



Inês Antunes

**Asphalt Rubber**  
**Studio della Reologia del Bitume**  
**Modificato con Polverino di Gomma**  
**di Pneumatico Riciclata**

**Gennaio 2006**

Tutore: Prof. Ing. Antonio Montepara  
Co-Tutore: Prof. Ing. Felice Giuliani  
Coordinatore del Dottorato: Prof. Ing. Paolo Mignosa

Università degli Studi di Parma  
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile – XVIII Ciclo









# Sommario

*La tesi di dottorato riguarda l'indagine sperimentale svolta ai fini della caratterizzazione reologica dei leganti ottenuti tramite modifica con polverino di gomma di pneumatici riciclati (CRM) secondo la cosiddetta metodologia "wet", detti **Asphalt Rubber**.*

*L'opportunità di questo studio nasce dalle sempre più pressanti esigenze legate all'ottenimento di alte prestazioni nel campo delle costruzioni stradali, le quali spingono la ricerca sui bitumi verso il superamento dell'approccio tradizionale, a favore di una caratterizzazione più specificatamente prestazionale, in sintonia con quanto sta avvenendo negli Stati Uniti. In particolare, l'interesse a sviluppare la ricerca scientifica nel campo della valutazione prestazionale dei bitumi stradali è finalizzato alla valorizzazione dell'utilizzo dei bitumi modificati rispetto ai bitumi tradizionali ed alla qualifica degli stessi bitumi in accordo con metodologie di classificazione americane definite in ambito SHRP (Strategic Highway Research Program). A tutto ciò si aggiungono le ottime caratteristiche prestazionali dimostrate dai conglomerati e leganti Asphalt Rubber, nonché gli interessi di tipo ambientale legati alla possibilità di riciclare notevoli quantità di gomma di pneumatici fuori uso.*

*L'importanza ed il carattere di originalità della presente tesi colmano la lacuna costituita dal fatto che sinora, nonostante siano stati effettuati innumerevoli studi riguardo alle prestazioni dell'Asphalt Rubber, utilizzato sia per la produzione di conglomerati CRM che di altri materiali quali SAMI, SAM o Chip Seals, non sia ancora stato effettuato uno studio approfondito sulla propria reologia del bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata.*

*È stato, quindi, dapprima definito un quadro di riferimento analizzando i leganti modificati in genere, mediante un'analisi sperimentale su bitumi modificati con vari tipi di polimeri. Su tale base è stato successivamente effettuato un dettagliato studio sperimentale comparativo dei bitumi Asphalt Rubber. Per completare l'analisi dei leganti modificati con polverino di gomma, sono stati studiati terminal blend ottenuti mediante il cosiddetto metodo texano, analizzandoli parallelamente a leganti modificati con polimeri e comparandoli con quanto risultante dall'analisi dell'Asphalt Rubber.*

*Tale studio ha consentito di inquadrare, relativamente alle caratteristiche prestazionali di altri prodotti presenti sul mercato, i leganti modificati con polverino di gomma di pneumatici riciclati, concentrandosi principalmente su quelli ottenuti mediante metodo wet, per i quali vengono specificate in maniera sistematica e rigorosa le proprietà tecniche e prestazionali, gli utilizzi più appropriati e i limiti applicativi.*

*A completamento del lavoro, si include una voce di capitolato tecnico in grado di costituire una guida alla formulazione, produzione in diversi tipi di impianto e controllo di qualità dei leganti Asphalt Rubber.*

## Abstract

*The present PHD Thesis presents the research developed in the last three years to the ends of the rheological characterization of **Asphalt Rubber** binders, produced using the wet process.*

*This study came about as a result of the ever-growing demand for high performances in the field of road constructions, which lead investigation into asphalt study, surpassing the current traditional empiricist approach in favor of a more specific characterization, much like it has been happening in the USA.*

*Particularly, the interest in developing this scientific investigation is aimed at driving the worth of industrial utilization of asphalt binders over traditional asphalts, and systemizing its classification, based on the American normative SHRP (Strategic Highway Research Program).*

*Adding to all this, there is also an environmental concern linked to the possibilities of recycling a significant amount of used tires given by the Hot Modified Rubber Asphalt Mixes.*

*The importance and originality of this Thesis culminates with the fact that although there are already many performance studies in Hot Modified Rubber Asphalt Mixes and spread applications like SAM, SAMI and Chip Seals, there wasn't done till now a deeper study of the of the rheology of Asphalt Rubber binders.*

*Therefore, initially a reference table was defined analyzing the rheological behaviour of general modified binder. Based on these results, a detailed study on the characteristics of the Asphalt Rubber was done afterwards.*

*Completing the experimental analysis, Terminal Blend type formulations were also studied and analyzed in parallel with other polymers modified binders.*

*This study also includes a comparative analysis between polymers and chemical modified binders with Asphalt Rubber.*

*Such study, allowed to integrate, in the present European market, the Crumb Rubber Modified Binders, through its performance features, focusing mostly in those modified through the wet method, and for which are specified its possible uses and application limitations.*

*To complete the work, an example of a notebook of technical incumbencies is included, to serve as a guide to formulation, production (in several types of systems) and quality assertion of Asphalt Rubber binders.*

---

---

## Resumo

*A presente dissertação apresenta o trabalho de investigação desenvolvido ao longo de 3 anos de doutoramento com o objectivo de caracterizar reologicamente os betumes modificados com borracha de pneus reciclada (CRM) através do método “wet”, chamados **Asphalt Rubber**.*

*Este estudo nasce da exigência, sempre maior, ligada à obtenção de altas prestações no campo da construção rodoviária, as quais direccionam a investigação para o estudo dos betumes, superando a actual abordagem tradicional (empírica) a favor de uma caracterização mais específica, em sintonia com a evolução que tem vindo a acontecer nos Estados Unidos.*

*Em particular, o interesse em desenvolver a investigação científica é dirigido à valorização da utilização industrial dos betumes modificados relativamente aos tradicionais e a sistematizar a sua classificação, tendo por base as normas americanas definidas no âmbito SHRP (Strategic Highway Research Program).*

*A tudo isto se adiciona o interesse ambiental, ligado à possibilidade dada pelas misturas betuminosas realizadas com betume de borracha, de reciclar uma quantidade muito significativa de pneus usados.*

*A importância e a originalidade da presente tese culmina, eliminando a lacuna que constituía o facto de que até agora, apesar de terem sido executados numerosos estudos relativamente à performance da Asphalt Rubber utilizada em misturas betuminosas ou em aplicações do tipo SAM, SAMI ou Chip Seals, não ter sido ainda efectuado um estudo aprofundado da própria reologia do betume modificado com borracha.*

*Assim, em primeiro lugar foi definido um quadro de referência analisando o comportamento reológico dos betumes modificados em geral. Tendo por base estes resultados foi depois executado um estudo pormenorizado das características do ligante Asphalt Rubber.*

*Para completar a análise experimental, foram também estudadas formulações do tipo Terminal Blend e analisadas paralelamente com outros betumes modificados com polímeros.*

*O estudo inclui ainda uma análise comparativa entre os betumes modificados com polímeros, quimicamente e Asphalt Rubber.*

*Tal estudo permitiu integrar, no presente mercado europeu, os betumes modificados com borracha, relativamente às suas características prestacionais, concentrando-se sobretudo naqueles modificados através do método wet, para os quais são especificados as possíveis utilizações e limites de aplicação.*

*Para completar o trabalho inclui-se um exemplo de voz de caderno de encargos técnico capaz de constituir um guia à formulação, produção (em diversos tipos de sistemas) e controlo de qualidade dos betumes Asphalt Rubber.*

---



---

È già lontano il convegno CRP del 2002, in occasione del quale ho conosciuto il professore Giuliani e ho deciso di intraprendere la sfida del dottorato di ricerca, scambiando la mia Lisbona per Parma.

A distanza di tre anni non voglio fare bilanci, soltanto ringraziare tutte le persone che mi hanno insegnato qualcosa, che mi hanno aiutato a crescere, progredire e maturare sia sotto il profilo professionale che umano.

In primo luogo ringrazio Felice Giuliani, che più che un professore è stato un amico ed ha saputo incitarmi e stuzzicarmi quando è stato necessario, per avermi trasmesso la passione per la ricerca come sinonimo di soddisfazione personale.

Ringrazio il Prof. Montepara per avermi dato la possibilità e la libertà di dedicarmi agli argomenti che mi entusiasmano di più, e tutti i colleghi dell'Università di Parma.

L'ing. Jorge Sousa, già mio capo e professore, per continuare a coinvolgermi nei suoi progetti e ad aprirmi porte.

George Way, per essere sempre solare e disponibile, e per avermi raccontato i segreti dell'Asphalt Rubber. Kamil e Carmen Kaloush per la loro amicizia e per farmi sentire che ho una famiglia anche in Arizona.

Ringrazio tutte le persone che hanno contribuito a sviluppare e a portare avanti il programma sperimentale nell'ambito del lavoro della tesi, in particolare la famiglia Santagata, punto di riferimento della grande scuola alla quale adesso appartengo, il Prof. Canestrari, Fabrizio Cardone e i colleghi dell'Università di Ancona.

Ringrazio tutti colleghi della Bitem e in particolare il Geom. Bonafè e il Geom. Lupini.

Grazie agli amici della Consulpav, Rossana Sousa, Susana Brito, Pedro Nobre e Francisco Silva, a Fabbio Capanelli della Valli Zabban e al Consorzio Spinner.

Un grazie di cuore a Gilda per i sorrisi ed i consigli nei momenti meno simpatici.

Ringrazio i miei genitori, i miei suoceri e i più cari amici, per tutto il supporto e amore incondizionato, anche senza capire benissimo cosa stavo facendo.

Obrigada mãe, Zé e Nocas, por tudo. Vocês foram a parte mais difícil desta escolha. Obrigada avó Laurinda, avó Cidália e tia São, pela força especial. Obrigada Carla e André porque souberam estar aqui sempre que precisei.

Obrigada Adriano por teres sempre tido mais certezas do que eu própria e por seres a minha vida.

Esta tese é para ti.

---



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1</b>	
<b>Generalità sul bitume modificato</b>	<b>5</b>
1.1 Proprietà chimiche e reologiche del bitume	6
1.2 I bitumi modificati	12
1.2.1 Modifica con polimeri	15
1.2.2 Modifica con acido polifosforico	29
1.2.3 Modifica con polverino di gomma di pneumatico riciclata	29
<b>Capitolo 2</b>	
<b>Il polverino di gomma di pneumatico riciclata</b>	<b>33</b>
2.1 Origini e ricadute ambientali	34
2.2 Il <i>Tire Program Management</i> Statunitense	37
2.2.1 Arizona	38
2.2.2 California	40
2.2.3 Florida	40
2.3 Processo di fabbricazione del Polverino	41
2.3.1 Processo criogenico	44
2.3.2 Processo Ambientale	44
2.4 Impiego nelle infrastrutture stradali	47
2.4.1 Processo wet	49
2.4.2 Processo dry	50
2.4.3 Processo di miscelazione in raffineria - <i>Refinery Blend Process</i>	52
2.5 Stato dell'arte delle applicazioni di CRM	54
2.5.1 Processo Wet	55
2.5.2 Processo Dry	71
2.5.3 Processi a confronto	75
2.6 Studi eseguiti in Italia	78
2.6.1 Metodo Dry	78
2.6.2 Metodo Wet	84
2.7 Alternative di utilizzo della gomma di pneumatico riciclata	87
<b>Capitolo 3</b>	
<b>Asphalt Rubber - Il bitume modificato con il polverino di gomma di pneumatico riciclata</b>	<b>89</b>
3.1 Generalità dell'Asphalt Rubber	89
3.2 Cenni Storici	93
3.2.1 Il Metodo Mac Donald	93
3.2.2 Evoluzione delle politiche di utilizzo	96
3.2.3 L'Asphalt Rubber oggi	100
3.3 Attributi delle Pavimentazioni in Asphalt Rubber	105
3.3.1 Principali aspetti caratterizzanti la superficie di una pavimentazione	105
3.3.2 Performance	109
3.3.3 Manutenzione	120

3.3.4	Proprietà funzionali e sicurezza	125
3.3.5	Fonoassorbenza	130
3.3.6	Efficienza Economica	146
3.3.7	Riciclabilità	153
3.3.8	Versatilità e Minori Tempi di Costruzione	155
3.4	Aspetti della Progettazione di Conglomerati Asphalt Rubber	156
3.4.1	Pavimentazioni Nuove	156
3.4.2	Manutenzione e Riabilitazione di pavimentazioni esistenti	157
3.4.3	Altri Aspetti Progettuali	168
3.4.4	Specifiche e capitolati per la formulazione di HMRA	169
3.5	Formulazione e posa in opera	171
3.5.1	Legante Asphalt Rubber	171
3.5.2	Conglomerati HMRA	183
3.5.3	<i>Chip seals</i>	190
3.6	Controllo della Qualità	193
3.7	Qualità dell'aria	201
3.8	Sviluppi Futuri	204

## **Capitolo 4**

### **Caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi** **209**

4.1	Viscoelasticità	211
4.1.1	Corpo elastico	214
4.1.2	Fluido viscoso	215
4.1.3	Modelli di comportamento viscoelastico	216
4.2	Reometria	219
4.2.1	Storia della forzante	219
4.2.2	Configurazioni di prova	223
4.3	Analisi dinamica e principio di equivalenza tempo-temperatura	236
4.3.1	Rappresentazione della curva maestra e dei fattori di traslazione	237
4.3.2	Conversione di funzioni viscoelastiche	239
4.3.3	Il modello viscoelastico lineare PSU	241
4.3.4	Modello matematico della curva maestra	243
4.4	Proprietà di viscoelasticità non lineare	246
4.4.1	Linearità e non linearità	248
4.4.2	Distribuzione della deformazione	249
4.4.3	Caratterizzazione del comportamento non lineare	250
4.4.4	Comportamento dei bitumi nella regione di viscoelasticità non lineare	251

## **Capitolo 5**

### **Quadro normativo e metodologia SHRP** **255**

5.1	La metodologia SHRP	256
5.1.1	Il sistema di classificazione SUPERPAVE®	256
5.1.2	Il Performance Grade	257
5.1.3	Invecchiamento dei bitumi	260
5.1.4	Prove Reologiche	266
5.1.5	Applicazione Pratica della Classificazione SHRP	282
5.1.6	Criticità della metodologia SHRP	283
5.1.7	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>	284
5.2	Recente evoluzione della normativa europea	299

---



---

<b>Capitolo 6</b>	
<b>Ricerca Sperimentale</b>	<b>303</b>
6.1 Finalità ed Organizzazione della Ricerca	304
6.2 Materiali di Prova	308
6.2.1 Modifica di Bitumi in Laboratorio	312
6.3 Prove Convenzionali	319
6.3.1 Effetto della Modifica con CRM	322
6.3.2 Confronto fra modifica con CRM e con Polimeri	342
6.3.3 Terminal Blend	360
6.3.4 Curve di Viscosità	389
6.4 Prove reologiche con DSR	398
6.4.1 Analisi Dinamica	398
6.4.2 Analisi Statica	423
6.4.3 Zero Shear Viscosity	425
6.5 Prove reologiche con BBR	431
6.6 Inquadramento dei Bitumi Asphalt Rubber nel mercato italiano	433
6.6.1 Fusi di Accettazione	435
6.6.2 Master Curve	440
6.7 Considerazioni sui risultati ottenuti	444
<b>Conclusioni</b>	<b>447</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>449</b>
<b>Glossario</b>	<b>459</b>
<b>Appendici</b>	
<b>Appendice 1 - Risultati complementari</b>	<b>A1</b>
Appendice 1.1 – Curve di viscosità	A3
Appendice 1.2 – Temperature limite superiore	A17
Appendice 1.3 – Limite lineare	A39
Appendice 1.4 – Dipendenza dalla deformazione	A51
Appendice 1.5 – Prove di Creep	A63
Appendice 1.6 – Zero Shear Viscosità	A73
Appendice 1.7 – Risultati BBR	A79
Appendice 1.8 – Fusi di accettazione	A99
<b>Appendice 2 - Applicazione pratica della caratterizzazione PG</b>	<b>A111</b>
Appendice 2.1 – Mappa territoriale di PG per il territorio Portoghese	A113
Appendice 2.2 – Determinazione del PG di un bitume	A125
Appendice 2.3 – Tabella SHRP	A133
<b>Appendice 3 – Analisi economica</b>	<b>A137</b>
<b>Appendice 4 – Condizioni tecniche speciali per AR</b>	<b>A153</b>

---

**Indice delle Tabelle**

Tabella 1-1:	Nomenclatura di polimeri Plastomeri ed Elastomeri	18
Tabella 1-2:	Miglioramenti ottenibili mediante la modifica con polverino di gomma di pneumatico riciclata	31
Tabella 2-1:	Confronto tra le differenti tecniche di smaltimento di PFU espresse in termini di bilancio di costi energetici	36
Tabella 2-2:	Bilancio energetico nel caso di produzione di polverino per asphalt rubber	36
Tabella 2-3:	Destinazione dei PFU generati in Arizona nel 1998	39
Tabella 2-4:	Destinazione dei PFU generati in California nel 1998	40
Tabella 2-5:	Destinazione dei PFU generati in Florida nel 1998	41
Tabella 2-6:	Confronto tra conglomerato convenzionale e ottenuto mediante Terminal Blend Process	53
Tabella 2-7:	Stabilità allo stoccaggio determinata mediante Tuben Test	63
Tabella 2-8:	Stabilità allo stoccaggio determinata mediante variante al metodo Tuben Test	63
Tabella 2-9:	Applicazioni di conglomerati AR in Portogallo lungo l'autostrada A8	66
Tabella 2-10:	Confronto tra le percentuali di utilizzo di PFU di automobili in Polonia	69
Tabella 3-1:	Quadro dell'evoluzione delle prove con HVS sulle tre pavimentazioni testate	113
Tabella 3-2:	Evoluzione della skid resistance prima e dopo oltre 10 anni dalla riabilitazione con AR	126
Tabella 3-3:	Valori di incidentalità prima e dopo la riabilitazione con AR	130
Tabella 3-4:	Riduzione della pressione sonora e del rispettivo volume percepito dall'udito corrispondenti a diminuzioni della rumorosità espresse in decibel.	131
Tabella 3-5:	Studi degli effetti fonoassorbenti dell'AR eseguiti in vari stati negli anni '80 e '90	139
Tabella 3-6:	Confronto tra emissioni sonore prima e dopo la riabilitazione nel 2002	140
Tabella 3-7:	Valori di rumorosità rilevati all'interno dell'abitacolo prima e dopo la riabilitazione	141
Tabella 3-8:	Confronto tra il costo di fornitura e posa in opera di diversi conglomerati (riferito al mercato dell'Arizona)	146
Tabella 3-9:	Equivalenze Strutturali per la Riabilitazione	166
Tabella 3-10:	Equivalenze per il Ritardo della Riflessione della Fessurazione	167
Tabella 3-11:	Tipiche gradazioni di polverino per AR Tipo 1 e 2	172
Tabella 3-12:	Proprietà del legante AR al variare del tempo di reazione	174
Tabella 3-13:	Temperature di miscelazione per conglomerati AR chiusi e gap-graded	183
Tabella 3-14:	Quantità tipiche di legante per gli HMRA	184
Tabella 3-15:	Caratteristiche dei conglomerati Asphalt Rubber	185
Tabella 3-16:	Forza di rottura e deformazione Marshall	185
Tabella 3-17:	Moduli di Deformabilità dei conglomerati Asphalt Rubber	186
Tabella 3-18:	Tassi tipici di produzione dei materiali con AR	187
Tabella 3-19:	Tipici tassi di applicazione per chip seals AR	192
Tabella 3-20:	Caratteristiche del bitume base per la produzione di AR in diverse regioni climatiche	194
Tabella 3-21:	Tipici parametri progettuali	198
Tabella 3-22:	Prove raccomandate per il controllo della qualità dei materiali	199
Tabella 3-23:	Prove raccomandate per il controllo della qualità del legante AR	200
Tabella 3-24:	Prove raccomandate per il controllo della qualità del conglomerato AR	200
Tabella 5-1:	Temperature massime e minime di progetto che definiscono le classi prestazionali.	258
Tabella 5-2:	Apparecchiature SHRP- SUPERPAVE®	260
Tabella 5-3:	Impostazioni del <i>Temperature Setting</i> per il raggiungimento della temperatura media nel reometro	269
Tabella 5-4:	Variabili di condizionamento del segmento 1	270
Tabella 5-5:	Variabili di condizionamento del segmento 2	270
Tabella 6-1:	Condizioni delle prove convenzionali realizzate	307
Tabella 6-2:	Condizioni delle prove reologiche realizzate	307
Tabella 6-3:	Caratteristiche principali dei bitumi studiati	308
Tabella 6-4:	Materiali oggetto di studio nella presente ricerca	311
Tabella 6-5:	Proprietà dell'additivo a base di acido polifosforico utilizzato nella presente indagine	317

---

Tabella 6-6:	Requisiti minimi per bitumi CRM dopo 45 min, Clima Tipo II	323
Tabella 6-7:	Requisiti minimi per bitumi CRM, Prodotto finale, Clima Tipo II	323
Tabella 6-8:	Modifica del bitume 160/220 con 20% di CRM	324
Tabella 6-9:	Modifica del bitume 70/100 A con diverse % di CRM	324
Tabella 6-10:	Modifica del bitume 70/100 B con 20% di CRM	325
Tabella 6-11:	Modifica del bitume 50/70 A con 18% di CRM	325
Tabella 6-12:	Modifica del bitume 50/70 B con diverse % di CRM	325
Tabella 6-13:	Modifica del bitume 40/50 con 18% di CRM	326
Tabella 6-14:	Risultati delle prove convenzionali per il bitume 70/100A con diverse percentuali di CRM	327
Tabella 6-15:	Percentuale “ottima” di CRM per il bitume 50/70 B	340
Tabella 6-16:	Percentuale “ottima” di CRM per il bitume 70/100 A	340
Tabella 6-17:	Caratteristica dei bitumi non invecchiati	342
Tabella 6-18:	Caratteristica dei bitumi invecchiati RTFOT	343
Tabella 6-19:	Cicli di riscaldamento	345
Tabella 6-20:	Stabilità allo stoccaggio del bitume 40/50 + 18% CRM determinata mediante Tuben Test	354
Tabella 6-21:	Stabilità allo stoccaggio del bitume 40/50 + 18% CRM determinata mediante variante al metodo Tuben Test	355
Tabella 6-22:	Grandezze caratteristiche dei bitumi analizzati dopo 1 anno di stoccaggio	356
Tabella 6-23:	Miscele del tipo Terminal Blend	361
Tabella 6-24:	Aggiunta dell' 1% di Additivo a base di Acido Polifosforico	373
Tabella 6-25:	Effetto dell'agitazione dei leganti sulle grandezze principali di miscele SBS e AP	376
Tabella 6-26:	Effetto dell'aggiunta di diverse percentuali di SBS al bitume 70/100 A	381
Tabella 6-27:	Effetto della percentuale di SBS sulle caratteristiche delle miscele	382
Tabella 6-28:	Effetto della Base utilizzata sulle caratteristiche delle miscele	384
Tabella 6-29:	Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla penetrazione	385
Tabella 6-30:	Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla temperatura di rammollimento	385
Tabella 6-31:	Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla viscosità	385
Tabella 6-32:	Confronto fra la % ottima di CRM e il miglior risultato da additivazione	389
Tabella 6-33:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A	392
Tabella 6-34:	Prova di Frequency Sweep per il bitume 50/70B+18%CRM a 76°C	401
Tabella 6-35:	Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi non invecchiati	421
Tabella 6-36:	Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi invecchiati RTFOT	421
Tabella 6-37:	Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi invecchiati PAV	421
Tabella 6-38:	Performance Grade superiore per i bitumi studiati	423
Tabella 6-39:	Parametri per l'esecuzione della prova di creep	427
Tabella 6-40:	Confronto fra penetrazione e ZSV dei diversi tipi di bitume	430
Tabella 6-41:	Risultati della prova BBR per il bitume 70/100 A + 18% CRM	432
Tabella 6-42:	Performance Grade inferiore per i bitumi studiati	433
Tabella 6-43:	Bitumi con modifica hard per conglomerati bituminosi ad alta resistenza a fatica per strati di base	434
Tabella 6-44:	Bitumi con modifica hard per sigillature e giunti tamponi	434
Tabella 6-45:	Fusi di accettazione per i bitumi studiati	435
Tabella 6-46:	Performance Grade	446

### Indice delle Figure

Figura 1-1:	Strutture di un asfaltene, di un idrocarburo aromatico e di un idrocarburo saturo	8
Figura 1-2:	Schema di frazionamento di bitumi	9
Figura 1-3:	Schematizzazione del bitume come micelle disperse in un mezzo oleoso	13
Figura 1-4:	Struttura dell'etilene vinilacetato (EVA)	19
Figura 1-5:	Struttura e unità di SBS	23
Figura 2-1:	Incendio in una discarica di Pneumatici, California 1999	33
Figura 2-2:	Pneumatici fuori uso accumulati in discarica	34
Figura 2-3:	Quantità di pneumatici riciclati nell'ambito di progetti con AR in Arizona dal 1988	38
Figura 2-4:	Investimenti per progetti con AR in Arizona dal 1988	38

Figura 2-5:	Fasi del processo di produzione del polverino di gomma di pneumatici riciclata	42
Figura 2-6:	Processo di produzione del polverino di gomma a partire da PFU	43
Figura 2-7:	Esempio di triturazione nel processo ambientale	45
Figura 2-8:	Composizione generica di un tipico pneumatico per automobili	46
Figura 2-9:	Schema di produzione e applicazione del polverino di gomma di pneumatici	48
Figura 2-10:	Esempio di impianto per la produzione di Asphalt Rubber	50
Figura 2-11:	Confronto tra le curve di fatica del conglomerato convenzionale e di quello ottenuto mediante Terminal Blend Process	54
Figura 2-12:	Impianto di produzione di Asphalt Rubber della Recipav	65
Figura 2-13:	Lavori di posa in opera di conglomerato AR	65
Figura 2-14:	Andamento della viscosità al variare del tempo di digestione per differenti granulometrie di poverino di gomma	73
Figura 2-15:	Andamento della resistenza residua al variare del tempo di digestione per differenti granulometrie di polverino di gomma	74
Figura 3-1:	Charles MacDonald	93
Figura 3-2:	Evoluzione dell'applicazione di CRM nelle pavimentazioni stradali	96
Figura 3-3:	Andamento decrescente dei prezzi dell'AR nel mercato dell'Arizona	97
Figura 3-4:	Andamento medio dei prezzi di CRM negli stati del sud ovest in USA	98
Figura 3-5:	Immagine associata ai due Congressi Internazionali sull'Asphalt Rubber	101
Figura 3-6:	Metodo di misura dell'altezza di sabbia	106
Figura 3-7:	Esempio di profilometro laser	107
Figura 3-8:	Esempio di veicolo per la misura del coefficiente di aderenza trasversale (CAT)	108
Figura 3-9:	Confronto tra due tratti di pavimentazione della I-40, a sinistra in conglomerato tradizionale e a destra in AR, dopo 8 anni di servizio	109
Figura 3-10:	Andamento della fessurazione durante le prove di carico accelerate	111
Figura 3-11:	<i>Heavy Vehicle Simulator</i> impiegato per lo studio del Caltrans e del CSIR.	112
Figura 3-12:	Stato fessurativo nelle diverse pavimentazione sottoposte alle prove con HVS	112
Figura 3-13:	Evoluzione della fessurazione nelle tre pavimentazioni sottoposte a prove con <i>Heavy Vehicle Simulator</i>	113
Figura 3-14:	Apparecchiatura per il <i>Fatigue Cracking Test</i>	119
Figura 3-15:	Prova di <i>Indirect Tensile Strength</i>	120
Figura 3-16:	Evoluzione della fessurazione nel tempo per diversi tipi di pavimentazioni	121
Figura 3-17:	Evoluzione comparativa dell'ormaiamento nel tempo	121
Figura 3-18:	Evoluzione comparativa della fessurazione nel tempo	122
Figura 3-19:	Carote che mostrano le capacità di resistenza alla fessurazione degli strati in AR	124
Figura 3-20:	Andamento dei valori di frizione <i>Mu Meter</i> nel tempo	126
Figura 3-21:	Riduzione dell'effetto <i>splash and spray</i> su una superficie in AR-OG rispetto ad una pavimentazione rigida	127
Figura 3-22:	Soluzione Asphalt Rubber sulla IH35, San Antonio (Texas). Corsia drenante e corsia tradizionale (A); particolare della superficie finita (B)	129
Figura 3-23:	Evoluzione comparativa della regolarità superficiale nel tempo	130
Figura 3-24:	Distribuzione delle emissioni sonore provocate dal passaggio di un veicolo su di una pavimentazione stradale	132
Figura 3-25:	Livelli medi di emissioni di rumore per diversi tipi di pavimentazioni a confronto	135
Figura 3-26:	Confronto tra i dati di rumorosità raccolti sui diversi tipi di pavimentazione in Arizona e California	136
Figura 3-27:	Strumentazione di misura dell'intensità sonora montata sulla ruota destra di un autoveicolo	137
Figura 3-28:	Livelli di rumorosità prima e dopo la riabilitazione dell'autostrada A8 con AR	142
Figura 3-29:	Riduzione dell'intensità sonora misurata nelle sezioni di prova della LA138 nel 2002 normalizzate rispetto a una pavimentazione rigida di riferimento	144
Figura 3-30:	Livelli dell'intensità sonora delle sezioni di prova della pavimentazione sulla LA138 misurate per un periodo di 18 mesi	144
Figura 3-31:	Spessori tipici di diversi esempi di strati di riabilitazione	148
Figura 3-32:	Costo di manutenzione in dollari per corsia/chilometro	149
Figura 3-33:	Costi di gestione del veicolo per l'utente per diverse età delle pavimentazioni in conglomerato convenzionale ed in AR	151

Figura 3-34:	Esempio di impianto mobile per la produzione di Asphalt Rubber	156
Figura 3-35:	Tipica curva di deterioramento, con indicati gli effetti di un trattamento manutentivo preventivo	157
Figura 3-36:	Esempio di riabilitazione a singolo strato, con evidenziati i minori spessori consentiti dall'applicazione di AR.	159
Figura 3-37:	Immagine che mostra l'elevata elasticità e resistenza di un trattamento superficiale con AR applicato ad una strada bianca nel deserto dell'Arizona	161
Figura 3-38:	Sistema a doppio strato	161
Figura 3-39:	Sistema triplo strato	162
Figura 3-40:	Apparecchiatura – Dynatest FWD 8081	163
Figura 3-41:	Fessurazione dei manti stradali al variare della percentuale di polverino	170
Figura 3-42:	Aspetto del bitume prima e dopo la modifica con CRM.	174
Figura 3-43:	Esempio di impianto di produzione di Asphalt Rubber del tipo <i>continuous drum dryer plant</i>	179
Figura 3-44:	Tipico schema di impianto per la produzione di Asphalt Rubber	180
Figura 3-45:	Esempio di unità di miscelazione	181
Figura 3-46:	Serbatoio di reazione del legante AR	181
Figura 3-47:	Cabina di controllo dei vari parametri del processo di produzione dell'Asphalt Rubber	182
Figura 3-48:	Impianto di produzione di AR in funzione	203
Figura 3-49:	Riscaldamento ambientale nell'area di Phoenix	206
Figura 4-1:	Sollecitazione applicata	211
Figura 4-2:	Esempio di risposta elastica	211
Figura 4-3:	Esempio di risposta viscosa	212
Figura 4-4:	Esempio di risposta viscoelastica	212
Figura 4-5:	Scomposizione del modulo complesso $G^*$ sul piano complesso	222
Figura 4-6:	Comportamento di un fluido newtoniano ed uno viscoelastico quando mescolati velocemente	225
Figura 4-7:	Forze generate in un fluido viscoso ed in uno viscoelastico quando mescolati velocemente	226
Figura 4-8:	Accoppiamento piatto-piatto	228
Figura 4-9:	Schema dell'accoppiamento piatto-cono	229
Figura 4-10:	Sistema di misura a cilindri coassiali	229
Figura 4-11:	Rappresentazione della curva di rigidità di creep di un bitume rispetto al tempo	232
Figura 4-12:	Schematizzazione dei diversi stadi di creep	233
Figura 4-13:	Esempio di diagramma deformazione-tempo durante la fase di carico	234
Figura 4-14:	Esempio di andamento della deformazione nella fase di recovery al variare del tempo di carico	234
Figura 4-15:	Componenti della deformabilità, reversibile e permanente, al termine di una fase di recovery	235
Figura 4-16:	Esempio di curva maestra accompagnata dal grafico dello shift factor	238
Figura 4-17:	Andamento del modulo complesso e dell'angolo di fase di un bitume in funzione della frequenza	238
Figura 4-18:	Esempio di strain sweep impiegata per determinare la regione lineare	241
Figura 4-19:	Rappresentazione dei parametri della curva maestra	242
Figura 4-20:	Comportamento elastico-lineare e non lineare	247
Figura 4-21:	Domini di comportamento	248
Figura 5-1:	Il Rolling Thin Film Oven (RTFO)	262
Figura 5-2:	Schema del interno del RTFO	263
Figura 5-3:	Bicchiere e bacchetta per invecchiamento MRTFOT	264
Figura 5-4:	Pressure Aging Vessel (PAV)	265
Figura 5-5:	Schema dell'apparecchiatura PAV	265
Figura 5-6:	Schema dei componenti del viscosimetro di Brookfield	266
Figura 5-7:	Reometro Haake Rotovisco RT10	267
Figura 5-8:	Apparecchiatura DSR	267
Figura 5-9:	Elementi costitutivi del reometro.	268
Figura 5-10:	Schema della quantità giusta di bitume per la prova DSR	268
Figura 5-11:	Comportamenti puramente elastico e puramente viscoso	271

Figura 5-12:	Risposta di un materiale viscoelastico	272
Figura 5-13:	Schema delle equazione di calcolo per il DSR	272
Figura 5-14:	Prova BBR	273
Figura 5-15:	Schema di una apparecchiatura BBR	274
Figura 5-16:	Schema di preparazione del cassero	275
Figura 5-17:	Provino di Bitume modificato SBS hard	276
Figura 5-18:	Rappresentazione della curva Deflessioni vs. tempo	277
Figura 5-19:	Curva Log di S(t) vs Log del tempo di carico	278
Figura 5-20:	(e 5-21) Casseri per provini DTT e schema di un provino DTT	280
Figura 5-22:	Provini DTT	280
Figura 5-23:	Deformazione di rottura nella prova DTT	281
Figura 5-24:	Tensione di rottura nella prova DTT	281
Figura 5-25:	Prove SHRP	283
Figura 5-26:	Esempio di risultati di una prova di creep ripetuto	290
Figura 5-27:	Modello analogico di Burgers	290
Figura 5-28:	Tipico andamento della deformabilità nel tempo in una prova di creep-recovery	294
Figura 5-29:	Determinazione della temperatura critica.	296
Figura 6-1:	Schema delle prove convenzionali e reologiche realizzate	306
Figura 6-2:	Principali apparecchiature utilizzate nelle prove reologiche	307
Figura 6-3:	Schema della scelta dei materiali di studio	310
Figura 6-4:	Miscelatore “Caframo” impiegato per la preparazione dell’Asphalt Rubber in laboratorio e schema della aste di acciaio per l’agitazione della miscela bitume-polverino	312
Figura 6-5:	Aspetto del polverino utilizzato nell’indagine	313
Figura 6-6:	Fasi di produzione in laboratorio di un bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata	314
Figura 6-7:	Aumento di volume del legante AR conseguente al riscaldamento, dovuto al rigonfiamento della gomma con creazione di aria al suo interno	314
Figura 6-8:	Strumento utilizzato per l’agitazione della miscela bitume-polimero	315
Figura 6-9:	Differenza di aspetto dei bitumi modificati con polverino di gomma (rugosi a sinistra) e modificati con SBS (aspetto liscio a destra)	316
Figura 6-10:	Temperatura di rammollimento per i tre metodi di produzione di bitumi modificati chimicamente con additivo a base di acido polifosforico	318
Figura 6-11:	Penetrometro	319
Figura 6-12:	Apparecchiatura per la prova di resilienza	320
Figura 6-13:	Duttillometro e cassero per ritorno elastico	322
Figura 6-14:	Evoluzione della viscosità lungo il tempo di reazione per bitumi Asphalt Rubber	327
Figura 6-15:	Evoluzione della Temperatura di Rammollimento all’aumentare della percentuale di polverino per il legante 70/100 A	329
Figura 6-16:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A con diverse % di CRM	330
Figura 6-17:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	331
Figura 6-18:	Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 70/100 A, diverse % CRM	331
Figura 6-19:	Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 50/70 B, diverse % di CRM	332
Figura 6-20:	Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 70/100 A, diverse % di CRM	333
Figura 6-21:	Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	333
Figura 6-22:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A con diverse % di CRM	334
Figura 6-23:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	335
Figura 6-24:	Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 70/100 A con diverse % di CRM	336
Figura 6-25:	Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	336
Figura 6-26:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per leganti AR con diverse % di CRM	337
Figura 6-27:	Variazione della resilienza con la penetrazione per leganti AR con diverse % di CRM	338

---

Figura 6-28:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per leganti AR con diverse % di CRM	339
Figura 6-29:	Duttilità e recupero elastico di bitumi CRM	341
Figura 6-30:	Duttilità e recupero elastico di bitumi CRM dopo invecchiamento	341
Figura 6-31:	Valori di penetrazione prima e dopo invecchiamento RTFOT	343
Figura 6-32:	Temperatura di rammollimento per i bitumi considerati, vergini e dopo RTFOT	344
Figura 6-33:	Confronto fra i valori di palla anello al inizio e alla fine di 4 cicli di riscaldamento e raffreddamento	346
Figura 6-34:	Andamento della viscosità per il bitume 70/100 A	346
Figura 6-35:	Andamento della viscosità per il bitume SBS hard	347
Figura 6-36:	Andamento della viscosità per il bitume modificato con EVA	348
Figura 6-37:	Andamento della viscosità per il bitume modificato con 15% di CRM	349
Figura 6-38:	Confronto fra valori di temperatura di rammollimento iniziale, dopo RTFOT e dopo 4 cicli di riscaldamento-raffreddamento	350
Figura 6-39:	Confronto fra i valori di viscosità iniziale, dopo RTFOT e dopo 4 cicli di riscaldamento raffreddamento	351
Figura 6-40:	Confronto fra valori di duttilità e di ritorno elastico per bitumi modificati CRM e SBS hard	352
Figura 6-41:	Confronto fra valori di duttilità e di Ritorno elastico per bitumi modificati CRM e SBS – effetto dell'invecchiamento	353
Figura 6-42:	Temperatura di Rammollimento per diversi tipi di modifica e invecchiamento	353
Figura 6-43:	Comparazione fra le caratteristiche del bitume non modificato 70/100 A dopo 1 anno di stoccaggio	357
Figura 6-44:	Effetti dello stoccaggio sul bitume SBS Hard	357
Figura 6-45:	Effetti dello stoccaggio per il legante 70/100 A + 18% CRM	358
Figura 6-46:	Effetti dello stoccaggio per il legante 70/100 A + 20% CRM	358
Figura 6-47:	Confronto tra i diversi bitumi stoccati durante 1 anno	359
Figura 6-48:	Suscettibilità alla temperatura dell'additivo AP	360
Figura 6-49:	Effetto dell'additivazione sul valore di ritorno elastico	361
Figura 6-50:	Effetto sulla penetrazione e sulla temperatura di rammollimento	362
Figura 6-51:	Effetto dell'additivazione nella viscosità	362
Figura 6-52:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	363
Figura 6-53:	Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	364
Figura 6-54:	Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	364
Figura 6-55:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	365
Figura 6-56:	Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	365
Figura 6-57:	Variazione della temperatura di rammollimento con la % di AP	366
Figura 6-58:	Influenza della % di additivo sulla resilienza	366
Figura 6-59:	Variazione della viscosità con la % di AP, stessa % di CRM	367
Figura 6-60:	Variazione della penetrazione con la % di AP, stessa % di CRM	368
Figura 6-61:	Variazione della resilienza con la % di CRM, per l'1% di AP	368
Figura 6-62:	Variazione della temperatura di rammollimento con la % di CRM, per l'1% di AP	369
Figura 6-63:	Variazione della viscosità con la % di CRM, stessa % di AP	369
Figura 6-64:	Variazione della penetrazione con la % di CRM, per l'1 % di AP	370
Figura 6-65:	Confronto fra i valori di palla anello al variare della % di AP e di CRM	371
Figura 6-66:	Confronto fra i valori di resilienza al variare della % di AP e di CRM	371
Figura 6-67:	Confronto fra i valori di viscosità al variare della % di AP e di CRM	372
Figura 6-68:	Viscosità a confronto per diverse percentuali di CRM e AP	374
Figura 6-69:	Penetrazione a confronto per diverse percentuali di CRM e AP	374
Figura 6-70:	Resilienza a confronto per diverse percentuali di CRM e AP	375
Figura 6-71:	Andamento nel tempo della viscosità a 160°C per il bitume 70/100A+3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	377

Figura 6-72:	Andamento nel tempo della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100A+3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	377
Figura 6-73:	Andamento nel tempo della penetrazione per il bitume 70/100A +3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	378
Figura 6-74:	Andamento nel tempo della differenza di Tuben Test per il bitume 70/100A+3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	378
Figura 6-75:	Confronto tra l'andamento sotto agitazione della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo	379
Figura 6-76:	Confronto tra l'andamento sotto agitazione della differenza di Tuben Test per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo	380
Figura 6-77:	Confronto tra l'andamento sotto agitazione della viscosità per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo	380
Figura 6-78:	Andamento dei valori di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS	381
Figura 6-79:	Effetto della percentuale di SBS sulle caratteristiche delle miscele	383
Figura 6-80:	Effetto del bitume base utilizzato sulle caratteristiche delle miscele	384
Figura 6-81:	Andamento della penetrazione per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di un 1% di EVA	386
Figura 6-82:	Andamento della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di un 1% di EVA	386
Figura 6-83:	Andamento della viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di un 1% di EVA	387
Figura 6-84:	Andamento dei valori di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A tal quale e modificato con 3 e 4% di SBS	387
Figura 6-85:	Andamento di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS e con 1% di EVA	388
Figura 6-86:	Schema di calcolo per le curve di viscosità	391
Figura 6-87:	Modello di Maryland per le curve di sensibilità viscosità-temperatura per il bitume 70/100 A non modificato	391
Figura 6-88:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di CRM	392
Figura 6-89:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di CRM	393
Figura 6-90:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 160/220	393
Figura 6-91:	Curve di viscosità per diversi bitumi base modificati con 20% di CRM	394
Figura 6-92:	Curve di viscosità per diversi bitumi base modificati con 15% di CRM	395
Figura 6-93:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per bitumi modificati SBS e EVA	395
Figura 6-94:	Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, SBS e EVA	396
Figura 6-95:	Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, terminal blend, SBS e EVA	397
Figura 6-96:	Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, SBS e EVA dopo invecchiamento RTFOT	397
Figura 6-97:	Definizione dei limiti del campo lineare in relazione a G' per i bitume studiati SBS Hard, 50/70 A da visbraking e EVA Soft	400
Figura 6-98:	Modulo complesso per bitumi CRM	402
Figura 6-99:	Effetto dell'invecchiamento RTFOT e PAV nel angolo di fase dei bitumi CRM	402
Figura 6-100:	Effetto dell'invecchiamento RTFOT e PAV nel modulo complesso per bitumi CRM	403
Figura 6-101:	Angolo di fase medio per il bitume vis	403
Figura 6-102:	Angolo di fase medio per il bitume hard	404
Figura 6-103:	Evoluzione del modulo complesso con la temperatura per il bitume 40/50 + 18% CRM vergine	404
Figura 6-104:	Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume non modificato 70/100 A vergine	405
Figura 6-105:	Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume non modificato 70/100 A + 18% CRM vergine	406
Figura 6-106:	Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume SBS Hard vergine	406



Figura 6-107:	Deformazione per le temperature 40, 52 e 76°C	409
Figura 6-108:	Deformazione osservata a 40°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard	409
Figura 6-109:	Deformazione osservata a 52°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard	410
Figura 6-110:	Deformazione osservata a 76°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard	410
Figura 6-111:	Evoluzione di $G^*$ con l'aumento della deformazione per il bitume 50/70 A	411
Figura 6-112:	Effetto della modifica sull'angolo di fase a 40°C	411
Figura 6-113:	Effetto della modifica sull'angolo di fase a 52°C	412
Figura 6-114:	Effetto della modifica sull'angolo di fase a 76°C	412
Figura 6-115:	Evoluzione della deformazione all'aumentare della frequenza per i bitumi 50/70 A non modificato, modificato EVA soft e SBS hard	413
Figura 6-116:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume 70/100 A vergine, invecchiato RTFOT e PAV	415
Figura 6-117:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume 70/100 A + 18% CRM vergine, invecchiato RTFOT e PAV	415
Figura 6-118:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume SBS Hard vergine, invecchiato RTFOT e PAV	416
Figura 6-119:	Temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A vergine, invecchiato RTFOT e PAV	417
Figura 6-120:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume 70/100 A +18% CRM vergine, invecchiato RTFOT e PAV	417
Figura 6-121:	$G^*/\text{sen } \delta$ funzione della temperatura per formulazioni terminal blend	418
Figura 6-122:	Angolo di fase funzione della temperatura per formulazioni terminal blend	418
Figura 6-123:	Performance Grade e Temperatura Limite per i bitumi studiati	419
Figura 6-124:	Performance Grade e Temperatura Limite per i bitumi invecchiati con l'RTFO e con l'MRTFOT	420
Figura 6-125:	Temperature limite superiori	422
Figura 6-126:	Temperature limite superiori	422
Figura 6-127:	Prove di creep-recovery di bitumi CRM	424
Figura 6-128:	Prove di creep-recovery di bitumi CRM.	425
Figura 6-129:	Prima ripetizione di una prova di viscosità di bitume 18% CRM	429
Figura 6-130:	Seconda ripetizione di una prova di viscosità di bitume 18% CRM	429
Figura 6-131:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume 50/70 B non modificato (fuso di accettazione bitume base)	436
Figura 6-132:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume 50/70 A non modificato (fuso di accettazione bitume base)	436
Figura 6-133:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume 70/100 A non modificato (fuso di accettazione bitume base)	437
Figura 6-134:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume Asphalt Rubber 70/100 + 18% CRM (fuso di accettazione hard)	437
Figura 6-135:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume Asphalt Rubber 70/100+20% CRM (fuso di accettazione hard)	438
Figura 6-136:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume Asphalt Rubber 40/50 + 18% CRM (fuso di accettazione hard)	438
Figura 6-137:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume EVA soft (fuso di accettazione hard)	439
Figura 6-138:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume SBS Soft (fuso di accettazione hard)	439
Figura 6-139:	Curva Modulo Complesso $G^*$ – Angolo di Fase $\delta$ per il bitume SBS Hard (fuso di accettazione hard)	440
Figura 6-140:	Master Curve per il bitume 70/100 + 18 %CRM	441
Figura 6-141:	Master Curve per il bitume EVA Soft	441
Figura 6-142:	Master Curve per il bitume 50/70 A	442
Figura 6-143:	Master Curve per il bitume SBS Soft	442
Figura 6-144:	Master Curve per il bitume SBS Hard	443



# Introduzione

Che il riciclaggio dei materiali nelle opere di Ingegneria sia un “argomento di moda” nel campo della ricerca e della innovazione tecnologica, non si fa mistero. Numerosi sono gli impulsi della Collettività e della Comunità Scientifica a sviluppare tecniche, procedure e modelli di analisi finalizzati alla reintegrazione nei processi di produzione di tutti quei materiali altrimenti destinati alla discarica controllata.

Che il settore dell’Ingegneria Stradale, più di altri, sia vocato a questa missione, ne è prova il fatto che le infrastrutture di trasporto comportano sovente enormi movimentazioni di materiali, con volumi difficilmente riscontrabili in altre tipologie di opere. In questo caso il riciclaggio assume aspetti che superano finanche la necessità ambientale e si traducono perfino in un importante, quanto legittimo, beneficio economico per gli operatori del settore delle costruzioni.

Ma non è di questo aspetto che la presente Tesi di Dottorato tratta.

Lo studio profuso nel triennio di ricerca universitaria ha affrontato gli aspetti del riciclaggio con l’approccio speculativo di uno studioso che, nello specifico caso, ha creduto che da una operazione di riciclaggio potesse scaturire un progresso nella conoscenza dei materiali per le costruzioni stradali, che da una operazione di riciclaggio si potesse valutare non già l’idoneità di un rifiuto a costituire una materia prima-seconda ma che quello stesso rifiuto potesse rappresentare un plus valore, un elemento qualificante di miglioramento delle prestazioni di un materiale tradizionale.

Riciclaggio e bitumi rappresentano per l’ingegnere delle infrastrutture stradali un binomio complesso, un tema delicato.

La complessità scaturisce dalle caratteristiche intrinseche dello stesso bitume, miscela di idrocarburi altamente termosensibile che possiede un legame costitutivo notoriamente articolato, dove le leggi dell’idraulica e della scienza delle costruzioni si sintetizzano nei principi della reologia dei solidi viscoelastici. Se, come nel caso in esame, l’oggetto del riciclaggio è un materiale altrettanto complesso quale il pneumatico stradale, il tema che si è deciso di affrontare poteva risultare quantomeno scoraggiante.

In effetti così non è stato.

Lo studio del riciclaggio di polverino di pneumatico quale elemento di modifica del bitume ha consentito di evidenziare le enormi potenzialità di impiego nel campo dei conglomerati bituminosi, dove i problemi operativi, economici e concettuali risultano agevolmente superati dalle interessanti prestazioni che lo stesso polverino è in grado di conferire alle miscele stradali.

Forse lo stesso entusiasmo ha coinvolto lo studioso americano Charles MacDonald quando, già dagli inizi degli anni '60, “mescolò” per la prima volta il polverino di gomma di pneumatico con bitume, non sapendo tuttavia che stava per dare un contributo importante per la risoluzione del problema ambientale costituito dalle circa 500 mila tonnellate di pneumatici fuori uso che ogni anno vengono accantonate.

MacDonald cercava un prodotto in grado di offrire performance superiori, sufficientemente flessibile ed elastico, efficace nella riparazione di fessure, buche e cedimenti delle pavimentazioni stradali. Oggi, dopo 40 anni di sistematico utilizzo e di continuo perfezionamento, ciò che è noto come *Asphalt Rubber* derivato da cosiddetto processo *wet*, si è dimostrato una soluzione tecnica vantaggiosa per la realizzazione di conglomerati bituminosi, non solo da un punto di vista ecologico ma anche prestazionale.

Gli oltre 300 km di rete stradale europea realizzati in Portogallo, Spagna, Germania e Austria con *Asphalt Rubber* confermano le potenzialità di utilizzo del polverino di gomma di pneumatico riciclato, andando ad aggiungersi agli ottimi riscontri ottenuti nei paesi con più esperienza in questo tipo di riciclaggio, quali Stati Uniti (oltre 2'800 Km nella sola Arizona), Sud Africa e Australia, che presentano numerose pavimentazioni di questo tipo in servizio da più di 30 anni.

In un momento in cui anche in Italia ci si avvicina all'utilizzo di questo materiale, già ampiamente collaudato da esperienze pluridecennali oltreoceano, si è ritenuto opportuno illustrare ed approfondire con nuovi contributi le conoscenze sulle caratteristiche, proprietà e opportunità offerte dall'utilizzo del polverino nei conglomerati bituminosi, ponendo specifica attenzione alla relazione gomma/bitume.

Le prove convenzionali realizzate sinora sull'*Asphalt Rubber* hanno mostrato un netto miglioramento delle loro proprietà rispetto ai bitumi base, ma le ragioni di questa differenza non possono essere spiegate utilizzando le sole prove convenzionali.

Definito preliminarmente il campo di applicazione ed il contesto culturale di riferimento, nell'ambito della ricerca del corso di Dottorato, si è passati ad un'analisi approfondita dei bitumi modificati con polverino di gomma di pneumatico riciclata secondo la metodologia *wet*, per i quali si è preliminarmente definito un ampio quadro conoscitivo focalizzato sulle caratteristiche tecniche, prestazionali e le relative esperienze pregresse e attuali nei diversi ambiti internazionali.

---

---

È stato eseguito un accurato studio sperimentale che ha permesso di definire in maniera esaustiva le caratteristiche reologiche e prestazionali anche al variare del grado di invecchiamento artificiale dei leganti *Asphalt Rubber*, con particolare riferimento al cosiddetto “Tipo 1”, ossia ottenuto da polverino di gomma interamente ricavato da pneumatici riciclati. I risultati ottenuti sono stati inquadrati nell’ambito normativo attuale e, nello specifico, rispetto ai parametri definiti dalla norma ASTM D6114, alla quale ha fatto seguito un’analisi comparativa rispetto agli altri materiali convenzionali.

Infine, a completamento del quadro analitico così definito, sono stati studiati i cosiddetti *Terminal Blend*, tipi di legante, recentemente messi a punto, ottenuti mediante modifica con minori percentuali di polverino di gomma e che prevedono, normalmente, l’aggiunta di additivi a base di acido polifosforico o oli estensivi.

Nel dettaglio, la presente Tesi è articolata partendo da un Capitolo 1 dove vengono introdotte le caratteristiche delle diverse tipologie di leganti bituminosi modificati, ponendo particolare attenzione alle proprietà reologiche di ciascuna.

Focalizzando l’attenzione sulla modifica mediante polverino di gomma di pneumatici riciclati, il Capitolo 2 illustra le motivazioni che spingono all’implementazione del suo impiego, offrendo, al contempo, una panoramica sullo state dell’arte del suo impiego in ambito stradale.

Il Capitolo 3 entra nel merito delle caratteristiche dell’impiego del polverino di gomma per la realizzazione di conglomerati bituminosi mediante il cosiddetto processo *wet*, da cui si ricava il materiale specificatamente studiato. Vengono illustrate le prestazioni delle pavimentazioni ottenute ricorrendo all’impiego dell’*Asphalt Rubber*, considerandone inoltre gli aspetti legati alla progettazione, alla posa in opera e al controllo della qualità, con attenzione riguardo ai benefici di tipo ambientale ed agli sviluppi futuri consentiti da tale materiale.

A monte della trattazione della parte sperimentale, il Capitolo 4 è dedicato alla caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi, definendo i concetti di viscoelasticità lineare e non lineare, reometria, analisi dinamica e soffermandosi sulle prove sperimentali che da questi scaturiscono.

Nel Capitolo 5 viene presentato il quadro normativo di riferimento, descrivendone l’evoluzione e dettagliando le caratteristiche del programma sperimentale statunitense di riferimento, denominato SHRP, dedicando infine una parte ai recenti progressi della normativa europea.

Il Capitolo 6 descrive l’impostazione dell’analisi sperimentale svolta ai fini della caratterizzazione reologica dei leganti *Asphalt Rubber*, illustrando i risultati ottenuti nel corso delle prove sui 46 bitumi testati.

---

Integrano il lavoro svolto la classificazione basata sul concetto di Performance Grade con relativa mappa territoriale di temperatura, un'analisi economica sui conglomerati Asphalt Rubber, inclusa nella tesi come appendice, ed una voce di Capitolato Tecnico che descrive le proprietà dei materiali, le tecnologie da impiegare e le procedure da seguire per la formulazione, confezionamento e controllo qualità di detti leganti.

# Capitolo 1

## Generalità sul bitume modificato

Il bitume è un composto organico eterogeneo di colore scuro, caratterizzato da una consistenza semisolida [1-1]. È una miscela di idrocarburi di origine naturale o artificiale, o entrambe, e di loro derivati metallici. È un materiale termoplastico, senza una temperatura di fusione ben definita, completamente solubile nel solfuro di carbonio e parzialmente in molti solventi organici quali il benzolo, l'alcool etilico, il tetracloruro di carbonio ed il cloroformio. È un materiale dalle straordinarie proprietà: è un legante efficace, di pronta adesione, impermeabile e resistente alla maggior parte degli acidi, degli alcali e dei sali.

I bitumi definiti puri, ottenuti dalla distillazione diretta del greggio di petrolio, presentano a temperatura ambiente un aspetto di liquido molto viscoso. Sono miscele di idrocarburi ad elevato peso molecolare, con un comportamento reologico particolarmente complesso che, al variare della temperatura, dipende dalla composizione chimica e dai legami esistenti tra le principali molecole.

Possono essere classificati in:

- *Bitumi naturali*: costituiti dal residuo formatosi in seguito a fenomeni naturali di ossidazione ed evaporazione delle sostanze più volatili dei petroli; i depositi di bitume possono trovarsi sotto forma di affioramenti, di vene, di sacche o di laghi. Il giacimento più importante si trova nell'isola di Trinidad, dove costituisce quasi un lago; esso contiene più del 50% di bitume puro misto ad acqua, sabbia, argilla. Quando i bitumi contengono almeno il 2% di sostanze inorganiche, come roccia, sabbia, ecc., prendono il nome di Bitumi Asfaltici.
- *Rocce asfaltiche*: quando i bitumi contengono una percentuale di sostanze inorganiche decisamente superiore al 2%, in questo caso si trova in quantità compresa tra il 5% ed il 20% raramente raggiunge il 40%. L'Italia possiede giacimenti importanti di rocce asfaltiche; in Sicilia (Ragusa) si trovano giacimenti nei quali il minerale è costituito da roccia calcarea impregnata di bitume in quantità variabile dal 7 al 12%.

- *Bitumi artificiali*: coprono ormai il 90% della produzione complessiva, si ottengono da petroli detti Asfaltici, cioè contenenti elevate quantità di idrocarburi ad elevato grado di polimerizzazione e con numerosi legami insaturi; il bitume artificiale si può anche ottenere dagli oli lubrificanti (prodotto dalla distillazione sotto vuoto del petrolio).

## 1.1 Proprietà chimiche e reologiche del bitume

Nonostante la composizione chimica dei bitumi sia piuttosto semplice, questa si presenta molto variabile a seconda dell'origine del greggio e dei processi utilizzati per la distillazione [1-2]. Il bitume è, infatti, un sistema multifasico costituito da miscele di idrocarburi ciclici saturi e di loro derivati, i quali si differenziano per la loro composizione e la struttura molecolare. Gli idrocarburi variano in funzione del petrolio greggio di provenienza e dei processi di distillazione attraverso i quali viene prodotto il legante. In genere sono del tipo:



Oltre al carbonio e all'idrogeno, presenti in ingenti quantità superiori al 90% in peso, e a tracce di metalli pesanti come il nichel e il vanadio, gli altri atomi generalmente presenti nella sono lo zolfo, l'ossigeno e l'azoto. L'analisi elementare dei bitumi mostra come esso contenga:

Carbonio	82 – 88 %
Idrogeno	8 – 11 %
Zolfo	0 – 6 %
Ossigeno	0 – 1,5 %
Azoto	0 – 1%

La composizione esatta varia a seconda dell'origine del petrolio grezzo da cui il bitume viene estratto e dalla successiva modificazione, sia realizzata durante la produzione che indotta dall'invecchiamento nella fase di esercizio.

L'analisi di tale composizione inizia con la suddivisione degli idrocarburi in due grandi gruppi, a seconda che siano o meno solubili in eptano.

---



Il primo gruppo è costituito sostanzialmente dagli asfalteni, insolubili negli idrocarburi saturi a basso punto di ebollizione (normal-eptano o eptano) e solubili nel tetracloruro di carbonio. Questi possono essere considerati i costituenti della frazione solida del bitume, il quale risulta tanto più duro quanto maggiore è la percentuale di asfalteni presenti. Gli asfalteni sono, infatti, solidi amorfi di colore scuro, e includono la maggior parte di zolfo, ossigeno e azoto presenti nel bitume, soprattutto sotto forma di composti eterociclici.

Presentano elevati pesi molecolari (tra 3000 e 50000) e rappresentano la frazione più ricca in macromolecole, con configurazioni strutturali piuttosto complesse del tipo a nuclei condensati (polinucleari) con rade e corte catene laterali. Sono costituiti principalmente da composti aromatici, con anelli condensati e catene alchiliche aventi fino a trenta atomi di carbonio, e da composti eteroaromatici contenenti zolfo (presente in anelli benzotiofenici) e azoto in anelli pirrolici o piridinici. Sono usualmente presenti anche ammine e ammidi, composti ossigenati (chetoni, fenoli o acidi carbossilici), nichel e vanadio complessati con l'azoto in sistemi porfirinici [1-1].

Gli asfalteni sono solidi a temperatura ambiente, con un aspetto granulare e costituiscono una frazione del legante compresa tra il 10 e il 25%. Sono i principali responsabili del comportamento viscoso del bitume, della sua elasticità o plasticità al variare della temperatura, della capacità di resistere a sollecitazioni meccaniche e di depositarsi rapidamente, se versati a caldo, su qualsiasi supporto, formando una pellicola molto adesiva.

Oltre agli asfalteni, il gruppo di idrocarburi insolubili in eptano è costituito da carboidi (insolubili in solfuro di carbonio) e da carbeni (insolubili nel tetracloruro di carbonio), presenti in proporzioni modeste rispetto ai primi. Questi composti non sono, infatti, solitamente presenti nel prodotto della distillazione e si formano in eventuali trattamenti termici del bitume.

Il gruppo degli idrocarburi solubili in eptano è costituito dai malteni (detti anche petroleni), i quali si presentano con un aspetto oleoso e si dividono in resine e oli. Questi ultimi sono costituiti essenzialmente da anelli naftenici e aromatici collegati da lunghe catene alifatiche e, a loro volta, si suddividono in aromatici e saturi.

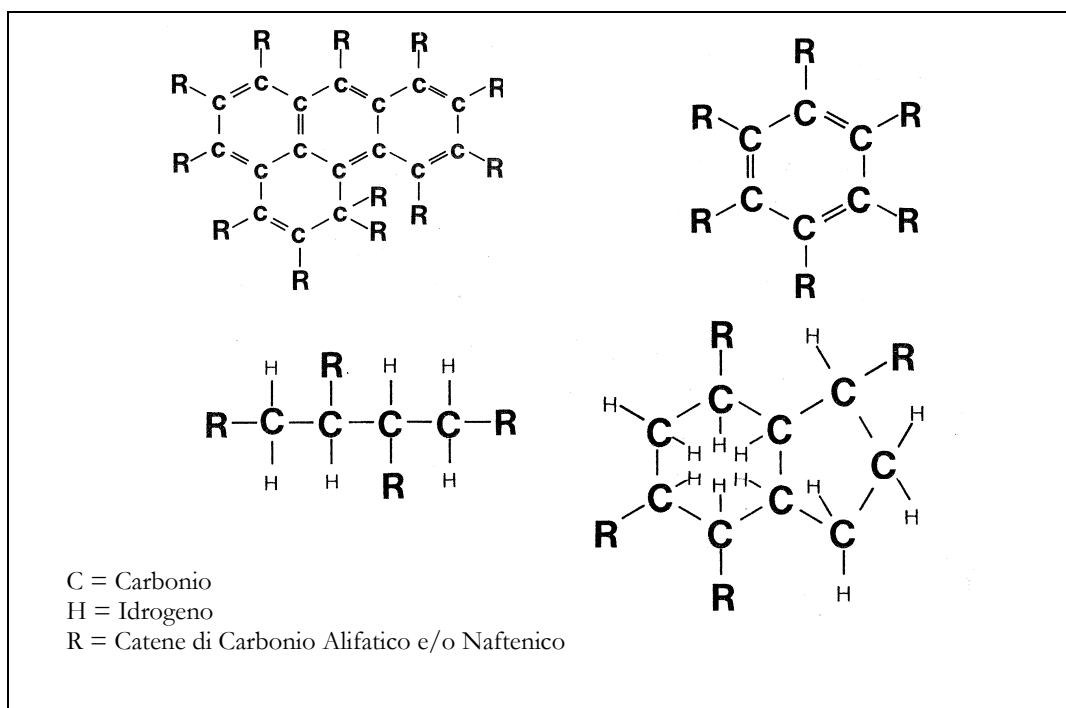
A temperatura ambiente, le resine sono composti chimici viscosi, solubili in aromatici (come l'n-eptano), caratterizzate da una discreta reattività chimica e da una accentuata natura polare che le conferisce notevoli proprietà adesive. Essendo gli unici composti maltenici polari rappresentano gli agenti disperdenti o peptizzanti delle strutture macromolecolari asfalteniche e sono generalmente buoni solventi. Presentano peso molecolare oscillante fra 500 e 5000 e colore marrone scuro. Sono principalmente costituiti da idrogeno e carbonio, così come gli asfalteni, ma contengono anche piccole quantità d'ossigeno, zolfo e azoto.

---

Data la loro capacità di disperdere gli asfaltini, la loro presenza e la loro qualità, intesa come reattività chimico-fisica, assume un'importanza determinante per l'equilibrio dei costituenti del bitume.

Gli aromatici comprendono i composti aromatici naftenici con il più basso peso molecolare (mediamente compreso fra 300 e 2000) e costituiscono il componente essenziale per la peptizzazione degli asfaltini. Costituiscono una percentuale compresa tra il 40 ed il 65% del totale e si presentano come liquidi viscosi di colore marrone scuro. L'elevato potere solvente nei confronti degli altri idrocarburi e l'alto peso molecolare dipendono dalla presenza di catene di carbonio non polari in cui prevalgono sistemi di anelli insaturi.

I saturi comprendono gli idrocarburi alifatici a catena lineare o ramificata, insieme con alchinaftenici e alchilaromatici. Sono oli viscosi non polari di colore biancastro, dal peso molecolare medio simile a quello degli aromatici. Questa frazione rappresenta una quantità che varia tra il 5 e il 20% del peso totale.



**Figura 1-1: Strutture di un asfaltene (in alto a sinistra), di un idrocarburo aromatico (in alto a destra) e di un idrocarburo saturo (in basso)**

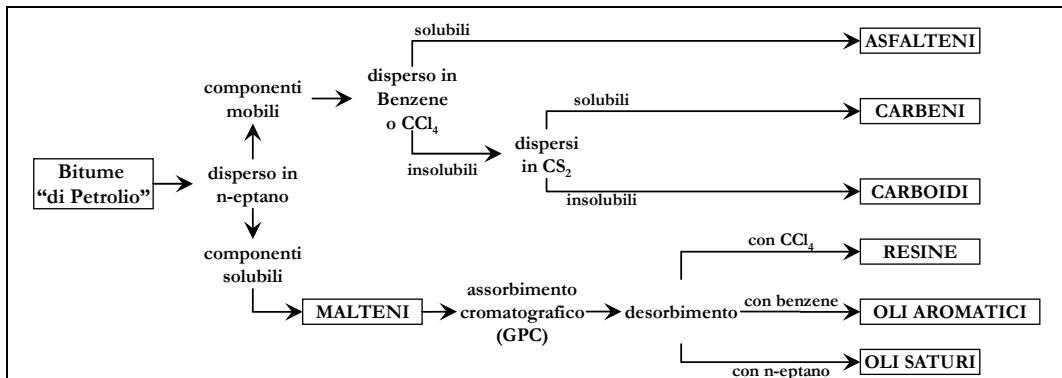


Figura 1-2: Schema di frazionamento di bitumi

Il comportamento reologico del bitume dipende dalla propria composizione chimica. Al variare della quantità dei suoi elementi costituenti il bitume cambia, infatti, il proprio comportamento, e gli asfaltene risultano essere l'elemento maggiormente influente. In caso di carenza di quest'ultimi, esso mostra una ridotta consistenza ed una maggiore suscettibilità alle deformazioni indotte da sollecitazioni meccaniche o termiche, oltre a perdere gran parte delle sue proprietà adesive [1-3].

In caso di un carente contenuto di resine, invece, il bitume si dimostra instabile, tendendo a separare gli asfaltene sotto forma di agglomerati lasciando affiorare gli oli. Aumentando le resine, al contrario, il bitume si indurisce, aumentando la viscosità e riducendo l'indice di penetrazione e la tensione di taglio. Con una ridotta percentuale di oli maltenici, infine, perde le caratteristiche di fluidità anche per temperature medio alte, risultando scarsamente manipolabile a causa dell'eccessiva durezza e adesività e perdendo la propria capacità di scorrimento.

Il bitume può essere assimilato ad un sistema colloidale, costituito da due fasi di cui una risulta dispersa nell'altra sotto forma di particelle. Queste ultime, dette micelle, sono costituite dagli asfaltene rivestiti dagli agenti peptizzanti, cioè le resine, e sono disperse nei componenti oleosi costituiti dalla frazione più leggera dei malteni. Quando sia disperdente che disperso sono in proporzioni adatte, gli asfaltene sono completamente peptizzati ed in condizione di muoversi con una libertà che è funzione della viscosità della fase disperdente. In caso di insufficienza di disperdente, si determina tra le micelle una mutua attrazione, e queste formano una specie di reticolo nella zona in cui si trovano più prossime. Il bitume assume, così, una struttura colloidale simile ad un agglomerato i cui spazi liberi sono occupati dalle resine.

La notevole suscettibilità termica costituisce, allo stesso tempo, il principale pregio ed inconveniente del bitume: essa infatti non consente al legante di conservare costanti le proprietà di coesione al variare della temperatura di servizio.

Un aumento di temperatura provoca, infatti, una riduzione del numero di asfalteni costituiti in micelle che, insieme agli elementi peptizzanti, causano un aumento della fase continua, con la conseguente riduzione della viscosità apparente del sistema. Tale meccanismo consente la realizzazione di miscele bituminose a caldo.

Studi reologici [1-4] hanno dimostrato che il comportamento del bitume può variare tra quello di un sistema “SOL” (o soluzione colloidale), prettamente Newtoniano, e quello di un “GEL”, non Newtoniano a carattere tixotropico o pseudoplastico.

I sistemi di tipo “SOL” sono sistemi nei quali le resine sono presenti in quantità tali da mantenere gli asfalteni in uno stato altamente disperso (o peptizzato) nella fase oleosa. Essi possono essere schematizzati come una dispersione di sfere indeformabili in un liquido Newtoniano. Poiché le interazioni tra le agglomerazioni micellari sono ridotte, tali sistemi esibiscono un comportamento di tipo Newtoniano (sia alle basse che alle alte temperature).

Il bitume possiede invece una struttura di tipo “GEL” quando le resine non sono molto efficaci nella peptizzazione degli asfalteni. Questi ultimi tendono infatti a reticolare fra loro con conseguente separazione della fase disperdente e dispersa. In questo caso il comportamento è di tipo non-Newtoniano.

All'aumentare della proporzione di asfalteni, il processo di flocculazione delle micelle può raggiungere una estensione tale da causare il passaggio del bitume ad una struttura di tipo "GEL". Tale dispersione può essere causata anche dall'ossidazione, causata ad esempio dal contatto con l'aria di bitume surriscaldato durante il processo di fabbricazione della miscela bituminosa, dando origine a fenomeni di disidrogenazione e polimerizzazione degli asfalteni.

Un sistema gel è normalmente rappresentato mediante sfere indeformabili collegate tra loro da molle. Un sistema di questo tipo possiede componenti di deformazione elastica, tuttavia l'elasticità è ritardata per effetto della viscosità della fase disperdente. È dunque l'interazione resine-asfalteni a governare il comportamento reologico del legante.

Per determinare in quale condizione si trova il bitume preso in esame (sistema “SOL” oppure sistema “GEL”) Gaestel ha definito un indice di instabilità colloidale  $I_c$ :

$$I_c = \frac{As + Sa}{Re + Ar} \quad (1-1)$$

---

dove:

As = asfalteni

Sa = saturi

Re = resine

Ar = aromatici

Tanto più elevato è questo rapporto, tanto più il bitume si avvicina a un sistema GEL e la sua stabilità è bassa.

Recentemente, tuttavia, sono state mosse delle critiche a questa schematizzazione. È stato quindi proposto, proprio all'interno del progetto americano SHRP, un modello alternativo per la struttura del bitume. Secondo quest'ultimo il bitume viene rappresentato come un fluido polare disperso, cioè tramite una dispersione casuale dei vari tipi di molecole, del tutto simile a quella che si ha in una soluzione molecolare. Secondo tale interpretazione il bitume risulta essere un sistema monofasico, in contrapposizione con il sistema bifasico micellare sopra esposto. Le finalità prettamente applicative del progetto SHRP, che nel tentativo di dare un'interpretazione statistica delle proprietà reologiche non si è soffermato sull'aspetto puramente chimico, spiegano questa apparente contraddizione.

I bitumi "GEL" presentano comportamenti poco idonei per le applicazioni stradali, con tendenza alla tixotropia. I bitumi adatti alle applicazioni viarie sono, invece, di tipo "SOL", i quali presentano una buona risposta alle azioni ad elevata frequenza, pur soffrendo alterazioni dovute ad azioni statiche e a variazioni di temperatura.

Strutturalmente, il bitume applicato in campo stradale si presenta come un sistema nel quale gli oli costituiscono la maggior parte della fase continua e le micelle possiedono un nucleo di asfalteni, peptizzati dalle resine e dai composti aromatici di peso molecolare più elevato, ai quali si adsorbono gli idrocarburi aromatici di peso molecolare più basso. Costituisce, in tal modo, un sistema colloidale disperso di tipo "SOL".

Il bitume è un materiale caratterizzato da elevatissima sensibilità termica. Il suo comportamento reologico è assimilabile a quello di polimeri a basso peso molecolare, dei quali presenta l'andamento tipico del modulo dinamico e della cedevolezza. A temperatura ambiente e fino a circa 70°C, il comportamento è prevalentemente viscoelastico; oltre questa temperatura avviene la transizione da liquido viscoelastico a fluido, eventualmente Newtoniano. La transizione vetrosa si manifesta intorno ai -20°C; questo valore si mantiene grossomodo costante per tutti i tipi di bitume ed anche la modifica con polimeri non ne provoca grandi variazioni. La temperatura di una pavimentazione stradale esposta al sole può raggiungere temperature massime intorno ai 60-80°C, mentre per climi particolarmente rigidi la temperatura può scendere sino a -40°C.

Da questi risulta evidente come per i bitumi sia necessaria una caratterizzazione reologica che copra un intervallo molto ampio di temperature.

La forte dipendenza delle proprietà reologiche dalla temperatura si manifesta anche dalle informazioni ricavabili dalla costruzione della master curve, che per le normali condizioni di servizio fornisce un andamento realistico del comportamento del materiale al variare della frequenza e della temperatura. Lo studio della viscosità del bitume alle alte temperature (oltre 135°C) presenta la stessa importanza delle prove dinamiche perché è a queste temperature che avvengono la modifica e la miscelazione con il materiale litoide. I bitumi modificati presentano comportamento viscoelastico in un intervallo di temperatura più ampio rispetto alle basi non modificate e la transizione a liquido Newtoniano avviene a temperature molto più alte, in alcuni casi superiori ai 120°C. Sotto questa temperatura la viscosità presenta una marcata dipendenza dallo *shear rate* (comportamento non-Newtoniano). Tale proprietà è studiata con prove in regime di scorrimento, aumentando progressivamente lo shear rate applicato e misurando la viscosità del campione in condizioni isoterme, a varie temperature. In caso di comportamento Newtoniano la viscosità rimane costante all'aumentare dello shear rate. In genere i fluidi reali hanno comportamento Newtoniano per valori molto bassi dello shear rate e il corrispondente valore di viscosità è definito “*zero-shear rate viscosity*” [1-5].

Lo studio di questa funzione è dettato dalla correlazione esistente tra il fenomeno del rutting (formazione di ormaie dovute all'accumulo di deformazioni permanenti alle alte temperature) e la dipendenza della viscosità dallo shear rate.

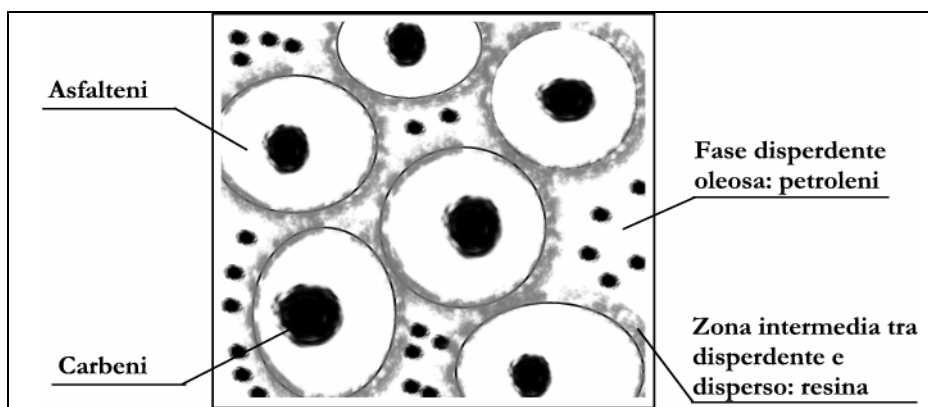
## 1.2 I bitumi modificati

Nel settore stradale, i materiali bituminosi convenzionali hanno offerto buone e soddisfacenti prestazioni per molti anni, oggi però, la “richiesta stradale” è cambiata e si hanno sempre maggiori esigenze, soprattutto in termini di sicurezza e di durata. Per ragioni pratiche ed economiche, i lavori di manutenzione devono essere limitati, riducendo con essi anche i disagi connessi all'interruzione del traffico.

In virtù delle proprietà reologiche esposte nel paragrafo precedente, la qualità dei bitumi può essere migliorata per mezzo di semplici accorgimenti quali la soffiatura (*bitumi soffiati*), consistente nel soffiaggio di aria per un tempo variabile dalle 5 alle 20 ore a temperature superiori a 100°C. L'aria provoca una blanda ossidazione, in conseguenza della quale il bitume diventa più duro e meno duttile, perciò adatto per prodotti da applicare come rivestimento (ad esempio su tetti). Il bitume così ottenuto presenta, però, limiti dovuti proprio alla sua rigidità, soprattutto per temperature medio-basse.

---

Al fine di meglio rispondere alle esigenze prestazionali sono nati i bitumi modificati, ovvero nuovi leganti bituminosi ottenuti attraverso l'intima unione fra un bitume tradizionale ed un agente chimico in grado di fornire prestazioni superiori. L'aggiunta di tale agente modifica la struttura sia chimica che fisica e le proprietà meccaniche del bitume di base [1-2]. I miglioramenti così ottenuti sono funzione del tipo di modifica effettuata sul bitume e dipendono dalla formulazione adottata in fase di produzione, in relazione al bitume di base ed al tipo di modificante impiegato, nonché dal processo utilizzato per la modifica stessa.



**Figura 1-3:** Schematizzazione del bitume come micelle disperse in un mezzo oleoso, in cui si possono considerare due porzioni: petrolene + resina e asfaltene + carbeni

I bitumi modificati trovano impiego in tutti i casi in cui i bitumi convenzionali presentano alcuni limiti, come insufficiente resistenza all'ormaiamento dovuta all'azione di un elevato traffico pesante canalizzato ad alte temperature, oppure eccessiva rigidità dei bitumi convenzionali che, se da un lato possono resistere meglio all'ormaiamento, possono però presentare problemi di fessurazione termica alle basse temperature. Altri fattori che portano a preferire la modifica sono legati alle miscele di conglomerato bituminoso aperte, le quali non garantiscono con un bitume convenzionale il raggiungimento di adeguati livelli di resistenza meccanica a causa della carenza di adesione e coesione che, per effetto dell'azione degli agenti atmosferici e della discontinuità dei punti di contatto all'interno dello scheletro litico, ne compromette la durabilità. Considerazioni analoghe valgono per i trattamenti superficiali sottoposti all'azione di un traffico pesante.

Esistono, quindi, varie tecniche al fine di migliorare le caratteristiche reologiche dei bitumi [1-6]:

- i bitumi soffiati, ottenuti tramite il soffiaggio di aria all'interno del bitume, migliorano le caratteristiche di durezza e rigidità alle alte temperature; questi bitumi permettono di ottenere pavimentazioni caratterizzate da un elevato modulo, ma presentano limitazioni legate alla flessibilità per temperature medio-basse ed alla scarsa resistenza alla fessurazione;
- la modifica del bitumi con polimeri continua ad avere margini di sviluppo, ma presenta problemi di compatibilità e stabilità di stoccaggio, così come un invecchiamento prematuro (separazione all'interno delle differenti fasi). Le raffinerie di petrolio hanno anche sviluppato tecnologie che hanno condotto a un sistema di bitumi multigradi;
- la modifica del bitume con materiali alternativi ai polimeri, in grado di mostrarsi preferibili a quest'ultimi per aspetti prestazionali, economici e/o pratici legati alla realizzazione, posa in opera e gestione.

Dato l'attuale limitato utilizzo dei bitumi soffiati in ambito stradale, concentreremo l'attenzione sui bitumi modificati. Come vedremo, il processo di soffiaggio può, comunque, essere applicato anche ad alcuni tipi di bitume modificato (come il caso dell'etilene-propilene-diene) al fine di migliorarne alcune caratteristiche.

Con tale termine si indicano i leganti bituminosi ottenuti dall'unione di un bitume di base con particolari composti chimici, detti agenti modificanti, la cui aggiunta comporta una variazione delle caratteristiche, al fine di migliorarne il comportamento reologico e prestazionale. Il processo di modifica necessita la predisposizione di appositi impianti e l'esecuzione di adeguati processi produttivi, che vanno opportunamente definiti sulla base delle caratteristiche sia dell'agente impiegato che del bitume di base, al fine di realizzare un materiale dalle caratteristiche omogenee e controllate.

Come illustrato al paragrafo precedente, il bitume può essere rappresentato come una dispersione colloidale di particelle asfalteniche, in una fase oleosa continua. Aggiungendo al bitume sostanze di natura diversa, utilizzando sistemi meccanici e/o chimici, in condizioni particolari di temperatura, se ne possono modificare il comportamento e la natura in due modi:

- Variando in un intervallo ristretto il valore di alcuni parametri caratteristici (penetrazione, viscosità, ecc.): si ottiene in tal modo una additivazione del bitume;
  - influenzando il comportamento reologico e la suscettibilità termica in forma sostanziale, assimilando gradualmente le caratteristiche a quelle della sostanza aggiunta: si ha una *modifica* del bitume.
-



---

I materiali che rientrano nel primo caso sono: filler inorganici, ebaniti polverizzate, plastificanti, flussanti ed additivi chimici vari. Nel secondo caso rientra, invece, un gran numero di materiali polimerici di diversa natura e il polverino di ***gomma vulcanizzata***.

Ci si riferisce a tre parametri fondamentali:

- *Natura chimica del bitume, dei modificanti e loro reciproca compatibilità*: moderne tecniche analitiche permettono di determinare la natura chimica prevalente di un bitume proveniente da qualsiasi tipo di greggio. Su questa base è altrettanto possibile scegliere il polimero che mostrerà la maggiore affinità e, di conseguenza, garantirà più facile compatibilità e maggiore omogeneità nel tempo alla miscela.
- *Condizioni operative e sistemi per una corretta preparazione dei modificati*: la conoscenza della natura dei componenti permetterà la scelta di impianti e condizioni adeguate capaci di garantire la miscelazione nella forma più esclusiva possibile, nel tempo più breve e con il minimo di dispendio energetico;
- *Morfologia delle miscele e loro stabilità nel tempo*: lo studio della morfologia è reso possibile dall'uso di microscopi a fluorescenza che permettono di identificare l'esatta collocazione del bitume e del polimero nella miscela con specifiche casistiche al comportamento dei vari polimeri; nota la morfologia è possibile prevedere le caratteristiche comportamentali.

### 1.2.1 Modifica con polimeri

I bitumi modificati con polimeri sono leganti ai quali sono state mutate radicalmente le caratteristiche fisiche, chimiche e reologiche mediante l'aggiunta di polimeri termoplastici, che possono essere di tipo elastomerico e plastomerico. Vengono inglobati nei bitumi ad alta temperatura, con il risultato di una miscela paragonabile ad un liquido viscoso.

Uno degli argomenti più comunemente usati a favore della modifica con polimeri dei bitumi convenzionali si basa sui seguenti fattori [1-7]:

- ampliamento dell'intervallo di plasticità. In generale è maggior l'incremento del valore del punto di rammollimento e del punto di fragilità. Questo implica una minore fragilità alle basse temperature e una minor deformabilità alle alte temperature.
- minore suscettibilità termica.

Entrambe le argomentazioni sono correlate: nei bitumi modificati con polimeri per i quali viene ampliato l'intervallo di plasticità, si produce parallelamente una diminuzione della suscettibilità termica.

---

Il bitume modificato si ottiene dalla interazione tra bitume e polimero, in un impianto speciale ed in condizioni controllate. Un bitume è “modificato” quando il suo comportamento reologico e le caratteristiche che lo contraddistinguono sono tendenzialmente assimilabili a quelle del polimero modificato utilizzato, avendo contemporaneamente salvato tutte le proprietà leganti originali della base bituminosa.

I polimeri sono materiali organici di sintesi, costituiti da molecole aventi un elevato numero di atomi legati tra loro da legami covalenti. Sono composti chimici complessi le cui molecole derivano dall'unione di più molecole semplici detti monomeri. Etimologicamente, infatti, polimero significa “molte parti” ed identifica, quindi, quei composti formati da unità più piccole ripetute un numero elevato di volte (macromolecole).

Essi possono essere *naturali* (gomma naturale, cellulosa) o provenire da *processi di sintesi*. La scienza dei polimeri riguarda sia l'analisi della loro composizione chimica e dei processi di sintesi utilizzati in campo industriale, sia lo studio della struttura fisica, relativamente al modo in cui le molecole sono disposte all'interno del materiale.

La complessità dei composti polimerici deriva dalla coesistenza di tipi di legame diversi per intensità e natura. Isolando una macromolecola filiforme, lungo la catena polimerica si può notare come gli atomi siano legati da forti legami covalenti, mentre nelle altre due direzioni dello spazio operino le forze di valenza secondarie. Quest'ultime si accumulano lungo tutta la catena polimerica e, anche se nettamente meno intense delle prime, determinano effetti evidenti sulle proprietà e sul comportamento del materiale. Tali forze variano da polimero a polimero e, in ordine crescente di intensità, possono essere classificate come segue:

- forze di dispersione
- forze dipolari permanenti
- legami idrogeno

L'insieme delle forze di valenza secondarie determina la coesione del materiale ed influenza, principalmente, le proprietà termiche e meccaniche del polimero.

Il criterio più semplice per classificare i materiali polimerici considera la loro origine e consente di dividerli in:

- polimeri naturali, come la cellulosa e le proteine, si trovano in natura
- polimeri sintetici, ottenuti tramite sintesi di monomeri
- polimeri artificiali, ottenuti con modificazione di tipo chimico dei polimeri naturali.

Un altro metodo di distinzione dei polimeri si basa sul meccanismo di polimerizzazione, distinguibile in:

---

- policondensazione (polimerizzazione a stadi): si ha un aumento graduale della lunghezza della catena e del peso molecolare del polimero
- poliaddizione (polimerizzazione a catena): si ha l'addizione di n monomeri fino alla formazione della catena.

Il criterio di classificazione più adatto ai fini delle caratteristiche dei modificanti per bitumi risulta essere, tuttavia, quello basato sul comportamento reologico. In tale ottica, i polimeri impiegati per modificare un bitume possono essere classificati essenzialmente nelle seguenti quattro categorie:

- Plastomeri Termoplastici (materie plastiche), come il polietilene, il polipropilene atattico, i copolimeri etilene-propilene e i copolimeri etilene-vinilacetato (EVA) e l'etilene-butilacrilato (EBA).
- Elastomeri Termoplastici (gomme sintetiche), come i copolimeri stirene-butadiene-stirene (SBS), le gomme stirene-butadiene (SBR) o gli elastomeri saturi come lo stirene-etilene-butadiene-stirene (SEBS).
- Elastomeri naturali (gomme naturali), materiali elastici quali il lattice.
- Polimeri Termoindurenti, come le resine sintetiche, soprattutto epossidiche, poliuretaniche o poliestere, che induriscono per aggiunta nella miscela di un opportuno catalizzatore o innalzamento della temperatura.

Negli attuali bitumi modificati vengono usate principalmente gomme termoplastiche e alcuni plastomeri, mentre le gomme naturali e sintetiche non vengono generalmente impiegate; le resine termoindurenti vengono utilizzate solo per applicazioni stradali speciali, quali Antiskid, Splitt Mastix Asphalt e microtappeti a caldo.

I materiali polimerici, per poter essere impiegati come modificanti, devono presentare le seguenti caratteristiche:

- compatibilità con il bitume;
- sufficiente stabilità termica alle temperature necessarie alla lavorazione ed applicazione del bitume;
- resistenza all'azione degli agenti atmosferici;
- mantenimento delle proprietà adesive del bitume.

Non tutti i polimeri sono, infatti, adatti per un determinato tipo di bitume e, viceversa, non tutti i bitumi sono adatti per un determinato tipo di polimero. Un fattore importante risulta, quindi, essere la compatibilità tra bitume e tipo di agente modificante. Quando bitume e polimero sono compatibili, essi danno luogo ad un sistema caratterizzato da un migliore comportamento reologico, condizioni cioè ottimali.

E' fondamentale che questi materiali garantiscano, oltre un certo limite di temperatura, anche un comportamento viscoso, necessario all'utilizzazione della miscela modificata con le stesse regole e le stesse apparecchiature del bitume semplice. I bitumi modificati con polimero, usati per gli asfalti stradali, devono infatti poter essere trattati con convenzionali attrezzature; devono cioè essere stabili fisicamente e chimicamente durante lo stoccaggio, l'applicazione ed il servizio.

Nella Tabella 1-1 viene riportata la nomenclatura utilizzata per i diversi tipi di polimeri plastomeri ed elastomeri. Per le ragioni spiegate di seguito, non tutti i materiali riferiti trovano applicazione nella modifica di leganti bituminosi in campo stradale.

**Tabella 1-1: Nomenclatura di polimeri Plastomeri ed Elastomeri**

<b>SIGLA</b>	<b>NOMENCLATURA</b>
<b>Plastomeri</b>	
PE	Polietilene
LDPE	Polietilene a bassa densità
HDPE	Polietilene ad alta densità
APP	Polipropilene atattico
IPP	Polipropilene isotattico
EVA	Etilene – Vinilacetato
EBA	Etilene-Butilacrilato
EMA	Etilene – Metacrilato
TPO	Termoplastici polifenici
<b>Elastomeri</b>	
NR	Gomma naturale
EPR	Gomma – Etilene Propilene
BR	Polibutadiene
SBR	Stirene – Butadiene - Rubber
SBS	Stirene – Butadiene – Stirene
SEBS	Stirene-Etilene-Butadiene-Stirene

Passiamo ad analizzare più nel dettaglio le quattro categorie in cui vengono suddivisi i materiali polimerici in funzione delle proprietà reologiche.

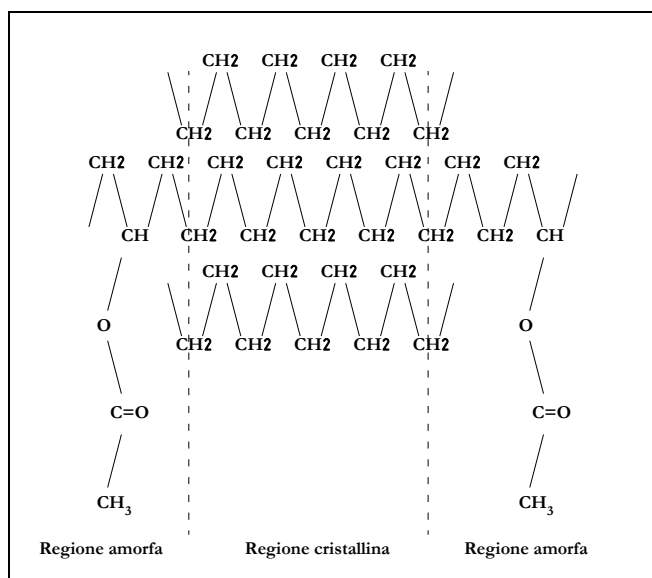
#### 1.2.1.1 I POLIMERI PLASTOMERI TERMOPLASTICI

Sono caratterizzati dalla capacità di rammollire a caldo ed indurire a freddo. La proprietà fondamentale di tali materiali è quella di variare le proprie caratteristiche con la temperatura in maniera reversibile: sono in grado, infatti, di passare dallo stato solido a quello fluido una volta superato il punto di fusione e di tornare allo stato iniziale una volta che la temperatura si abbassa nuovamente. Questa proprietà li rende adatti ad essere mescolati con i bitumi. La deformazione elastica può essere accompagnata anche da una deformazione permanente relativamente grande (in funzione della proporzione tra fase flessibile e fase rigida nella matrice polimerica).

I plastomeri sono, quindi, una famiglia di polimeri di tipo termoplastico, costituiti da catene macromolecolari lineari raramente anche ramificate. I principali materiali appartenenti a questo gruppo ed utilizzati come modificanti sono il polietilene (PE), il polipropilene (PP), il polivinilcloruro (PVC), il polistirene (PS), l'etilene-vinilacetato (EVA), l'etilene-butilacrilato (EBA), l'etilene-metacrilato (EMA) e il polisobutylene (PIB). Sono da considerarsi plastomeri anche altri copolimeri basati sull'etilene come il copolimero etilene-propilene (EMP o EPR), il copolimero etilene-vinile o etilene-acrilestere (ACM). La presenza in EVA, EMA e ACM di gruppi molecolari molto grandi, ne aumenta la resistenza alla separazione e la rigidità, pur non incrementandone le caratteristiche di elasticità; inoltre, per la presenza di gruppi polari, essi favoriscono le componenti di adesione [1-1].

#### *EVA (ETHYLENE-VINYL-ACETATE)*

Tra i plastomeri, i più utilizzati come modificanti del bitume sono i copolimeri EVA. Si tratta di materiali termoplastici per i quali i due monomeri del copolimero entrano nella catena in modo più o meno casuale; possiedono, cioè, una struttura random, le cui proprietà sono controllate dal peso molecolare e dal contenuto di vinilacetato. In questi copolimeri, i gruppi vinilacetato vanno ad interrompere l'arrangiamento strutturale del polietilene per dare origine ad una regione non cristallina e amorfa. Per questo motivo sono definiti polimeri semi-cristallini. Nella Figura 1-4 è rappresentato uno schema della struttura molecolare del plastomero. Va precisato come l'EVA presenti una debole stabilità termica, ma rimanga sufficientemente accettabile per l'utilizzo nei bitumi modificati.



**Figura 1-4: Struttura dell'etilene vinilacetato (EVA)**

Il polimero EVA modifica le caratteristiche del bitume aumentandone la durezza e la viscosità alle basse temperature, migliorandone la flessibilità a freddo e l'indice di penetrazione. Mescolato al bitume, può essere stoccato a caldo per un tempo indeterminato senza che si separi dal bitume, mantenendo il prodotto perfettamente omogeneo. Inoltre, permette di ottenere emulsioni cationiche caratterizzate da un'ottima lavorabilità e dotate di una moderata viscosità. Bitumi che di per se non sono emulsionabili, lo diventano con l'aggiunta di una certa quantità di EVA.

Tale polimero modifica le proprietà dei bitumi ossidati e di prima distillazione. Le alterazioni delle proprietà dei bitumi di prima distillazione, quando miscelati con EVA, sono:

- Diminuzione della penetrazione;
- Aumento della temperatura di rammollimento;
- Aumento della flessibilità, soprattutto alle basse temperature;
- Aumento della forza di coesione e dell'elasticità.

Resine particolari, ottenute con l'aggiunta di EVA, tendono a migliorare le caratteristiche di invecchiamento. Il polimero EVA, come i bitumi, è soggetto ad un lento processo di deposizione alle alte temperature, durante il quale possono liberarsi piccole quantità di acido acetico ed altri prodotti di degradazione. La decomposizione diventa evidente solo a temperature sopra i 230°C. Degradazioni consistenti non si hanno al di sotto dei 250°C, e tale temperatura rappresenta il limite superiore di riscaldamento della miscela.

EVA è quindi un polimero atto a conferire una più elevata stabilità e resistenza alla deformazione, una maggiore resistenza allo sbalzo termico, un minore invecchiamento del legante, un incremento del punto di rammollimento del bitume ed un aumento dell'intervallo termoplastico del bitume. Esiste una grande varietà di polimeri EVA, differenziati in base al loro contenuto in acetato di vinile. Normalmente un polimero di questo tipo viene indicato con la sigla EVA x/y, dove il primo numero (x) indica la qualità di acetato di vinile, mentre il secondo (y) rappresenta l'indice di fluidità.

Le prove eseguite su tali materiali, sia in laboratorio che in situ, indicano che l'EVA è compatibile con la maggioranza dei bitumi. Quando si verifica una insufficiente omogeneizzazione, questa può essere indice di incompatibilità.

Per ottenere un ciclo di lavorazione che consenta di avere prodotti effettivamente migliorati in termini di elasticità, coesione, adesività, suscettibilità termica, oltre ad assicurare una più lunga vita in esercizio delle pavimentazioni stradali, è necessario anzitutto assicurare un controllo costante delle temperature durante le varie fasi della modifica. È, infatti, noto il rischio di decomposizione dei polimeri oltre i 200°C e la difficoltà di miscelazione degli stessi al di sotto di determinate temperature (120°C).

---

### 1.2.1.2 I POLIMERI ELASTOMERI TERMOPLASTICI

Un elastomero è un polimero che, da solo o opportunamente trasformato (mescolato con vari ingredienti e reticolato), presenta, nelle condizioni di utilizzo, proprietà elastiche per cui, se sottoposto a forze di trazione, raggiunge allungamenti elevati (diverse volte la propria lunghezza) e, rimuovendo la sollecitazione, recupera sostanzialmente e in tempi brevi le dimensioni iniziali. Esistono elastomeri naturali (gomme naturali, vedi paragrafo 1.2.1.3) ed elastomeri sintetici. La classe degli elastomeri comprende elastomeri reticolabili (che presentano le caratteristiche elastiche solo dopo il processo di reticolazione) ed elastomeri termoplastici. Questi ultimi sono polimeri che, da soli o in mescolanza, senza richiedere reticolazione, presentano alla temperatura di servizio proprietà simili a quelle di un elastomero vulcanizzato, mentre ad alta temperatura (durante la lavorazione) si comportano come un fuso e sono quindi lavorabili con le tecnologie delle materie plastiche. Vi sono molte famiglie di elastomeri sintetici. Tra le più importanti sono il polibutadiene (BR), le gomme stirene-butadiene-stirene (SBS), le gomme stirene-butadiene (SB o SBC), le gomme stirene-butadiene random (SBR), le gomme stirene-isoprene-stirene (SIS), le gomme etilene propilene (EPR), le gomme etilene-propilene-diene (EPDM), le gomme nitriliche (NBR) le gomme acriliche (ACM) e quelle a base di isobutilene e isoprene (IIR).

Il butadiene è il primo componente della serie dei dieni, idrocarburi con due doppi legami. L'isomero ha formula chimica  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$  e si ricava dal cracking del petrolio. Viene utilizzato come monomero per produrre il polibutadiene e come comonomero per la produzione di diversi altri elastomeri. A sua volta, il butadiene viene ricavato dall'acetilene  $\text{C}_2\text{H}_2$ , uno dei prodotti maggiormente pregiati della petrolchimica, ottenuto industrialmente mediante cracking all'arco elettrico di idrocarburi a basso numero di atomi di carbonio oppure mediante cracking termico ad alta temperatura del gas naturale, per parziale combustione del metano.

Gli elastomeri termoplastici usati in ambito stradale sono i polimeri termoplastici elastomerici stirenici che danno origine ai bitumi elastomerizzati. Sono copolimeri a blocchi di mono e di-olefine, ossia lunghe sequenze di un monomero che si unisce a lunghe sequenze (blocchi) dell'altro monomero. La mono-olefina è di solito lo stirene, mentre la di-olefina sono il butadiene o l'isoprene. Questi polimeri vengono semplicemente miscelati al bitume, ma può avvenire una **reazione** chimica originando una struttura interna reticolare chiamata *cross-link*.

La struttura di tali polimeri viene espressa come:



dove S rappresenta il blocco stirenico (polistirene), D il blocco elastomerico di polibutadiene o isoprene (SBS o SIS, rispettivi idrogenati, SEBS e SEPS) e X l'agente legante scelto appropriatamente. Nella tipica struttura macromolecolare il blocco stirenico S risulta posizionato esternamente, chimicamente legato con il blocco elastomerico centrale D.

A seconda del contenuto di stirene varia il comportamento del polimero [1-6]:

- con una percentuale di stirene inferiore a 15%, il polimero si comporta come una gomma grezza, senza reticolazione;
- per una percentuale di stirene compresa fra 20 e 40%, questo assume il comportamento di gomma vulcanizzata;
- se la percentuale di stirene supera il 40%, il polimero diventa un composto che assorbe molto bene gli urti.

Gli elastomeri termoplastici possono presentarsi sia in forma di catena lineare di monomeri, sia in catena ramificata. Nella struttura lineare, il butadiene è l'elemento di unione, che fornisce elasticità, tra i blocchi stirenici, che rappresentano le estremità e conferiscono rigidità. Nel caso di catena ramificata è, invece, lo stirene ad avere la funzione di unione.

Le molecole formano reticoli tridimensionali, ottenendo una struttura amorfa. Lo stirene e il butadiene presentano una reciproca incompatibilità termodinamica, e per le normali temperature di esercizio ciascun elemento cerca altri elementi a sé congruenti. Alle temperature di servizio, quindi, all'interno del materiale si formano domini di fase nei quali gli elementi stirenici tendono a riunirsi dando luogo ad agglomerati che rappresentano i nodi rigidi del reticolo. Alle alte temperature, invece, a causa della elevata energia interna e della conseguente mobilità delle molecole, i domini si dissolvono ed il materiale passa allo stato fluido, consentendo di procedere alla miscelazione del polimero con il bitume.

Questi polimeri, grazie alle proprie caratteristiche strutturali e compositive, inducono nel bitume un comportamento fortemente elastico tipico dei materiali gommosi. Mediante opportuni accorgimenti tecnologici consentono, inoltre, di raggiungere un grado di dispersione stabile.

Oltre all'SBS, le cui caratteristiche vengono riprese e meglio descritte di seguito, ulteriori tipi di elastomeri termoplastici che trovano applicazione in campo stradale sono la gomma stirene-butadiene (SBR), lo stirene-etilene-butadiene-stirene (SEBS) e l'etilene-propilene-diene monomero (EPDM).

---



I copolimeri stirene-butadiene (SBC), date le buone proprietà di coesione e la possibilità di essere applicati senza usare solventi o agenti per la formazione di *crosslinking*, sono comunemente utilizzati per modificare bitumi che devono avere una buona adesività (es. sigillatura di fessure).

I polimeri SEBS o SEPS sono idrogenati e quindi è più difficile che formino legami di *crosslink*, ma presentano maggior resistenza all'invecchiamento ossidativo dovuto ai raggi UV.

L'EDPM è ottenuto per polimerizzazione di un diene con il copolimero etilene-propilene. Le sue principali proprietà sono l'elevata capacità di dispersione e la possibilità di una successiva reticolazione all'interno del bitume consentita dai doppi legami del componente diene. Tuttavia, l'EPDM presenta una poco agevole miscibilità con il legante di base, richiedendo, in taluni casi, un processo di soffiaggio d'aria per indurre la reticolazione e aumentare la stabilità del modificato.

#### SBS (STYRENE-BUTADIENE-STYRENE)

Come anticipato, è un polimero in grado di sviluppare un reticolo nella massa del bitume. La sigla stessa indica la configurazione dell'elastomero, un copolimero a blocchi stirene-butadiene-stirene, la cui struttura è mostrata in Figura 1-5. Il contenuto di stirene rappresenta il 20-30% del peso totale del polimero.

La struttura molecolare dell'SBS può essere lineare o radiale; la struttura lineare vede due blocchi di polistirene posizionati agli estremi del blocco elastomerico di polibutadiene, mentre nella struttura radiale i blocchi di polistirene, almeno tre, sono disposti in una configurazione a stella intorno al polibutadiene. Il suo peso molecolare può variare tra 80000 e 300000. Un aumento del peso molecolare o del contenuto di stirene potrebbero ridurre la compatibilità con i bitumi, portando a problemi di dispersione e instabilità allo stoccaggio.

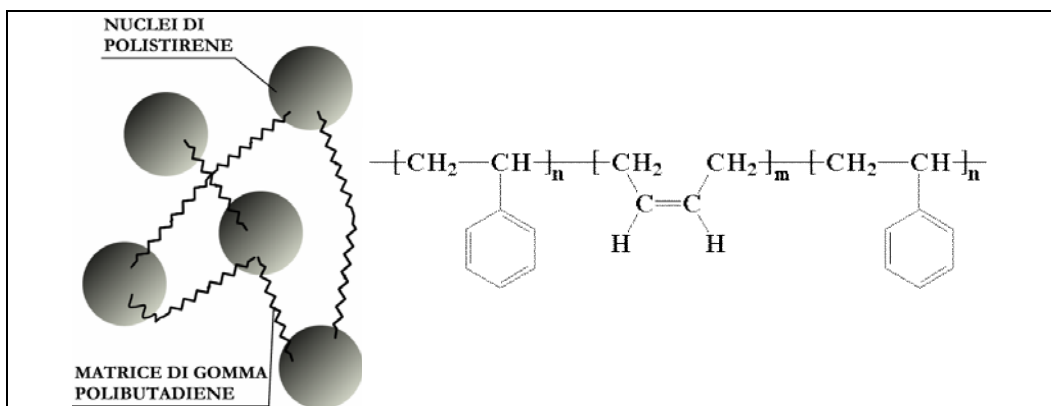


Figura 1-5: struttura SBS (a sinistra) e unità di SBS (a destra)

Il comportamento meccanico è dovuto proprio alla struttura bifasica del copolimero, costituita da domini di polistirene dispersi in una matrice di gomma polibutadiene. L'SBS presenta a temperatura ambiente un comportamento analogo alle gomme vulcanizzate: i segmenti polibutadienici agiscono come elastomeri mentre quelli polistirenici formano domini rigidi che operano come punti di reticolazione [1-8]. Questa struttura reticolata è reversibile, quindi le proprietà fisiche e meccaniche del copolimero non variano dopo ripetuti riscaldamenti e raffreddamenti.

Il profilo chimico assume rilevante importanza nel caso di SBS lineare. Infatti solamente con un struttura chimica ottimale si ottengono i risultati voluti: miglioramenti nelle caratteristiche reologiche, fisiche e chimiche. Quale condizione primaria, il polimero non deve turbare troppo gli equilibri intramolecolari esistenti all'interno del bitume, con particolare riferimento all'unione fra malteni ed asfalteni, la quale non deve superare un certo limite, così come i saturi. I pesi molecolari medi della struttura non devono essere troppo bassi (implica un elevato contenuto di asfalteni). In queste condizioni si possono ottenere mescole nelle quali il polimero risulti completamente solubilizzato ed abbia una perfetta reticolazione, perciò completamente omogeneo e stabile in un ampio spettro di condizione ambientali. Risulta molto utile per contrastare quello che viene chiamato "Decadimento del punto di rammollimento".

Quando l'SBS è miscelato con la base bituminosa, la fase elastomerica del copolimero assorbe la frazione maltenica (frazione oleosa) e si rigonfia, aumentando il suo volume in funzione del tipo di base. Percentuali di polimero medio-alte, intorno al 5-7% in peso, creano una rete tridimensionale polimerica che modifica radicalmente le proprietà del bitume. Il prodotto ottenuto ha un intervallo di elastoplasticità molto più ampio, miglior comportamento ad alte e basse temperature e maggior resistenza alla fatica e all'usura dettato dall'incremento delle proprietà elastiche.

Il problema derivante dalla modifica con questo copolimero è che la struttura non è termicamente stabile. La gomma termoplastica ha un peso molecolare simile a quello degli asfalteni o addirittura più alto. Gli asfalteni e il polimero competono per il potere solvente della fase maltenica e se la quantità di malteni è insufficiente si può creare una separazione di fase; questa separazione è un indice della incompatibilità della base bituminosa con la fase polimerica. È, tuttavia, possibile migliorare la compatibilità aggiungendo il bitume con oli aromatici, tenendo, però, conto che una percentuale troppo alta dissolve i blocchi polistirenici annullando i benefici dell'aggiunta del copolimero.

Dopo essere stato prodotto, il bitume modificato viene immagazzinato in serbatoio ad elevata temperatura, diversa per ogni tipo di mescola. Nei serbatoi il bitume può rimanere anche alcuni giorni in attesa di utilizzo.

---

Durante questo periodo, il legante può presentare una diminuzione del punto di rammollimento rispetto al valore riscontrato subito dopo la preparazione della miscela. Tale fenomeno si verifica ogniqualvolta il bitume venga mantenuto ad elevata temperatura per un periodo eccessivamente lungo dopo la preparazione.

#### 1.2.1.3 ELASTOMERI NATURALI

Gli elastomeri naturali, o gomme naturali (NR), risultano ad oggi scarsamente impiegati come modificanti per il bitume. Tale materiale risulta, infatti, sensibile alla decomposizione e all'assorbimento d'ossigeno, oltre a presentare un peso molecolare troppo alto per essere direttamente disciolto nel bitume; ciò implica che debba essere parzialmente decomposto e omogeneizzato meccanicamente, in modo da meglio prestarsi alla dispersione sotto forma di lattice.

Nell'industria chimica con lattice si indica qualunque sospensione o emulsione acquosa affine al lattice naturale, mentre quest'ultimo è un liquido di aspetto lattiginoso, bianco o colorato, che si trova nei laticiferi di molte piante.

I lattici aventi maggiore importanza industriale sono quello ricavato dall'*Hevea brasiliensis* o da piante affini, oltre ai vari lattici sintetici. Anche al lattice, come per la gomma secca, si devono anzitutto aggiungere le sostanze necessarie a farlo vulcanizzare (acceleranti, attivatori e zolfo), a ritardarne l'invecchiamento (antivecchianti), a modificarne il colore (coloranti), l'aspetto (plastificanti) o la struttura (rigonfianti). Le mescolanze si ottengono miscelando al lattice le quantità prestabilite delle sostanze citate, preventivamente emulsionate a loro volta in acqua con l'ausilio di speciali agenti (tensoattivi, disperdenti, bagnanti, ecc.).

#### 1.2.1.4 POLIMERI TERMOINDURENTI

I polimeri termoindurenti, a differenza dei polimeri termoplastici, non rammolliscono quando ulteriormente riscaldati e non sono, quindi, molto utilizzati come modificanti per il bitume, nel campo stradale.

Tra questi, i prodotti maggiormente diffusi sono le resine epossidiche, applicate miscelando due componenti, uno contenente la resina e l'altro l'indurente, che reagiscono chimicamente formando forti strutture tridimensionali. Miscelate con i bitumi in ingenti quantità, le resine epossidiche presentano proprietà tipiche delle resine termoindurenti modificate piuttosto che dei bitumi modificati.

Il modificato così ottenuto non mostra flussi viscosi e risulta essere molto resistente all'attacco chimico, incluso quello di solventi e combustibili.

Per un contenuto di resina non troppo elevato, invece, il bitume è in grado di rammollire e di diventare fluido all'aumentare della temperatura, alle variazioni della quale non si dimostra molto suscettibile.

#### 1.2.1.5 EFFETTI PRODOTTI DALLA MODIFICA CON POLIMERI

Normalmente l'obiettivo del bitume modificato è il trasferimento delle proprietà dei polimeri modificati al bitume, preservandone contemporaneamente i suoi preesistenti punti di forza. In pratica, le caratteristiche del bitume variano in funzione dei polimeri modificanti e dalle condizioni di confezionamento.

L'impiego di un opportuno modificante consente, generalmente, di ampliare l'intervallo di elasto-plasticità della miscela, cioè l'intervallo d'uso del bitume, compreso tra il punto di fragilità a freddo e il punto di rammollimento a caldo. Oltre alla consistenza, la modifica con il polimero varia consistentemente le proprietà reologiche, diminuendo, in particolare, la suscettività termica del bitume modificato.

In funzione della loro natura, alcuni polimeri avranno effetti più specifici nell'area delle basse temperature ed altri nella zona opposta. Tutti i polimeri, ed in particolar modo i plastomeri, aumentano la viscosità dei bitumi, in funzione del tipo di polimero, del peso molecolare e della concentrazione dello stesso.

Le gomme termoplastiche forniscono maggiore forza e duttilità e aumentano notevolmente l'elasticità del bitume, rendendolo più resistente alla deformazione alle alte temperature (ormaiamento), e più flessibile alle basse temperature, quindi più resistente ai fenomeni di rottura di origine termica. Anche con riferimento alla fessurazione per fatica, l'uso di una struttura elastomerica determina un aumento del modulo di rigidità ed un aumento significativo del grado di elasticità, ovvero della sua capacità di recuperare le deformazioni subite [1-7].

Infine, i bitumi modificati con polimeri presentano una buona resistenza ai fenomeni dell'invecchiamento dovuta alle migliori caratteristiche di coesione e di adesione della matrice bituminosa, che facilita la dissipazione dell'energia prodotta dalle sollecitazioni termiche [1-2].

Il miglioramento è, quindi, soprattutto in termini di suscettibilità termica, ossia di parametri quali la tenacità e l'adesione al variare della temperatura, e i comportamenti reologici si riflettono notevolmente sulle caratteristiche finali e sulle prestazioni del prodotto ottenuto. La diminuzione della suscettibilità termica si traduce, in pratica, in aumento del punto di rammollimento, diminuzione della penetrazione, abbassamento del punto di rottura a freddo, estensione dell'intervallo di elasto-plasticità e forte aumento della viscosità (normalmente i bitumi modificati presentano a 60°C una viscosità da 15 a 400 volte la viscosità del bitume base).

---

Il normale intervallo di applicabilità utile del bitume, compreso tra  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $+50^{\circ}\text{C}$ , può ampliarsi per effetto della modifica con polimeri tra  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $+110^{\circ}\text{C}$ .

#### 1.2.1.6 COMPATIBILITÀ TRA BITUME E POLIMERO

Nel processo di modifica di un bitume con polimero assumono un ruolo di primaria importanza l'omogeneizzazione del polimero stesso nel bitume e la stabilità del modificato ottenuto [1-9]. In altri termini, il polimero deve sia essere compatibile con il bitume che mantenere le sue proprietà durante le fasi di stoccaggio, posa in opera ed esercizio. A livello pratico la compatibilità è definita come una situazione dove bitume e polimero possano essere combinati originando un prodotto di qualità superiore e dove tale combinazione possa essere maneggiata senza eccessive precauzioni.

A causa delle diverse strutture chimiche, masse molecolari, viscosità e densità del bitume e del polimero, non sempre è possibile ottenere la compatibilità dei due componenti.

Quali variabili si hanno, oltre al tipo di polimero, anche le caratteristiche proprie del bitume, dipendenti sia dalla composizione del greggio di origine che dal processo di produzione. Risultano particolarmente influenti le componenti del bitume che agiscono come solubilizzanti o agenti di rigonfiamento per il polimero. Nel bitume modificato con alto contenuto di polipropilene, ad esempio, la fase resine-asfalteni è completamente dispersa nel polimero rigonfiato ed il bitume risulta ricco in saturi con alto peso molecolare; un comportamento simile è mostrato da tutti i plastomeri termoplastici. Un bitume adatto per miscele SBS dovrebbe avere, al contrario, un alto contenuto in aromatici e basso in asfalteni. In particolare, nel caso dell'SBS, è stata dimostrata una decisa incompatibilità tra polimero e asfalteni e una buona dispersione in aromatici e resine.

Durante la fase di miscelazione ad alta temperatura, infatti, i componenti aromatici del bitume determinano un rigonfiamento delle catene poli-butadieniche del polimero SBS. Per effetto del raffreddamento tali catene rimangono stirate ed i blocchi stirenici intrappolano i componenti del bitume che non hanno contribuito al rigonfiamento del poli-butadiene stesso.

Per valutare la compatibilità tra bitumi e polimeri è necessario definire la composizione e a quale temperatura debba essere eseguita la miscelazione in modo da ottenere un sistema monofase.

### COMPATIBILITÀ E SOLUBILITÀ

La solubilità di un polimero in un bitume dipende principalmente dalla differenza dei parametri di solubilità (densità di energia coesiva, determinabile indirettamente attraverso la misurazione del rigonfiamento in una serie di solventi con parametri di solubilità noti) del polimero e della fase maltenica del bitume.

Viene condizionata, inoltre, dalla quantità e tipo di asfalteni presenti nel bitume, in quanto la fase maltenica funge da solvente per il polimero, mentre gli asfalteni contrastano la permanenza del polimero in soluzione.

Nella analisi della solubilità di un polimero assume importanza la *Upper Critical Solution Temperature* (UCST), ossia la massima temperatura critica della soluzione bitume-polimero. Per ciascuna miscela bitume-polimero le cui differenze in termini di parametri di solubilità siano accettabili, è infatti possibile individuare la temperatura critica UCST tale che:

- se la temperatura di miscelazione è maggior della UCST, si ha una fase unica;
- se la temperatura di miscelazione non raggiunge la UCST, coesistono due fasi distinte.

L'influenza delle caratteristiche del bitume è determinata da questa temperatura, funzione della quantità di asfalteni e del potere solvente dei malteni. A sua volta l'influenza delle caratteristiche del polimero dipende dai parametri di solubilità, che sono funzione del peso molecolare, risultando la miscelazione facilitata per bassi pesi molecolari (50.000÷300.000).

### COMPATIBILITÀ E ADATTABILITÀ

In generale, particolarmente alle basse temperature, le miscele di bitume e polimeri, sia plastomeri (EVA) che elastomeri (SBS), sono sistemi costituiti da due fasi:

- fase 1: ricca di polimero e una parte di malteni del bitume adsorbiti dal polimero;
- fase 2: ricca di asfalteni che non sono adsorbiti dal polimero.

Con particolare riguardo al volume delle due fasi, un copolimero come lo SBS può assorbire fino a nove volte il suo stesso peso di componenti del bitume (il volume aumenta del 900%), e tale capacità di assorbimento decresce con l'aumentare della concentrazione del polimero.

Quando la fase ricca di polimero inizia a diventare una fase continua le proprietà della miscela iniziano a cambiare drasticamente. Con polimeri altamente reattivi questo succede con concentrazioni intorno al 4-6%, che maggiormente vengono introdotte nei bitumi per uso stradale. Per ottenere l'inversione di fase (da fase continua di bitume a fase continua di polimero) con polimeri meno reattivi la concentrazione critica aumenta circa dell'1%.

---

## 1.2.2 Modifica con acido polifosforico

Come dimostrato in applicazioni recenti, il miglioramento delle caratteristiche di un bitume può essere ottenuto anche mediante la modifica chimica, come nel caso dell'aggiunta dell'acido polifosforico.

Tra i vari acidi utilizzabili per la modifica del bitume, l'acido polifosforico è, infatti, un modificante inorganico di polimeri che risulta stabile rispetto alla temperatura e non ossida.

In particolare, con l'aggiunta di acido polifosforico è possibile ottenere miglioramenti prestazionali di un bitume che si traducono in un aumento della penetrazione di una o due classi.

Tali miglioramenti possono essere ottenuti a partire dall'aggiunta di una piccola quantità di acido, inferiore al 2%. Inoltre, anche la combinazione dell'acido polifosforico con i polimeri può sortire un effetto positivo [1-10].

Anche questa modifica chimica migliora l'intervallo termico di applicazione di un bitume, definito come l'intervallo fra le due temperature critiche (minima e massima), e le diverse applicazioni commerciali nel Nord America degli ultimi cinque anni dimostrano l'interesse tecnologico che tale tecnica sta riscuotendo.

Uno degli aspetti principali della modifica con acido polifosforico è costituita dalla variazione indotta nella quantità di asfaleni all'interno del bitume, con conseguente aumento della stabilità. Da un punto di vista meccanico, come visto precedentemente, il bitume può essere considerato una matrice (malteni) rafforzata da un filler organico (asfaleni). Alle alte temperature, il bitume così modificato mostra maggiore resistenza, rigidità ed elasticità. Ciò si spiega con l'aumento di interazione fra malteni e asfaleni, che porta ad un miglioramento delle proprietà meccaniche. Alle basse temperature, la diminuzione di asfaleni aggregati determina, invece, una minor suscettibilità termica alla fessurazione.

Questo miglioramento delle proprietà meccaniche è funzione della quantità di acido polifosforico aggiunto. La quantità ottima dipende dalla chimica del bitume e dal proprio indice di penetrazione, e in particolare dal numero di particelle reattive della frazione asfaltenica.

## 1.2.3 Modifica con polverino di gomma di pneumatico riciclata (Asphalt Rubber)

Nel campo dei bitumi per uso stradale la produzione di leganti di prestazioni superiori avviene, come visto, attraverso la modifica del bitume con l'aggiunta di polimeri plastomeri, ad esempio del tipo EVA o, più diffusamente di elastomeri SBS o SBR.

---

Tuttavia, sempre più frequentemente negli Stati Uniti ed in numerosi Paesi Europei il bitume modificato con polverino di *gomma di pneumatico riciclata*, noto come **Asphalt Rubber**, viene utilizzato quale valida alternativa per il confezionamento di conglomerati bituminosi di ottima durabilità e resistenti a severe condizioni di carico.

L'uso dell'Asphalt Rubber, come meglio descritto nei capitoli seguenti, non solo costituisce una concreta applicazione per il riutilizzo dei pneumatici usati, ma risulta di estremo interesse anche come soluzione strettamente tecnica [1-11].

Si parla propriamente di Asphalt Rubber quando un bitume viene modificato con una percentuale minima del 15 % (tipicamente il 20%) di polverino di gomma di pneumatico riciclata, incorporata tramite *processo wet*, che ha reagito durante un periodo di tempo sufficientemente lungo da permettere ai due componenti una specifica interazione fisica. Il legante viene prodotto direttamente in opera, in stretta prossimità del cantiere stradale, tramite apparecchiature specializzate e ricorrendo a polverino di specifica granulometria.

Il termine Asphalt Rubber è stato finora liberamente utilizzato: per alcuni rappresenta un tipo specifico di bitumi, per altri può definire un elenco più ricco di materiali. "Asphalt Rubber" è di fatto un tipo specifico di bitumi, che utilizza un tipo e una granulometrica specifica di gomma, e che viene prodotto direttamente in opera, in stretta prossimità del cantiere stradale, tramite apparecchiature specializzate.

Ad oggi, il mercato italiano non ha ancora riconosciuto la validità di tale tipo di modifica, comprovato, invece, da studi ed applicazioni pratiche sia negli Stati Uniti che in altri paesi europei. I passati approcci a livello nazionale a tale metodologia, infatti, realizzati negli ultimi 15 anni, nonostante ricorressero a polverino di gomma di pneumatico come modificante, hanno sperimentato metodi di fabbricazione differenti dal citato processo wet, oppure incorporando percentuali minori di polverino o non lasciando il tempo di reazione necessario per fare avvenire la modifica. Le differenze tra queste procedure, e soprattutto tra i risultati ottenuti, verranno spiegati più avanti.

Vale, inoltre, la pena di specificare l'utilizzo del termine "modifica" piuttosto che "additivazione" quando si parla dell'aggiunta di polverino di gomma al bitume, in quanto si verifica una reazione di assorbimento e rigonfiamento della gomma che origina una vera e propria modifica delle proprietà del bitume originale. Tale processo è irreversibile, come comprovato da diversi studi, dal momento che la gomma non può più essere interamente rimossa dal bitume. Ovviamente queste considerazioni sono valide per il processo wet.

Sono oggetto di studio approfondito nel presente lavoro i miglioramenti in termini di prestazioni ottenibili mediante questo tipo di modifica del bitume, illustrati nella Tabella 1-2.

---



A tali aspetti va, inoltre, aggiunto il vantaggio ambientale che deriva dal riciclaggio, in maniera non inquinante, di un'ingente quantità di gomma di pneumatico, come verrà meglio descritto nel capitolo successivo.

**Tabella 1-2: miglioramenti ottenibili mediante la modifica con polverino di gomma di pneumatico riciclata**

<b>Prestazioni dei Bitumi</b>
Aumento della durata del modificato dovuto all'aggiunta di antiossidanti
Riduzione del processo di invecchiamento del legante
Aumento significativo della viscosità e delle proprietà viscoelastiche del bitume
Fornisce una sottile pellicola di ricoprimento degli aggregati
Aumento del punto di rammollimento
Riduzione della suscettibilità del bitume alla temperatura
Migliora le proprietà del bitume alle basse temperature
<b>Prestazioni dei Conglomerati</b>
Aumento della resistenza all'abrasione, soprattutto in zone soggette a neve
Riduzione dell'ossidazione
Aumento della durabilità
Incremento della resistenza a fatica
Riduzione della riflessione della fessurazione
Riduzione del fenomeno dell'ormaiamento
Riduzione della rumorosità
Possibilità di utilizzare minori spessori degli strati della pavimentazione
Riduzione del tempo di costruzione
Aumento della sicurezza durante la fase di costruzione
Risparmio di risorse energetiche e naturali
Minori costi di manutenzione



## Capitolo 2

# Il polverino di gomma di pneumatico riciclata

I pneumatici usati costituiscono per la maggior parte del mondo un grosso problema ambientale. Solo in Europa ogni anno vengono accantonate oltre 2.000.000 di tonnellate di pneumatici fuori uso [2-1] ed il loro recupero e riutilizzo consentirebbe un risparmio significativo di risorse ed un contributo importante al rispetto dell'ambiente.

Se è vero che l'utilizzo di materiali riciclati nell'ultimo ventennio è stato promosso ed attuato con enfasi sempre maggiore, le iniziative future richiedono un ulteriore progresso nella cooperazione multidisciplinare tra governi e industria, ingegneri dei trasporti e specialisti dell'ambiente. In effetti il settore dei trasporti è caratterizzato dagli enormi volumi di materiali movimentati che costituiscono potenziale materia prima per nuove realizzazioni (aggregati riciclati, produzioni di nuovi leganti a base bituminosa).

Dall'esperienza statunitense [2-2] emerge la necessità della costituzione di partnerships tra società che operano nel settore ambientale e aziende di trasporti che consentano di aumentare l'utilizzo dei materiali riciclati in una forma economicamente conveniente.



Figura 2-1: Incendio in una discarica di Pneumatici, California 1999 (foto: Sacramento Bee)

Le soluzioni per lo smaltimento dei pneumatici di scarto, definite come le “3-R”, sono il riutilizzo, il riciclaggio e il recupero per la produzione di energia. Tra i possibili impieghi di materiali ottenuti a partire dal riciclaggio della gomma di pneumatici, quali la realizzazione di campi da calcio sintetici (per ciascuno dei quali occorrono circa 2500 tonnellate di gomma, corrispondenti a 400 mila pneumatici di autovettura o a 40 mila di camion), l'impiego in tecnica stradale di materie di scarto come il granulato di gomma di pneumatico riciclata costituisce un aspetto di notevole interesse non solo per le ricadute ambientali, ma anche e soprattutto per il miglioramento delle prestazioni offerte dalle pavimentazioni.

In tale contesto, assume un ruolo particolarmente importante il bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata, ossia l'**Asphalt Rubber**, che oggi trova specificazione nella normativa ASTM D 6114. A tale materiale, protagonista della presente tesi, viene interamente dedicato il Capitolo 3.



**Figura 2-2:** Pneumatici fuori uso accumulati in discarica

## 2.1 Origini e ricadute ambientali

La storia dell'impiego di granuli di gomma riciclata da pneumatici fuori uso (PFU) in ambito stradale ha avuto origine nel 1940 negli Stati Uniti, quando la Rubber Reclaiming Company iniziò a commercializzare gomma riciclata proveniente da dismissione di pneumatici. Le prime applicazioni sistematiche di questo tipo risalgono al 1960, quando Charles MacDonald sperimentò sulle strade di Phoenix, Arizona, i benefici apportati dalla gomma come *additivo* del bitume nella riparazione di buche [2-3].

---

---

Successivamente furono brevettate diverse formule di utilizzo della gomma come legante nelle miscele bituminose, fra le quali l'Asphalt Rubber così come concepito da MacDonald [2-4].

Nel corso degli anni le possibilità d'impiego si sono rivelate essere di gran lunga più ampie. Sempre negli anni sessanta, infatti, due compagnie svedesi cominciarono a produrre un tipo di miscela stradale per strati superficiali, introducendo una piccola quantità di gomma macinata di pneumatici in disuso in sostituzione di una frazione granulometrica dell'ossatura litica del conglomerato, al fine di aumentarne la resistenza alle azioni aggressive dei pneumatici chiodati e delle catene da neve.

Tale tecnica, precursore dell'attuale metodo definito come **Processo Dry** (vedi §2.4.2), ha portato alla formulazione di molte miscele di tipo analogo, tra cui la più diffusa viene attualmente commercializzata negli Stati Uniti come **PlusRide**<sup>®</sup> ed in Europa col nome di *Rubin*. Questa è stata messa a punto a seguito di una vasta sperimentazione effettuata negli USA, e particolarmente in Alaska, tra la fine degli anni '70 e metà anni '80 [2-5] e prevede l'introduzione di gomma di dimensioni granulometriche comprese tra 2 e 4.2 mm, in quantità variabili tra l'1 e il 3% sul peso totale della miscela e con una percentuale dei vuoti dei conglomerati tra il 2 ed il 4%. Il tenore in bitume nella miscela così ottenuta varia normalmente tra il 7.5 e il 9%.

A seguito della crescente sensibilità dell'opinione pubblica riguardo alle tematiche ambientali, la legislazione americana ha contemporaneamente iniziato ad incentivare l'uso di tecnologie mirate al recupero di materiali di scarto, predisponendo per i pneumatici fuori uso il *Tire Recycling Incentives Act*, finalizzato alla risoluzione dei rischi ambientali dovuti alla presenza di depositi di pneumatici usati. Successivamente il Congresso degli Stati Uniti ha approvato l'*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act* (ISTEA - 1991), che impone il ricorso all'utilizzo di gomma di pneumatici riciclati nell'ambito dei progetti di opere stradali finanziate dal governo, tramite lo studio e l'uso da parte delle *Highway Agencies* (concessionarie autostradali) di **Crumb Rubber Modifier** (CRM), ovvero di procedimenti che ricorrono all'impiego di gomma da riciclo di pneumatici. Il CRM costituisce un agente modificante in quanto la sua introduzione modifica i tradizionali prodotti bituminosi destinati alle pavimentazioni stradali [2-6]. Tale provvedimento trova giustificazione nell'enorme quantità di pneumatici fuori uso prodotti ogni anno negli Stati Uniti (oltre trecento milioni), destinati per la maggior parte alla discarica.

Attualmente le principali possibilità di reimpiego di questi materiali di scarto, in alternativa al conferimento in discarica, prevedono il loro utilizzo come combustibile o, come visto sopra, come agente modificante per conglomerati bituminosi. La combustione risulta ad oggi la tecnica più diffusa e consente, sempre negli Stati Uniti, di eliminare ogni anno oltre ventisei milioni di pneumatici.

---

La grande quantità di pneumatici smaltibile attraverso tale tecnica presenta, comunque, dei limiti di accettabilità sociale, dal momento che nel complesso comporta una netta perdita di energia rispetto a metodi alternativi.

Un'analisi costi-benefici effettuata in Arizona [2-7] ha, infatti, considerato le tre principali alternative di smaltimento dei pneumatici fuori uso (PFU). Con riferimento agli Stati Uniti, è stato valutato il beneficio sociale di ciascun metodo, stimandone il bilancio energetico finale in termini di energia per unità di massa della gomma, espressa in *British Thermal Unit per pound* (BTU/libbra – vedi Tabella 2-1).

In particolare, la stima relativa alla produzione di modificanti per leganti bituminosi ha considerato lo specifico caso della produzione di polverino per la realizzazione di Asphalt Rubber.

**Tabella 2-1: Confronto tra le differenti tecniche di smaltimento di PFU espresse in termini di bilancio di costi energetici**

Utilizzo dei PFU	Bilancio finale [BTU/libbra di gomma]
Discarica	-790
Combustione	13'500
Polverino per AR	133'400÷243'400

Con particolare riferimento al riutilizzo di gomma di pneumatici per la produzione di Asphalt Rubber, la Tabella 2-2 dettaglia il bilancio che conduce ad un guadagno in termini di costi energetici che, come illustrato, può arrivare al recupero di oltre 200000 BTU/libbra.

**Tabella 2-2: Bilancio energetico nel caso di produzione di polverino per Asphalt Rubber**

Processo	Bilancio energetico [BTU/libbra]
Raccolta PFU	-750
Trasporto PFU	-750
Triturazione	-1'542
Trasporto del granulato	-750
Recupero dei metalli	817
Risparmio di bitumi ( $\approx 20\%$ )	90'000÷200'000
Risparmio di aggregati ( $\approx 4\%$ )	4'675
Totale	133'400÷243'400

---

La valutazione delle possibili migliorie prestazionali ottenibili mediante il reimpiego di PFU in ambito stradale si va, quindi, ad affiancare ai benefici sociali espressi in termini ambientali ed economici, e l'obiettivo della ricerca in questo settore è quello di ottenere miglioramenti sia dal punto di vista del recupero delle materie di scarto che del miglioramento delle prestazioni delle pavimentazioni, attraverso l'impiego ed il perfezionamento di tecniche innovative, tenendo opportunamente conto degli aspetti economici legati ai costi di costruzione e manutenzione.

A livello europeo, la disposizione comunitaria che a partire dal 2006 vieta il conferimento a discarica di PFU ha rilanciato l'interesse per il loro possibile riutilizzo in ambito stradale. Anche in Italia una cospicua parte di tali materiali viene destinata alla combustione, in particolar modo nei cementifici, riducendo almeno apparentemente le dimensioni del problema. Mentre in altre realtà, anche europee, i PFU vengono ormai comunemente utilizzati per il confezionamento di conglomerati bituminosi, in Italia tale impiego è stato oggetto di alcuni studi ma di pochissime applicazioni pratiche, e rappresenta di fatto un'applicazione innovativa.

Relativamente agli sviluppi normativi che stanno accompagnando l'evoluzione tecnologica in tale ambito, risulta particolarmente interessante l'esempio rappresentato dai programmi volta alla risoluzione della questione ambientale legata ai PFU, come il *Program Tire Management* sottoscritto da alcuni stati membri degli USA, illustrato di seguito [2-8].

## 2.2 Il Tire Program Management Statunitense

In risposta alle crescenti preoccupazioni ambientali citate, negli anni '90 la maggior parte degli stati membri degli USA hanno iniziato a recepire le norme emanate dallo *Scrap Tire Management Council*, finalizzate al controllo del flusso di pneumatici fuori uso, anche in considerazione del divieto per legge di smaltire pneumatici sotterrandooli.

Mentre nel 1989 soltanto cinque stati controllavano questo flusso, alla fine del 1991 trentacinque stati avevano già adottato la legislazione per i pneumatici, numero che è salito a quarantotto alla fine del 1998. Di questi, trentacinque stati hanno vietato la pratica di abbandono dei pneumatici sul paesaggio. A tali misure si è aggiunta l'applicazione di tasse relative alla vendita di gomma nuova. In particolare, i paesi che si sono rivelati più attivi in tale ambito sono Arizona, California e Florida.

---

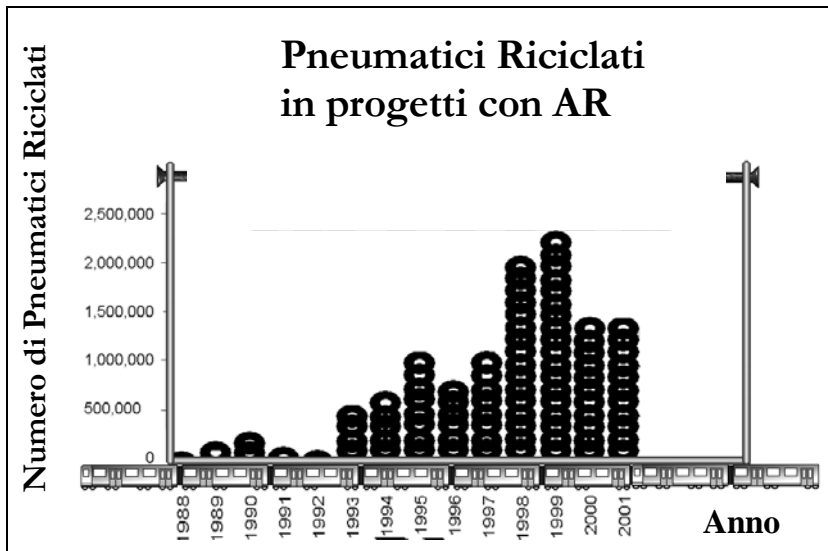


Figura 2-3: Quantità di pneumatici riciclati nell’ambito di progetti con AR in Arizona dal 1988 (ADOT)

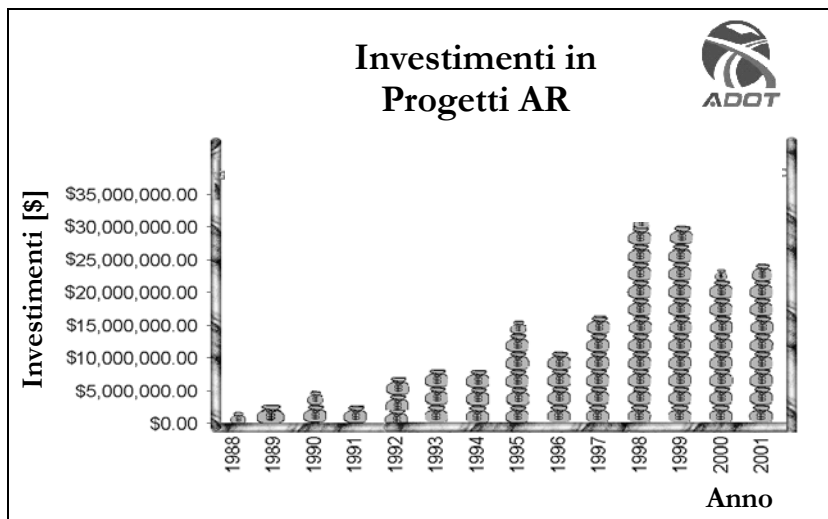


Figura 2-4: Investimenti per progetti con AR in Arizona dal 1988 (ADOT)

### 2.2.1 Arizona

Secondo l’*Arizona Department of Environmental Quality* (ADEQ), lo stato dell’Arizona produce annualmente circa 4 milioni di pneumatici di scarto. Di questi, tre milioni sono destinati ad un’unica stazione di riciclaggio di gomma di pneumatici posta nei pressi di Phoenix.



Circa 2.6 milioni vengono utilizzati per la realizzazione di pavimentazioni stradali, mentre il resto è usato in prodotti modellati, prodotti da giardinaggio o materiale di sicurezza e per aree ludiche – parchi giochi (vedi Tabella 2-3). La restante quantità viene raccolta e esportata in regioni poste ad una distanza dalla fabbrica tale da rendere economicamente conveniente il trasporto su autocarro.

**Tabella 2-3: Destinazione dei PFU generati in Arizona nel 1998 [ADEQ]**

<b>Uso di pneumatici fuori uso</b>	<b>milioni</b>
Recupero energetico/Forni cementizi	0
Esportazione dallo Stato	1
Riutilizzo in prodotti riciclati	0.4
Mercato stradale	2.6

Nel 1990 il governo ha iniziato ad applicare sulla vendita di pneumatici nuovi una tassa corrispondente al 2%, e comunque non inferiore a due dollari, che viene riscossa dai rivenditori ogni trimestre e consegnata al fondo monetario per la gomma. Relativamente ai pneumatici, la tassa media su ciascuno risulta pari a \$1.26, il 10% dei quali viene detenuto dai venditori per la gestione e le spese generali.

Inizialmente il 51.5% dei fondi così raccolti veniva versato per la costruzione del citato impianto di lavorazione vicino a Phoenix, il 41.5% veniva distribuito alle contee, mentre il rimanente 5% è servito al mantenimento ed alla gestione del programma.

Nel 1993, una volta ultimata la costruzione dell'impianto, le contee sono state rese responsabili del programma di riciclaggio di pneumatici ed hanno iniziato a ricevere il 95% delle tasse annuali del fondo monetario della gomma. Le contee si sono addossate l'onere della raccolta dei pneumatici usati a costo zero per rivenditori ed abitanti della stessa contea, e a tal fine hanno incaricato apposite società dietro un compenso medio di 93 dollari per ogni tonnellata raccolta.

Tutti i soggetti che non siano rivenditori o non risiedano nella contea sono tenuti al pagamento di una tassa di smaltimento al momento della “rottamazione” dei propri pneumatici. I fondi monetari raccolti sono resi disponibili all'ADEQ sotto forma di finanziamenti per la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie di riciclaggio di pneumatici.

### 2.2.2 California

La California produce ogni anno quasi 30 milioni di gomme residue. Nel 1990 è stata applicata una tassa di \$0.25 per finanziare la riduzione delle discariche contenenti in totale oltre 45 milioni di gomme.

Il programma è amministrato dalla *California Integrated Waste Management Board* (CIWMB), e la tassa, analogamente a quanto avviene in Arizona, viene riscossa al punto di vendita con 10% ritenuto dal rivenditore di pneumatici per le spese generali, mentre il resto viene depositato nel fondo monetario, generando circa cinque milioni di dollari ogni anno. Sulla base dell'importo raccolto, sembra che circa 8 milioni di gomme evadano la tassa.

Circa il 50% del flusso residuo annuale della gomma è destinato ad utilizzazioni finali alternative (vedi Tabella 2-4).

**Tabella 2-4: Destinazione dei PFU generati in California nel 1998 [CIWMB]**

Uso di pneumatici fuori uso	milioni
Recupero energetico	3.5
Forni cementizi	3.5
Esportazione dallo Stato	0
Riutilizzo in prodotti riciclati	4.3
Mercato stradale	2.7

### 2.2.3 Florida

In Florida il *Tire Program Management* è stato avviato nel 1988 a cura del *Florida Department of Environmental Protection* (FDEP). Prima della sua attuazione vi erano circa 18 milioni di pneumatici accumulati o gettati senza regolamentazione. Attualmente, tale quantità è scesa al di sotto dei 3 milioni di gomme.

I costi di smaltimento variano tra \$0.85 e \$2.00 per pneumatico.

La Florida genera annualmente circa 20 milioni di pneumatici. Il programma è costituito da un fondo dell'amministrazione *Solid Waste Management Trust Fund* che applica una tassa di \$1,00 sulla vendita di ogni pneumatico nuovo. Nel 1998 è stato generato un reddito da oltre \$17,3 milioni. Le utilizzazioni finali delle gomme residue sono descritte nella Tabella 2-5.

---

**Tabella 2-5: Destinazione dei PFU generati in Florida nel 1998 [FDEP]**

<b>Uso di pneumatici fuori uso</b>	<b>milioni</b>
Recupero energetico/Forni cementizi	9.1
Esportazione dallo Stato	0
Riutilizzo in prodotti riciclati	6.3
Mercato stradale	3

### 2.3 Processo di fabbricazione del Polverino

Il polverino di gomma di pneumatico riciclata è costituito principalmente da gomma naturale sintetica, carbone nero (detto nero fumo), zolfo, zinco ossidato e agenti coloranti. I pneumatici vengono macinati attraversando diverse fasi sequenziali al fine di rimuovere filamenti, fibre e frammenti metallici, fino ad arrivare a una gradazione che permetta di produrre poverino di gomma.

Le figure seguenti mostrano i successivi passaggi del processo di riciclaggio dei pneumatici, al fine di ottenere polverino di gomma adatto ad essere incorporato nel bitume o nei conglomerati bituminosi.



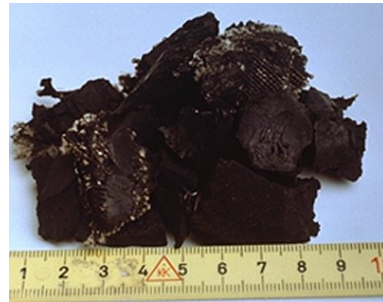
Pneumatici di Automobile



Pneumatici di Camion



Pneumatici dopo la prima fase di triturazione



Particolare della gomma dopo la prima fase di triturazione



Metalli estratti dai pneumatici



Fibre estratte dai pneumatici



Polverino di gomma dopo la fase finale del processo di riciclaggio

---

**Figura 2-5: Fasi del processo di produzione del polverino di gomma di pneumatici riciclata**

---

Il granulato di gomma può essere ottenuto attraverso un *processo* detto *ambientale*, realizzato meccanicamente tagliando la gomma in strisce alla temperatura ambiente, oppure attraverso il *processo criogenico*, che prevede di portare la gomma a temperature molto basse mediante azoto liquido, rendendola fragile e fratturandola con colpi di maglio.

Durante la fase di *triturazione* la gomma subisce diversi cambiamenti, e le caratteristiche che rivestono particolare importanza nel prodotto ottenuto sono la morfologia della superficie della particella di gomma e la granulometria del polverino.

A queste si aggiunge la superficie specifica delle particelle, che costituisce un ulteriore fattore determinante per l'ottenimento di un prodotto adatto all'impiego in leganti e conglomerati bituminosi.

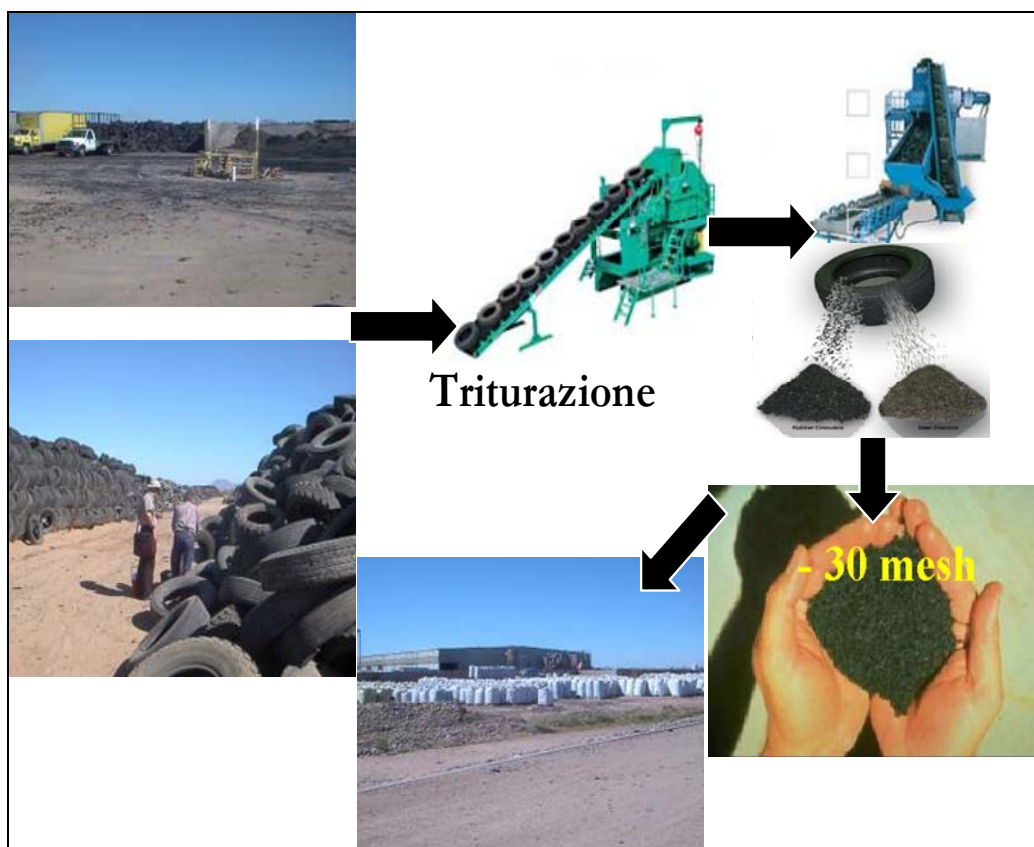


Figura 2-6: Processo di produzione del polverino di gomma a partire da PFU

### **2.3.1 Processo criogenico**

In questo caso la macinazione dei pneumatici avviene una volta raggiunta la temperatura di fragilizzazione della gomma (tra  $-87^{\circ}\text{C}$  e  $-198^{\circ}\text{C}$ ). Per portarsi in queste condizioni, la gomma dei pneumatici viene collocata in un bagno di azoto, e per temperature molto basse diviene estremamente fragile e può essere facilmente frantumata mediante una pressa, ottenendo particelle di dimensione prefissata. Il risultato di questo processo è un granulato di gomma avente superficie praticamente liscia.

Studi realizzati [2-9 e 2-10] dimostrano che la morfologia della gomma triturrata è il fattore che influenza maggiormente le proprietà elastiche conferite alla miscela finale, le quali risultano migliori al diminuire del peso specifico e della dimensione delle particelle e all'aumentare della porosità della superficie dei granuli. L'introduzione nel legante mediante processo wet di particelle di gomma a superficie liscia, come quelle ottenute tramite processo criogenico, comportano rispetto all'impiego di grani porosi un minor grado di reazione col bitume stesso e proprietà elastiche della miscela inferiori.

Ulteriori studi [2-11] hanno evidenziato che il polverino ottenuto tramite processo criogenico ha bisogno di essere irruvidito attraverso un ulteriore passaggio in un molino cracker rotermill o in una apparecchiatura equivalente, al fine di assicurare una reazione completa fra bitume e polverino di gomma, dal momento che la maggior area ottenuta con i sistemi ambientali conferisce al polverino una maggiore reattività con il bitume. Come conseguenza di tali considerazioni, attualmente sul mercato si trovano altri tipi di polverino di gomma prodotti tramite processo criogenico e sottoposti ad una successiva triturazione finale, che può essere del tipo "Crakermill" o "Rotermill". I due processi terminano in una fase di setacciatura centrale finalizzata alla separazione delle particelle di polverino a seconda delle dimensioni, eliminando eventuali contaminanti quali acqua, fibre, minerali o metalli.

### **2.3.2 Processo Ambientale**

Tale processo, come anticipato, permette di ottenere un granulato caratterizzato da una morfologia più adatta alla reazione col bitume, nel quale le particelle di gomma presentano superfici irregolari e porose, molto più estese rispetto a quelle delle particelle ottenute per via criogenica. Seguendo tale metodo viene effettuata una triturazione meccanica alla temperatura ambiente, effettuata per mezzo di lame e coltelli rotanti. Una volta separato dal materiale metallico, il granulato di gomma così ottenuto presenta una granulometria variabile tra 0.5 e 5 mm.

---



Figura 2-7: Esempio di triturazione nel processo ambientale

Originariamente il polverino di gomma impiegato nella produzione di Asphalt Rubber proveniva dal processo ambientale e, principalmente, da pneumatici di automobili. La normativa ASTM D 6114 è stata sviluppata proprio sulla base di questo tipo specifico di polverino, utilizzato in Arizona e California.

In particolare, il *pneumatico di un automobile* è formato approssimativamente dall'85% di gomma e dal 15% di fibre di ferro e carcasse di poliestere. Dopo la vita economica, la percentuale di gomma nel pneumatico si riduce all'83% mentre la quantità di fibre di ferro rimane inalterata.

I *pneumatici di camion* sono composti da una maggior percentuale di gomma naturale rispetto a quelli di automobile. Per produrre un granulato di gomma idoneo all'introduzione nelle miscele bituminose, pertanto, viene suggerito dalla letteratura [2-12] di tenere opportunamente conto di queste differenze, utilizzando, di conseguenza, adeguate percentuali di gomma da pneumatici di autocarro e autovetture.

Nella Figura 2-8 è rappresentata la composizione generica di una gomma di pneumatico di automobile.

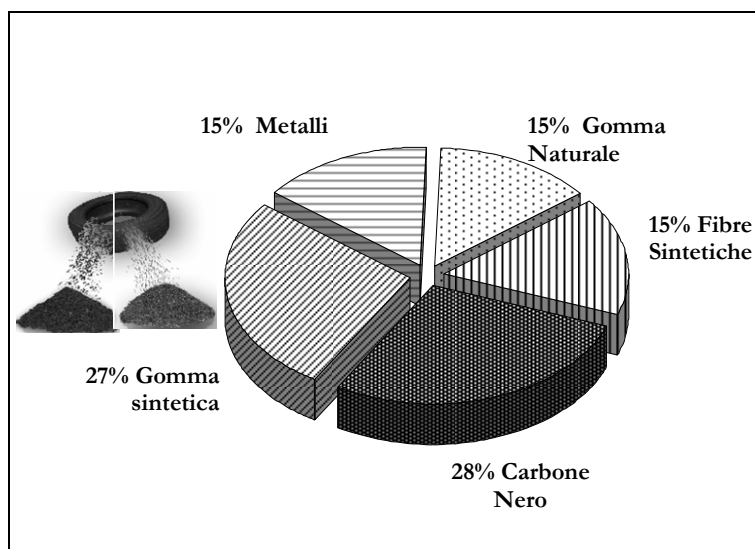


Figura 2-8: Composizione generica di un tipico pneumatico per automobili

Per quanto riguarda la distribuzione della gomma, nel battistrada dei pneumatici è presente principalmente gomma naturale mentre l'interno contiene differenti tipi di gomma sintetica. Nonostante queste differenze, il polverino di gomma può essere trattato come una gomma vulcanizzata dal momento che contiene sia gomma naturale che gomma sintetica. La struttura molecolare della gomma vulcanizzata contiene un numero elevato di incroci formati da una matrice solforosa e da altri agenti, che possono ridurre la mobilità della gomma. I polimeri, incluse le gomme, sono in grado di assorbire liquidi in funzione della loro natura, temperatura, viscosità del liquido, *solvente* e del tipo di polimero.

La provenienza della gomma utilizzata determina la natura chimica e la composizione della stessa, condizionando le prestazioni fornite una volta introdotta nelle miscele bituminose impiegate nelle pavimentazioni stradali. I pneumatici di camion e di automobile sono caratterizzati da tipi significativamente differenti di componenti, che possono condizionare le proprietà finali del legante durante il suo utilizzo in conglomerati bituminosi.

Dal momento che i pneumatici di camion fuori uso rappresentano una buona percentuale delle gomme di scarto totali, si è cominciato ad utilizzare questo tipo di polverino, sia puro (ossia 100% pneumatici di camion) che mescolato con polverino di gomme di automobile. A supportare questa scelta esiste un studio completo eseguito nell'ambito di una collaborazione tra due delle principali aziende europee operanti nel riciclaggio di pneumatici in ambito stradale (Recipneu e Consulpav), insieme alla canadese Recovery Technologies [2-13].



Vari tipi di polverini di gomma prodotti mediante processi differenti (ambientale, criogenico, criogenico seguito da *crackermill*, criogenico seguito da *rotermill* e da rotermill ritrattato) e con gomma di origine diversa (automobile e camion) sono state mescolate con un bitume base (PG 64-16), in modo da produrre bitumi Asphalt Rubber differenti.

Un'ulteriore conclusione a cui è pervenuto tale studio comparativo mostra come non vi sia alcun vantaggio nel sottoporre la gomma ad un'elaborazione intensa di rotermill, dal momento che una doppia elaborazione porta a risultati difficili ed insufficienti rispetto ad una elaborazione semplice.

Il processo criogenico presenta l'importante vantaggio che tutta la gomma ottenuta può essere utilizzata per la produzione di Asphalt Rubber, senza perdite di materiale, comportando un risultato molto importante dal punto di vista economico. Questo tipo di processo riduce, quindi, i costi di produzione, origina un minor scarto, la produzione risulta più uniforme e ha la capacità unica di produrre direttamente ed efficientemente una elevata quantità di materiale molto fine. Inoltre, se si sottopone il polverino ottenuto mediante tale processo ad un successivo trattamento rotermill, si ottiene un prodotto avente caratteristiche ottimali per la reazione col bitume.

Tale conclusione, se da un lato compensa gli svantaggi precedentemente citati riguardo al processo criogenico in termini di rugosità del granulato, dall'altro suggerisce di sottoporre sempre il materiale così ottenuto a un ulteriore trattamento rotermill. Tale tipo di processo ha trovato ampia applicazione, tra gli altri, in Portogallo e Spagna, dove è normalmente utilizzato sin dal 1998.

## 2.4 Impiego nelle infrastrutture stradali

Oltre all'ambito stradale, i PFU sono stati impiegati in vari modi, sia sotto forma di pneumatici interi (sfusi o pressati) che di porzioni, come sottofondi in terreni paludosi, discariche e autostrade (fungendo da isolanti contro fenomeni di suzione per capillarità), oltre che in rilevati di varia natura (es. argini) con funzione stabilizzante, o ancora per realizzare opere di difesa delle coste marine contro l'erosione. Un esempio europeo di applicazioni è rappresentato da una combinazione di terra e porzioni di PFU collegate insieme a strati, ideato negli anni '80 in Francia e denominato PNEUSOL, mentre uno studio molto interessante è stato recentemente effettuato in Texas, dove sono stati comparati tra loro rilevati realizzati sia con terra che con terra mescolata a diverse quantità di gomma, monitorandone la costipazione, l'andamento delle temperature interne, le acque di lisciviazione e valutandone i costi.

Altre applicazioni implicano la trasformazione dei PFU in granulato, che a seconda del tipo di processo impiegato, come visto sopra, possono avere rese anche solo del 60% rispetto al pneumatico di partenza, oltre a comportare costi che aumentano al diminuire della granulometria del prodotto finale.

L'impiego più diffuso dei granulati è relativo alle pavimentazioni, con alcune interessanti applicazioni fonoassorbenti e antivibranti anche in alcune tratte ferro-tranviarie. Una recente applicazione stradale sperimentata in Giappone e Svezia prevede l'applicazione di un manto di granulato di gomma legato con circa il 10% di poliuretani, il quale viene applicato con uno spessore di 4-5 centimetri sulla superficie stradale; presentando una percentuale di vuoti compresa tra il 20 e il 40% e risultando sia drenante che fonoassorbente. Tale tecnica presenta svantaggi legati ai costi elevati e alla capacità di aderire al sottofondo.

Attualmente in Italia vi è uno scarso interesse relativamente ai possibili impieghi nelle infrastrutture, a cui fa eccezione una crescente attenzione verso le applicazioni relative ai conglomerati bituminosi. Relativamente a queste ultime, la gomma può venir incorporata nei manti asfaltici in tre modi principali, definiti rispettivamente *Processo Wet*, *Processo Dry* e *Refinery Blend Process*.

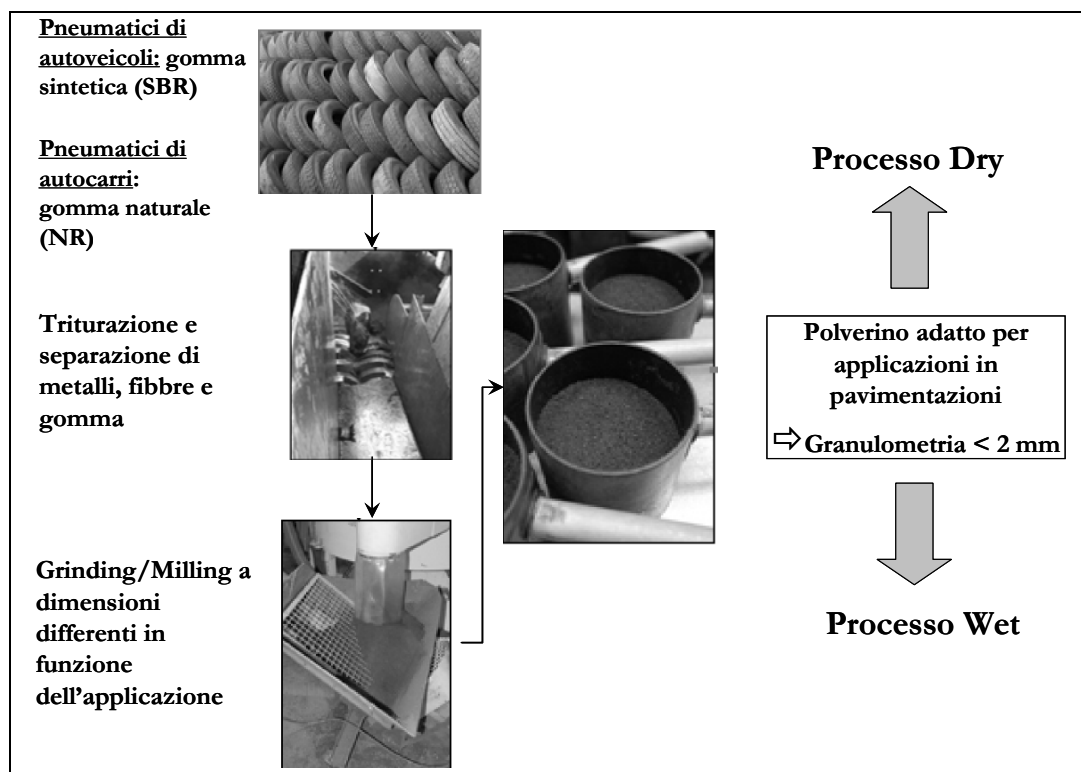


Figura 2-9: schema di produzione e applicazione del polverino di gomma di pneumatici

### 2.4.1 Processo wet

Il processo utilizzato con maggiore diffusione è quello “wet”, che consiste nella modifica del bitume nelle fasi che precedono il confezionamento in centrale dei conglomerati. Risulta, dunque, essere un processo di riciclaggio che riguarda la formulazione del legante. Con tale termine vengono, infatti, indicati tutti i metodi tramite i quali il poverino di gomma viene miscelato con il bitume prima di aggiungere il legante risultante agli aggregati, e che richiede l'impiego di apparecchiature specializzate.

Questo metodo ha superato una serie di riscontri sperimentali riguardo all'influenza della quantità di polverino di gomma impiegato e al processo di reazione con il bitume. Nel processo wet, quando il polverino di gomma (CRM) viene unito al bitume, a seguito della reazione tra i componenti si forma un legante modificato che, introdotto in un conglomerato bituminoso (*Hot Modified Asphalt* - HMA), origina il cosiddetto **Hot Modified Rubber Asphalt Mixes** (HMRA). In tale processo, un impianto specifico mescola il polverino di gomma con il bitume base in quantità ben precise (che nel caso dell'Asphalt Rubber è normalmente del 20% di polverino e 80 % di bitume), controllate da un sistema computerizzato.

La miscela viene poi trasferita in un serbatoio dove viene agitata ad una velocità costante, sempre controllata elettronicamente, per un periodo di tempo che viene definito “periodo di reazione” e che normalmente è compreso tra 45 e 60 minuti. Successivamente si controlla la viscosità del legante così ottenuto, ovvero Asphalt Rubber, al fine di verificare che abbia raggiunto un valore compreso nel range specificato nella normativa ASTM D6114. Una volta raggiunta la viscosità adeguata, il processo di reazione fra bitume e gomma è completo e l'Asphalt Rubber viene pompato nell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, dove viene mescolato con gli aggregati. Si ottiene così un *Hot Modified Asphalt*.

Il fatto di incorporare una percentuale di gomma così elevata nel bitume, porta ad un aumento significativo della viscosità (secondo la norma, la viscosità a 175°C, dopo 45 minuti di reazione, deve essere compresa fra i 1500 cP e i 5000 cP, valori molto al di sopra di quelli ottenuti per bitumi modificati con polimeri). È questa viscosità elevata che permette di utilizzare una percentuale più elevata di legante nel HMRA, requisito fondamentale per l'ottenimento delle prestazioni volute da questo tipo di conglomerati, in particolare per quanto riguarda la riflessione della fessurazione.

Altre possibili applicazioni del Processo wet si hanno, inoltre, nel campo dei trattamenti superficiali, delle membrane (SAM e SAMI) e della sigillatura delle fessure [2-14].



**Figura 2-10: Esempio di impianto per la produzione di Asphalt Rubber**

Tra le modifiche tramite processo wet si possono distinguere due filoni. Il primo e più utilizzato ricorre ad installazioni concepite per fabbricare AR direttamente in cantiere, in prossimità dell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, in modo da evitare la necessità di immagazzinare e trasportare il prodotto in cisterne. La metodologia più recente di praticare la modifica wet consiste, invece, nella produzione di bitumi modificati con polverino, dalle caratteristiche simili a quelli modificati con polimeri, in centrali di produzione molto simili a quelle utilizzate per la produzione di questi ultimi. Il prodotto viene così immagazzinato, controllato e trasportato tramite cisterne, ed in tal modo l'impianto di produzione non necessita di essere installato in prossimità dell'impianto di produzione dei conglomerati a caldo.

## **2.4.2 Processo dry**

In questo processo il polverino di gomma viene mescolato all'aggregato prima dell'aggiunta del bitume al conglomerato, e non necessita di apparecchiature specifiche per la produzione e la posa in opera. Tramite processo dry si ottiene un conglomerato (HMA) caratterizzato dalla sostituzione di una parte dell'aggregato con il granulato di gomma, definito *Rubber Modified Asphalt Concrete* (RUMAC).

Il prodotto originato tramite tale tecnica viene denominata *Rubber Modified Asphalt* o *Rubberized Asphalt* e, grazie a costi di produzione inferiori rispetto al metodo wet, è stato utilizzato negli Stati Uniti in molteplici occasioni. I 30 anni della sua applicazione hanno manifestato, però, una performance a lungo termine inferiore rispetto al metodo wet, portando a non considerare tale materiale come una scelta economicamente conveniente per la riabilitazione di pavimentazioni.

---

Tale differenza di performance deriva da due considerazioni, la prima delle quali è legata alla difficoltà di ottenere una distribuzione uniforme del polverino quando addizionato al conglomerato come filler, portando alla fessurazione in minor tempo, a causa di fenomeni di riflessione della fessura che portano frequentemente alla disaggregazione della superficie stradale. La seconda riguarda il tempo di reazione relativo all'interazione fra bitume e gomma. Il polverino di gomma sostituisce, infatti, il filler nella composizione granulometrica del conglomerato e, a causa del breve tempo di miscelazione, non si verifica una reazione sufficientemente significativa fra bitume e gomma.

Inoltre, il comportamento della gomma in questo caso risulta più complesso e difficile da governare, in quanto non si comporta esattamente come un inerte, dal momento che mediamente circa il 10% interagisce col bitume. Le miscele stradali così ottenute necessitano di una maggior quantità di legante. Il processo dry più conosciuto è il già citato PlusRide®, nato in Svezia alla fine degli anni '60 e sviluppato, successivamente, negli Stati Uniti.

In generale, tale processo ha fornito risultati contrastanti, dovuti probabilmente alla diversa gestione delle molteplici variabili in gioco, quali il comportamento della gomma a caldo, la scelta della curva granulometrica in modo che lasci spazio alla deformazione della gomma, ecc. Le applicazioni fatte in Alaska, ad esempio, hanno mostrato risultati soddisfacenti caratterizzati da una buona resistenza al gelo, mentre in California è stata riscontrata una miglior resistenza all'abrasione. Esperienze in altri stati nordamericani, quali Minnesota e Maryland, non hanno mostrato vantaggi apprezzabili, limitandosi ad evidenziare costi più elevati.

Esistono, inoltre, prodotti commerciali ottenuti tramite questo tipo di processo, come ad esempio in Francia, funzionali al miglioramento delle caratteristiche di fonoassorbente, alle quali si accompagnano migliori caratteristiche di aderenza, oltre che una riduzione delle vibrazioni e del cracking termico.

Se eseguita a regola d'arte, l'applicazione di questi conglomerati produce buoni risultati sia in climi caldi (come dimostrano le esperienze in Arizona, California, Texas), sia in climi freddi (Alaska, Nebraska, Alberta), consentendo generalmente di riciclare una maggior quantità di gomma rispetto ai processi wet. Nelle miscele di tipo RUMAC, infatti, il granulato di gomma introdotto rappresenta dal 2.5 al 5% in peso dell'aggregato, ossia da due a quattro volte il quantitativo di gomma impiegabile nel processo wet, con i conseguenti vantaggi ambientali.

---

Gli svantaggi di tale processo derivano, oltre che dai maggiori costi rispetto ai conglomerati convenzionali, dovuti alla necessità di ricorrere ad aggregati specialmente gradati per permettere fisicamente l'incorporazione del polverino di gomma, dal fatto che un errore nel loro confezionamento non consente di effettuarne correzioni successive, dando così origine a problemi di compattazione, sgranamento e perdita di materiale in opera [2-15].

Inoltre, dai risultati raccolti sinora il metodo wet consente di ottenere performance superiori, probabilmente dovute al fatto sia che in questo caso la formulazione del conglomerato utilizza le percentuali tradizionali di legante, sia che nei prodotti ottenuti col processo dry una minore quantità di gomma, soprattutto le particelle più fini, interagisce col bitume.

Nonostante tali aspetti negativi, ed in controtendenza rispetto agli altri paesi occidentali, in Italia è sino ad ora stato preferito il metodo dry, come dimostrano studi effettuati presso alcune Università, come ad esempio Roma, Palermo, Bologna, oltre che alcune recenti applicazioni sperimentali su strada, di una delle quali sono stati pubblicati i risultati (vedi §2.6.1).

### **2.4.3 Processo di miscelazione in raffineria - Refinery Blend Process**

Questo processo prevede che la digestione del polverino di gomma nell'asfalto avvenga in una raffineria nel processo terminale di miscelazione, definito ***Terminal Blend Process***. Tale metodo viene utilizzato in Texas dal 1989, e ricorre ad una quantità di polverino di gomma circa dimezzata rispetto al processo wet, con percentuali inferiori al 10%. Inoltre, anche il contenuto di bitume nel conglomerato risulta inferiore al 6% del peso degli inerti.

In particolare, si fa ricorso a un polverino di granulometria fine, inferiore allo 0.5, al fine di favorirne la miscelazione col bitume, e può, eventualmente, essere prevista l'aggiunta di un polimero SBS, o un altro elastomero, per aumentare la stabilità allo stoccaggio del legante ottenuto.

Nemmeno questo processo, analogamente al processo dry, necessita di apparecchiature speciali, e può essere utilizzato con inerti di qualunque granulometria, continua, discontinua o porosa.

Uno studio eseguito presso la *Universidade Federal de Santa Catarina* (Brasile) [2-16] ha valutato l'effetto dell'addizione del polverino di gomma a conglomerati bituminosi tramite tale metodo, comunemente definito metodo texano, nel corso della quale la reazione del polverino col bitume è stata osservata al microscopio. Tale studio ha proceduto all'ottimizzazione della percentuale di gomma con l'aiuto del metodo Marshall, mentre la performance dei conglomerati ottenuti è stata valutata tramite prove di tensione indiretta, di modulo resiliente e prove di fatica in campioni Marshall.

---

All'interno del range di addizione di polverino preso in considerazione, è stato dimostrato come la densità di un conglomerato diminuisca all'aumentare della quantità di gomma. La stabilità Marshall presenta una tendenza massima in corrispondenza di una percentuale di polverino pari allo 0.7% sul peso totale del conglomerato e al 5.3% di legante. Un'ulteriore conclusione a cui è giunto lo studio citato riguarda l'aumento dei vuoti degli aggregati minerali all'aumentare della quantità di polverino, mentre l'addizione di quest'ultimo risulta produrre una diminuzione dello stress di tensione indiretta.

Va, inoltre, menzionato uno studio effettuato presso l'*Universidad Politécnica de Madrid* [2-17] che ha esaminato leganti modificati con un ridotto contenuto di polverino di gomma, ovvero leganti anch'essi ottenuti mediante *Terminal Blend Process*.

Tali bitumi mostrano prestazioni caratterizzate da penetrazione compresa tra 50 e 70 dmm e un punto di rammollimento superiore a 58°C. Secondo i criteri indicati nel citato studio, a seconda del tipo di granulometria degli inerti la percentuale di polverino varia tra il 5.7%, nel caso di granulometria discontinua, e il 5% per granulometria continua, arrivando al 4.5% in caso di conglomerato poroso.

Le analisi di laboratorio sono state condotte mediante prove Marshall, di compressione sott'acqua e di modulo dinamico, confrontando due conglomerati aventi uguale granulometria (S-20) e contenuto in legante (4.6%), il primo ottenuto a partire da bitume modificato ed il secondo dal corrispondente bitume base 60/70. Dai risultati ottenuti (vedi Tabella 2-6) si osserva che l'applicazione della modifica consente un aumento della stabilità Marshall ed un notevole incremento della resistenza alle deformazioni plastiche, misurata mediante la prova di pista in laboratorio. Il modulo dinamico, invece, diminuisce nel caso di introduzione del polverino.

**Tabella 2-6: Confronto tra conglomerato convenzionale e ottenuto mediante Terminal Blend Process**

Prova	Parametro	Congl. 60/70	Congl. TBP
Marshall	Stabilità [kN]	15.4	16.5
	Deformazione [mm]	2.3	2.1
	Hm [%]	6.0	7.5
Compr. sott'acqua	Res. residua [%]	84	82
Pista di laboratorio	V105-120 [mm/min]	6	1.5
Modulo dinamico	a 20°C, 10 Hz [MPa]	6'450	5'230

La Figura 2-11 mostra le curve di fatica ottenute, che indicano un comportamento nettamente migliore del conglomerato ottenuto a partire da bitume modificato con polverino.

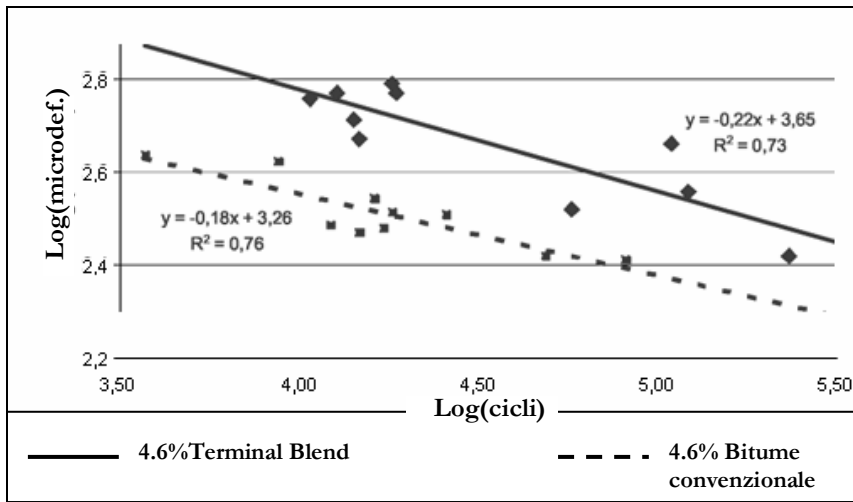


Figura 2-11: Confronto tra le curve di fatica del conglomerato convenzionale e di quello ottenuto mediante Terminal Blend Process [2-17]

## 2.5 Stato dell'arte delle applicazioni di CRM

I processi illustrati si differenziano non solo per le caratteristiche dei prodotti ottenuti, ma anche per la quantità e la granulometria della gomma impiegata, nonché per le attrezzature necessarie ad effettuare la produzione in impianto. La scelta del tipo di processo vincente è un argomento complesso data l'estrema variabilità dei risultati ottenuti. La letteratura riporta, infatti, risultati a volte contraddittori relativi all'impiego dei diversi metodi.

Il processo wet negli ultimi 30 anni ha dimostrato di permettere di ottenere conglomerati stradali con prestazioni migliori, sia partendo da bitume normale che da bitume modificato, che di seguito verranno riferiti come “conglomerati convenzionali”.

Il processo dry è ampiamente utilizzato in Southern California, dove i risultati sembrano molto simili a quelli ottenuti con il processo wet.

Il più recente processo terminal blend, messo a punto negli ultimi 5 anni e utilizzato soprattutto in Texas, ha sinora ottenuto buoni risultati. Come anticipato, tale metodo prevede un contenuto di bitumi nel conglomerato inferiore, massimo 6% (nella maggior parte dei casi 5.5%, come nei conglomerati convenzionali) rispetto all'8.5% utilizzato nel processo wet. Questo comporta una minor ricopertura degli aggregati, che può dar luogo ad una accelerazione del processo di invecchiamento per ossidazione e diminuire la resistenza alla propagazione di fessure.



I proponenti di questa tecnologia indicano che le prove SUPERPAVE® (vedi Capitolo 5) dimostrano che le pavimentazioni così ottenute sono equivalenti a quelle derivate dagli altri processi. Per confermare tali affermazioni risultano necessarie ulteriori sperimentazioni durante un periodo di osservazione più lungo di quanto attualmente disponibile.

Al fine di tracciare un quadro dello stato di fatto relativo alle applicazioni di CRM in conglomerati stradali, si riporta di seguito una rassegna delle diverse applicazioni del polverino di gomma sinora effettuate in vari paesi, con particolare riferimento ai metodi wet e dry, data la ridotta bibliografia relativa al peraltro recentissimo metodo terminal blend. I risultati prestazioni attualmente ottenibili tramite il processo wet verranno poi dettagliati nel successivo Capitolo 3.

### 2.5.1 Processo Wet

Le applicazioni ottenute tramite processo wet sono quelle nettamente più diffuse, ed in molti paesi quali Stati Uniti, Sud Africa e Canada sono praticamente l'unico metodo utilizzato. Iniziano a diffondersi anche in Europa, dove la penisola iberica costituisce una sorta di precursore nella loro attuazione.

Come anticipato, il termine Asphalt Rubber viene definito secondo la norma ASTM D6114-97 (*Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*) come una miscela di legante bituminoso con un contenuto pari almeno al 15% in peso di gomma di pneumatici riciclati, oltre a determinati additivi, e nella quale la gomma ha reagito col bitume ad elevate temperature in modo sufficiente da provocare il rigonfiamento delle proprie particelle. Il granulato di gomma viene solitamente miscelato al legante bituminoso in quantità comprese tra il 18% ed il 25% rispetto al peso totale del legante, e durante la reazione col bitume il CRM rammollisce e rigonfia in maniera diversa a seconda della temperatura di miscelazione, del tempo durante il quale tale temperatura si mantiene, del tipo e energia di miscelazione meccanica imposta, oltre che in funzione di morfologia e dimensioni del CRM e dell'eventuale presenza di aromatici nel bitume.

Ai fini di ottenere un buon rigonfiamento del granulato, conviene utilizzare bitumi molli o aggiungere oli aromatici, dal momento che durante la reazione gli oli aromatici presenti nel bitume vengono assorbiti all'interno delle catene polimeriche che costituiscono i componenti principali della gomma, sia naturale che sintetica.. Inoltre, è possibile incrementare il grado di reazione aumentando la superficie specifica del CRM, oltre che gli sforzi di taglio dovuti alla miscelazione meccanica e la temperatura di reazione.

Ai fini del raggiungimento della viscosità richiesta, si deve agire sul tempo di reazione, imponendo il minimo necessario al raggiungimento di una viscosità pressoché stabile.

Ai fini dell'ottenimento di idonee condizioni della miscela finale, generalmente si ricorre a temperature di reazione pari a 170°, 190° o 215° C, durate comprese tra 45 minuti e 2 ore circa e sforzi di taglio non inferiori a 500 rpm.

Un altro accorgimento da tenere consiste nel confezionamento del conglomerato in tempi brevi dopo la preparazione del legante, e comunque dopo non più di 16 ore, ai fini di evitare un decadimento delle proprietà reologiche dello stesso. Dalla pratica è risultato che conviene, comunque, evitare di mantenere riscaldate le miscele che non trovano impiego immediato, facendole invece raffreddare e riscaldandole solo al momento del loro impiego.

### 2.5.1.1 ARIZONA

Come visto, le prime applicazioni di granulato di gomma in leganti stradali hanno avuto luogo in Arizona, ed in tale contesto risulta coerente l'ampia sperimentazione dei CRM nei conglomerati bituminosi che l'*Arizona Department of Transportation* (ADOT) ha condotto a partire dagli anni '70, attraverso innumerevoli applicazioni pratiche del processo wet. Nello specifico, nell'arco di quaranta anni l'ADOT ha realizzato oltre 380 progetti utilizzando l'AR, per la maggior parte dei quali (circa 270) sono stati utilizzati sottili rivestimenti AR-OGFC. Prendendo in considerazione il solo periodo successivo al 1988, l'ADOT ha realizzato approssimativamente 500 km di pavimentazioni utilizzando HMRA.

Mentre le prime applicazioni si limitavano all'impiego in SAM, SAMI e sigillanti, a partire dalla metà degli anni '80 ha avuto inizio un vasto ricorso a manti di usura ottenuti mediante l'impiego di conglomerati da bitume modificato AR, sia in miscele aperte che chiuse a granulometria discontinua, attraverso l'applicazione di un granulato di gomma di dimensione massima pari a 2 mm. Per tali applicazioni si è generalmente fatto ricorso ad un legante del tipo AC-10 e ad una percentuale di gomma pari al 20% del peso del bitume, senza l'aggiunta di oli aromatici. I manti di usura ottenuti a partire da miscele aperte, aventi spessori inferiori a 40 mm, sono stati utilizzati per il rivestimento di pavimentazioni degradate sia rigide (in PCC) che flessibili, mentre le miscele chiuse a granulometria discontinua sono state impiegate in spessori inferiori a 60 mm, principalmente su pavimentazioni flessibili. Il contributo del CRM si traduce in un inspessimento delle pellicole di legante attorno al materiale arido, ottenendo una maggior durabilità della resistenza alla riflessione della fessurazione della pavimentazioni.

Le miscele aperte per strati superficiali, dette ***Open Graded Friction Course*** (OGFC) trovano impiego soprattutto in strati di usura lungo la rete viaria urbana, al fine di migliorare le condizioni di comfort e di sicurezza, oltre che per esigenze di tipo estetico legate all'integrità della pavimentazione. Le miscele chiuse a granulometria discontinua, dette ***Gap-Graded Friction Course*** (GGFC), vengono invece impiegate principalmente per interventi di manutenzione di pavimentazioni ampiamente fessurate.

---

Mentre per le miscele OGFC il contenuto di legante è tipicamente attorno al 9-10%, per le miscele GGFC tale valore si attesta tra 6.5 e 8.5%. Le prime, precedentemente alla diffusione del protocollo SUPERPAVE®, venivano dimensionate applicando il procedimento Marshall nel rispetto di un prestabilito valore limite inferiore della stabilità: per valori risultanti inferiori a 1'000 libbre (circa 450 kg), la formulazione doveva essere corretta, diminuendo il contenuto di legante o aumentando la quantità di filler tramite aggiunta di calce idrata o cemento Portland. Per le GGFC, invece, veniva applicata la metodologia Marshall senza imporre un valore limite inferiore per la stabilità della miscela, prevedendo il 5% di vuoti e calcolando di conseguenza il contenuto di legante.

Nell'ultimo ventennio l'utilizzo di conglomerati **ARFC (Asphalt-Rubber Friction Course)** è stato esteso alla riabilitazione di molte pavimentazioni in cemento Portland (PCCP). Quando applicato direttamente su di una pavimentazione esistente, in caso questa sia strutturalmente sana lo spessore di ricoprimento è normalmente di circa 2.5 cm. In alcuni casi il rivestimento può essere più sottile ed arrivare sino a 1.9 cm, mentre se lo strato di riabilitazione in **AR-ACFC (Asphalt-Rubber Concrete Friction Course)** viene applicato in abbinamento ad un trattamento tipo SAMI, oppure nel caso di pavimentazioni nuove, lo spessore è tipicamente di circa 1.5 cm. Nel caso di applicazioni per il miglioramento delle caratteristiche strutturali di pavimentazioni esistenti, lo strato in AR-ACFC viene generalmente abbinato ad uno strato in AR-AC, il quale presenta generalmente uno spessore inferiore a 5 cm.

Ricercatori dell'ADOT hanno effettuato negli ultimi anni una serie di prove di modulo complesso [2-18] che hanno consentito di valutare le prestazioni di miscele AR sia di tipo OGFC che GGFC, comparandole con quelle offerte dalle miscele tradizionali ed arrivando a una spiegazione di tipo meccanico delle notevoli performance mostrate in opera dalle miscele wet durante oltre trent'anni di applicazioni.

#### 2.5.1.2 CALIFORNIA

Il *California Department of Transportation* (Caltrans) ha indagato le possibilità d'uso del CRM per pavimentazioni stradali a partire dal 1978, prendendone in considerazione l'applicazione su pavimentazioni esistenti sia rigide che flessibili, eventualmente con l'interposizione di SAMI [2-19].

Dopo una prima sperimentazione su miscele sia wet che dry, i migliori risultati delle prime hanno convinto all'utilizzo del solo processo wet, applicato a miscele chiuse, dette **Asphalt Rubber Hot Mix-Dense Graded** (ARHM-DG) oppure a miscele chiuse con discontinuità granulometrica, ovvero **Asphalt Rubber Hot Mix-Gap Graded** (ARHM-GG).

Le applicazioni di miscele di tipo dry hanno, infatti, mostrato problemi legati alla formazione di buche. Anche le prime applicazioni di miscele wet non sono risultate esenti da problemi, originando fenomeni di spogliamento e di fessurazione anticipata a causa dei bassi contenuti di legante.

L'evoluzione delle tecniche di produzione ha, successivamente, condotto a leganti AR in grado di fornire buone prestazioni, come è emerso dall'attività di monitoraggio dello stesso Caltrans, che sottolinea le migliori caratteristiche di durabilità, di controllo della fessurazione e di resistenza all'azione aggressiva di pneumatici chiodati o catene mostrate dalle pavimentazioni realizzate ricorrendo a tali materiali. Tali miglioramenti sono ufficialmente riconosciuti a livello normativo, dal momento che in California i criteri di dimensionamento degli strati di conglomerato bituminoso, per una vita utile della pavimentazione stabilita pari a 10 anni, tengono conto dell'utilizzo di leganti AR, per i quali vengono imposti spessori inferiori rispetto ai leganti tradizionali.

A parità di spessore, infatti, il grado di irrigidimento per ossidazione di un HMRA-GG risulta inferiore a quello di un conglomerato bituminoso chiuso tradizionale, rispetto al quale l'HMRA-GG sopporta deflessioni notevolmente superiori senza presentare fessure. Inoltre, un ulteriore vantaggio mostrato dalle applicazioni wet è rappresentato dal riciclaggio di tali pavimentazioni che in California viene effettuato con successo dal 1994.

Il diffondersi della pratica dell'impiego del CRM e l'esecuzione di ulteriori studi e sperimentazioni, hanno condotto alla definizione di linee guida per il progetto e la costruzione di pavimentazioni mediante leganti AR [2-14].

Tra i vantaggi emersi durante l'applicazione e il monitoraggio di pavimentazioni Asphalt Rubber in California si evidenziano:

- un maggiore contenuto di legante, che porta ad un aumento della resistenza alla fessurazione superficiale per distorsione termica e alla fessurazione di richiamo, della resistenza all'invecchiamento, all'ossidazione e a fatica;
  - un aumento della viscosità e della temperatura di rammollimento del legante, che conducono ad un miglioramento della resistenza all'ormaiamento;
  - un maggior spessore della pellicola di legante e una tessitura più aperta, con la conseguente riduzione delle emissioni sonore, il miglioramento della resistenza allo spogliamento e l'attenuazione dei fenomeni di splash e di spray in caso di pioggia;
  - un aumento della persistenza nel tempo della colorazione scura della pavimentazione, che porta ad un maggiore contrasto e ad un miglioramento della visibilità, specialmente in condizioni notturne;
-

- riduzione degli spessori posti in opera e prestazioni migliori e più durevoli, con conseguenti minori costi di costruzione e manutenzione;
- vantaggi ambientali derivanti dal riciclaggio di pneumatici fuori uso.

Tra i limiti riscontrati nell'impiego dell'AR vengono, invece, riportati:

- più elevati costi unitari di costruzione, compensati però dai minori spessori e dalla maggiore vita utile dell'opera;
- variabilità dei risultati ottenuti in passato, causati da problemi di realizzazione o condizioni climatiche sfavorevoli ed oggi superati grazie all'introduzione di opportune specifiche per il processo di costruzione;
- limiti di efficacia di ricariche in conglomerati AR nel caso di pavimentazioni con spessori delle fessure superiori a 12.5 mm;
- problemi di raffreddamento del conglomerato durante il trasporto in caso di eccessiva distanza del cantiere dall'impianto di produzione.

### 2.5.1.3 TEXAS

Il *Texas Department of Transportation* (TxDOT) e il *Texas Transportation Institute* (TTI) hanno ampiamente valutato i possibili prodotti per pavimentazioni stradali ottenibili mediante il riciclaggio di gomma di pneumatici, conducendo svariate sperimentazioni sulle applicazioni in SAM (***Stress-Absorbing Membrane***), SAMI (***Stress-Absorbing Membrane Interlayer***), sigillanti per fessure e giunti e, infine, conglomerati bituminosi.

In particolare, gli studi fino ad oggi condotti hanno evidenziato come i leganti per pavimentazioni stradali modificati con CRM secondo processo *wet* siano caratterizzati da una maggior vita utile, derivante dall'aumento della resistenza a fatica rispetto ai leganti tradizionali.

Sono, inoltre, emersi vantaggi legati alla riduzione del grado di ossidazione [2-20] ed al miglioramento di entrambi gli estremi del Performance Grade (PG - vedi Capitolo 5) offerto dal legante AR. Quest'ultimo parametro, in particolare, è risultato dipendere soprattutto dal quantitativo di gomma, dall'azione di taglio esercitata durante la miscelazione, dalla temperatura della stessa e dal tempo di maturazione, all'aumentare del quale si verifica un maggior incremento del PG del legante.

Come evidenziato da analisi di laboratorio e, contemporaneamente, di tipo economico [2-15], pavimentazioni AR consentono con buona probabilità di raggiungere, rispetto ai conglomerati tradizionali, un aumento della vita utile pari o superiore al valore del 15-20%, che rappresenta la soglia oltre la quale si ha un rapporto costi/benefici favorevole.

---

#### 2.5.1.4 FLORIDA

La prima indagine relativamente all'utilizzo di polverino di gomma di pneumatico in ambito stradale è stata eseguita nel 1970 dal *Florida Department of Transportation* (FDOT), al fine di valutare le potenzialità sia di membrane tipo SAMI che di leganti bituminosi sigillanti. I risultati delle sperimentazioni condotte sono stati raccolti nell'agosto del 1980 in un rapporto presentato al dipartimento dei trasporti statunitense, a seguito del quale l'FDOT ha proceduto alla realizzazione di diversi progetti dimostrativi che hanno consentito la messa a punto di una serie di specifiche per l'uso del polverino di gomma nei diversi leganti e conglomerati bituminosi.

Attualmente in Florida, oltre che per la produzione di SAMI, si ricorre al processo wet principalmente per realizzare strati superficiali mediante conglomerati bituminosi sia OGFC che DGFC, applicati in nuove costruzioni o come riabilitazione di pavimentazioni esistenti. L'impiego dei conglomerati *open grade* viene generalmente prescritto per le infrastrutture *multilane* con velocità di progetto non inferiori a 75 km/h, mentre negli altri casi si ricorre a conglomerati *dense grade*.

In questo stato, la massima dimensione nominale ammessa per il CRM, ottenuto esclusivamente tramite macinazione a temperatura ambiente, è pari a 0.425 mm nei conglomerati aperti e 0.18 mm nei conglomerati chiusi, ed i contenuti tipici di CRM in percentuale sul peso del legante sono pari, rispettivamente, al 5 e al 12%. Vengono, inoltre, definite una serie di specifiche relative alle proprietà fisiche e chimiche del CRM, al processo di miscelazione col legante, il cui tempo minimo deve essere di 15 minuti, ed alla viscosità minima del legante modificato.

Per i conglomerati AR si ricorre a contenuti di legante, per OGFC e DGFC, pari rispettivamente a 7.1 e 6.5% del peso totale. Nel caso dei conglomerati chiusi vengono, inoltre, fissati il valore minimo della stabilità Marshall, pari a 1'500 libbre (circa 680 kg), e l'intervallo di accettabilità dello scorrimento, compreso tra 2.00 e 3.50 mm. Vengono, infine, imposti la percentuale minima del 15.5%, per i vuoti dello scheletro minerale (VMA), l'intervallo di accettabilità tra il 4 e il 6% dei vuoti d'aria nella miscela, e il contenuto effettivo di bitume minimo pari al 5.5%.

#### 2.5.1.5 REPUBBLICA DEL SUD AFRICA

In Sud Africa i conglomerati bituminosi modificati con CRM sono stati applicati sin dagli anni '80, e durante i primi dieci anni di impiego ne sono state prodotte più di 150'000 ton, principalmente mediante processo wet. Le elevate prestazioni ottenute hanno condotto ad un ampio utilizzo di questo tipo di materiali, grazie alla loro superiore capacità strutturale osservata in opera [2-21 e 2-22], ed alla maggior vita utile degli interventi di riabilitazione espressa dal ritardo nella comparsa di fessure di richiamo.

---

Nel dimensionamento degli strati superficiali in conglomerato AR vengono utilizzati gli stessi coefficienti di riduzione utilizzati in California, che consentono di compensare i maggiori costi di produzione dei leganti. A questo va aggiunto il risparmio comportato dalla durabilità delle pavimentazioni, che a parità di condizioni sono risultati passare dai 12 anni delle pavimentazioni tradizionali ai 23 delle pavimentazioni AR.

Anche nel caso del Sud Africa è stata definita una serie di specifiche che sia i materiali che i processi impiegati che i prodotti ottenuti devono rispettare, richiedendo materie prime di elevata qualità, che nel caso del CRM si traduce in una granulometria uniforme, ricavata esclusivamente mediante processo ambientale, oltre ad un contenuto minimo del 30% di gomma naturale.

Durante oltre vent'anni sono stati esaminati conglomerati AR di diversi tipi (aperti, chiusi a granulometria continua, chiusi con discontinuità granulometriche, drenanti) e tutti hanno evidenziato ottime prestazioni.

Rispetto ai conglomerati tradizionali hanno, infatti, mostrato una maggior resistenza ai processi di ossidazione e invecchiamento, alla fessurazione di richiamo, allo sgranamento, alla formazione di buche, oltre che alla rottura per fatica, denotando un'ottima capacità strutturale residua.

A fronte delle prestazioni ottenute, i conglomerati AR sono risultati particolarmente convenienti anche dal punto di vista economico e adatti all'impiego su strade ad elevato traffico o su pavimentazioni degradate, per le quali l'applicazione di uno strato superficiale in AR riduce la frequenza degli interventi di manutenzione.

#### 2.5.1.6 PORTOGALLO

In Portogallo, secondo l'*Impresa Nacional de Reciclagem de Pneus* (Recipneu Lda), ogni anno si contano circa 50'000 tonnellate di pneumatici fuori uso. A fronte di questi dati è aumentato l'interesse per il possibile riciclaggio della gomma in ambito stradale e, nel 1999, l'amministrazione stradale portoghese (ICERR) ha approvato l'utilizzo di conglomerati asfaltici con Asphalt Rubber per la riabilitazione di alcuni tratti lungo due strade nazionali, EN 104 e EN 105, per un'estensione totale di circa 30 km. Prima dell'intervento tali tratti si trovavano in stato di avanzato deterioramento, denotando ampi fenomeni di disgregazione e fessurazione. La loro particolare localizzazione, in corrispondenza dell'attraversamento di aree residenziali, ha fatto scartare il ricorso ad una soluzione di tipo tradizionale a causa di problemi legati alle limitazioni di quota, preferendo una riabilitazione mediante la stesura di strati in neo conglomerato Asphalt Rubber di spessore variabile, seguito da un sottile strato di usura in conglomerato Asphalt Rubber gap graded.

Essendo la prima applicazione di questo tipo sul territorio nazionale, il *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (LNEC) è stato incaricato sia di seguire i lavori di riabilitazione che di studiare in laboratorio le proprietà di leganti e conglomerati AR impiegati, al fine di raccogliere una serie di informazioni funzionali alla redazione di un documento contenente le raccomandazioni per l'utilizzo in Portogallo di queste tecnologie, in modo da consentire la diffusione delle pavimentazioni AR.

L'attività del LNEC si è focalizzata, principalmente, sulla caratterizzazione strutturale delle pavimentazioni prima e dopo la riabilitazione, sull'analisi di laboratorio delle proprietà dei leganti e della gomma utilizzati, sia durante il processo di produzione che di modifica (digestione), oltre che sulla caratterizzazione meccanica dei conglomerati asfaltici ottenuti. Una volta conclusi i lavori di riabilitazione, il LNEC ha monitorato alcuni punti significativi della pavimentazione al fine di valutarne le performance nel lungo periodo [2-23].

Successivamente, considerando gli stessi tratti di pavimentazione, presso LNEC è stato effettuato un ulteriore studio ai fini di valutare le performance a tre anni di distanza dalla costruzione e gli effetti di un eventuale stoccaggio, il quale può verificarsi quando un qualunque problema non consenta, dopo la reazione tra bitume base e gomma, l'immediata applicazione degli stessi per la fabbricazione del conglomerato.

In particolare, è stata valutata la stabilità allo stoccaggio sia mediante Tuben Test, eseguito secondo la norma ASTM D5892, sia mediante una variante di questo metodo nella quale i campioni sono stati lasciati in forno a 130°C per 5 giorni e successivamente riscaldati a 180°C ed agitati per 45 minuti.

I risultati ottenuti mostrano come lo stoccaggio in condizioni statiche modifichi le proprietà dell'Asphalt Rubber, con la viscosità che diminuisce sensibilmente nella parte superiore del campione, mentre aumenta nella parte inferiore dello stesso, probabilmente a causa di una separazione della gomma osservabile anche visivamente. [2-24].

La Tabella 2-7 e 2-8 mostrano i risultati delle prove di stabilità allo stoccaggio eseguite con entrambi i metodi.

---



Tabella 2-7: Stabilità allo stoccaggio determinata mediante Tuben Test

Proprietà	Legante prodotto in laboratorio		Legante prod. in impianto	
	tempo di digestione 1 ora		tempo di digestione sconosciuto	
	Prima dello stoccaggio	Dopo 4gg di stoccaggio	Prima dello stoccaggio	Dopo 4gg di stoccaggio
Viscosità a 175°C [cP]	3250	Sup. 2438 Inf. 5188	3400	Sup. 1844 Inf. 8500
Penetr. a 25°C, 5s [10 <sup>-1</sup> mm]	49	Sup. 46 Inf. 49	37	Sup. 33 Inf. 34
Punto Ramm. [°C]	66.4	Sup. 63.0 Inf. 67.3	67.1	Sup. 64.6 Inf. 68.9
Resilienza a 25°C [%]	24	Sup. 18 Inf. 23	27	Sup. 29 Inf. 33

Tabella 2-8: Stabilità allo stoccaggio determinata mediante variante al metodo Tuben Test

Proprietà	Prima dello stoccaggio	Dopo 1 giorno di stoccaggio		Dopo 5 giorni di stoccaggio
	Legante da lab. - digest. 45 min.	Legante da lab. - digest. 45 min.	Legante da impianto digest. scon.	Legante da impianto digest. scon.
	Viscosità a 175°C [cP]	2375	3813	3400
Penetr. a 25°C, 5s [10 <sup>-1</sup> mm]	-	36	37	34
Punto Ramm. [°C]	-	68.9	67.1	67.5
Resilienza a 25°C [%]	-	-	27	20

Dalle analisi di laboratorio si è notato che lo stoccaggio di questo tipo di bitume induce modificazioni nelle proprietà della miscela bitume-polverino. Tali prove sono state eseguite simulando lo stoccaggio dei bitumi AR e nonostante i risultati ottenuti non siano stati sufficienti alla definizione delle condizioni ammissibili di stoccaggio di questo tipo di materiale, sono state osservate le correlazioni esistenti tra tempo di digestione, condizioni di stoccaggio e deformazione permanente dei conglomerati risultanti, quest'ultima misurata mediante *Wheel Tracking Test*. In particolare si è osservato che i conglomerati prodotti con maggiori tempi di digestione presentano una maggior deformazione permanente rispetto a quelli prodotti con tempi di digestione inferiori alle 3 ore. Lo stoccaggio dei bitumi AR in forno a 130° per un giorno non risulta influenzare le performance del conglomerato, mentre cinque giorni a 130° causano un peggioramento delle prestazioni. Inoltre, lo stoccaggio del bitumi per tre giorni a temperatura ambiente seguito da riscaldamento e miscelazione non ne a intaccato le proprietà in modo significativo.

In tal modo risulta possibile, ai fini del controllo della qualità della produzione, prelevare piccoli campioni dall'impianto e portarli in laboratorio, dove possono essere testati anche ad alcuni giorni di distanza.

Considerando tempi di digestione compresi tra 45 minuti e 6 ore, non è stata evidenziata una variazione sensibile alla penetrazione a punto di rammollimento, mentre per quanto riguarda viscosità e resilienza, queste sono risultate variare significativamente in funzione del tempo di digestione, pur rimando all'interno dei limiti specificati nella normativa ASTM.

L'influenza della percentuale di polverino di gomma considerato, compreso tra il 17 e il 21%, non ha influito in maniera significativa sulle proprietà del legante, mentre i risultati di prove a fatica eseguiti su campioni di pavimentazione prelevati in situ indicano buone performance di questo tipo di materiale, che risulta poco sensibile all'invecchiamento.

Il coefficiente di frizione negli strati di usura gap graded considerati è risultato simile a quello ottenuto per strati drenanti, e la profondità della tessitura del conglomerato AR, misurata tramite profilometro laser IRI, varia tra 1.0 e 1.2 mm.

Le prove di *Wheel Tracking Test*, eseguite su campioni sia prelevati in situ che ricostruiti in laboratorio, hanno evidenziato come la deformazione permanente dei HMRA possa essere influenzata negativamente da fattori quali:

- compattazione inadeguata del conglomerato;
- tempi di digestione superiori alle 3 ore;
- stoccaggio dei bitumi a temperature elevate per periodi lunghi prima del loro utilizzo;
- origine eterogenea del polverino di gomma.

A seguito di queste prime applicazioni ne sono seguite numerose altre tra cui, nel 2001, la prima applicazione di conglomerati AR su di una pavimentazione autostradale. Si tratta di un trattamento di riabilitazione effettuato lungo un tratto sperimentale di circa 3 Km della *A8 Lisboa-Caldas da Rainha*, a cui sono seguite applicazioni, tra il 2003 ed il 2004, lungo altri quattro tratti della medesima autostrada, per un totale di circa 16 Km (vedi Tabella 2-9).

Le Figure 2-12 e 2-13 dimostrano alcune fasi esecutive di quest'intervento.

---



Figura 2-12: Impianto di produzione di Asphalt Rubber della Recipav



Figura 2-13: Lavori di posa in opera di conglomerato AR

I conglomerati AR utilizzati sono stati ottenuti impiegando percentuali di bitume comprese tra il 7 e il 10%, a loro volta conseguiti mediante una percentuali di CRM del 20% [2-25]. Anche queste applicazioni autostradali hanno mostrato notevoli caratteristiche di resistenza alle deformazioni permanenti, alla fessurazione ed un buon comportamento a fatica, anche per spessori ridotti dello stato superficiale.

**Tabella 2-9: Applicazioni di conglomerati AR in Portogallo lungo l'autostrada A8**

Tratto	Anno	Estensione [km]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Spessore [cm]	Quantità [ton]
Frielas-Loures	2001	2.7	30'763	2.5	1'602
Malveira-Torres V. Sud	2003	2.6	52'292	2.5	2'615
Torres V. Sul-Torres V. Nord	2003	5.7	134'400	2.5	6'720
Bombarral-Caldas das Rainhas	2003	1.4	23'669	2.0	947
Torres V. Nord-Bombarral	2004	3.7	84'975	2.5	4'499

Un ulteriore studio condotto nell'ambito di una cooperazione tra *Instituto Politécnico de Bragança, Universidade do Minho e Universidade de Coimbra* [2-26] analizza l'influenza sulla vita utile di uno strato di usura AR da parte di temperatura media superficiale e diminuzione della temperatura sino allo stato fessurativo. Conpara, inoltre, gli effetti dello stress termico con quelli derivanti, invece, da un aumento di traffico. La vita utile dello strato di usura è stata calcolata utilizzando le leggi di fatica, valide sia per strati di usura in Asphalt Rubber che per conglomerati convenzionali.

Le prestazioni lungo la vita utile degli strati superficiali dipendono dalla tipologia di stress a cui vengono sottoposti. Negli strati superficiali applicati a pavimentazioni fessurate si sviluppano sin dai primi anni di servizio fessure di riflesso, provenienti dalla propagazione di quelle degli strati inferiori, a causa dell'azione di carichi statici e ripetitivi.

Sousa [2-27] ha, infatti, identificato i seguenti differenti meccanismi per la propagazione della fessura originale:

- stress termico dovuto a fatica termica, che avviene quando le variazioni di temperatura inducono cicli di apertura e chiusura delle fessure nella pavimentazione, causando una concentrazione di stress sulla superficie della pavimentazione;
- stress termico dovuto a un rapido congelamento dello strato superiore, che induce fenomeni di stress di tensione critica nella superficie;
- il carico ripetitivo del traffico induce stress addizionali alle superfici, che aumentano il tasso di propagazione delle fessure indipendentemente dall'origine delle stesse.

Sousa ha riscontrato che, quando la fessurazione di riflesso è causata dal carico dovuto al traffico, appaiono complessi pattern di stress che comportano la presenza di una combinazione dei primi due meccanismi sopra individuati.

All'interno dello studio in esame, al fine di stimare la vita utile dell'opera è risultato particolarmente importante considerare gli elevati gradienti di raffreddamento a cui questa è sottoposta, causa di un incremento di tensioni sullo strato superficiale.

Mentre da una parte l'effetto della temperatura sulle proprietà dei materiali aumenta la vita utile dell'opera, dall'altro l'accumulo di sovratensioni causate dallo stesso raffreddamento in combinazione con la presenza del traffico, conduce ad una riduzione della durata della pavimentazione. Si è, quindi, concluso che gli HMRA presentano alle basse temperature una resistenza a fatica superiore in confronto ai conglomerati convenzionali.

L'effetto di ritrazione della superficie di una pavimentazione è risultato, inoltre, influenzare significativamente la sua vita utile, e merita quindi speciale attenzione nelle metodologie di progettazione.

#### 2.5.1.7 SPAGNA

La Spagna è stato il primo paese europeo ad impiegare conglomerati modificati con CRM mediante metodo wet, dato che le prime applicazioni sperimentali hanno avuto luogo nel 1990 nei pressi di Madrid, finanziate dal *Ministerio de Industria y Energía* (MINER) e dal *Centro de Desarrollo Tecnológico y Industrial* (CDTI) e con il coinvolgimento della *Universidad Politécnica de Madrid* e del *Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos de Madrid*. Le prestazioni rilevate sia in laboratorio che in situ hanno condotto a risultati così soddisfacenti [2-28] da convincere all'utilizzo di Asphalt Rubber in diversi progetti sul territorio nazionale, al punto da portare la principale società produttrice di leganti CRM del paese a sviluppare una propria formulazione, leggermente diversa da quella originale di McDonald per quanto riguarda le percentuali di polverino, applicata con ottimi risultati da oltre un lustro.

#### 2.5.1.8 AUSTRALIA

La ricettività dello stato nei confronti dei conglomerati AR è dimostrata dalla redazione, già nel 1981, di uno studio comparativo eseguito nell'ambito dell'*Australian Road Research Board* [2-29] relativo alle prestazioni, in termini di resistenza a fatica e alle deformazioni permanenti, delle soluzioni wet rispetto a miscele tradizionali, a conglomerati dry e a conglomerati ottenuti a partire da bitumi modificati con EVA, SBS e PBD.

---

I risultati ottenuti hanno mostrato un comportamento a fatica dei conglomerati wet simile a quello di conglomerati con legante modificato PBD, entrambi sostanzialmente migliori rispetto ai conglomerati con bitume modificato EVA o con bitume multigrado. Inoltre, per i bitumi AR, l'aggiunta di oli aromatici ha consentito un miglioramento della resistenza a fatica del prodotto finale. I conglomerati AR hanno, inoltre, evidenziato un grado di ormaiamento inferiore rispetto a quelli ottenuti da bitumi modificati con polimeri. Al fine di evitare possibili problemi di spogliamento, a conclusione dell'analisi effettuata è stato consigliato di innalzare il contenuto di legante ad almeno l'8% del peso totale.

#### 2.5.1.9 BRASILE

Nonostante il Brasile abbia conoscenza del metodo wet da diversi anni, la sua diffusione è stata ostacolata dalle dubbie condizioni di fattibilità economica legate alle condizioni socio-politiche del paese. Così, soltanto nel 2001 nello stato di Rio Grande do Sul, nei pressi della città di Guaíba sono stati realizzati i primi 2 Km di pavimentazione in HMRA.

I vantaggi economici derivanti da tale applicazione, stimati da un accurato studio compiuto a cura dell'IME (*Instituto Militar de Engenharia*) e dell'ANTT (*Associação Nacional Transporte e Território*), hanno spinto all'implementazione di ulteriori applicazioni a partire dal 2002 lungo alcuni tratti della Autostrada SP330 nei pressi di São Paulo [2-30].

D'accordo con l'associazione brasiliana delle industrie di produzione, il Brasile produce 45 milioni di pneumatici all'anno, 30 milioni dei quali vengono mandati in discarica. Una tale quantità potrebbe essere trasformata approssimativamente in 180.000 tonnellate di polverino. Considerando che la produzione annua nazionale di leganti bituminosi è circa 10 volte tanto, e che in un legante Asphalt Rubber viene impiegato il 20% in peso di polverino, tale materiale consentirebbe di smaltire il doppio della totalità dei pneumatici fuori uso del paese.

#### 2.5.1.10 COLUMBIA BRITANNICA

È stato condotto uno studio su HMRA, consistito sia in un'analisi di laboratorio che in osservazioni sul campo mediante il monitoraggio, tra l'ottobre 1994 ed il luglio 1995, di sei tratti sperimentali [2-31].

In particolare sono stati presi in considerazione leganti AR contenenti una percentuale di polverino compresa tra il 15 e il 30%. Effettuando prove per la determinazione del punto di rottura Fraass, di flessione alle basse temperature, di scorrimento, di rammollimento palla anello e di viscosità alle alte temperature, sono state evidenziate buone qualità dei leganti così ottenuti.

---

I risultati ottenuti denotano, infatti, un punto di Fraass notevolmente inferiore ed una viscosità alla temperatura di 60°C fino a duecento volte superiore rispetto a quella di un bitume tradizionale. Tali proprietà consentono una buona resistenza all'ormaiamento e all'accumulo di deformazione permanente per fluidimento alle alte temperature del conglomerato ottenuto.

Dallo studio effettuato sono emersi i seguenti vantaggi derivanti dall'uso di leganti AR:

- migliore lavorabilità delle miscele;
- riduzione dello spessore degli strati d'usura, passando da 50 mm a 38;
- maggior facilità di compattazione, ottenibile con un minor passaggio di rulli o a temperature inferiori;
- possibilità di impiegare per il mix design metodi tradizionali quali il metodo Marshall.

#### 2.5.1.11 POLONIA

In Polonia, il problema dei pneumatici di scarto non è meno grave che in altri paesi, dal momento che ogni anno vengono scartati circa 120'000 t di pneumatici e che tale quantità è destinata ad aumentare a causa dell'incremento del mercato automobilistico registrato negli ultimi anni [2-32].

La tabella sotto riferisce l'utilizzo dei pneumatici di automobile fuori uso in Polonia, riportando la situazione nel 1997 e proiettandone la previsione per l'anno 2006.

**Tabella 2-10: Confronto tra le percentuali di utilizzo di PFU di automobili in Polonia**

Tipo di Utilizzo PFU [%]	Percentuali di riutilizzo	
	1997	2006 (previsione)
Riutilizzo	15 - 18	20
Riciclaggio	5 - 10	23
Produzione di energia	8	55
Altri metodi	1	2
Non utilizzati	60 - 70	-

Il previsto abbattimento, passando dal 1997 al 2006, del 60-70% di PFU non utilizzati deriva da una serie di misure previste in risposta alla disposizione comunitaria che a partire dal 2006 ne vieta il conferimento a discarica. Tra i nuovi utilizzi previsti, vi sono applicazioni sia in ambito stradale che per la costruzione di parchi giochi, campi sportivi e altro ancora.

In tale contesto si inserisce il rinnovato interesse per il riciclaggio della gomma di pneumatico per applicazioni nei conglomerati bituminosi, le cui sperimentazioni sono iniziate in Polonia negli anni '70 ma che non hanno mai trovato applicazione.

Nel 1998 è stato, quindi, messo a punto un programma di ricerca con l'intento di riprendere e completare i risultati precedentemente ottenuti.

In particolare, è stato impiegato polverino di gomma sia tramite metodo wet che dry, realizzando diversi tratti di prova caratterizzati da differenti intensità di traffico.

Il processo wet di modifica del bitume è stato condotto a temperature comprese tra 175° e 220°, sufficientemente elevate da rompere i ponti dello zolfo e le catene elastomeriche, migliorando la dispersione delle particelle di gomma nel bitume, che si gonfiano ed assorbono gli asfaltini. Precedenti indagini sperimentali svolte in Polonia, da Radziszewki nel 1994, hanno dimostrato che una miscela bitume-gomma sottoposta ad un'elevata temperatura (190°C) già dopo un circa 20 minuti raddoppia il proprio volume.

Le analisi in laboratorio e le osservazioni in situ hanno dimostrato che l'utilizzo del polverino in conglomerati risulta particolarmente vantaggioso nel caso del processo wet, mostrando migliori proprietà reologiche per quanto riguarda consistenza, resistenza alle basse temperature, coesione e sensibilità termica.

Aspetti negativi legati al processo wet hanno riguardato la stabilità del sistema bitume-gomma, la necessità di applicazione di un polverino con una granulometria fine, dal momento che al diminuire della dimensione del granulato di gomma la modifica risulta più efficace.

Durante la realizzazione delle sezioni di prova la produzione e posa in opera di conglomerati AR si è rivelata più semplice nel caso del metodo dry, dal momento che non sono necessarie apparecchiature particolari, rendendone la produzione analoga a quella di un conglomerato convenzionale.

Durante lo studio effettuato entrambe le metodologie wet e dry hanno condotto a buoni risultati, a condizione di utilizzare determinati materiali e tecnologie che ne possono incrementare i costi. È, quindi, emersa la proposta di finanziare una parte degli interventi di questo tipo ricorrendo a fondi ambientali.

Oltre agli ambiti nazionali riportati, vanno ricordate anche le applicazioni svolte in paesi come il Cile, a partire dal 1999, ed ad oggi in corso di attuazione in Austria, Germania, Sudan, Cina, delle quali non sono ancora stati pubblicati studi ufficiali di valutazioni delle performance in situ. Si ricorda, inoltre, l'applicazione di questa tecnologia alle pavimentazioni della taxiway dell'*Osaka International Airport*, in Giappone.

---



## 2.5.2 Processo Dry

Come anticipato, nel processo dry la gomma viene aggiunta direttamente all'aggregato lapideo prima della miscelazione col bitume, e rappresenta generalmente una percentuale variabile tra il 2.5 e il 5% dell'aggregato.

In questo caso la gomma agisce, quindi, principalmente da aggregato e l'interazione della gomma con il legante risulta limitata, nonostante durante la fase di miscelazione la frazione fine del granulato di gomma reagisca in parte con il bitume, comportandone un certo grado di modifica. Nell'applicazione di tale processo va tenuto conto della differenza tra i pesi specifici del granulato di gomma e dell'inerte da utilizzarsi, in modo da garantire, a miscelazione avvenuta, il ricoprimento dell'intero aggregato con una sufficiente pellicola di bitume.

### 2.5.2.1 ALASKA

Tra il 1979 ed il 1984 l'*Alaska Department of Transportation* ha applicato il processo dry alla realizzazione di sei tronchi sperimentali in conglomerato bituminoso con introduzione di granulato di gomma, per un totale di circa 5.5 km. La gomma è stata triturata grossolanamente ed introdotta nel conglomerato in percentuali variabili tra il 3 e il 4%, seguendo le specifiche PlusRide®, utilizzando impianti di produzione tradizionali e classiche attrezzature da cantiere per la posa in opera [2-33].

Dall'applicazione del metodo Marshall per il mix design è risultata la necessità di innalzare la percentuale di legante del 2-3% rispetto al conglomerato privo di gomma, in modo da raggiungere percentuali dei vuoti non superiori al 3% in laboratorio, corrispondente al 5% in opera. Tale valore rappresenta, infatti, il limite massimo mostrato dalle applicazioni pratiche al fine di ottenere una pavimentazione sufficientemente resistente alle sollecitazioni in esercizio. Gli elevati contenuti di bitume, insieme alla scelta di bitumi molli, non ha comunque comportato, alla massima temperatura di esercizio, fenomeni di separazione per colatura del bitume dagli aggregati.

Tale tipo di pavimentazioni ha mostrato una più rapida capacità di eliminazione di manti di ghiaccio sulla superficie, maggiori flessibilità e resistenza a fatica ed una certa riduzione del rumore prodotto dal rotolamento dei pneumatici.

### 2.5.2.2 AUSTRALIA

Come anticipato (vedi §2.5.1.8), nell'ambito dell'*Australian Roads Research Board-Austroroads Pavement Research Group* (ARRB-APRG) sono state condotte prove comparative tra diversi tipi di conglomerati bituminosi, realizzate con processo dry, con processo wet e con bitume modificato con polimeri, caratterizzate attraverso prove di resistenza a fatica e all'ormaiamento.

---

Il conglomerato ottenuto con processo dry, realizzato con l'8% di bitume ed il 2.5% di gomma rispetto al peso totale, ha mostrato una resistenza a fatica ed all'ormaiamento superiore rispetto agli altri tipi di conglomerato, dovuta soprattutto all'alto contenuto di gomma. Come risultato dello studio vengono specificati per il granulato di gomma un peso specifico apparente non superiore a 300 kg/m<sup>3</sup> e una dimensione massima di 0.4 mm. Inoltre, al fine di permettere la digestione parziale della gomma, viene raccomandato un tempo minimo di stoccaggio della miscela prima della posa in opera pari a un'ora e mezza.

### 2.5.2.3 CALIFORNIA

Durante le proprie sperimentazioni su conglomerati ottenuti mediante processo dry, effettuate a partire dal 1978, il Caltrans ha optato per formulazioni di tipo PlusRide<sup>®</sup>, riscontrando particolari problemi [2-34] legati a fessurazioni estese e formazione di buche, che l'hanno portato ad optare per l'uso esclusivo di conglomerati AR ottenuti tramite processo wet.

### 2.5.2.4 FLORIDA

In Florida sono state ampiamente indagate le prestazioni di conglomerati ottenuti sia tramite processo wet che dry [2-35], ricorrendo nel secondo caso a formulazioni di tipo PlusRide<sup>®</sup>. Queste hanno mostrato in laboratorio, rispetto ai conglomerati tradizionali, un notevole incremento della resistenza e fatica. Le applicazioni pratiche non hanno, però, manifestato riscontri altrettanto buoni, mostrando miglioramenti inferiori rispetto a quelli previsti in laboratorio. Inoltre, i miglioramenti ottenibili con conglomerati ottenuti secondo processo dry, in termini di resistenza a fatica, sono risultati superiori per temperature negative (-5°C) rispetto a temperature più elevate (10°C).

Il modulo resiliente aumenta, invece, sensibilmente al diminuire della granulometria della gomma impiegata. Le prove di creep statico hanno evidenziato una maggior deformabilità a compressione degli stessi conglomerati dry rispetto a quelli di controllo, mentre dalle prove di creep dinamico si evince una maggior resistenza alle deformazioni permanenti da parte dei primi. Le analisi di laboratorio hanno dimostrato l'inattendibilità delle prove Marshall per caratterizzare il comportamento in opera dei conglomerati ottenuti con processo dry, dal momento che ad un rapporto di rigidità Marshall nettamente sfavorevole rispetto al confronto con conglomerati tradizionali, si contrappongono le migliori prestazioni in opera dei conglomerati dry.

Questi ultimi hanno, inoltre, evidenziato una maggior flessibilità alle basse temperature, con conseguente incremento delle deformazioni relative che la pavimentazione può tollerare senza rotture, oltre che una migliore tenuta all'acqua ed una minore tendenza all'invecchiamento per ossidazione, dovuta agli antiossidanti contenuti nella gomma.

---

### 2.5.2.5 MINNESOTA

Anche il *Minnesota Department of Transportation* ha preso in considerazione soprattutto conglomerati di tipo PlusRide® [2-36], concludendo, però, che tale prodotto presenta una serie di svantaggi legati soprattutto a:

- difficoltà di determinazione del contenuto ottimo di bitume basandosi sulle specifiche attuali;
- maggiore suscettibilità al costipamento rispetto ai conglomerati tradizionali;
- deflessioni FWD equivalenti a quelle dei conglomerati bituminosi tradizionali;
- scarsa efficacia contro la riflessione della fessurazione di riflesso dal basso;
- scarsa efficacia contro i problemi legati alla presenza di ghiaccio;
- aumento di costi non accompagnati da significativi miglioramenti delle prestazioni.

### 2.5.2.6 SPAGNA

Il medesimo studio che ha analizzato leganti ottenuti mediante *Terminal Blend Process* (vedi §2.4.3), eseguito presso l'*Universidad Politécnica de Madrid* [2-17], ha preso in considerazione anche conglomerati ottenuti mediante processo dry.

In particolare, sono state realizzate prove di laboratorio mirate a stabilire l'influenza del tempo di digestione, analizzando diversi conglomerati bituminosi e recuperandone poi il legante al fine di confrontarne la viscosità finale con quella originaria.

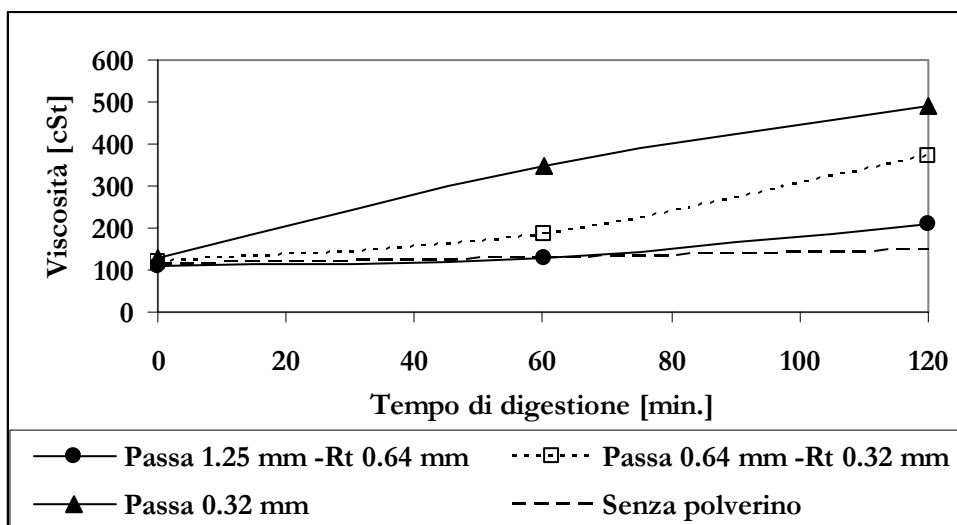


Figura 2-14: Andamento della viscosità al variare del tempo di digestione per differenti granulometrie di polverino di gomma [2-17]

I risultati (vedi Figura 2-14) mostrano che all'aumentare del tempo di digestione, e contemporaneamente al diminuire della granulometria del poverino impiegato, aumenta la viscosità e, quindi, il grado di modifica del bitume.

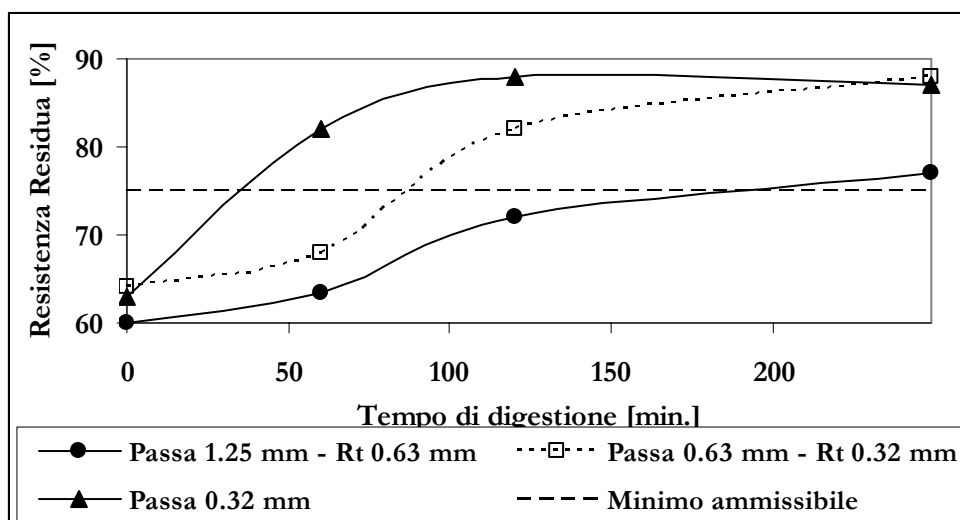


Figura 2-15: Andamento della resistenza residua al variare del tempo di digestione per differenti granulometrie di polverino di gomma [2-17]

Tramite prove di compressione sott'acqua, inoltre, sono stati determinati i tempi di digestione minimi dei diversi conglomerati, che devono essere rispettati al fine di evitare un prematuro deterioramento delle pavimentazioni in opera.

Tale studio, nel corso del quale sono stati considerati anche conglomerati HMRA, è giunto alla conclusione che, tra le tre tecniche di produzione di conglomerati modificati con polverino di gomma (wet, dry e terminal blend), quella che offre un maggior incremento delle prestazioni è il processo wet, seguita dal processo terminal blend. In linea generale, infatti, la resistenza a fatica del conglomerato è risultata maggiore all'aumentare del contenuto di polverino nel bitume e del contenuto del legante stesso nel conglomerato bituminoso.

#### 2.5.2.7 STATO DI NEW YORK

Il N.Y. *State Department of Transportation* [2-37] ha proceduto all'applicazione di strati d'usura realizzati con processo dry posti al di sopra di pavimentazioni rigide in *Portland Cement Concrete* (PCC).

Il monitoraggio triennale di tali pavimentazioni, il cui strato superficiale di riabilitazione era di 37.5 mm di spessore, non ha evidenziato miglioramenti delle prestazioni rispetto ai conglomerati tradizionali che giustificassero il maggior investimento economico.

### 2.5.2.8 OREGON

L'*Oregon State Department of Transportation* ha monitorato dal 1993 al 1999 le prestazioni di diciassette tipi differenti di miscele bituminose, ricorrendo anche alla modifica con polverino di gomma sia mediante processo wet che dry. In quest'ultimo caso, le pavimentazioni ottenute sono risultate ottenere prestazioni peggiori rispetto a quelle realizzate con la corrispondente miscela di controllo, evidenziando soprattutto problemi di costipamento e rotture anticipate, a fronte di maggiori costi di realizzazione [2-5]. Si è infatti verificata, per quasi tutte le sezioni sperimentali realizzate in RUMAC, una percentuale dei vuoti superiore del 3-5% rispetto alla percentuale dei vuoti prefissata, il che indica problemi di compattazione in opera che hanno generato, sia dai primi anni di vita dell'opera, notevoli problemi di degrado, legati soprattutto alla e formazione di buche e spogliamento dell'inerte dalla pellicola di bitume.

Al contrario, le miscele wet sperimentate hanno mostrato, nel corso degli anni, le migliori prestazioni, presentando un ottimo rapporto costi-benefici dovuto anche alla maggior curabilità degli interventi.

### 2.5.2.9 TEXAS

Da studi effettuati sinora dal TxDOT emerge che, ai fini del miglioramento delle prestazioni legate alla resistenza a fatica, è preferibile l'uso del CRM nei conglomerati bituminosi mediante processo wet, dal momento che gli strati realizzati con processo dry evidenziano una maggiore tendenza alla fessurazione [2-15]. Al fine di limitare tale ammaloramento, viene raccomandato di aggiungere il granulato di gomma ad una miscela chiusa e in percentuale non superiore allo 0.5% in peso dell'aggregato.

Anche nell'esperienza texana la maggior limitazione alla diffusione dell'impiego sia di processi wet che dry consiste nel maggior aggravio dei costi, non sempre giustificabile tramite un miglioramento delle prestazioni significativo.

## 2.5.3 Processi a confronto

Come descritto, nel processo wet il legante viene premiscelato al polverino di gomma ad elevate temperature, comprese tra i 177 e i 210 °C, attraverso specifiche condizioni di miscelatura. Nel processo dry, invece, il polverino di gomma viene aggiunto all'aggregato prima che il legante bituminoso venga introdotto nel conglomerato e la granulometria del polverino di gomma è normalmente più grande. Mentre nel processo dry le particelle di gomma sono considerate come una parte fine della granulometria del conglomerato (chiamata filler di gomma), nel processo wet le particelle di polverino di gomma reagiscono pienamente con i leganti bituminosi, incrementandone le loro proprietà.

---

Da quanto riportato sopra, si riscontra relativamente al processo dry una certa disomogeneità di giudizio, a proposito della quale si sottolinea che le opinioni più negative sono state espresse dagli studi maggiormente datati, ed in particolare in occasione di valutazioni delle prestazioni che si sono avvalse di prove statiche (quali Marshall e Trazione Indiretta) in condizioni di sollecitazione diverse da quelle effettivamente presenti in opera [2-38].

Il processo wet ha, invece, raccolto nel corso degli anni e praticamente in tutto il mondo, una significativa uniformità di giudizi positivi, come evidenziato dalle considerazioni che sono state singolarmente riferite per ogni paese che ha sperimentato tale tecnica, lasciando intravedere futuri ed ancora indispensabili sviluppi della sperimentazione a riguardo.

Oltre alle sperimentazioni riportate, uno studio effettuato in Louisiana [2-39] ha messo a confronto otto tipi di pavimentazioni realizzate con bitumi modificati con polverino di gomma, ottenendo risultati che indicano come i conglomerati AR mostrino migliori caratteristiche di resistenza in laboratorio rispetto ai conglomerati convenzionali.

Le sezioni di pavimentazioni costruite con conglomerati bituminosi CRM hanno evidenziato soprattutto migliori prestazioni legate alla resistenza all'ormaiamento, alla rottura a fatica ed un migliore indice di regolarità IRI rispetto alle rispettive sezioni di controllo dopo un periodo di monitoraggio in opera compreso tra cinque e sette anni.

Gli obiettivi di tale studio includono la valutazione di otto applicazioni CRM come di seguito specificato:

- processo wet Arizona applicato ad un conglomerato semiaperto;
- processo wet Arizona applicato una membrana SAMI;
- processo wet Arizona applicato a uno stato di usura semiaperto;
- processo dry PlusRide® utilizzando un conglomerato semiaperto;
- processo wet Rouse con gomma vulcanizzata applicato a un tipico conglomerato chiuso;
- bitume modificato con polimero, formulato da Neste Wright, in un conglomerato chiuso;
- processo wet Rouse con gomma vulcanizzata in un conglomerato chiuso;
- processo generic dry applicato a un conglomerato semiaperto.

Le sezioni di prova sono state comparate con altre sezioni di controllo di pavimentazioni convenzionali realizzate sempre in Louisiana.

---

---

I conglomerati bituminosi convenzionali e CRM sono stati esaminati mediante prove di laboratorio per la valutazione delle prestazioni, come la prova di trazione indiretta (ITS) e la prova di determinazione del modulo di resilienza indiretta (*Indirect Tensile Resilient Modulus MR test*). Inoltre, durante la fase di progettazione del conglomerato sono stati eseguite la prova di stabilità di Marshall e il *Flow Test*. Il confronto tra le prestazioni in situ è stato, invece, eseguito attraverso la prova strutturale non distruttiva denominata Dynaflect, oltre che ricorrendo alla misura di parametri indicanti le prestazioni a lungo termine, quali l'indice di ormaimento, IRI e fessurazione a fatica.

Dall'analisi dei risultati risulta che:

- nelle prove di laboratorio i conglomerati AR analizzati generalmente mostrano caratteristiche di sforzo inferiori rispetto ai conglomerati convenzionali;
  - i conglomerati AR semiaperti esibiscono una minore stabilità di Marshall rispetto ai conglomerati AR chiusi;
  - i conglomerati AR semiaperti hanno flussi di Marshall superiori rispetto ai conglomerati convenzionali di controllo semiaperti e chiusi, dal momento che i conglomerati AR chiusi sono caratterizzati da flussi di Marshall simili ai corrispondenti conglomerati di controllo chiusi;
  - i conglomerati AR semiaperti presentano ITS e MR inferiore rispetto ai conglomerati di controllo;
  - le sezioni di pavimentazione realizzate con conglomerati AR chiusi e con processo wet mostrano generalmente una maggiore capacità strutturale (numero strutturale Dynaflect) rispetto alle sezioni controllo;
  - le pavimentazioni CRM realizzate con metodo dry con conglomerati semiaperti esibiscono una minore capacità strutturale iniziale (numero strutturale Dynaflect) rispetto alle sezioni controllo con conglomerato convenzionale chiuso;
  - dopo un tempo di servizio compreso tra cinque e sette anni, le sezioni di pavimentazione CRM mostrano un valore del coefficiente IRI simile o inferiore rispetto alle sezioni di controllo;
  - le sezioni di pavimentazione CRM mostrano generalmente una profondità di ormaimento simile o inferiore rispetto alle sezioni di controllo dopo un intervallo di servizio compreso tra cinque e sette anni;
  - le pavimentazioni CRM semiaperte mostrano fessurazione da fatica uguale e inferiore rispetto alle sezioni di controllo;
  - solitamente, l'uso di CRM in conglomerati bituminosi incrementa il costo di costruzione dei conglomerati a caldo.
-

Visti i livelli prestazionali dimostrati nel corso delle innumerevoli sperimentazioni ed applicazioni pratiche, risulta lecito attendersi nel prossimo futuro una ulteriore espansione dell'utilizzo di leganti modificati con polverino di gomma, soprattutto quelli ottenuti mediante il processo wet, che possono sostituire con prestazioni pari o superiori i bitumi modificati con polimeri per la produzione di strati superficiali dotati di particolari caratteristiche. Anche i più recenti *terminal blend* hanno evidenziato buone caratteristiche elastiche e adesive, in grado di conferire al conglomerato proprietà fonoassorbenti e antivibranti. I pochi anni di osservazione sinora disponibili richiedono, però, un maggior studio di questi materiali al fine di provarne le potenzialità.

Gli eccellenti risultati ottenuti nelle diverse applicazioni del processo wet, se da un lato intaccano il primato dei bitumi modificati con polimeri, dall'altro possono non risultare preferibili a quest'ultimi nel caso della produzione di miscele ad alto modulo o per un aggravamento economico in casi particolari.

## **2.6 Studi eseguiti in Italia**

### **2.6.1 Metodo Dry**

Presso il Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie (DIIV) dell'Università degli Studi di Palermo [2-40], nel 2000 ha avuto inizio un'attività di ricerca focalizzata sulla possibilità di ricorrere all'applicazione del CRM col duplice obiettivo di risolvere il problema della gomma di scarto e cercare di migliorare le proprietà dei conglomerati bituminosi. In particolare, oltre a conglomerati ottenuti con il metodo dry di tipo tradizionale, sono stati analizzati campioni prodotti mediante un metodo dry definito ibrido, che consiste nel produrre il conglomerato aggiungendo il granulato di gomma contemporaneamente al bitume e all'aggregato, in modo da consentire la digestione delle particelle fini della gomma alle elevate temperature utilizzate. Nello specifico per ottenere tali conglomerati si scaldano dapprima gli aggregati a 180°C per un'ora, miscelandoli poi con il granulato di gomma per 1 minuto a 180°C. Contemporaneamente viene riscaldato il bitume alla temperatura di 160°C per 45 minuti, aggiungendolo di seguito alla miscela gomma-aggregati e miscelando per 15 minuti alla temperatura di 180°C. Si aggiunge, quindi, il filler, miscelando per 2 minuti a 180°C, mantenendo poi il prodotto ottenuto in forno alla temperatura di 180°C per un'ora.

I risultati ottenuti da prove Marshall e di trazione indiretta mostrano, in generale, come i conglomerati modificati con polverino portino a benefici potenziali rispetto ai conglomerati convenzionali.

---



Le caratteristiche più importanti sono una minor suscettibilità termica, che conferisce una maggior rigidità alle alte temperature e una maggior resistenza alla deformazione permanente, mantenendo la stessa rigidità dei conglomerati convenzionali alle basse temperature.

Dalle conclusioni emerge che il processo dry consente di migliorare le proprietà meccaniche dei conglomerati, ricorrendo, però, a percentuali superiori al 3% di polverino. L'aggiunta di percentuali comprese tra il 2 e il 3%, infatti, non è risultata modificare in modo significativo le proprietà meccaniche, e la scelta di ricorrere a percentuali di questo tipo si basa su fattori non di tipo prestazionale, bensì economici e ambientale.

Inoltre, estraendo il bitume dai conglomerati ottenuti, questo non ha mostrato modifiche nelle proprietà reologiche rispetto a prima dell'aggiunta al conglomerato. Ciò deriva, con ogni probabilità, dalle dimensioni del granulato di gomma superiori rispetto a quanto raccomandato dalla normativa ASTM, che nel breve tempo di digestione del processo dry non ha consentito una apprezzabile modifica del legante.

Ciò nonostante, tutti i conglomerati modificati hanno dimostrato una performance più elevata rispetto ai conglomerati convenzionali.

Sempre presso il DIIV dell'Università degli Studi di Palermo, è stato recentemente condotto un ulteriore studio [2-41] con l'obiettivo di chiarire gli aspetti relativi alla formulazione, alla fabbricazione ed alla posa in opera di conglomerati bituminosi modificati con gomma triturrata di pneumatici dimessi, ottenuti mediante processo dry. Come descritto, questa si differenzia dal processo wet sia per quantità e granulometria della come impiegata, sia per l'attrezzatura necessarie alla produzione della miscela. Per il processo dry la gomma introdotta rappresenta una percentuale variabile dal 2 al 5% in peso dell'aggregato, permettendo di impiegare una quantità di gomma superiore rispetto al processo wet. Nonostante quest'ultimo necessiti di equipaggiamenti specifici per la miscelazione, offre rispetto al primo il vantaggio di poter attentamente governare le proprietà del bitume ottenuto. Per le miscele dry, infatti, l'interazione del CRM con il legante può essere misurata solo per via indiretta analizzando il comportamento dei conglomerati ottenuti, mentre per il processo wet è possibile effettuare misure reologiche direttamente sul legante Asphalt Rubber.

Mediante il proprio studio, l'Università di Palermo ha cercato di verificare in maniera sistematica il presunto decadimento delle prestazioni meccaniche che i conglomerati dry hanno evidenziato rispetto a quelli non additivati nel corso di precedenti studi di laboratorio, effettuandone una valutazione delle prestazioni in opera a partire da misure di laboratorio delle caratteristiche dei materiali. A tale scopo gli autori dello studio hanno predisposto un piano sperimentale basato su metodologie capaci di rappresentare correttamente la risposta dei materiali in opera e di descriverne i processi di degradazione.

Per la formulazione delle miscele è stato adottato il metodo SUPERPAVE® del programma SHRP (vedi Capitolo 5). In particolare, per valutare le prestazioni meccaniche offerte dalle differenti miscele sono state effettuate prove di modulo complesso, tramite *Three-point Bending Test*, e di resistenza a fatica su provini di forma prismatica, mentre per la valutazione della resistenza all'accumulo di deformazione permanente si è fatto ricorso a prove di ormaiamento. Durante l'esecuzione della prova di compatibilità alla pressa giratoria, oltre quanto previsto dalle procedure SHRP è stato acquisito anche il rapporto di taglio  $\sigma$  al fine di misurare la stabilità interna del conglomerato durante il suo costipamento.

Infine, sono state effettuate prove statiche di stabilità Marshall e di resistenza a trazione indiretta, ai fini di stabilire se tali prove possano essere ritenute idonee per fornire indicazioni sulle prestazioni delle miscele dry, mediante comparazione con le prove di ormaiamento, di modulo complesso e di resistenza a fatica.

Mediante una dosaggio in gomma pari al 2% in peso dell'aggregato, è stata sostituita quasi totalmente la frazione sabbiosa dello stesso. Durante la realizzazione delle prove di formulazione delle miscele con CRM, è stato osservato che queste risultavano scarsamente coese e difficili da compattare, anche nel caso di un forte aumento di dosaggio del bitume. Tale comportamento denota una cattiva distribuzione del legante nella massa dell'aggregato, tipico di miscele eccessivamente viscosi, con risultato che buona parte del bitume avvolgeva subito la frazione più fine, mentre l'aggregato grosso è risultato appena rivestito da una pellicola molto sottile di legante. Tale fenomeno è risultato più evidente per il bitume meno duro considerato (70/100), caratterizzato da un basso rapporto tra asfaltini e aromatici.

Al fine di ovviare a tale problema è stato necessario aumentare la temperatura di miscelazione, variando nel contempo il contenuto di bitume al fine di individuare le condizioni ottimali.

I diagrammi di Black ottenuti durante le prove di modulo complesso hanno mostrato come l'additivazione di gomma con metodo dry, per brevi tempi di maturazione, porti a una maggior flessibilità associata, però, ad una riduzione della componente viscosa e ad un relativo aumento delle carattere elastico reversibile. A parità di modulo complesso, infatti, l'angolo di fase dei conglomerati che hanno subito un breve tempo di maturazione a caldo risulta significativamente ridotto rispetto a quello dei conglomerati senza gomma.

Con riferimento alle prove di resistenza fatica, l'impiego di CRM nei conglomerati bituminosi comporta un aumento da 1.5 a 1.8 volte delle deformazioni unitarie ammissibili rispetto ai conglomerati non modificati.

---

---

Relativamente, invece, alla tenuta all'ormaiamento le prove eseguite hanno mostrato per i conglomerati ottenuti con processo dry la capacità di accettare sovradosaggi di legante senza penalizzare la resistenza all'accumulo di deformazione permanente.

Tale studio dimostra che l'additivazione di gomma mediante processo dry origina effetti paragonabili a quelle ottenibili mediante modifica con elastomeri termoplastici quali SBS. Nonostante non sia possibile evidenziare l'interazione tra gomma e bitume per questo tipo di processo, gli effetti dell'additivazione possono essere quantificati tramite vari aspetti mostrati dai conglomerati con gomma rispetto a quelli tradizionali, di seguito riportati:

- aumento della viscosità, con conseguente necessità di aumentare la temperatura di miscelazione e costipamento;
- richiesta di un dosaggio superiore di legante;
- migliori proprietà elastiche e maggior resistenza a fatica, con un'evoluzione del danno decisamente più lenta;
- aumento della resistenza all'ormaiamento, anche in presenza del maggior dosaggio di legante.

È stato notato, inoltre, come all'aumentare del tempo di maturazione a caldo del conglomerato prima del suo impiego si verifichi un aumento della resistenza a fatica e dell'accumulo delle deformazioni permanenti, accompagnato da un aumento del comportamento elastico reversibile del modulo complesso e da una riduzione della suscettibilità termica dello stesso, che ha come conseguenza un aumento della rigidità alle alte temperature e della flessibilità alle temperature di esercizio.

Emerge, in particolare, una elevata sensibilità delle miscele ottenute con processo dry rispetto al dosaggio di bitume e, come visto sopra, ai tempi di maturazione a caldo delle miscele in fase di preparazione prima della posa in opera.

Da una collaborazione tra il DISTAR dell'Università degli Studi di Bologna e l'API SpA, con la partecipazione dell'Università di Pisa [2-42], è stato recentemente condotto uno studio comparativo tra un conglomerato convenzionale e due conglomerati CRM ottenuti mediante processo dry, caratterizzati da un diverso contenuto in gomma. Alle analisi di laboratorio, è seguita un'indagine sperimentale su strada mediante la realizzazione di un campo prova con uno dei due conglomerati CRM. Nel corso dell'intero studio l'attenzione è stata focalizzata sui meccanismi di generazione delle vibrazioni, indagando proprio le migliori capacità di minimizzarle possedute da parte dei conglomerati modificati.

---

Le vibrazioni costituiscono, infatti, un fattore di disturbo interferente sia con attività umane quali il sonno, sia con dispositivi e apparecchiature particolarmente sensibili, tanto da condurre l'*International Organization for Standardization* (ISO) e diversi paesi alla pubblicazione di specifiche norme al riguardo. In conseguenza, però, della scarsità di informazioni disponibili e della disomogeneità delle normative esistenti, le odierne metodologie progettuali delle infrastrutture viarie tendono a trascurare il problema delle vibrazioni, ponendolo in secondo piano rispetto ad altri fattori di impatto ambientale.

Nello specifico, la sollecitazione vibratoria che si genera sulle pavimentazioni stradali deriva dalle forze di reazione in corrispondenza del passaggio delle ruote di un veicolo al di sopra di una irregolarità.

Oltre alla regolarità superficiale, risulta influire sull'emissione di vibrazioni dalla pavimentazione anche la rigidità degli strati superficiali e l'elasticità relativa tra strato superficiale di usura, strati sottostanti di collegamento e base, oltre che le caratteristiche del veicolo espresse in termini di dimensioni, peso, velocità, tipo di sospensioni. A questo tipo di vibrazioni si affiancano quelle interne al veicolo stesso, legate soprattutto ai movimenti delle parti meccaniche.

I conglomerati analizzati sono stati ottenuti a partire da un bitume 50/70 fornito da una raffineria API, mentre il granulato di gomma, proveniente dalla frantumazione di pneumatici di veicoli pesanti, è stato impiegato nelle due pezzature 2/4 e 4/6 mm. La prima delle tre miscele studiate è di tipo convenzionale, ottimizzata sia con metodo Marshall che con pressa giratoria analizzando tre diverse percentuali di bitume (4.5, 5.0 e 5.5%). Il secondo conglomerato è stato ottenuto aggiungendo una quantità di polverino pari al 2.1% sul peso totale, costituita da uno 0.7% di gomma 2/4 e 1.4% di gomma 4/6, ed anche questo è stato ottimizzato in maniera analoga al precedente considerando tre percentuali di bitume (5.5, 6.0 e 6.5%). Il terzo conglomerato è stato ottenuto aggiungendo il 3% di polverino (1% di gomma 2/4 e 2% di gomma 4/6), e ottimizzato considerando le stesse percentuali di legante viste per il conglomerato precedente.

Per tutti i provini di conglomerato, confezionati con la pressa giratoria, è stato determinato il modulo di rigidità a trazione indiretta, direttamente collegato alla capacità del materiale della pavimentazione di diffondere i carichi ed influenzato sia da parametri di carico (frequenza, temperatura, livello di carico) che da parametri di progetto del conglomerato (contenuto in vuoti, tipo e contenuto di aggregati, filler, bitume).

Da questa prima fase di laboratorio è emersa una migliore risposta sotto carico dinamico dei conglomerati modificati, legata alle migliori proprietà elastiche, soprattutto nel caso dell'aggiunta del 3% di gomma.

---

I buoni risultati ottenuti hanno, quindi, portato alla realizzazione di un campo prove sperimentale per la verifica in situ delle caratteristiche di una pavimentazione stradale avente lo strato di collegamento realizzato con il conglomerato con 2% di polverino. Tale pavimentazione è stata inserita in una delle tratte previste nei lavori di manutenzione straordinaria della Strada Statale Ferrara-Porto Garibaldi, relativi sia al risanamento profondo della corsia di marcia che al rifacimento del tappeto superficiale della corsia di sorpasso.

In particolare, ricorrendo all'impiego del conglomerato con polverino è stato realizzato un tratto di circa 100 m di corsia di marcia, realizzando una fresatura di 20 cm, una stabilizzazione a cemento dello strato di fondazione preesistente per ulteriori 20 cm, realizzando poi uno strato di base in conglomerato bituminoso di 13 cm, uno strato di collegamento dello spessore di 4 cm in conglomerato bituminoso con il 2% di granulato di gomma seguito, infine, dalla stesa di uno strato di usura superficiale dello spessore di 3 cm.

Sono, quindi, state condotte prove dinamiche mediante Vibrodina, una macchina realizzata dall'ISMES di Bergamo che risulta saldamente ancorata alla struttura, alla quale applica forze variabili nel tempo con legge sinusoidale.

Tali prove hanno mostrato, mediante la misura della risposta dinamica della pavimentazione effettuata con 10 accelerometri piezoelettrici, come la presenza dello strato di collegamento con granulato di gomma permetta di ridurre l'entità assoluta delle accelerazioni superficiali e, quindi, di spostamenti indotti. In tal modo, l'applicazione del polverino nel conglomerato costituente lo strato di collegamento ha consentito la limitazione alla sorgente delle vibrazioni trasmesse attraverso la pavimentazione.

I buoni risultati ottenuti nella prima fase sperimentale di progettazione volumetrica della miscela sono, quindi, stati confermati dai risultati ottenuti nella sperimentazione su scala reale, dalla quale è risultata la possibilità di realizzare, con spessori non troppo elevati, tappeti con granulato di gomma che forniscono una serie di vantaggi alla pavimentazione tradizionale, tra cui:

- riduzione della rigidità dello strato ma non della pavimentazione nel suo complesso, con conseguenti vantaggi in termini di vita utile;
  - aumento delle capacità di assorbimento elastico delle vibrazioni provocate dalle irregolarità superficiali in prossimità della sorgente;
  - possibilità di applicazione su pacchetti esistenti di caratteristiche sia buone sia medio-basse.
-

### 2.6.2 Metodo Wet

A metà degli anni 90, nell'ambito di una collaborazione tra l'Università degli Studi di Padova e il laboratorio Technoprove di Vicenza, è stato eseguito uno studio [2-43] mirato ad accertare l'idoneità dell'uso del polverino di gomma di pneumatico come additivo per i leganti idrocarburi dei conglomerati bituminosi drenanti.

Durante lo studio è stata effettuata un'analisi comparativa del comportamento meccanico e tecnologico di vari tipi di bitume, con e senza modifica con gomma e sottoposti a invecchiamento forzato, oltre a confrontare leganti modificati con polverino di gomma con leganti modificati con polimeri.

La determinazione del modulo complesso e le prove di *creep* dinamico hanno consentito di caratterizzare il comportamento delle miscele modificate con gomma riciclata, ottenendo risultati superiori in condizioni di una più elevata temperatura di servizio, grazie al prevalente comportamento elastico, oltre ad un consistente risparmio sui costi del legante bituminoso.

Nella scelta del tipo di pneumatico adatto ad essere riciclato per tale scopo, è stata considerata la diversa composizione dello stesso in funzione del tipo di veicolo a cui è destinato. Infatti, mentre per le autovetture il contenuto di gomma naturale e sintetica si attesta rispettivamente attorno al 20 e al 26%, nei veicoli commerciali tali percentuali risultano del 33 e del 21%.

La gestione dei pneumatici, una volta raggiunto il termine dalla propria vita utile, presenta particolari problemi in discarica, dovuti principalmente a:

- basso peso specifico accompagnato dall'occupazione di un elevato volume;
- difficoltà di costipamento insieme ad altri rifiuti;
- instabilizzazione del corpo di discarica;
- elevata infiammabilità, aggravata dalla presenza di biogas;
- possibilità di stappi e lacerazioni del manto causati da carcasse di pneumatici prossimi alla superficie della discarica.

In un quadro di questo tipo, meritano particolare attenzione tutte quelle tecnologie di recupero, riciclaggio o smaltimento della gomma dei pneumatici che attualmente si presentano come alternativa al trasporto in discarica. Tra queste ricordiamo la triturazione meccanica, la triturazione criogenica, la pirolisi e la termocombustione. Dalle prime due, come visto, si ottiene il granulato di gomma, ovvero il polverino, particolarmente adatto alle applicazioni in ambito stradale.

---

---

Lo studio citato si è proposto di contribuire ad accrescere la limitata conoscenza del problema dell'utilizzo dei pneumatici usati in Italia, dovuta alle poche sperimentazioni ed alle ancor più ridotte applicazioni, in modo da definire le potenzialità d'uso del polverino in applicazioni a basso impatto in termini di inquinamento acustico ed atmosferico. Il materiale impiegato deriva da un processo di riciclaggio della gomma articolato nelle seguenti fasi:

- caricamento del pneumatico in vasche di accumulo;
- triturazione della gomma mediante un meccanismo a cascata sino alla pezzatura 0/100 mm;
- granulazione mediante ulteriore frantumazione, all'interno di un'apposita camera cilindrica mediante un dispositivo a lame di acciaio, sino al raggiungimento di una pezzatura 0/20 mm;
- deferizzazione con calamita e setacciatura del granulato.

Lo studio comparativo sui conglomerati è stato preceduto dall'analisi delle caratteristiche dei leganti utilizzati nella sperimentazione, prevedendo l'impiego di bitume modificato con SBS quale legante tipo del conglomerato drenante e di un bitume normale 50/70 come base per additivazione con polverino, utilizzando una pezzatura 0/0.5. Al fine di modificare la viscosità del bitume in modo da renderla compatibile con l'impiego previsto, oltre che per migliorarne il comportamento reologico, è stato aggiunto un olio aromatico pari al 3% in peso del bitume.

Le prove di caratterizzazione eseguite sui leganti hanno stabilito che la penetrazione diminuisce all'aumentare del contenuto di gomma, mentre contemporaneamente aumenta il punto di rammollimento palla anello. Questo implica un miglioramento della suscettibilità termica del legante e, in particolare, della resistenza alla deformazione alle alte temperature.

L'aggiunta dell'olio aromatico al bitume modificato con polverino rende meno duro il legante a temperatura ambiente, soprattutto per elevati contenuti in gomma. La pulizia della gomma utilizzata è risultata ininfluenza sulla durezza del legante a temperatura ambiente e ancora meno significativa alle alte temperature. L'eccessiva aggiunta di gomma ha, inoltre, mostrato un decisivo aumento della viscosità del bitume, che indica come la preparazione delle miscele bituminose in impianto possa risultare esposta a difficoltà operative in caso di sovradosaggio di gomma riciclata. Anche la resilienza dei bitumi, infine, aumenta con il contenuto di gomma, in maniera ancor più sensibile se è presente l'olio aromatico, che appare migliorare le caratteristiche elastiche del legante.

---

Tali risultati preliminari hanno, quindi, suggerito di proseguire la sperimentazione concentrandosi sui soli bitumi additivati con gomma e olio aromatico. In particolare, la gomma può essere utilizzata così come fornita dal produttore, dal momento che non risulta fondamentale la sua pulitura. Al fine di definire il dosaggio ottimale di polverino di gomma è stata predisposta una prova di invecchiamento RTFOT, da cui risultano limitate riduzioni di resilienza che compravano una buona elasticità del legante modificato anche dopo l'invecchiamento, ma soprattutto tramite la quale è stato possibile fissare al 13% il contenuto minimo di polverino di gomma necessaria a mantenere caratteristiche reologiche idonee all'applicazione su strada. In particolare i risultati ottenuti hanno consigliato, per lo studio in esame, un dosaggio di granulato fissato cautelativamente al 15%.

I conglomerati bituminosi drenanti e fonoassorbenti realizzati per tale sperimentazione sono stati confezionati utilizzando un bitume modificato con il 15% di gomma tal quale con aggiunta di olio aromatico, un bitume modificato con il 15% di gomma pulita ed olio aromatico e, infine, un bitume modificato con SBS.

Dalla caratterizzazione dinamica dei conglomerati ottenuti è stato notato come all'aumentare della temperatura, dapprima il modulo del conglomerato confezionato con bitume modificato con polverino si approssimi a quello delle miscele con bitume modificato SBS, per poi di superarlo tanto prima quanto inferiore è la frequenza di applicazione del carico. Inoltre, la similarità dei comportamenti dei due bitumi risulta sempre maggiore per alte frequenze (massima a 10 Hz). Infine, il conglomerato con bitume modificato SBS tende ad incrementare il campo di deformazione plastica all'aumentare della temperatura, assumendo un comportamento puramente viscoso alla temperatura di 40 °C per carichi pseudo statici, mentre il conglomerato con polverino di gomma conserva anche alle temperature più elevate un buon comportamento elastico, mantenendo al contempo per le temperature inferiori caratteristiche meccaniche costanti. La prova di *creep* dinamico ha poi fornito un'ulteriore conferma della validità strutturale dei conglomerati ottenuti a partire da bitume modificato con polverino di gomma.

Da tale studio risulta che l'applicazione di leganti modificati con polverino di gomma ottenuto tramite la frantumazione meccanica di pneumatici usati, risponde alla necessità di prevedere l'utilizzo, per conglomerati drenanti e fonoassorbenti, di leganti bituminosi capaci di sopperire alle carenze strutturali legate alla tessitura aperta, quindi porosa, deformabile e permeabile. Questo tipo di leganti, infatti, risulta possedere proprietà reologiche analoghe o superiori ai leganti bituminosi modificati con polimeri SBS. Anche tale analisi sperimentale ha, quindi, concluso come l'utilizzo del polverino di gomma presenti vantaggi legati sia alla salvaguardia ambientale dovuta alla riduzione dei rifiuti da avviare discarica, che alle prestazioni ottenibili.

---



## 2.7 Alternative di utilizzo della gomma di pneumatico riciclata

In generale, il concetto di sviluppo sostenibile esige che si diffonda la convinzione della necessità di utilizzare al massimo le risorse disponibili, cercando di minimizzare la produzione di rifiuti. In tale contesto si stanno sviluppando continuamente nuove tecnologie per superare il problema dello smaltimento dei pneumatici fuori uso, e fra i principali attori di tali misure, in Italia si distinguono le attività di:

- Consorzio ARGO (Consorzio Nazionale Volontario Riciclaggio Gomma), fondato nel 1996, è un'associazione nazionale e volontaria che raggruppa le principali aziende italiane operanti nel settore del recupero dei PFU. L'obiettivo principale dell'associazione è la promozione del recupero e del riutilizzo dei pneumatici fuori uso come strumento sostenibile e competitivo e in quanto principale mezzo per sottrarli alla discarica.
- *European Tyre Recycling Association* (ETRA), è un'associazione fondata nel 1994, che rappresenta a livello europeo ed internazionale il settore del riciclaggio dei pneumatici fuori uso. Questa associazione opera a stretto contatto con associazioni, imprese ed istituti di ricerca al fine di creare nuovi sbocchi commerciali, economicamente ed ecologicamente significativi, per i materiali derivanti dai PFU e per le applicazioni possibili.
- Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade (DITS) della Università "La Sapienza" di Roma, all'interno del quale opera un gruppo di docenti e ricercatori di riconosciuta competenza sull'utilizzo di materiali riciclati nel settore delle costruzioni e nei ripristini ambientali, con speciale esperienza nel settore stradale.

Tra i possibili riutilizzi per i PFU, si ha il loro riutilizzo tali e quali, la loro riprofilatura e riutilizzo su veicoli, l'incenerimento per la produzione di energia e, infine, il riciclaggio.

Per quanto riguarda il riciclaggio, la gomma dei pneumatici fuori uso ha trovato applicazione nell'area della costruzione civile, come ad esempio l'inclusione di brandelli dentro gli argini, consentendo di impiegare grandi quantità di pneumatici di scarto. Inoltre, grazie alle proprietà fonoassorbenti della gomma, ulteriori tecnologie hanno visto l'applicazione di granulato di pneumatico nei rivestimenti di superfici per barriere antirumore poste lungo strade urbane, evolute poi nelle lastre o barriere vuote riempite di polverino. Ulteriori applicazioni in ambito stradale della gomma di pneumatici riciclati riguardano la produzione di manufatti a fini segnaletici, quali cordoli, delineatori, delimitatori di corsia, mini New Jersey, dissuasori di sosta, deflego, cippi chilometrici ed altro.

Lo stesso polverino, oltre che per la produzione di conglomerati, può trovare impiego nella produzione di tinte industriali, teli di rivestimento, nastri adesivi, oltre che per ottenere guarnizioni per condotte fognarie, superfici antiscivolo, recinzioni, guanti, stivali, e molti altri prodotti che spaziano dall'industria chimica all'industria automobilistica, passando, tra gli altri, per il settore delle costruzioni.

Oltre ai processi ambientale e criogenico dai quali, come illustrato (vedi §2.3), si ricava il polverino di gomma, un ulteriore metodo per il riciclaggio dei PFU consiste nella pirolisi, ovvero in un processo di decomposizione chimica sotto vuoto a temperature comprese tra 400 e 800°C, dalla quale si ottengono:

- liquidi ricchi in idrocarburi e caratterizzati da ridotto contenuto di zolfo, utilizzabili come combustibile;
- gas di colore scuro, riutilizzabili per la **vulcanizzazione** della gomma o per produzione di tinte e inchiostri;
- acciaio, riciclato nell'industria siderurgica;
- acidi (es. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), riutilizzabili nell'industria chimica;
- gas residui.

Quanto esposto nel presente capitolo mostra come il polverino di gomma di pneumatico riciclata non possa essere considerato un materiale di scarto, ma una materia prima il cui utilizzo è in continua espansione e crescita nei diversi mercati. Per quanto riguarda in particolare il suo utilizzo in ambito stradale, il polverino ha sinora dimostrato di essere un buon additivo per la realizzazione di conglomerati a caldo, sia tramite processo wet che dry, i quali hanno mostrato elevate performance e vantaggi in termini economici. A questi si aggiunge la considerazione che la produzione di polverino di gomma, dal punto di vista ambientale, risulta essere un sano ed economico metodo per ridurre PFU, ed i programmi di pavimentazione con asfalti modificati con gomma costituiscono la componenti chiave per una gestione sostenibile dei pneumatici fuori uso.

---

# Capitolo 3

## Asphalt Rubber

### Il bitume modificato con il polverino di gomma di pneumatico riciclata

#### 3.1 Generalità dell'Asphalt Rubber

Di seguito si introduce una panoramica delle principali caratteristiche e problematiche legate al bitume modificato con il polverino di gomma di pneumatico riciclata, definito *Asphalt Rubber* (AR), che verranno approfondite nel corso del presente capitolo.

##### - **Definizione di Asphalt Rubber secondo la Norma ASTM D6114**

L'Asphalt Rubber è un bitume modificato con una percentuale minima di polverino di gomma di pneumatico riciclata (CRM) pari al 15% sul peso totale del legante, incorporata tramite processo *wet*, che abbia reagito durante un periodo di tempo sufficientemente lungo da permettere il rigonfiamento della gomma. Si distinguono due tipi di Asphalt Rubber. Il Tipo 1 contiene CRM ricavato soltanto da gomma di pneumatico, mentre il Tipo 2 è composto per il 75% da polverino di gomma di pneumatico e per il 25% da gomma naturale.

##### - **Background**

L'Asphalt Rubber (a cui ci si riferisce anche come “processo wet” o “processo MacDonald”) è stato utilizzato negli Stati Uniti a partire dagli anni '60, sviluppandosi dapprima in Arizona, ed arrivando al giorno d'oggi ad essere correntemente utilizzato da parte di diverse agenzie per la produzione di *Hot Modified Rubber Asphalt* (HMRA), in applicazioni “spray” o, semplicemente, per la sigillatura di fessure durante la manutenzione dei manti stradali.

Come descritto nel Capitolo 2, esistono sul mercato altre tecnologie riferite come “*rubberized asphalt*”, come è il caso del processo *dry*, nel quale la gomma viene aggiunta durante la fase di mescolamento del bitume con gli inerti, e il processo *Terminal Blend*, che utilizza meno di 10% di CRM e alcuni additivi. Questi processi portano a caratteristiche diverse dei manti stradali ottenuti, ma sono comunemente riferite sul mercato come riconducibili, seppur in modo improprio, alla tecnologia Asphalt Rubber.

#### - **Descrizione del Processo di Produzione**

I materiali utilizzati per la produzione di Asphalt Rubber sono il bitume base, una quantità variabile tra il 18 e il 22% di polverino di gomma, contenente una elevata percentuale di gomma naturale e, nel caso del Tipo 2 di CRM, alcuni tipi di oli estensivi.

In un impianto specializzato, la miscela reagisce a temperature elevate, superiori a 185°C, per un tempo minimo di 45 minuti, in modo da permettere il rigonfiamento della gomma e la digestione del bitume. Il legante ottenuto può essere applicato in conglomerati a caldo (HMRA) o in applicazioni *spray*. I tipi più utilizzati di HMRA sono i conglomerati aperti e *gap-graded*, simili ai semi-aperti italiani. Nelle applicazioni *spray*, l’Asphalt Rubber è utilizzato in **Chip Seals** (ARCS – Asphalt Rubber Chip Seal) o in membrane di tipo SAMI.

#### - **Riduzione dello Spessore**

Le elevate performance dei conglomerati Asphalt Rubber, confermate da 40 anni di sperimentazioni e applicazioni pratiche, hanno portato alla redazione di un manuale per la riduzione dello spessore di strati in HMRA da parte del *California Department of Transportation* (Caltrans), secondo il quale sono consentite riduzioni sino al 50% dello spessore di un strato in AR, rispetto ad un conglomerato convenzionale. Questo manuale è stato validato da prove condotte in Sud Africa e presso la U.C. Berkeley.

#### - **Formulazione**

Per le miscele aperte o drenanti, la formulazione è simile ha quella utilizzata per i conglomerati aperti convenzionali, con un fattore applicato alla percentuale di legante. Per gli HMRA *gap-graded*, le proprietà generalmente utilizzate per stabilire la percentuale di legante da utilizzare sono riferite a vuoti, VMA o a esperienze locali precedenti. La sensibilità alla umidità non costituisce un fattore particolarmente importante per gli HMRA.

---

---

### - Proprietà del Conglomerato Bituminoso

I conglomerati Asphalt Rubber hanno dimostrato una maggiore resistenza a fatica, dovuta all'elevata percentuale di bitume incorporata negli HMRA, ed una maggiore resistenza all'ormaiamento, attribuita alla viscosità più elevata del legante. Sono generalmente conglomerati caratterizzati da una permeabilità superiore, che consente di ridurre i fenomeni di *splash and spray* e di *acquaplaning* in caso di superficie bagnata.

### - Efficienza Economica

I costi iniziali per i conglomerati prodotti con Asphalt Rubber, ovvero HMRA, *chip seals* e SAMI, risultano più elevati rispetto a quelli dei materiali convenzionali. Tuttavia, dal momento che gli HMRA possono essere stesi in strati di spessore ridotto e presentano una durabilità superiore, come pure i *chip seals*, rispetto ai prodotti convenzionali, l'Asphalt Rubber si è rivelato nel complesso economicamente vantaggioso in oltre l'80% dei casi analizzati durante un periodo di osservazione di 30-40 anni.

### - L'Asphalt Rubber e l'Ambiente

L'Asphalt Rubber permette di riutilizzare un prodotto di scarto (PFU), consentendo al contempo di ottenere prestazioni superiori rispetto ai conglomerati convenzionali. Le applicazioni negli USA utilizzano tra i 900 (nel caso del Tipo 2) e i 1250 pneumatici (per il Tipo 1) per ogni Km di corsia, considerando un spessore medio di 5 cm. Inoltre, è un tipo di conglomerato che può essere riciclato e non incide sulla qualità dell'aria più di un conglomerato convenzionale.

### - Applicazioni dell'Asphalt Rubber

I HMRA possono essere applicati in strategie di riabilitazione di pavimentazioni esistenti per ridurre gli ammaloramenti causati da agenti atmosferici, disgregazione e ossidazione. Risultano migliorare le caratteristiche superficiali, con buoni valori di IRI e attrito, e possono anche essere utilizzati come strato superficiale applicato a pavimentazioni rigide o sopra ponti e viadotti, con lo scopo d'evitare la fessurazione di riflessione, migliorare l'aderenza e ridurre i livelli di rumore. I ARCS possono essere applicati come trattamenti superficiali di pavimentazioni esistenti o dopo l'applicazione di un strato sottile di conglomerato bituminoso per il livellamento di una corsia. Conferiscono buone caratteristiche d'attrito e aumentano la durabilità della pavimentazione. Un trattamento di questo tipo non influenza le proprietà di portanza delle pavimentazioni e non corregge l'irregolarità longitudinale, ma apporta una buona resistenza alla propagazione della fessurazione. Questa proprietà ha condotto all'utilizzo dei *chip seals* in AR anche come membrane interstrato in **sistemi a doppio** o **triplo strato**.

---

### - **Vantaggi dell'Asphalt Rubber**

I principali vantaggi di questo legante sono, in sintesi, costituiti da:

- Performance e durabilità superiori
- Maggior resistenza all'invecchiamento e all'ossidazione dovuta ad una maggior ricopertura degli inerti
- Maggior resistenza all'ormaiamento grazie all'incremento della viscosità e del punto di rammollimento
- Maggiore resistenza a fatica e alla fessurazione nel conglomerato, a causa del maggior contenuto percentuale di legante presente
- Possibilità di applicare spessori inferiori di conglomerato, che comportano anche minori tempi di costruzione legati alla minor quantità di materiale
- Efficacia dei trattamenti di riabilitazione con AR, che si pongono come valida alternativa alla ricostruzione
- Vantaggio economico dovuto alla riduzione degli spessori, ad una maggior durabilità e alla minor manutenzione
- Diminuzione del rumore (equivalente all'85% di traffico in meno) in conglomerati aperti
- Maggior sicurezza legata alla riduzione dei fenomeni di splash and spray e acquaplaning e all'aumento della visibilità notturna, dovuta alla colorazione scura persistente nel tempo che crea contrasto fra pavimentazione e segnaletica orizzontale
- Miglioramenti di aderenza, tessitura e regolarità superficiale (IRI)
- Riutilizzo di ingenti quantità di PFU, preservando nel contempo le risorse naturali
- Aumento della ritenzione degli aggregati dovuto alla diminuzione dello spessore.

### - **Limitazioni dell'Asphalt Rubber**

L'Asphalt Rubber porta a buoni risultati nella maggior parte delle applicazioni, ma possiede alcune limitazioni rappresentate da:

- Maggiori costi iniziali associati alla produzione e necessità di impianti specializzati
  - Ottenimento, in passato, di prestazioni variabili a causa della mancanza di una norma di riferimento contenente specifiche e raccomandazioni per il processo costruttivo
  - Maggiore sensibilità alla temperatura, con conseguente necessità di maggior attenzione al fine di mantenere la temperatura controllata durante la fase di costruzione
  - Tali fattori hanno condotto in passato al verificarsi in alcuni casi di fenomeni di:
    - Disgregazione e rifluimento, legati nella maggior parte dei casi alla qualità della costruzione, confermando l'importanza del controllo della qualità quando si impiega Asphalt Rubber
    - Adesività eccessiva, a cui i conglomerati AR sono più portati data l'elevata viscosità del prodotto.
-

## 3.2 Cenni Storici

### 3.2.1 Il Metodo Mac Donald

Il primo impiego di gomma di pneumatico per modificare le proprietà del bitume risale agli anni 50, anche se fu solo nel 1963 che si realizzò la prima prova industriale di una certa rilevanza. Infatti, l'utilizzo del bitume modificato col polverino di gomma di pneumatico riciclata ha avuto inizio negli Stati Uniti, più di quarant'anni fa, dalla necessità di trovare un rimedio efficace per contrastare la propagazione delle fessure nelle pavimentazioni stradali flessibili, per lo più generate da gradienti di temperatura particolarmente elevati che danno origine a tipici fenomeni di stress termico.

Mentre sviluppava un metodo per riparare i difetti più comuni nelle pavimentazioni di Phoenix in Arizona, Charles H. MacDonald ha provato ad aggiungere polverino di gomma a bitume liquido, eseguendo vari esperimenti con questo nuovo materiale ottenuto, mediante uno dei quali ha notato che, a seguito della miscelazione continua di polverino con bitume per più di quarantacinque minuti, si ottenevano nuove proprietà molto curiose ed interessanti. Il materiale acquisiva un comportamento che univa quello elastico della gomma con quello viscoso del bitume, e decise di battezzare tale materiale "Asphalt Rubber".



Figura 3-1: Charles MacDonald (al centro), ideatore dell'Asphalt Rubber

Il suo lavoro sperimentale con la *Atlas Rubber*, l'*Arizona Department of Transportation* (ADOT) e la *Sabuaru Petroleum and Asphalt Company*, ha portato al brevetto della tecnologia che è correntemente descritta come il metodo McDonald o metodo wet (“umido”) per la fabbricazione di Asphalt Rubber. Insieme alla ADOT ha, quindi, sviluppato e monitorato il nuovo materiale, iniziandone l'applicazione nel 1964.

Il primo utilizzo fu finalizzato alla creazione di “cerotti” per la riparazione di buche presenti lungo le pavimentazioni stradali della città di Phoenix, ed ha funzionato talmente bene che l'Asphalt Rubber ha cominciato ad essere utilizzato come legante per *chip seals*.

A partire dal 1968 la ADOT ha iniziato numerosi studi di ricerca e progetti di sviluppo di questo materiale sotto il coordinamento di Gene Morris, l'allora direttore dell'*Arizona Transportation Research Center*. Durante i primi utilizzi, il polverino di gomma veniva sparso dall'alto di un autocarro e quindi mescolato facendo alternativamente avanzare e retrocedere il veicolo. Nonostante si trattasse di un utilizzo primitivo, nel 1972 è stato comunque possibile costruire il primo campo sperimentale utilizzando Asphalt Rubber come *seal coat*. Quest'applicazione è oggi conosciuta come SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), ed entrambe le utilizzazioni, SAM (*Stress Absorbing Membrane*) e SAMI, hanno portato buoni risultati che hanno spinto l'ADOT ad implementare l'uso di questa tecnologia sino a realizzare, tra il 1974 e il 1989, oltre 1000 km di strade statali utilizzando l'Asphalt Rubber sia sotto forma di SAM o SAMI che come mano di attacco sotto un tradizionale conglomerato per manto di usura.

Nel 1975, il polverino di gomma di pneumatico riciclata è stato incorporato per la prima volta con successo nel bitume. Basandosi sulle ricerche condotte dal citato dipartimento dell'Arizona, in altri Stati, diversi enti hanno iniziato ad utilizzare Asphalt Rubber. In particolare, in California e Texas negli anni '70 sono stati eseguite applicazioni pratiche di *chip seals*, mentre dal 1980 sono iniziate le applicazioni di conglomerati HMRA.

Un ulteriore esempio è fornito dalla Florida, dove ai fini di ovviare al brevetto è stato sviluppato un tipo di bitume modificato caratterizzato da percentuali di gomma inferiori rispetto a quelle utilizzate per la preparazione di Asphalt Rubber.

Nel 1989, Larry Scofield ha documentato in uno studio la storia dello sviluppo e delle performance dell'Asphalt Rubber nell'ambito della ADOT. Tale relazione documenta come l'Asphalt Rubber sia stato utilizzato con successo come membrana per controllare la deformazione delle pavimentazioni e per ridurre la propagazione della fessurazione in strati di pavimentazione sia rigide che flessibili.

Sempre in questo studio si è giunti alla conclusione che l'Asphalt Rubber poteva essere utilizzato anche per la produzione di conglomerati, mettendo in evidenza come tale bitume porterebbe il conglomerato stesso ad avere caratteristiche adatte per la realizzazione di strati di usura per riabilitare pavimentazione fessurate.

---



---

Nel frattempo la ADOT e il FHWA hanno sponsorizzato numerosi ulteriori indagini che hanno condotto alla pubblicazione di 42 studi, aumentando esponenzialmente le conoscenze e, quindi, l'utilizzo dell'Asphalt Rubber.

Nel 1998, dopo un'evoluzione pluridecennale del materiale, la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) ha pubblicato una definizione dell'Asphalt Rubber (ASTM D8-88):

***“... a blend of asphalt cement, reclaimed tire rubber and certain additives, in which the rubber component is at least 15% by weight of the total blend and has reacted in the hot asphalt cement sufficiently to cause swelling of the rubber particles.”***

(“... una miscela di legante bituminoso, polverino di gomma di pneumatico riciclata e certi additivi, nella quale il contenuto di polverino è almeno il 15% sul peso totale della miscela e che ha reagito sufficientemente nel bitume caldo per portare all'assorbimento delle particelle di gomma.”)

È, quindi, importante precisare che il termine Asphalt Rubber si riferisce al processo wet con l'aggiunta di una percentuale di polverino di gomma compresa tra il 15 e il 22%, d'accordo con quanto specificato dalla norma ASTM D-6114. Così come riferito, questo bitume esiste da quarant'anni ed è inizialmente stato soggetto al brevetto del suo inventore. A partire dal 1992 non risulta più brevettato, il che ha portato alla sua rapida diffusione nel resto del mondo, ed in particolare in paesi europei quali Portogallo, Spagna, Germania e Austria.

Curiosamente, la grande crescita dell'impiego di bitumi modificati con polimeri è proceduta parallelamente all'esperienza di bitumi modificati con polverino di gomma di pneumatico. Anche se largamente diffuso, l'utilizzo di questo materiale è stato limitato ad un uso sperimentale a causa delle restrizioni di brevetto. Nonostante tale vincolo, nel 1990 ben 23 Stati negli USA avevano già applicato AR.

Una ricerca esauriente è stata completata nel 1992, anno di cessazione del brevetto, nell'ambito del *Construction Productivity Advancement Research Program* finanziato dell' *U. S. Army Corps of Engineers and Private Industry* [3-1].

A questa si aggiunge un studio iniziato nel 1995 e finanziato dal FHWA insieme a diversi Stati nordamericani, nel quale vengono riassunte le proprietà ed i risultati dei vari tipi di gomma utilizzati nella modifica dei bitumi. Questo studio non è mai stato completato, ma una rassegna parziale dei risultati ottenuti è stata pubblicata nelle pratiche operative per l'utilizzo di AR del *Transportation Research Institute of Oregon State University* nel volume *“Summary of Practises in Arizona, California and Florida”* e in una guida provvisoria per la costruzione di sezioni con conglomerati AR denominata *“Construction Guidelines”*.

---

A tali attività si sono affiancate ricerche finalizzate alla valutazione di tutti gli aspetti dei leganti AR, incluse le percentuali di CRM da utilizzare e le condizioni di miscelazione, e lo studio *Synthesis* del NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*), che include un sommario dello stato dell'arte relativo a tutti i tipi di incorporazione di CRM nelle pavimentazioni stradali. Tutti questi studi si sono rivelati di grande utilità per gli enti gestori intenzionati a sviluppare specifiche per i conglomerati HMRA.

I risultati delle applicazioni pratiche ottenuti nel tempo hanno consentito di perfezionare le tecniche di produzione e le prestazioni dell'Asphalt Rubber, portando nell'ultimo decennio alla definizione di una specifica norma che definisce e identifica tale materiale (ASTM D-6114). Il diagramma di Figura 3-2 mostra l'evoluzione dell'applicazione del polverino di gomma nelle pavimentazioni stradali, iniziate con i noti trattamenti SAM e SAMI, il cui obiettivo principale era sigillare fessure, impermeabilizzare la pavimentazione, evitando il progredire del deterioramento.

Attualmente per la preparazione delle miscele wet si ricorre ad un apposito impianto, che è normalmente fisso (o semimobile) nel caso dell'AR, mentre risulta più compatto e completamente mobile nel caso dei Terminal Blend, normalmente preparati sul luogo di stesa.

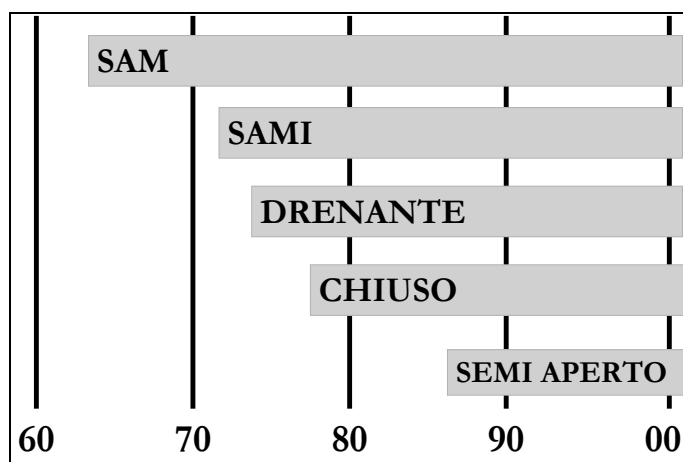


Figura 3-2: Evoluzione dell'applicazione di CRM nelle pavimentazioni stradali

### 3.2.2 Evoluzione delle politiche di utilizzo

La storia dell'Asphalt Rubber non sarebbe completa senza menzionare gli stretti rapporti esistenti fra governo e industria stradale negli Stati Uniti. A livello regionale, in California fino a 1992 i fondi federali per le strade non potevano essere impiegati per l'utilizzo di Asphalt Rubber a causa della sua condizione di "*experimental status*", legata all'esistenza del rispettivo brevetto.

L'allora sindaco di Palm Springs, Sonny Bono, divenuto più tardi membro del Congresso degli Stati Uniti, ha promosso e diffuso l'utilizzo dell'AR cercando di cambiarne lo statuto sperimentale, sostenuto nella sua posizione dal successo ottenuto dall'uso prolungato di questo legante lungo diverse strade californiane. Questo tipo di politica sarebbe stata necessaria in tutte gli stati, a meno che il governo federale non decidesse di eliminare le restrizione dei finanziamenti per i materiali sperimentali.

A livello nazionale, la *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act* (ISTEA) del 1991, sezione 1038, ha imposto l'utilizzo di conglomerati AR in alcuni progetti di strade federali finanziati dal governo e la cui conclusione era prevista entro il 1995, anno in cui la maggior parte dei brevetti associati ai processi di modifica di bitumi o conglomerati con gomma sarebbero già scaduti, con la previsione di aumentare il numero di tali progetti negli anni seguenti. Giunti al 1995, il settore della costruzione stradale si è opposto vigorosamente a questo mandato, che avrebbe concentrato nelle mani di pochi costruttori detentori della tecnologia Asphalt Rubber, la produzione di una buona parte dei 500 milioni di tonnellate annue di conglomerato a caldo negli Stati Uniti. Nell'ambito di questa campagna contro l'AR sono state sollevate le critiche di seguito elencate [3-1].

#### - Costi iniziali e Ciclo di vita economico

I costi di produzione unitari risultavano superiori rispetto all'asfalto convenzionale, soprattutto sino al momento in cui tale tecnologia non venisse impiegata su larga scala. Studi effettuati in Arizona calcolarono che il costo unitario si sarebbe mantenuto elevato sino a che i brevetti non sarebbero scaduti e più appaltatori competessero per il lavoro.

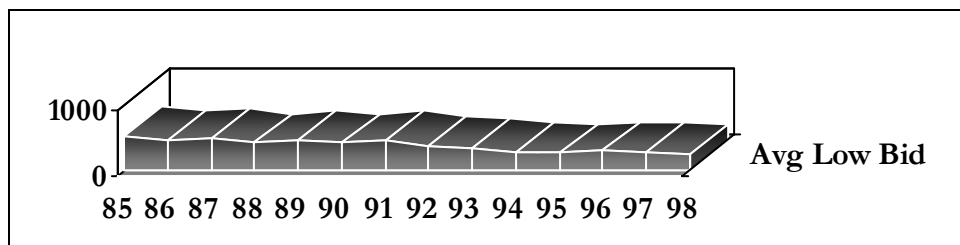
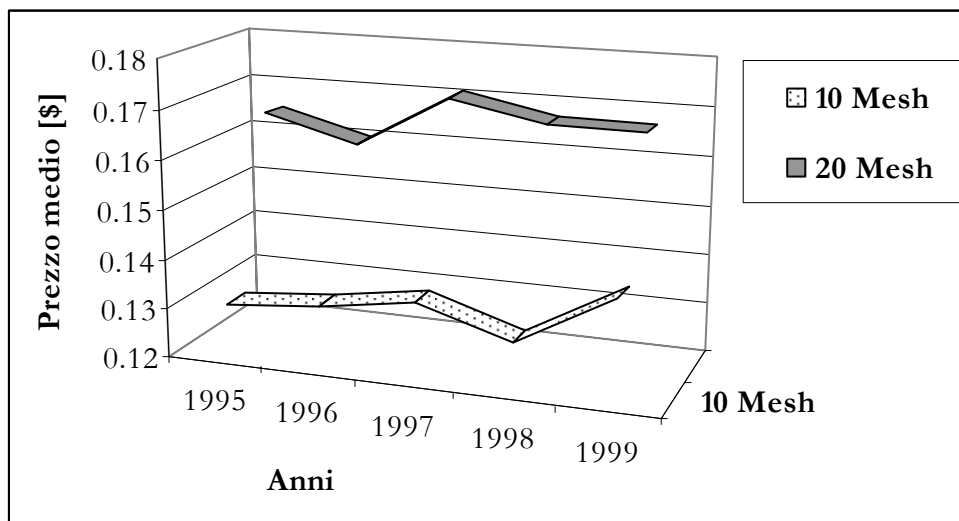


Figura 3-3: Andamento decrescente dei prezzi dell'AR nel mercato dell'Arizona

Attualmente, la differenza di prezzi fra conglomerati modificati con Asphalt Rubber e convenzionali è di circa \$10.00 per tonnellata, e la tendenza alla diminuzione del prezzo è mostrata nella Figura 3-3 [3-1].

L'andamento di tale valore è legato all'andamento del prezzo del CRM, mostrato in Figura 3-4 [3-1].



**Figura 3-4: Andamento medio dei prezzi di CRM negli stati del sud ovest in USA**

Fino alla pubblicazione di uno studio condotto da Hicks, Lundy e Epps [3-2], il risparmio economico relativo all'AR risultava poco chiaro, a causa dell'eterogeneità di valori che emergevano dalle diverse indagini effettuate.

Le indicazioni disponibili tendevano a mostrare costi di manutenzione ridotti legati alle buone prestazioni nel tempo dei conglomerati AR, ma nessuno studio aveva ancora applicato il modello di analisi dei costi del ciclo di vita adottato dalla FHWA. Lo studio citato ha mostrato risultati oggettivi e convincenti che indicano come l'applicazione di AR risulti economicamente conveniente nella maggior parte dei casi.

#### - **Riciclabilità**

Durante il brevetto il riciclaggio non è mai stato provato, dal momento che sino al 1992 le pavimentazioni in AR non avevano ancora mostrato ammaloramenti, portando a diffondersi l'idea che il riciclaggio di tali pavimentazioni non fosse possibile. Quando alcuni tratti di tali pavimentazioni hanno raggiunto il termine della propria vita utile, queste sono state, invece, riciclate con successo.

#### - **Preoccupazioni ambientali**

Nota la pericolosità dei fumi risultanti dai processi di combustione dei pneumatici fuori uso, si riteneva erroneamente che il processo di fabbricazione di conglomerati a caldo con Asphalt Rubber fosse interessato da tale fenomeno.

---

In realtà, dal momento che durante il processo di produzione del bitume modificato con polverino non vengono raggiunte le temperature di combustione della gomma, ma solo quelle di fusione, non viene prodotto fumo.

- **Modifiche agli impianti di produzione**

L'apparecchiatura usata per mescolare il bitume alla gomma richiede che vengano effettuate piccole modifiche ad un impianto di produzione di bitumi modificati convenzionale. L'apparecchiatura è tipicamente montata su un rimorchio ed è trasportata sino al luogo dell'impianto di produzione dei conglomerati bituminosi. I serbatoi dedicati di miscelazione e di reazione fanno parte dell'impianto di produzione dell'Asphalt Rubber e sono anch'essi mobilitati sino al luogo di produzione.

Le critiche poste all'introduzione sistematica di questa nuova tecnologia hanno fatto sì che non entrasse in vigore il citato mandato, "congelato" dall'introduzione di una moratoria che imponeva di chiarire in maniera soddisfacente tutte le voci dell'elenco presentato prima di poter essere applicato. Nonostante numerosi studi e progetti di ricerca, oltre che un monitoraggio delle caratteristiche delle pavimentazioni realizzate abbiano risposto a tutte le questioni sollevate, durante la citata moratoria l'industria stradale riuscì a persuadere il Congresso a rigettare la Sezione 1038 dell'ISTEA. Come anticipato, i brevetti scaduti nel 1992 non sono stati rinnovati e adesso l'Asphalt Rubber è di dominio pubblico.

Durante il mandato, ai fini di eludere il congelamento della tecnologia AR, vari scienziati e ingegneri hanno sviluppato metodi e formulazioni alternative al fine di incorporare il polverino di gomma in bitumi e conglomerati, rispondendo alle esigenze di mercato. Gli insuccessi ottenuti durante queste nuove sperimentazioni, insieme agli effetti del mandato stesso, hanno portato alcune concessionarie di infrastrutture viarie a perdere interesse nei riguardi dell'Asphalt Rubber, nonostante i vantaggi ottenibili dalla sua applicazione.

Il percorso di sviluppo che l'Asphalt Rubber ha attraversato è stato, quindi, lungo e controverso. Come ogni nuovo prodotto, le aziende costruttrici ed i gestori devono passare per una fase di apprendistato, nella quale si verificano sia successi che insuccessi, affinché il prodotto provi di essere valido prima di essere approvato dalla concessionaria o dall'utente. Attualmente l'Asphalt Rubber ha superato questa prova, e le concessionarie che hanno creduto nei suoi vantaggi stanno ora traendo i profitti di una scelta riuscita. In stati come la California e l'Arizona, dove l'AR è stato maggiormente applicato, questo è risultato essere una scelta conveniente anche dal punto di vista economico.

---

### 3.2.3 L'Asphalt Rubber oggi

Sono passati più di quattro decenni da quando McDonald ha impiegato per la prima volta AR cercando di risolvere il problema della disgregazione superficiale di una strada in Phoenix. Nonostante il supporto della *Federal Highway Administration* negli Stati Uniti, tramite gli sforzi di Douglas Bernard, soltanto pochi stati hanno implementato seriamente l'utilizzo di Asphalt Rubber.

Dalla scadenza dei brevetti, nel 1992, diversi appaltatori di pavimentazione stradali sono stati coinvolti nel mercato di questo materiale, e dal numero iniziale di due aziende operanti in questo settore negli anni '70, si è passati al numero odierno di circa una trentina di appaltatori che possiedono impianti di fabbricazioni di AR o apparecchiature per la sua distribuzione, e tale numero è in continua crescita. Ma, anche dopo la scadenza dei vari brevetti, solamente quattro Stati nordamericani (California, Arizona, Texas e Florida) e la Repubblica del Sud Africa hanno continuato ad utilizzare Asphalt Rubber come un materiale per la realizzazione di pavimentazioni stradali sino al 1996.

Lo sviluppo dell'industria dell'AR dipende dalla decisione delle concessionarie di ricorrere a tale materiale. Va sottolineato come questa tecnologia non sia stata sviluppata per risolvere il problema dei pneumatici fuori uso, bensì si è iniziato a ricorrere al polverino di gomma a causa delle caratteristiche e qualità significative che questo è in grado di conferire alle pavimentazioni per le quali vengono utilizzati conglomerati AR.

La *Rubber Pavements Association* (RPA), fondata nel 1993 dallo sforzo congiunto a livello nazionale negli USA ed avente come obiettivo sia lo sviluppo e ricerca che la divulgazione delle qualità e possibilità offerte dall'Asphalt Rubber, può rappresentare diversi produttori di tale materiale, in virtù del fatto che non è più soggetto a brevetto (non a caso è stata fondata l'anno successivo alla scadenza del brevetto stesso).

I paesi che possiedono una maggior storia, e quindi una maggior esperienza, nell'utilizzo del bitume modificato con polverino di gomma riciclata tramite il processo wet sono Arizona, California, Sud Africa e Australia.

I conglomerati bituminosi e trattamenti superficiali utilizzati sono in media caratterizzati da una percentuale di legante compresa fra il 6.5 e il 9%, costituita normalmente da una quantità di polverino tra il 18 e il 22% sul peso del bitume.

Attualmente l'aspetto per il quale esistono più dati disponibili è la valutazione della performance delle pavimentazioni in AR comparativamente con quella delle pavimentazioni tradizionali. In molti casi questi dati sono raccolti dopo la costruzione di pavimentazioni utilizzando diversi tipi di leganti bituminosi.

---

Alcune di queste sezioni hanno più di trent'anni di servizio e hanno consentito, nel corso di questo tempo, di raccogliere dati come l'evoluzione dello stato di fessurazione, di formazione di ormaie, i costi di manutenzione e le caratteristiche superficiali. Dal confronto emerge come l'inibizione della propagazione della fessurazione da parte dei leganti AR sia un'evidenza che costituisce la chiave del successo di questi pacchetti stradali.

Nel 1999, la RPA ha organizzato un simposio Internazionale a Tempe, Arizona, al quale hanno partecipato rappresentanti di enti pubblici e privati di 17 paesi. L'interesse di questo simposio ha portato all'organizzazione del primo convegno mondiale "Asphalt Rubber 2000 Conference", tenutosi presso Vilamoura, in Portogallo. Questa conferenza ha riunito più di 200 tecnici e scienziati, in rappresentanza di oltre 30 paesi. Lo scopo di questa conferenza è stato quello di chiarire una serie di dubbi legati al suo utilizzo, in particolare per quanto riguarda le performance comparate fra conglomerati convenzionali e CRM, le questioni ambientali legate alla fabbricazione dell'AR e la relazione performance/costo.



Figura 3-5: Immagine associata ai due Congressi Internazionali sull'Asphalt Rubber tenutisi nel 2000 e 2003

Gli atti di questo convegno hanno riassunto più di 30 anni di investigazioni e esperienza nell'utilizzo, performance e proprietà dei bitumi Asphalt Rubber e provveduto informazioni essenziali per quanto riguarda questo prodotto, la sua storia e il suo interesse ingegneristico. Queste informazioni hanno consentito a diversi ingegneri di sfruttare questo materiale, la sua elevata durabilità, i suoi benefici ambientali e la sua efficienza economica. Come conseguenza di questa conferenza e del lavoro sviluppato dalla RPA, l'utilizzo dell'AR in nuove zone è cresciuto esponenzialmente.

Il mercato stradale ha capito che l'implementazione dell'utilizzo di AR può produrre un livello migliore di performance rispetto alla maggior parte delle pavimentazioni. Il bitume modificato con polverino di gomma riciclata è una soluzione ingegneristica più economica, che consente di realizzare pavimentazioni caratterizzate da maggior durata, miglior performance, minor rumore e maggior sicurezza, oltre a permettere lo smaltimento di una considerevole quantità di pneumatici.

A tre anni di distanza è stato organizzato il secondo convegno "Asphalt Rubber 2003 Conference", in Brasilia, Brasile, durante il quale sono stati presentati oltre 40 studi, tra i quali si dà particolare rilievo ai lavori presentati da Alex Visser e Jack Van Kirk, i quali hanno illustrato le ricerche che il *California Department of Transportation* ha effettuato in Sud Africa con l'*Heavy Vehicle Simulator APT*, al fine di simulare in breve tempo l'avanzamento dello stato di degrado delle pavimentazioni. Nei loro articoli vengono comparate la resistenza alla propagazione della fessurazione di un conglomerato convenzionale di 75 mm con due conglomerati gap-graded in AR da 37 mm e 25 mm. I risultati ottenuti vengono illustrati più avanti (vedi §3.3.2).

Secondo Mark Belshe (*FNF Construction, Arizona*) "... dopo la conclusione dei diversi progetti dove è stato utilizzato AR ed è stata misurata la regolarità finale della pavimentazione, varie aziende di costruzione sono riuscite a ricevere il premio che i dipartimenti dei trasporti riconoscono per i progetti caratterizzati da una minor irregolarità. I dati finali consentono di concludere che quanto maggiore è il numero di strati in AR in un pacchetto stradale, maggiore è la regolarità finale delle pavimentazioni".

George Way [3-3] ha presentato a questo convegno i risultati di una comparazione dei valori di IRI in sezioni realizzate con diversi conglomerati, caratterizzate dai medesimi livelli di traffico e ubicate nella stessa zona. La superficie con bitume CRM ha dimostrato la migliore performance.

Attualmente, la crescita delle attese per l'impiego di Asphalt Rubber si concentra sui conglomerati bituminosi drenanti, che contengono un'elevata percentuale di legante come formulato per la prima volta dall'ADOT. Fino al 2003 la stessa ADOT ha realizzato più di 28'000 km di corsie di questo tipo di conglomerati.

---



---

L'applicazione di strati di spessore inferiore utilizzando AR come legante non porta soltanto a una superficie più liscia e durevole, ma permette anche una riduzione significativa del rumore, al punto che il governatore dell'Arizona, Jane Dee Hull, ha prescritto il suo utilizzo in tutta l'area metropolitana della città di Phoenix, lungo oltre 200 km di corsie. Una risposta positiva nei confronti di questo materiale è rappresentata anche dal programma pilota della FHWA, finalizzato allo studio della produzione di rumore e all'analisi economica comparativa di riabilitazioni delle superfici stradali e realizzazione di barriere sonore.

Il contributo della RPA nel promuovere l'utilizzo dell'Asphalt Rubber, così come definito della ASTM D6114-97 (2002), ha fatto sì che tale materiale iniziasse ad essere introdotto in diversi nuovi paesi. Tuttavia, non tutti possiedono la capacità tecnica di produrlo, a causa della necessità di un impianto specializzato.

L'implementazione del "*Quiet Pavement Program*" della ADOT ha portato in Arizona i rappresentanti di diversi paesi, interessati ad approfondire l'argomento. Attualmente il Giappone sta sviluppando un piano per ridurre il rumore del traffico utilizzando AR e la Cina sta per realizzare il suo primo progetto con tali leganti nei pressi di Hong Kong. Alcuni paesi si stanno anche muovendo verso l'utilizzo di AR in strati drenanti. La Corea ha concordato un programma con la Thailandia nell'ambito del quale è stata costruita una sezione sperimentale mediante un impianto messo a punto dallo stesso *Taiwan Construction Research Institute*. Nel frattempo nuovi sviluppi nell'area della fabbricazione di apparecchiature per la produzione di AR sono stati portati avanti in Texas, dove Andy Cox, dell'azienda D&H ha presentato una nuova unità computerizzata per la produzione continua di AR in piccoli impianti bituminosi.

Recentemente negli Stati Uniti, lo stato del Nebraska ha sviluppato un programma di riabilitazione di pavimentazioni rigide in cemento, utilizzando una combinazione di conglomerati aperti AR e conglomerati gap-graded AR, mentre la *Rocky Mountain State of Colorado* ha utilizzato AR *chip seals* nella riabilitazione di piste aeroportuali con piccolo volume di traffico.

George Way riferisce che l'ADOT sta costruendo nuove strade ad alta capacità di traffico per una spesa totale di costruzione di oltre \$ 400'000'000.00 e per le quali è stato imposto l'utilizzo di bitume modificato con polverino di gomma per la realizzazione degli strati di usura.

In Alberta, Canada, è stato implementato un programma di pavimentazione con Asphalt Rubber in una zona caratterizzata da temperature estremamente fredde. Nella Columbia Britannica, sempre in Canada, è stato sviluppato un apposito piano per dimostrare l'applicabilità di questo bitume agli ingegneri più scettici.

---

Il Messico ha utilizzato ARCS e HMRA in centinaia di chilometri di pavimentazione e l'utilizzo di Asphalt Rubber in trattamenti superficiali è una strategia utilizzata anche per ridurre l'emissione di polvere nelle strade non asfaltate che confinano con gli Stati Uniti.

In Puerto Rico, in seguito alla recente inaugurazione di un nuovo impianto per il riciclaggio di pneumatici, è stato messo a punto un progetto di dimostrazione e monitoraggio dell'utilizzo di AR.

In Europa, il Portogallo continua a guidare l'aumento dell'utilizzo di Asphalt Rubber, che rientra ora nei capitolati della seconda maggior concessionaria di autostrade, la *Auto-Estradas do Atlantico S.A.*, mentre Spagna, Germania, e Austria hanno recentemente adottato progetti sperimentali di riabilitazione di pavimentazioni autostradali rigide e flessibili utilizzando Asphalt Rubber. Tutti questi progetti dimostrativi hanno sinora mostrato performance al di sopra delle aspettative, anche sotto le condizioni più estreme.

Come risultato del rinnovato interesse per l'Asphalt Rubber e dei risultati raggiunti, la FHWA ha posizionato una sezione test con il 50% di riduzione dello spessore di un conglomerato gap graded in Virginia, monitorato dal *Turner Fairbanks Research Center*, ed ha testato le pavimentazioni in Asphalt Rubber con l'utilizzo dell'apparecchiatura ALF (*Accelerated Loading Facility*). Tutti gli altri materiali testati in questo studio comparativo hanno fallito, mentre la sezione con Asphalt Rubber non ha presentato fessurazione.

Il *California Department of Transportation* sta correntemente comparando in situ pavimentazioni in Asphalt Rubber e conglomerati da bitumi modificati SBS, utilizzando il veicolo HVS dell'Università di Berkeley, California.

Un altro progetto di investigazioni della performance dell'AR è attualmente condotto presso l'Arizona State University dai professori Matt Witzcak e Kamil Kaloush, finanziato da *Ford Motor Company*, ADOT e RPA.

Il Dr. Serji Amirkhanian, della *Asphalt Rubber Technology Service* presso l'Università di Clemson sta conducendo un studio sperimentale su alcune sezioni dimostrative in South California.

Ci sono anche tante altre università, quali l'Università Politecnica di Madrid e l'Università degli Studi di Parma, per citarne alcune, che stanno analizzando la performance di pavimentazione in AR, approfondendone lo studio.

Nell'ottobre del 2006 si terrà il convegno internazionale "Asphalt Rubber 2006 Conference", e avendo osservato gli enormi sviluppi avvenuti tra i precedenti AR2000 e AR2003, ci si aspetta che questa conferenza porti a conoscenza di innovativi casi dimostrativi e risultati di ricerca nell'utilizzo di questo materiale.

---

---

### 3.3 Attributi delle Pavimentazioni in Asphalt Rubber

#### 3.3.1 Principali aspetti caratterizzanti la superficie di una pavimentazione

In generale, le principali caratteristiche richieste ad una pavimentazione stradale sono la massima durabilità, la minima necessità di manutenzione ed il mantenimento nel tempo di buoni livelli di sicurezza, garantita essenzialmente da buone caratteristiche superficiali. Inoltre assumono oggi un ruolo molto importante gli aspetti ambientali e finanche gli aspetti estetici, sulla base dell'idea che il contesto stradale debba concorrere alla costruzione di un paesaggio in armonia con gli spazi urbani e con gli insediamenti umani. La strada deve soddisfare anche requisiti visivi, ed elementi quali *patches* (o altri segni di manutenzioni evidenti) ed altre irregolarità sulla strada non risultano graditi all'utente, oltre a comportare spesso problemi di sicurezza. Altri aspetti che non devono essere trascurati sono la regolarità percepita dagli utenti e le emissioni di rumore legate direttamente alla rugosità superficiale. Dal momento che tutti gli aspetti citati dipendono dalle caratteristiche superficiali di una pavimentazione, ossia dalle sue proprietà funzionali, si è ritenuto opportuno approfondire questo aspetto.

Un parametro particolarmente importante per la descrizione delle caratteristiche superficiali di una pavimentazione è la tessitura superficiale o rugosità, intesa come lo scostamento della superficie stradale dal piano medio di interpolazione della stessa.

Questa caratteristica della superficie stradale dipende principalmente, nel caso di conglomerati bituminosi, dal tipo di aggregati lapidei impiegati e dalla modalità di realizzazione dello strato superficiale [3-4].

Le principali distinzioni nel tipo e tessitura di una pavimentazione possono essere fatti:

- rispetto ad un piano orizzontale, distinguendo tra tessitura casuale, quando non è rilevabile in nessuna direzione predominante, e tessitura trasversale, tipica delle pavimentazioni in calcestruzzo è caratterizzata da striature perpendicolari alla direzione principale del traffico;
  - rispetto ad un piano verticale, dividendo in tessitura positiva, formata da asperità che si ergono al di sopra del piano di inviluppo che media la superficie stradale, e tessitura negativa, nel caso sia possibile identificare vuoti tra le particelle che compongono la superficie stradale stessa.
-

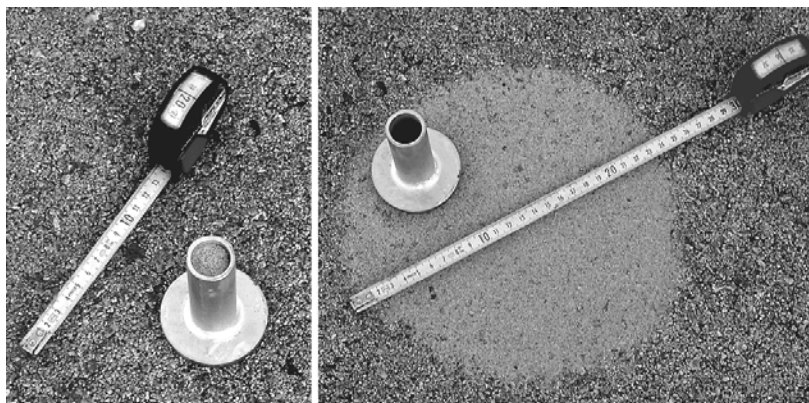
Considerando il caso di pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso, assume particolare importanza la macrotestitura, ossia la componente della tessitura superficiale legata alle dimensioni dei singoli aggregati lapidei, alla relativa distribuzione granulometrica (mix design), nonché alla quantità di legante e alle modalità di confezionamento e posa in opera dell'intero conglomerato.

Le rugosità legate a questo tipo di tessitura consentono al battistrada del pneumatico, mediante forze di pressione, di vincolarsi alla superficie stradale generando un processo deformativo nel pneumatico stesso. L'energia assorbita da quest'ultimo, dovuta alla forza di reazione orizzontale durante il passaggio sulla sede stradale, non viene interamente restituita ma viene in parte trasformata in calore, generando localmente temperature che possono risultare così elevate da produrre una parziale liquefazione della gomma.

Un altro aspetto importante legato alla macrotestitura è il sistema di micro canali di scorrimento che questa definisce per l'immagazzinamento delle acque meteoriche, riducendo in tal modo lo spessore del velo idrico responsabile dei fenomeni di *aquaplaning*.

Ai fini della valutazione in sito di tale componente della tessitura, alle metodologie classiche di misura si affiancano tecniche che non necessitano di un diretto contatto con la superficie stradale e ricorrono, ad esempio, all'impiego di laser.

Tra le metodologie classiche, si riportano le misure volumetriche, basate sull'utilizzo di un volume noto di materiale facilmente modellabile che viene steso manualmente ed in forma circolare sulla pavimentazione. Il diametro medio ottenuto consente il calcolo dell'area occupata, la quale rapportata al volume iniziale permette di valutare la tessitura superficiale. In Italia, ad esempio, il CNR stabilisce che il materiale da impiegare sia sabbia e il corrispondente metodo viene, quindi, definito come metodo di misura dell'altezza di sabbia.



**Figura 3-6: Metodo di misura dell'altezza di sabbia**

---

Un altro sistema di misura della macrotestitura ricorre alla misura del flusso d'acqua riversato da un cilindro di volume noto appoggiato sulla superficie stradale. L'inverso del tempo impiegato per lo svuotamento del cilindro stesso fornisce una misura dell'effetto drenante della pavimentazione, e costituisce quindi una misura indiretta della tessitura superficiale: all'aumentare del tempo impiegato corrisponderà una superficie più liscia e levigata.

I metodi di misura più impiegati attualmente ricorrono, come anticipato, a tecniche che non implicano il diretto contatto con la superficie stradale, tramite l'utilizzo di profilometri o tessurimetri. Attualmente esistono tre tipologie di tali strumenti in grado di valutare con precisione la macrotestitura di una pavimentazione, che si distinguono in profilometri a luce laser, a luce radente e a punta meccanica, il primo dei quali risulta essere il più impiegato.



**Figura 3-7: Esempio di profilometro laser**

Sempre con riferimento alle pavimentazioni realizzate in conglomerato bituminoso, un'ulteriore proprietà intrinseca è rappresentata dalla microtestitura, legata alle irregolarità superficiali presenti sulle facce dei singoli aggregati lapidei affioranti sul piano stradale. Tale proprietà, detta anche microrugosità, dipende quindi dal tipo di aggregati utilizzati, le cui irregolarità, penetrando nella gomma del battistrada, forniscono un contributo fondamentale all'aderenza sviluppando una significativa pressione di contatto che dà luogo ad un insieme di legami molecolari che consentono l'adesione tra pneumatico e strato di usura. In caso di superficie bagnata, tale legame risulta possibile solo se la pressione di contatto è sufficientemente elevata da consentire di rompere il velo idrico.

All'aumentare della velocità tale rottura risulta più difficile, portando ad una riduzione del valore di aderenza. La microtessitura, quindi, consente lo sviluppo di forze di attrito principalmente alle basse velocità e per pavimentazioni asciutte.

La misura di tale grandezza presenta problemi pratici legati alle ridotte dimensioni (anche pochi micron) delle grandezze coinvolte, costringendo a ricondursi ad una valutazione indiretta degli effetti prodotti tramite la misura della resistenza di attrito radente (*skid resistance*) per basse velocità di prova, utilizzando uno strumento denominato *British Pendulum Skid Tester*. Questo consiste in un particolare pendolo dotato sull'estremità libera di un pattino rivestito in gomma, al quale viene fatta compiere un'oscillazione che porta la gomma a strisciare sulla superficie da testare. Attraverso tale prova viene valutata una grandezza, denominata *British Pendulum Number (BPN)*, che consente di stabilire una misura indiretta della microtessitura.

Un ulteriore parametro, detto coefficiente di levigatura accelerata (CLA), fornisce una misura della resistenza all'usura delle graniglie costituenti lo scheletro litico dello strato superficiale in conglomerato bituminoso, e costituisce un coefficiente di valutazione della capacità di tali materiali di contribuire al rallentamento del processo di degradazione della rugosità superficiale. La misura di questo parametro viene effettuata tramite una specifica apparecchiatura descritta dal B.U. 140/1992 del CNR.

Esistono, altresì, metodi specifici per la misura dell'aderenza, distinguibili in quattro principali modalità operative:

- misura a ruota bloccata (*Locked Wheel Tester*);
- misura della forza di aderenza laterale (*Side Force Measurement*);
- misura con scorrimento fisso (*Fixed Force Devices*);
- misura con scorrimento variabile (*Variable Slip Devices*).

In particolare, la *Side Force Measurement* permette la determinazione del coefficiente di aderenza trasversale (CAT), corrispondente al *Sideway Force Coefficient (SFC)*.

La determinazione di questo coefficiente di attrito ha come scopo valutare le condizioni di sicurezza relativamente alla aderenza in condizione di superficie bagnata.



Figura 3-8: Esempio di veicolo per la misura del coefficiente di aderenza trasversale (CAT)

Il rilievo della tessitura superficiale risulta molto più semplice rispetto alla misura diretta di aderenza, ed è quindi da preferirsi per la gestione della rete stradale, nonostante sia comunque possibile applicare leggi sperimentali che consentono di correlare tra loro le diverse metodologie di misura citate. Esiste, infatti, un forte legame tra tessitura ed aderenza, provata dal fatto che pavimentazioni con micro e macro tessitura diverse sviluppino diversi valori di aderenza.

La resistenza di attrito radente determinata mediante lo *Skid Tester* (CNR 105/85) deve fornire valori di BPN maggiori o uguali a 65 o, in alternativa, il coefficiente di aderenza trasversale (CAT) determinato mediante un'apparecchiatura SCRIM (CNR 147/92), deve risultare maggiore o uguale a 0.65. L'altezza di sabbia determinata mediante la metodologia CNR 94/83 deve, infine, risultare superiore a 0.7 mm.

### 3.3.2 Performance

Le foto riportate nella Figura 3-9, ormai divenute un classico esempio, sono state scattate in Arizona sulla Intestate 40, nei pressi di Flagstaff, dopo 8 anni di servizio della pavimentazione, soggetta ad un intenso traffico pesante. In questo tratto il clima è condizionato dall'altitudine di circa 2100 m e da una precipitazione nevosa pari a 255 cm/anno; le temperature sono comprese tra i  $-6$  e  $38^{\circ}\text{C}$ . La foto a sinistra mostra una struttura di 10 cm di spessore di conglomerato convenzionale, mentre a destra è illustrato un tratto di pavimentazione di 5 cm di HMRA chiuso.



Figura 3-9: Confronto tra due tratti di pavimentazione della I-40, a sinistra in conglomerato tradizionale e a destra in AR, dopo 8 anni di servizio

Queste foto permettono un'immediata percezione dell'elevata performance dei conglomerati AR, sia per quanto riguarda la capacità strutturale che, soprattutto, per la loro resistenza alla fessurazione.

La fessurazione delle pavimentazioni è in genere causata da eccessivi sforzi di tensione all'interno dello strato di conglomerato bituminoso, la cui origine è probabilmente legata ad una deformazione dello strato superficiale dovuta all'azione del traffico, al restringimento causato dalle basse temperature (congelamento), o alla riflessione delle fessure che, nel caso di riabilitazione di pavimentazioni esistenti, dal vecchio strato fessurato si propagano verso il nuovo strato di usura. La fessurazione dovuta alle basse temperature inizia, invece, dallo strato di usura e progredisce verso lo strato di fondo, dal momento che le basse temperature raffreddano in primo luogo la superficie. L'Asphalt Rubber ha dimostrato in diverse utilizzazioni e studi di possedere una resistenza eccezionale ad entrambi i tipi di fessurazione.

Ai materiali che costituiscono una pavimentazione stradale viene, quindi, richiesta una sufficiente resistenza ai più importanti fenomeni di deterioramento quali l'ormaiamento, la fessurazione da fatica e, nei climi più freddi, la fessurazione termica. Le azioni agenti su di una pavimentazione stradale possono essere sia orizzontali che verticali: le prime derivano soprattutto dal peso del veicolo, mentre le seconde sono conseguenti al moto o alle variazioni di velocità del veicolo stesso.

Le azioni orizzontali tangenti al piano stradale possiedono componenti sia in direzione del moto, ovvero dell'asse della strada, sia ad esso ortogonali per effetto della forza centrifuga agente sul veicolo in curva. A causa di tali azioni gli sforzi di trazione sono presenti sia sulla superficie del manto stradale che negli strati più profondi e maggiormente soggetti a flessione. Inoltre, a causa del collegamento tra gli strati, il ritiro del conglomerato dovuto al proprio raffreddamento successivamente alla stesa, genera sollecitazioni di trazione.

Le prove di adesione sull'Asphalt Rubber, prevalentemente condotte nella penisola iberica mediante la prova Cantabro (NLT 362), evidenziano un'ottima resistenza all'azione dell'acqua (<15%) che consente l'applicazione dei leganti AR a conglomerati particolarmente porosi e sollecitati in corrispondenza del contatto legante/aggregato.

Le elevate percentuali di gomma utilizzate nel processo wet permettono di ottenere conglomerati bituminosi drenanti particolarmente resistenti all'ormaiamento, con valori di velocità di deformazione di  $12 \cdot 10^{-3}$  mm/min nelle aree con temperature più elevate e per le classi di traffico più severo (T100), secondo la recente normativa spagnola (PG-3 OC5/2001) [3-5].

---



Sulla base delle rilevazioni effettuate da programmi di valutazione delle prestazioni a lungo termine, l'*Arizona Department of Transportation*, notoriamente coinvolta nei test stradali più severi per le particolari condizioni climatiche nelle quali opera, prescrive dal 1980 conglomerati bituminosi con Asphalt Rubber (*AR-Concrete*, *AR-Hot Mix*, *AR-Friction Course*). Le prestazioni in opera, valutate sulla base di 10 anni di osservazioni, hanno evidenziato risultati notevoli [3-6 e 3-7].

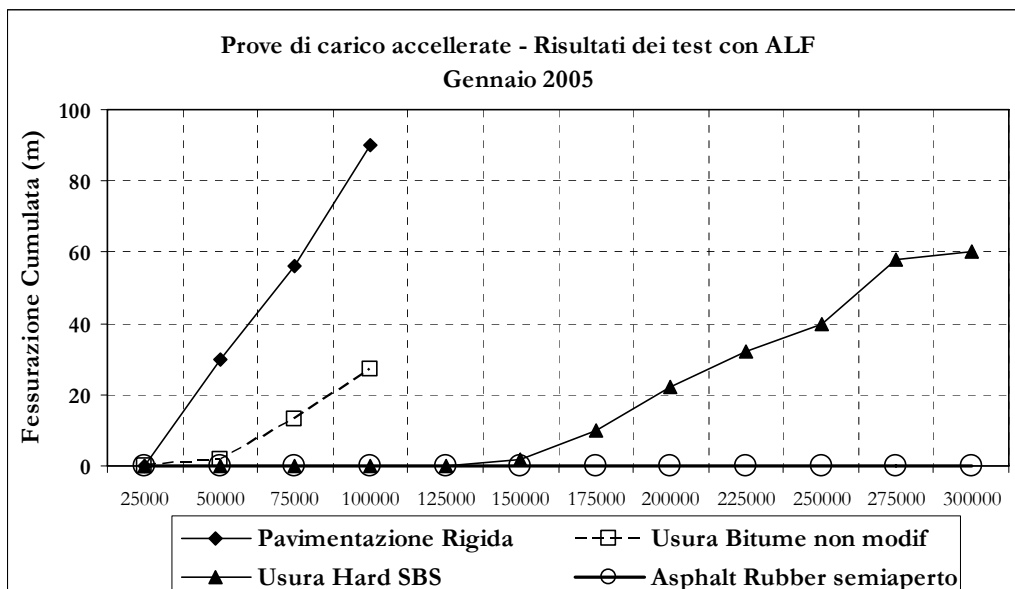


Figura 3-10: Andamento della fessurazione durante le prove di carico accelerate [3-6]

Nel 1992, il *California Department of Transportation* (CALTRAN) e il *South African Council for Scientific and Industrial Research* (CSIR) hanno effettuato prove mediante un *Heavy Vehicle Simulator* (HVS, Figura 3-11) [3-8]. Tale apparecchiatura, piuttosto simile ad un ALF, sposta rapidamente un pneumatico caricato con un peso predeterminato sino a raggiungere la fessurazione o rottura meccanica. Sono stati testati tre tipi di pavimentazione, caratterizzate da strati di usura differenti: 80 mm di bitume modificato con SBS, 25 mm di Asphalt Rubber e 38 mm di AR. Dopo un determinato numero di passaggi, le fessure sono state misurate e contate (vedi Figura 3-12).



Figura 3-11: Heavy Vehicle Simulator impiegato per lo studio del Caltrans e del CSIR.

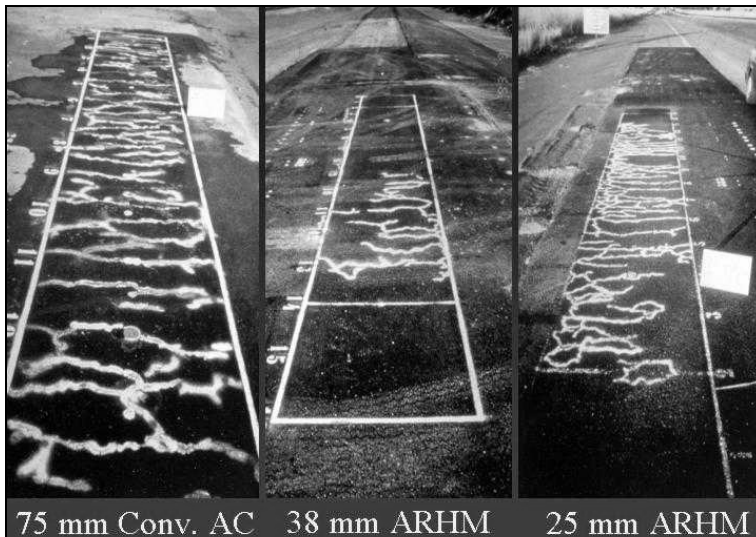


Figura 3-12: Stato fessurativo nelle diverse pavimentazioni sottoposte alle prove con HVS

I primi passaggi con HVS sono stati effettuati a temperatura ambiente (25°C) e con il carico standard previsto dalla U.S. Highway (40 kN). Al termine di 175'000 passaggi il conglomerato tradizionale, al contrario dell'AR, presentava già fessure. Il test mostra che la sezione in conglomerato convenzionale ha fallito dopo 200'000 ripetizioni. A 175'000 ripetizioni la sezione di 38 mm di conglomerato AR non mostrava ancora fessurazione; a partire dai passaggi successivi il carico è stato aumentato a 80 kN, e tale pavimentazione non ha mostrato fessure fino a 237'000 passaggi.

---

Tabella 3-1: Quadro dell'evoluzione delle prove con HVS sulle tre pavimentazioni testate

Ripetizioni	Carico	Superficie rigida (75mm)	ARHM-GG (38mm)	ARHM-GG (25mm)
da 0 a 100000	40 kN	Fessurazione fine a 100000	-	-
da 100000 a 175000	40 kN	Fessurazione di blocco a 175000	-	-
<b>Aumento del carico a 80 kN</b>				
da 175000 a 200000	80 kN	Completamente fessurata	-	Fessurazione fine
da 200000 a 237000	80 kN	Prova interrotta	-	Completamente fessurata
<b>Riduzione della temperatura della pavimentazione a -5°C</b>				
da 237000 a 250000	80 kN	Prova interrotta	Metà sezione	Prova interrotta

Proseguendo la prova, dopo 25'000 ulteriori passaggi la pavimentazione convenzionale presentava uno stato di completa rottura. La sezione di 25 mm di Asphalt Rubber, invece, ha resistito per altri 37'000 passaggi. Per testare la sezione da 3.8 mm di AR, la si è sottoposta a temperature negative (-5°C): con il doppio del carico, dopo 75'000 passaggi (oltre ai 175'000 con carico standard) il provino non aveva ancora raggiunto la metà della fessurazione.

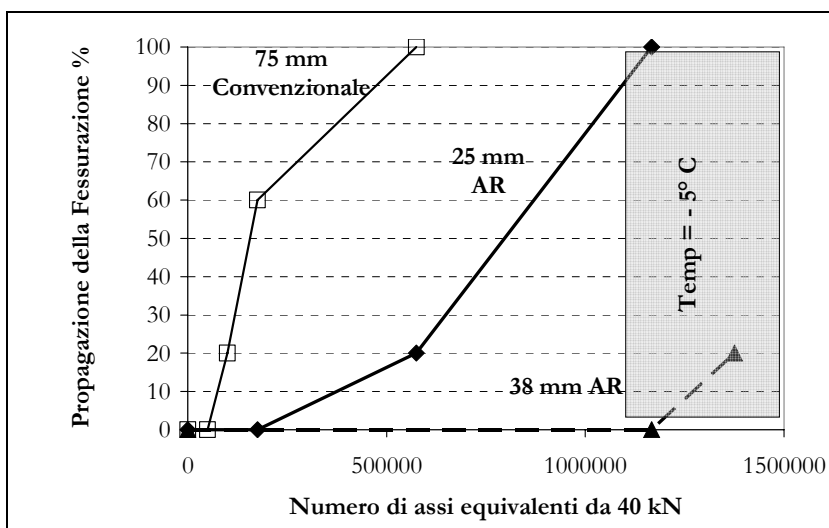


Figura 3-13: Evoluzione della fessurazione nelle tre pavimentazioni sottoposte a prove con Heavy Vehicle Simulator

I risultati ottenuti da tale sperimentazione hanno permesso di concludere che i conglomerati in Asphalt Rubber risultano estremamente resistenti alle sollecitazioni (175.000 passaggi di ruota singola da 40 kN per l'innescò delle prime fessurazioni) anche su simulazioni condotte a -5°C, con la medesima vita utile garantita da uno spessore doppio di conglomerato bituminoso tradizionale.

Nel 1994, Reese ha valutato le proprietà dei conglomerati AR chiusi e drenanti applicati in sei progetti Caltrans [3-9 e 3-10], giungendo a dimostrare che l'utilizzo della pendenza ( $m$ ) della curva di rigidità di *creep* e l'imposizione di un valore massimo di rigidità risultano sufficienti per la determinazione della resistenza alla fessurazione termica dei bitumi AR. La ricerca ha, inoltre, concluso che la rigidità diminuisce del 4% per ogni punto percentuale di aumento della quantità di polverino, per tutti e tre i tipi di gomma. Questa tendenza è altamente dipendente dal tipo di bitume: quanto più bassa è la rigidità del bitume, meno significativo sarà l'effetto della gomma.

L'effetto provocato dalle diverse origini del CRM è risultato simile, e la variazione del valore di pendenza  $m$  non è risultato sensibile alla diversa origine o composizione della gomma impiegata.

L'anno successivo, Bahia e Davis hanno valutato l'effetto di bitumi aventi diversi tipi e quantità di polverino di gomma, sulle proprietà reologiche dei leganti [3-11]. Sono stati presi in considerazione tre tipi di polverino di gomma ricavati mediante processi diversi, ed in particolare da processo di macinatura ambientale (**Ambient Shredding** - AS), processo criogenico (*Cryogenic Grinding* - CG) ed espulsione speciale (*Special Extrusion* - TP). Le quantità di polverino incorporato su due bitumi normali, aventi gradi di penetrazione diversi, sono state del 5, 10, 15 e 20%. Le proprietà reologiche valutate hanno incluso la rigidità di *creep* ( $st$ ) e la *creep rate* ( $m$ ) per temperature comprese tra -20 e 0°C. Tale studio ha concluso che l'effetto (compreso tra il 2 e il 20%) della modifica con polverino di gomma sulla riduzione della rigidità alle basse temperature, è una funzione lineare della quantità di gomma incorporata ed è indipendente dall'origine della gomma stessa.

Un'ulteriore studio eseguito in Arizona [3-12] ha messo a confronto quattro sezioni di pavimentazione, sia in HMA che HMRA, costruite in laboratorio a scala ridotta utilizzando le formulazioni più comuni presenti sul mercato stradale. Le sezioni della pavimentazione sono state sottoposte a traffico simulato mediante il *Model Mobile Load Simulator* (MMLS) con due livelli di carico. Inoltre; sono stati preparati e testati in laboratorio campioni per le prove di *resilient modulus*, *tensile strenght*, *bulk specific gravity*, resistenza a fatica e *creep compliance*. I dati ottenuti sono stati, quindi, introdotti in un programma di simulazione denominato *Kenlayer*, in grado di valutare la performance e la durabilità di una pavimentazione.

---

Si è osservato un aumento graduale nella profondità delle ormaie all'aumentare delle ripetizioni e del carico, ottenendo un minor ormaimento per carichi leggeri. Il totale della profondità delle ormaie dopo un milione di ripetizioni del carico per lo strato in Asphalt Rubber è stato di 1.34 e 178 mm, rispettivamente con carico leggero e pesante, mentre per il conglomerato bituminoso convenzionale si sono ottenuti i corrispondenti valori di 0.55 e 2.55 mm. In entrambi i casi dopo un certo numero di passaggi si sono verificate ormaie sia a destra che a sinistra. L'ormaiamento si è verificato a causa di una densificazione nel caso dei carichi leggeri, mentre a causa di un rifluimento laterale per i carichi pesanti. Nelle pavimentazioni in AR non si è riscontrata fessurazione a fatica dopo un milione di ripetizioni di carico, sia per carichi leggeri che per pesanti.

La media del modulo resiliente misurato è stata, rispettivamente a 5, 25 e 40 °C, di 7665, 2044 e 793 MPa (per 1111, 289 e 115 ksi) per le pavimentazioni con Asphalt Rubber e 9598, 3252 e 821 MPa (1392, 472 e 119 ksi) per quelle di tipo convenzionale. La media dello sforzo di tensione indiretta a 25° è risultata, invece, 1448 kPa (210 psi) per gli HMRA e 1350 kPa (196 psi) per gli HMA convenzionali.

L'*Indirect Tensile Fatigue Test* ha dimostrato che aumentando il livello di stress diminuisce il numero di ripetizioni di carico necessarie al cedimento. Le medie dei valori di compliance a 900 s di carico per le pavimentazioni in HMRA e HMA sono stati, rispettivamente, di 0.036 mm<sup>2</sup>/N e 0.043 mm<sup>2</sup>/N.

La simulazione col software Kenlayer ha dimostrato che per i conglomerati AR e convenzionali sono necessarie, rispettivamente,  $125 \cdot 10^{15}$  e  $7.8 \cdot 10^{15}$  cicli per causare 12.5 mm di ormaie per il livello di carico leggero. Per livello di carico pesante sono sufficienti  $85 \cdot 10^{15}$  e  $6.9 \cdot 10^{15}$  cicli per provocare 12.5 mm di ormaie. Tali valori risultano particolarmente elevati a causa della temperatura alla quale sono state eseguite le prove (25°C).

Attualmente l'Asphalt Rubber viene utilizzato indistintamente in conglomerati bituminosi di tipo chiuso e di tipo aperto, questi ultimi impiegati per la realizzazione di pavimentazioni drenanti e fonoassorbenti. I moduli di deformabilità, secondo la norma AASHTO TP 48-94, a 20°C e 10Hz risultano pari a circa 4000 MPa e 2000 MPa, rispettivamente per conglomerati chiusi ed aperti con una percentuale di CRM pari al 9% [3-13].

Dal momento che i conglomerati drenanti AR contengono una maggior percentuale di bitumi, ne è stata contestata la capacità drenante. In risposta a tale critica, un'indagine condotta da Fredy Reyes [3-14] si è posta l'obiettivo di proporre nuovi conglomerati drenanti utilizzando proprio il polverino di gomma secondo metodo wet.

L'utilizzo di leganti AR avrebbe dovuto ridurre le deformazioni plastiche permanenti, la fessurazione a fatica, la fessurazione termica e l'invecchiamento, causati dagli agenti atmosferici e dalla bassa qualità dei materiali impiegati. È stato, così, condotto uno studio comparativo utilizzando due tipi di conglomerati drenanti, uno convenzionale e l'altro in AR. Per quest'ultimo la percentuale ottima di polverino di gomma è stata determinata tramite prove Marshall. I campioni sono stati successivamente sottoposti a diversi test dinamici per determinare l'influenza della gomma sulla capacità drenante del conglomerato e sul suo comportamento a fatica. La resistenza alla prova Cantabro per i due tipi di conglomerato drenante è diminuita del 15% nel caso di modifica con CRM. In generale il modulo di rigidezza dei conglomerati con polverino di gomma non presenta grandi differenze rispetto ai conglomerati convenzionali per le temperature fra 10 e 20°C, mentre un comportamento diverso si verifica già a 30°C in corrispondenza dei quali il modulo dell'AR aumenta approssimativamente del 30% per le tre frequenze testate. Questo indica che quanto più elevata è la temperatura, maggiori saranno le differenze fra i conglomerati convenzionali e gli HMRA, i quali riducono il rischio di rottura.

Dall'analisi delle prove di fatica si conclude che non esiste una differenza significativa fra i due conglomerati nonostante gli HMRA presentino una minor inclinazione dalla curva di fatica, che indica una minor tendenza alla fessurazione e all'ormaiamento.

Per quanto riguarda le deformazioni permanenti per entrambi i conglomerati sono risultate deformazioni superiori all'1%, il che indica, che entrambi i conglomerati presentano una bassa resistenza alle deformazioni assiali. Mentre per una temperatura di 20°C i due conglomerati presentano un comportamento simile relativamente alle deformazioni permanenti, le deformazioni alle temperature di 30 e 40°C presentano un migliore comportamento nel caso di modifica con gomma, la quale migliora la resistenza all'ormaiamento dei conglomerati alle temperature elevate. Tale studio ha concluso che i due conglomerati possiedono una capacità drenante equivalente.

Come illustrato, diversi studi hanno dimostrato i miglioramenti nella performance di un conglomerato bituminoso quando il legante utilizzato è Asphalt Rubber, ma tra questi pochi hanno indagato la performance di questi conglomerati in condizioni climatiche caratterizzate da basse temperature. Tra questi, un'indagine svolta in Alberta [3-15], nella parte occidentale del Canada fra il quarantanovesimo e il sessantesimo parallelo di latitudine, ha mostrato come i conglomerati AR forniscano buone performance anche in presenza di neve o di manti ghiacciati, dal momento che presentano una superficie piuttosto regolare e resistente. Nello specifico, è stato costruito un tratto sperimentale con diverse sezioni realizzate in Asphalt Rubber, in adiacenza di ciascuna delle quali sono state realizzate sezioni di controllo in conglomerati tradizionali.

---

Ogni sezione di prova presenta due diversi strati di usura in AR, caratterizzati da spessori differenti ai fini di determinarne l'effetto sulle prestazioni. Per ogni sezione sono stati analizzati i fattori strutturali e funzionali prima, durante e dopo la costruzione.

Durante la fase di costruzione delle pavimentazioni si sono evidenziate alcune problematiche:

- la densità di compattazione del conglomerato AR ha presentato difficoltà di raggiungimento dei livelli specificati di compattazione (97% della densità Marshall), aspetto riscontrato anche in esperienze precedenti in altri Stati;
- il conglomerato AR presenta un'elevata adesività, e può essere rullato soltanto con un compattatore in acciaio. La sua stesa risulta, inoltre, più difficile;
- dal momento che nella zona in questione le temperature dell'aria sono piuttosto basse, vi è la possibilità che la temperatura del conglomerato si abbassi rendendo più difficile l'operazione di compattazione;
- apparentemente questi conglomerati producevano maggiore fumo e emissioni rispetto a un conglomerato convenzionale. Il *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) ha studiato le emissioni dai conglomerati Asphalt Rubber, le quali hanno dimostrato di essere allo stesso livello di quelle dei conglomerati convenzionali.

Prima e dopo la pavimentazione tutte le sezioni della strada sono state valutate, ricorrendo a prove di *Road Radar*, *Falling Weight Deflectometer*, *Distress Mapping*, RUT e IRI. I rilevamenti di attrito e IRI per i due tipi di pavimentazioni non ha portato a differenze significative. Questo risultato rientrava nelle aspettative, dal momento che i dati sono stati raccolti immediatamente dopo la costruzione e le sezioni della pavimentazione non avevano ancora sperimentato condizioni più severe di basse temperature (congelamento) o l'imposizione di un carico di traffico superiore.

Le prime indicazioni mostrano come lo strato costruito con spessore ridotto di AR fornisca performance equivalenti a quelle dello spessore superiore per quanto riguarda le prove strutturali e di cracking.

Le misure di rumore, immediatamente dopo la costruzione, hanno dimostrato che le pavimentazioni in AR consentono una riduzione delle emissioni sonore di almeno 4 dB rispetto ai conglomerati convenzionali.

Nella primavera del 2001, ADOT in cooperazione con *FNF Construction Inc*, ha iniziato un'indagine con il coinvolgimento dell'*Arizona State University* (ASU) con lo scopo di determinare le proprietà prestazionali degli HMRA in climi freddi, eseguendo i test raccomandati dalla NCHRP 9-19, in modo da tenerne conto durante la redazione della successiva guida AASHTO 2002 *Pavement Design Guide*.

Questo progetto, chiamato *Buffalo Range TI-Canyon Diablo*, è localizzato lungo la Interstate 40 nei pressi di Winslow, Arizona. La caratterizzazione delle proprietà dell'Asphalt Rubber effettuata verrà poi utilizzata come input diretto per stimare il modulo complesso, risultante dalla curva maestra, da utilizzare in fase di progettazione. Uno degli elementi del successo dell'implementazione dalla nuova AASHTO 2002 consiste nell'avere un data base di materiali caratterizzati per quanto riguarda caratteristiche e proprietà. I risultati delle diverse prove impiegate sono illustrati di seguito:

- *Triaxial Shear Trencht Test*

I risultati dei parametri di coesione hanno mostrato una minor resistenza strutturale del conglomerato aperto Asphalt Rubber rispetto agli altri due, risultato atteso e confortato dal fatto che i conglomerati AR non vengono mai utilizzati per la realizzazione di strati strutturali. L'Asphalt Rubber dimostra, invece, di possedere un maggior angolo interno di frizione e un più ridotta propensione verso la deformazione permanente [3-16].

- *Prove di deformazione permanente*

In entrambe le prove non confinate *static creep* e *repeated load* condotte a circa 55°C (130°F) i conglomerati AR indicano una performance superiore ed una resistenza molto maggiore alla deformazione permanente in confronto ai conglomerati convenzionali. Il fallimento del conglomerato AR ha avuto luogo dopo aver raggiunto un sforzo tra 5 e 10 volte più grande rispetto ad un conglomerato SBS, indicando una migliore stabilità dei primi ai carichi applicati. I risultati di *static creep* e del test di *repeated load* sono stati abbastanza simili in entrambi i casi. Tuttavia i risultati migliori sono stati osservati con i test *static creep*, dai quali risulta anche una migliore stabilità dell'AR in condizioni di carico costante [3-16].

Il conglomerato Asphalt Rubber ha generalmente mostrato minore resistenza alle deformazioni permanenti rispetto agli altri conglomerati testati. Per le prove non confinate questo fatto può essere attribuito a diversi fattori, quali maggiore percentuale di vuoti e quantità di bitume. Si sottolinea nuovamente come questo conglomerato non sia progettato per strati strutturali. Per le prove confinate, le cattive prestazioni mostrate in laboratorio sono da attribuirsi a un incorretto livello di confinamento, non corrispondente a quello che si verifica sul campo. Da queste considerazioni si conclude che i test di routine non si rivelano adeguati a comparare conglomerati aperti *friction course*, mostrando come la scelta di stress imposta in laboratorio non sia risultata adeguata.

Lo studio della sensibilità alla variazione della percentuale di vuoti ha dimostrato che il conglomerato AR compattato sino al 7% di vuoti ha avuto prestazioni molto superiori rispetto a quello con l'11% di vuoti, mostrando una minor propensione alle deformazioni permanenti.

---



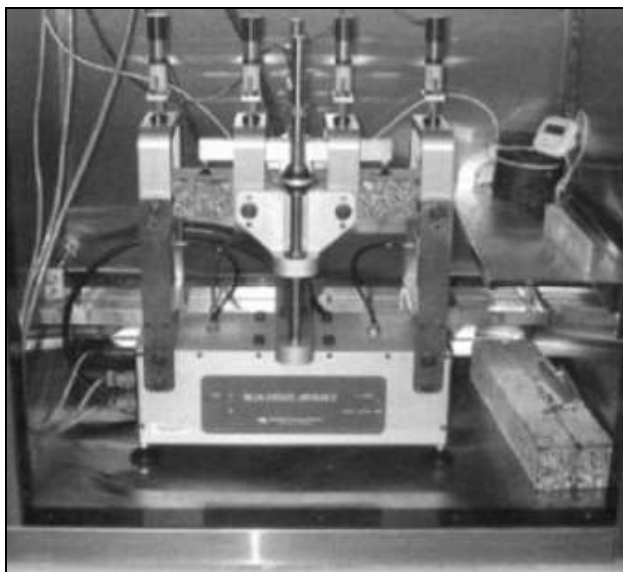
- *Dynamic Complex Modulus Test*

I risultati hanno dimostrato che l'Asphalt Rubber migliora le proprietà dei conglomerati a alte e basse temperature. I test condotti con diverse condizioni di confinamento hanno esibito un aumento significativo nei valori dei moduli alle alte temperature e alle basse frequenze, mentre tale aumento non è stato significativo alle basse temperature per il conglomerato AR aperto. Il confronto tra i valori dei moduli complessi ottenuti con metodi confinati e non confinati dimostrano come la scelta del livello di confinamento sia determinante per la corretta riuscita delle prove, soprattutto per i conglomerati aperti.

- *Fatigue Cracking Test*

I risultati dei modelli di fatica mostrati dai conglomerati Asphalt Rubber in questo studio hanno avuto un rigore eccellente e sono plausibili dal momento in cui una minor vita a fatica è stata ottenuta a temperatura più bassa.

La vita a fatica è risultata maggiore per l'Asphalt Rubber di 15 volte a 21,11°C rispetto ad un conglomerato convenzionale e 3 volte rispetto ad un modificato SBS.



**Figura 3-14:** Apparecchiatura per il *Fatigue Cracking Test*

- *Thermal cracking test*

I risultati delle prove *Indirect Tensile Strength* (vedi Figura 3-15) hanno dimostrato che il conglomerato SBS presenta un valore di sforzo tre volte più elevato che l'AR, risultando non coerente con le osservazioni sul campo.



**Figura 3-15:** Prova di *Indirect Tensile Strength*

Il report finale di questo studio, la cui ricerca sperimentale si è completamente svolta nella Arizona State University, sotto l'orientamento del professore Kamil Kaloush, sarà concluso nella primavera 2006 e sarà uno degli studi più completi circa la performance dei conglomerati AR alle basse temperature. Questo studio include inoltre relazioni di suscettibilità del bitume AR alla temperatura con i risultati ottenuti nelle prove meccaniche.

### **3.3.3 Manutenzione**

Le pavimentazioni in Asphalt Rubber, quando ben progettate e costruite, consentono una riduzione significativa della manutenzione. Studi condotti dall'ADOT rivelano, infatti, che dopo dieci anni le pavimentazioni AR presentano una riduzione del 66% dei costi di manutenzione, legata soprattutto ai minori processi di fessurazione che si verificano in questo tipo di conglomerati.

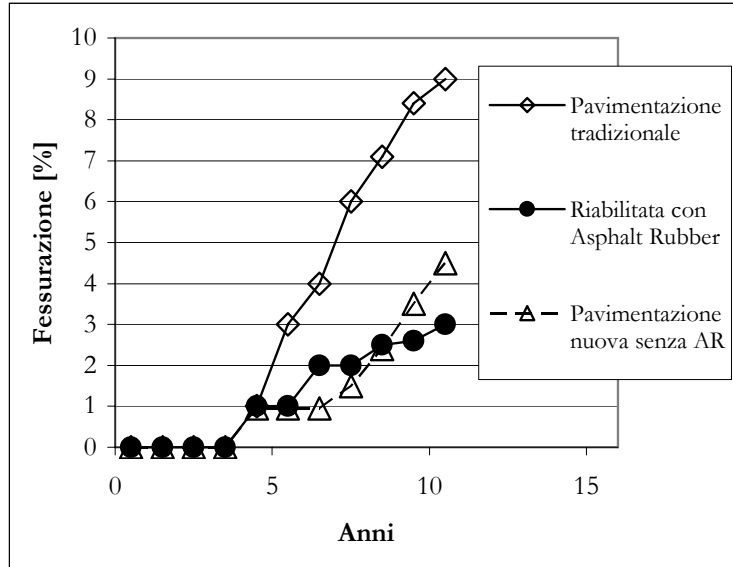


Figura 3-16: Evoluzione della fessurazione nel tempo per diversi tipi di pavimentazioni (ADOT)

Altri studi condotti dall'ADOT in cooperazione con la FWHA fra il 1993 ed il 2001 [3-16], hanno esaminato vari progetti costruiti in diverse zone climatiche dell'Arizona, utilizzando i risultati del FPBB (*Four Point Bending Beam*) e giungendo alla conclusione che l'AR possiede un PG più elevato e risulta adatto ad essere utilizzato in strati di usura.

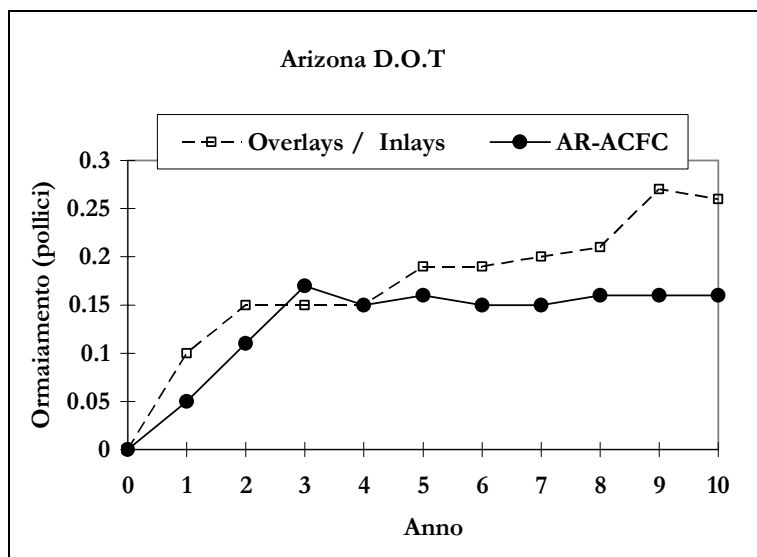
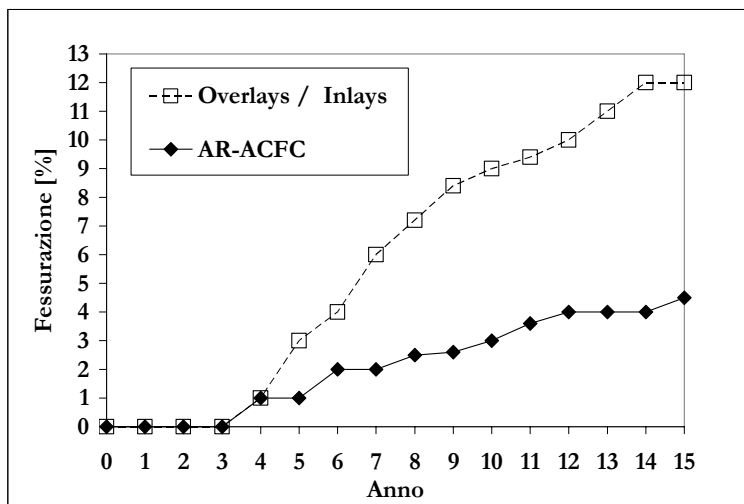


Figura 3-17: Evoluzione comparativa dell'ormaiamento nel tempo (ADOT)



**Figura 3-18: Evoluzione comparativa della fessurazione nel tempo (ADOT)**

La Figura 3-17 e la Figura 3-18 sono state ottenute da dati rappresentativi di circa 500 progetti di riabilitazione stradale di routine, i quali sono stati conseguiti senza utilizzare il sistema SHRP. Tali dati rappresentano una base ragionevole che può essere utilizzata per valutare altri conglomerati ed esaminare quanto o in che grado i nuovi conglomerati progettati in laboratorio possano essere correlati alla performance attuale per quanto riguarda rottura e fessurazione. Le due figure dimostrano che entrambi i conglomerati forniscono buoni risultati sia per quanto riguarda la resistenza a fatica, sia per quanto riguarda la rottura.

Il discorso cambia per quanto riguarda la fessurazione o il grado di densità Marshall per i conglomerati convenzionali. In questi casi l'Asphalt Rubber mostra risultati significativamente superiori.

Un altro studio, condotto nell'ambito di una collaborazione tra *Universidade do Minho* (Portogallo), *Consulpar International* e ADOT [3-17] ha analizzato il fenomeno della riflessione della fessurazione.

Gli strati di usura sono la soluzione più comunemente utilizzata per la riabilitazione di una pavimentazione fessurata. Tuttavia, questi non presentano in molti casi le prestazioni attese a causa, in parte, della propagazione anche dopo un periodo breve delle fessure esistenti nella parte inferiore della pavimentazione (che in molti casi si presentano già dopo le prime piogge). Questo problema, definito riflessione della fessurazione, è un fenomeno ben identificato quando lo strato di riabilitazione presenta lo stesso pattern di fessurazione di quello sottostante.

---

La riflessione della fessurazione viene causata o da una contrazione termica o da carichi ripetuti di traffico, oppure da una combinazione di questi due meccanismi. Sappiamo, inoltre, che la rigidità di una determinata pavimentazione dipende dalla temperatura.

I modelli esistenti per il dimensionamento delle pavimentazioni non tengono conto della riflessione della fessurazione, considerando normalmente la sola fessurazione a fatica, prendendo in considerazione solo i seguenti fenomeni:

- sforzo di tensione nella parte superiore dello strato, particolarmente per gli strati sottili e sopra la sommità di un nuovo strato;
- sforzo di tensione nella parte superiore degli strati esistenti. Particolarmente per strati relativamente intatti, ovvero privi di fessurazione;
- stress complessivo o sforzo sulla superficie dei materiali scollegati dove il meccanismo di fallimento non era da fessurazione a fatica.

Per minimizzare o per ritardare la propagazione delle fessure sono stati messi a punto altri accorgimenti basati su tecniche che includono un aumento dello spessore dello strato di pavimentazione, la modifica delle proprietà dell'asfalto o l'introduzione di una membrana assorbente della fessurazione (SAMI) collocata fra la pavimentazione esistente e il nuovo strato. Tuttavia, si è verificato che le fessurazioni esistenti si propagano fino alla superficie della nuova pavimentazioni producendo un fallimento precoce, evidenziando la necessità di introdurre la riflessione della fessurazione nel modello di riabilitazione delle pavimentazioni. Questo modello deve tener conto della discontinuità prodotta dalle fessure in una pavimentazione esistente.

La propagazione di fessure può essere modellata ricorrendo a tecniche numeriche avanzate quali l'analisi agli elementi finiti associata ai concetti di meccanismo nella frattura.

Una delle conclusioni interessanti dello studio citato mette in evidenza come, per ciascun materiale, lo *shear stress* sia funzione proprio dello spessore utilizzato, diminuendo all'aumentare di quest'ultimo.

Sempre in questo studio viene presentata una comparazione delle prestazioni tra un conglomerato convenzionale ed un conglomerato AR. Come si può verificare nella Figura 3-19, i conglomerati AR sono caratterizzati da una elevata capacità di resistere alla riflessione della fessurazione.

---



**Figura 3-19: Carote che mostrano le capacità di resistenza alla fessurazione degli strati in Asphalt Rubber**

Un altro studio che ha tenuto conto dell'effetto di temperature particolarmente basse è stato effettuato nel Nevada [3-18], analizzando gli sforzi di tensione generati dal restringimento conseguente a gradienti termici consistenti. Quando questi sforzi eccedono la resistenza alla fratturazione dello strato di conglomerato bituminoso, appaiano fessure trasversali. I conglomerati che hanno un modulo di rigidezza elevato alle basse temperature sono più inclini a spezzarsi.

Dal momento che la fessurazione termica è un ammaloramento puramente dovuto alle tensioni di trazione, la resistenza della pavimentazione a questo fenomeno è fornita dal legante, che in condizioni di basse temperature determina le performance del conglomerato.

Uno studio eseguito in Portogallo [3-19] ha esaminato l'influenza sulla vita dello strato di usura della temperatura iniziale e della diminuzione della temperatura sia nello strato fessurato che nello strato di usura. Presenta, inoltre, una comparazione fra gli effetti di un aumento del traffico e della diminuzione della temperatura superficiale. Infine, è stata calcolata la vita utile dello strato superficiale utilizzando le leggi di fatica per gli strati di usura per conglomerati convenzionali.

La stesa di strati bituminosi di usura continua ad essere il metodo più utilizzato per la riabilitazione di pavimentazioni deteriorate. La vita in servizio di questi strati dipende dalla sua performance relativamente allo stress.

---

---

Sulla superficie di una pavimentazione fessurata si svilupperanno fessure che provengono dalla propagazione delle fessure dagli strati inferiori, sotto l'azione di carichi statici e ripetitivi, anche dai primi anni di servizio.

Come riferito precedentemente (vedi Capitolo 2), Sousa ha identificato i meccanismi differenti per la propagazione della fessura a partire dalla pavimentazione originale:

- stress dovuto a fatica termica, che avviene quando le variazioni di temperatura causano cicli di apertura e chiusura delle fessure nella pavimentazione, portando ad una concentrazione di stress nella superficie della pavimentazione;
- stress termico dovuto a un rapido congelamento dello strato superiore, che induce fenomeni di stress di tensione critica nella superficie.
- carico ripetitivo del traffico, che induce stress addizionali sulle superfici e aumenta il tasso di propagazione delle fessure indipendentemente dalla loro origine.

Al fine di stimare la vita utile dello strato di usura risulta particolarmente importante considerare i tassi di rapido congelamento che causano stati di tensione sulla superficie. Da una parte l'effetto della temperatura sulle proprietà del materiale risulta importante per la stima della vita utile, dall'altra parte valutando i due effetti contemporaneamente, la riduzione della vita utile dello strato di usura non risulta essere la somma diretta dell'effetto dello stress termico insieme all'aumento dei carichi di traffico.

### 3.3.4 Proprietà funzionali e sicurezza

Come anticipato, L'ADOT ha utilizzato Asphalt Rubber in strati di usura a partire dagli anni '80. La maggior parte di queste superfici continuano a presentare eccellenti valori di aderenza, tessitura e regolarità, espressi da un coefficiente di frizione chiamato "*Mu Meter*". Come si può vedere nel grafico di Figura 3-20, nelle pavimentazioni in Asphalt Rubber, partendo da un valore funzionale uguale a una pavimentazione "convenzionale", i valori di frizione *Mu Meter* restano pressoché costanti, mentre in una pavimentazione convenzionale peggiorano già dopo un anno dalla costruzione.

---

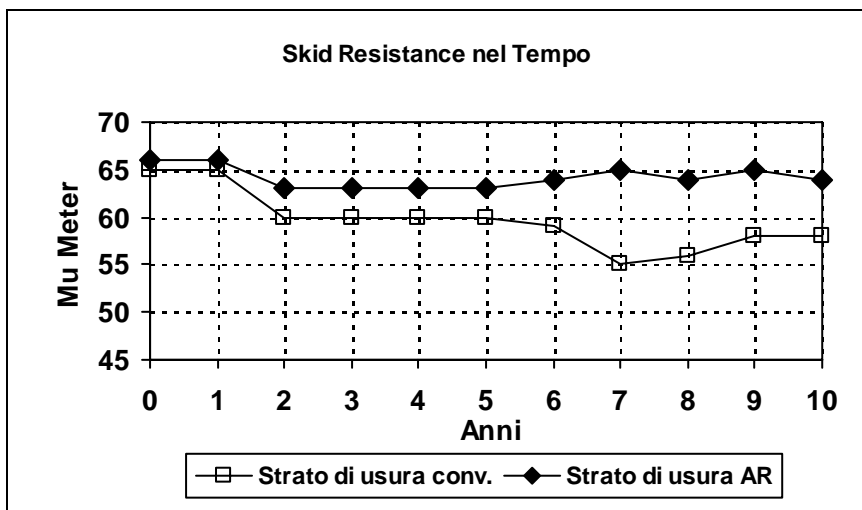


Figura 3-20: Andamento dei valori di frizione *Mu Meter* nel tempo

Per i conglomerati AR, anche a dieci o più anni dalla costruzione sono stati misurati ottimi valori di Skid Resistance, riportati nella Tabella 3-2 per quanto riguarda rilievi eseguiti dopo 10, 12 e 14 anni.

Tabella 3-2: Evoluzione della *skid resistance* prima e dopo oltre 10 anni dalla riabilitazione con AR

Progetto (Anno Costruzione)	Attrito misurato prima della riabilitazione	Attrito con <i>Mu Meter</i> (anno di misura)
Flagstaff, AZ I-40 (1990)	38	65 (10 anni dopo la costruzione)
Phoenix, AZ I-17 (1990)	43	57 (12)
Tucson, AZ I-19 (1988)	38	64 (14)

Una pavimentazione stradale, per poter garantire la necessaria sicurezza della circolazione, deve assicurare un insieme di caratteristiche prestazionali essenziali, quali la portanza, la regolarità e l'aderenza.

In particolare l'aderenza, ovvero l'insieme delle forze di attrito che si trasmettono tra pavimentazione e pneumatico lungo le rispettive superfici di contatto, riveste un ruolo fondamentale ai fini dell'ottenimento di adeguati livelli di sicurezza. Il principale aspetto è rappresentato, quindi, dall'interazione tra il pneumatico e la pavimentazione.



L'effetto dell'aderenza, oltre a consentire l'avanzamento stesso del veicolo, risulta particolarmente importante nella fase di frenatura, durante la quale è decisivo evitare lo strisciamento dei pneumatici sul piano stradale, specialmente in caso di superficie bagnata per evitare l'innescò della condizione dinamica nota come aquaplaning, funzione della velocità e dallo spessore del velo d'acqua. Durante la fase di frenatura la forza d'aderenza longitudinale risulta avere verso opposto rispetto a quello di avanzamento.

Il livello di aderenza ottenibile dipende, per definizione, dalle caratteristiche sia dello strato superficiale della pavimentazione stradale che da quelle del pneumatico. In generale le pavimentazioni drenanti fono-assorbenti sono adottate, in Italia, all'interno della rete autostradale, e cioè in tutti quei tratti in cui si richiede maggiore sicurezza e comfort a disposizione dei conducenti in fase di guida del mezzo.



**Figura 3-21: Riduzione dell'effetto splash and spray su una superficie in AR-OG (a sinistra) rispetto ad una pavimentazione rigida (a destra)**

Le pavimentazioni in Asphalt Rubber presentano una superficie che garantisce buone condizioni di sicurezza e buone caratteristiche di aderenza. I conglomerati drenanti (open-graded), o semi-drenanti (gap-graded), offrono ulteriori vantaggi come la riduzione dei fenomeni di splash and spray sotto la pioggia (vedi Figura 3-21). In caso di pioggia, l'asfalto poroso, dapprima assorbe l'acqua evitando che si fermi in superficie, poi la incanala fino a scaricarla ai lati delle strada.

Gli aspetti principali che caratterizzano l'effetto drenante sono:

- Elevate caratteristiche di attrito radente delle coppia pneumatico/pavimentazione e quindi, miglioramento dell'aderenza e della antisdrucchiolevezza (resistenza allo scivolamento, sicurezza del traffico, ecc.). Questo effetto è dovuto principalmente alla porosità del conglomerato (rimangono punti di contatto secco anche in caso di strada bagnata);
- Aumento del coefficiente di aderenza trasversale (C.A.T.) causato dallo smaltimento delle acque meteoriche e dall'aerazione della superficie stradale. L'elevata percentuale di vuoti comunicanti presenti nei conglomerati aperti permette all'acqua di defluire verso i canali laterali ed all'aria di circolare all'interno;
- Eliminazione di spruzzi e nebbia d'acqua sollevati dalle ruote dei veicoli in caso di pioggia. Il grado di diminuzione della nebulizzazione è di circa il 90% rispetto ai conglomerati tradizionali chiusi ed è accompagnato da un notevole accrescimento della velocità di guida;
- Eliminazione dell'effetto di riflessione dei raggi luminosi e quindi, in particolare, miglioramento della visibilità notturna su pavimentazione bagnata.

Data la grande capacità drenante di un conglomerato poroso ben realizzato, è bene verificare l'efficienza dello smaltimento delle acque nelle opere d'arte preposte (cabalette, pozzetti, ecc.).

Le pendenze trasversali dei piani di posa devono essere mantenute sopra il 2,5%, mentre le pendenze longitudinali, se molto accentuate, vanno interrotte ogni 200 m circa con opere di captazione trasversali.

Con il passare degli anni, e con il conseguente invecchiamento, alcune pavimentazioni in cemento armato continuano a presentare una buona capacità strutturale, ma scarse qualità funzionali e quindi offrono limitate caratteristiche di sicurezza, mentre i conglomerati Asphalt Rubber sono diventati la miglior scelta in questi casi, dal momento in cui presentano migliori caratteristiche di trazione, attrito, visibilità in caso di pioggia, minimizzano i fenomeni di *hydroplaning* e, soprattutto, presentano minori indici di incidentalità. (vedi Figura 3-22).

---



**Figura 3-22: Soluzione Asphalt Rubber sulla IH35, San Antonio (Texas). Corsia drenante e corsia tradizionale (A); particolare della superficie finita (B).**

È possibile rendere più sicure le strade, migliorandone la aderenza, eliminando l'*aquaplaning*, migliorando la visibilità in caso di pioggia, rendendo perfetta l'adesione del manto al supporto, riducendo gli spazi di frenata soprattutto nei tratti più pericolosi (curve, dossi, etc.).

I conglomerati drenanti rimuovono l'acqua dalla superficie stradale. Aggiungendo il polverino di gomma a questi conglomerati aperti, si ottiene una miglior aderenza e una pavimentazione con maggior durabilità, data la maggior percentuale di legante. Il miglioramento della aderenza comporta una riduzione dei fenomeni di *splash and spray* ed un miglioramento della visibilità.

Uno studio effettuato nel 2002 su di una vecchia pavimentazione a San Antonio IH35, Texas, dimostra quanto detto. In quel caso, non essendo attuabile il ripristino della superficie, dal momento in cui l'aggregato tende a levigarsi, e quindi la superficie sarebbe diventata liscia in poco tempo, si è optato per applicare un sottile strato di conglomerato drenante Asphalt Rubber. Questa soluzione ha portato:

- eliminazione della nebulizzazione (*spray*);
- aumento della resistenza allo slittamento;
- riduzione dell'abbagliamento da riflesso sulla superficie bagnata.

Le condizioni climatiche, di traffico e incidentalità sono state studiate durante 12 mesi prima e per ulteriori 12 mesi dopo l'applicazione dello strato drenante AR.

Le tabella seguente riassume i risultati ottenuti, i quali mostrano una riduzione netta della pericolosità del tratto riabilitato.

Tabella 3-3: Valori di incidentalità prima e dopo la riabilitazione con AR\*

Prima della stesura dello strato in AR <i>Luglio 2001 - Giugno 2002</i>	Dopo la stesura dello strato in AR <i>Novembre 2002 – Ottobre 2003</i>
Precipitazioni Totali: <b>807.2 mm</b>	Precipitazioni Totali: <b>828.8 mm</b>
N. incidenti: <b>85</b>	N. incidenti: <b>48</b>
N. incidenti in giorni di precipitazioni: <b>39</b>	N. incidenti in giorni di precipitazioni: <b>19</b>

\*I dati di incidentalità sono stati forniti dallo studio “*A major accident Traffic Accident*” del *San Antonio Police Department* (SAPD), mentre i dati climatici sono del *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA).

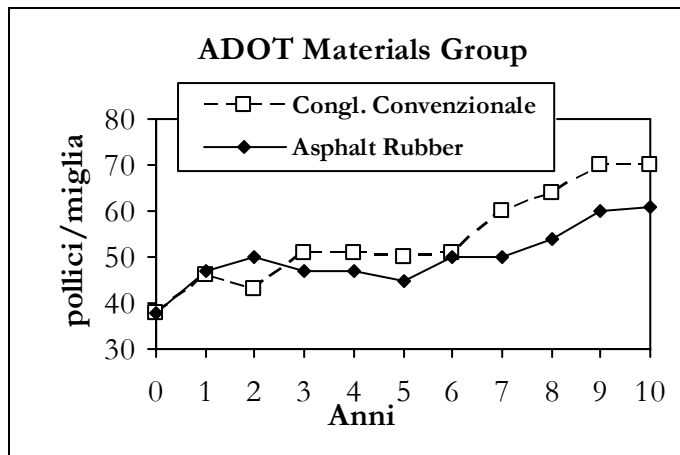


Figura 3-23: Evoluzione comparativa della regolarità superficiale nel tempo

### 3.3.5 Fonoassorbenza

La problematica del rumore generato da parte del traffico stradale ha assunto primaria importanza sia per gli enti gestori, sia per l'utente di strade e autostrade che, infine, per le comunità ubicate nelle immediate vicinanze delle infrastrutture viarie.

Il rumore è semplicemente un suono indesiderato. Così prima di tutto va analizzato il suono e come questo viene generato. Infatti, altro non è che una variazione di pressione dell'aria o, in altri termini, una sorgente sonora deve muovere l'aria in modo da creare onde che possano essere udite. L'intensità sonora è rappresentata proprio dalla velocità con la quale varia la pressione dell'aria, il volume è determinato dall'entità di variazione della pressione stessa.

La maggior parte dei suoni è rappresentata da complesse onde sinusoidali. L'intensità viene misurata in hertz, che rappresenta una velocità di variazione per unità di tempo. Il volume è invece misurato in decibels (dB). Tecnicamente, i decibel sono usati per misurare due suoni a confronto, ma definendo il valore di 0 dB come riferimento, possiamo considerarli come un'unità di misura assoluta del suono. La misura del livello sonoro viene espressa in dB quando ci si riferisce al livello sonoro misurato, mentre viene espressa in dBA quando ci si riferisce al livello sonoro percepito dall'udito umano.

L'intervallo di frequenza percepibile dall'uomo è compreso tra 20 Hz e 20 kHz. Un discorso più complicato va fatto per il volume. Innanzitutto, l'intervallo di volume di un suono percettibile dall'orecchio umano è estremamente ampio (in decibel varia da circa zero a 120). Il più alto suono udibile senza danni per l'apparato uditivo, è circa 10 miliardi di volte (in termini di pressione dell'aria) più alto rispetto al suono più debole. Inoltre la scala di misurazione in decibel non è lineare. Infatti, in termini di pressione sonora effettiva si ha un dimezzamento del rumore ogni 3 dB di riduzione, mentre a livello di suono percepito risulta dimezzato per una riduzione di 10 dB. In altri termini, un incremento di 10 dB rappresenta un aumento di 10 volte della potenza dall'onda sonora, mentre costituisce un aumento di sole 2 volte del volume percepito dall'orecchio umano.

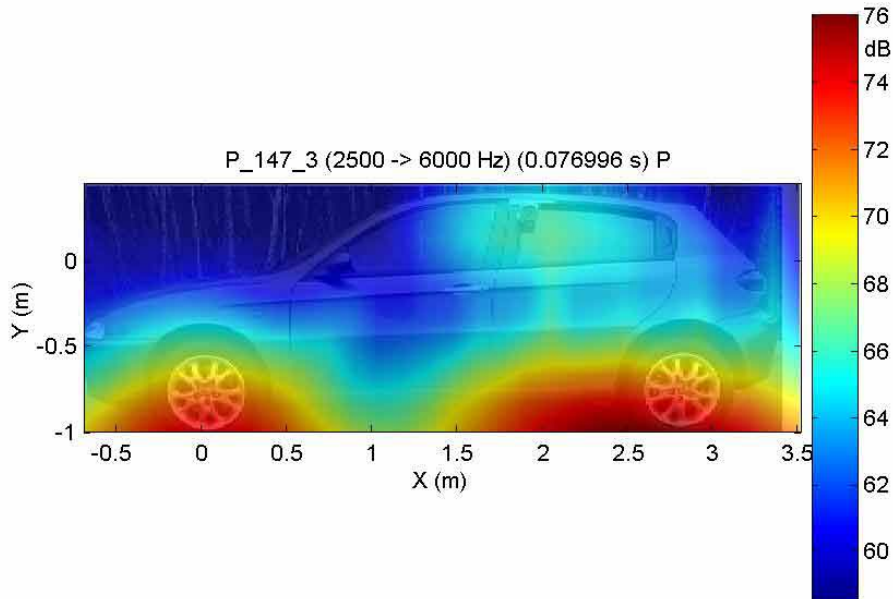
Il concetto importante ai fini dell'analisi della rumorosità di una pavimentazione stradale è che una riduzione da 50 dB a 47 dB di rumorosità costituisce un dimezzamento dell'energia sonora totale. Quindi ogni decibel di rumorosità eliminato ha un'importanza non trascurabile. Occorre comunque ricordare che la variazione di volume percepito non corrisponde alla variazione di energia. La Tabella 3-4 riassume tale concetto [3-20].

**Tabella 3-4: Riduzione della pressione sonora e del rispettivo volume percepito dall'udito corrispondenti a diminuzioni della rumorosità espresse in decibel.**

$\Delta$ dB	Riduzione della pressione sonora effettiva	Riduzione del volume percepito
-3 dB	50%	18.77%
-6 dB	75%	34.02%
-9 dB	87.5%	46.41%

Le emissioni sonore dovute al passaggio di un pneumatico sopra una pavimentazione stradale sono dovute ad un insieme di fattori. La fonte principale è costituita dal passaggio del pneumatico, al verificarsi del quale si crea una variazione di pressione tra questo e la pavimentazione sottostante, generando così onde sonore (vedi Figura 3-24).

Un'altra componente, legata sempre all'azione di rotolamento, è probabilmente dovuta all'azione di *friction* o *rubbling* della gomma del pneumatico sullo strato superficiale della pavimentazione.



**Figura 3-24: Distribuzione delle emissioni sonore provocate dal passaggio di un veicolo su di una pavimentazione stradale (fonte ACB Engineering)**

Il rumore generato dal traffico legato al contatto pneumatico-superficie stradale è influenzato da diversi fattori, tra cui:

- peso del veicolo;
- velocità ed accelerazione del veicolo;
- caratteristiche della superficie stradale.

Il contatto pneumatico-superficie stradale genera un'ampia gamma di onde sonore che, in base alla frequenza, risultano più o meno percettibili. Sono più fastidiose quelle medio-alte, cioè quelle intorno a 1800 – 2000 Hz. L'identificazione delle sorgenti del rumore, ha consentito agli studiosi di comprendere il fenomeno nella sua complessità ed individuarne le cause per una possibile riduzione.

Un veicolo carico in movimento genera vibrazioni che si trasmettono dal motore al fondo stradale alla carrozzeria. Il pneumatico nel suo avanzamento veloce, comprime l'aria davanti a sé, intrappolandola tra la scolpitura della gomma ed il fondo stradale. Il cuscinetto d'aria viene laminato sotto la ruota e si espande dopo il passaggio generando la risonanza nell'aria. La propagazione del rumore sarà tanto più alta quanto più liscia è la strada e quanto è meno scolpito il pneumatico.

L'asfalto poroso aperto consente all'aria di passare sotto la zona di contatto senza comprimersi troppo; per questo motivo è decisamente importante la macrotestitura della superficie stradale. In fase di rilascio, a valle della zona di contatto, l'onda acustica esce più smorzata e rimbalza sotto la scocca del veicolo in movimento con minore pressione e quindi con meno rumore.

L'energia che penetra nel conglomerato, risulta gradualmente dissipata per rifrazione fra i granuli di pietrisco. Più tortuoso è il percorso delle onde sonore nella massa, tanto maggiore è l'assorbimento. La riduzione del rumore di rotolamento sulle pavimentazioni porose è prevalentemente dovuta alle proprietà di assorbimento acustico di tali pavimentazioni. La soglia di velocità di 50 km/h rappresenta quel valore oltre il quale l'attrito pneumatico-strada supera per rumorosità qualsiasi altra causa di disturbo sonoro.

La rumorosità è anche funzione della temperatura dell'aria, che interviene sulla densità e influenza la propagazione delle onde sonore.

Gli algoritmi e le procedure indicate nel FHWA-R-77-108 (il modello della FHWA per la previsione dell'inquinamento acustico dovuto al traffico autostradale), vengono usati per normalizzare le misure delle emissioni sonore nelle normali condizioni di flusso di traffico.

I livelli di emissione sonora del traffico variano in maniera proporzionale al numero di veicoli equivalenti  $N_E$  transitanti in un determinato punto. Tale valore viene espresso dalla formula:

$$N_E = N_A + 10N_{MT} + 32N_{HT} \quad (3-1)$$

dove:

$N_A$  = numero di veicoli Classe 1 (*Automobiles*)

$N_{MT}$  = numero di veicoli di Classe 2 (*Medium Trucks*)

$N_{HT}$  = numero di veicoli di Classe 3 (*Heavy Trucks*)

L'equazione mostra la grande influenza che un numero anche relativamente piccolo di mezzi pesanti può avere sui livelli di rumorosità dovuti al traffico stradale.

L'attenzione, relativamente alla problematica del rumore generato da parte del traffico, si concentra soprattutto su come il rumore possa essere ridotto. La risposta più comune a questo tipo di problematica, se non in molti casi l'unica, è il posizionamento di barriere fonoassorbenti che si interpongono tra il traffico circolante e gli abitati limitrofi.

Tali barriere non riducono il livello di rumore prodotto dall'autostrada, ma ne limitano la propagazione verso i possibili ricettori. Presentano, inoltre, limitazioni geometriche: devono, infatti, interrompere la linea retta fra sorgente e ricevitore del rumore e riescono ad attenuare i livelli sonori in maniera significativa limitatamente ad una fascia di 60-75 m di larghezza direttamente dietro la barriera. Inoltre non contribuiscono alla riduzione del rumore percepito dagli occupanti dei veicoli in transito.

Metodologie alternative per la riduzione del rumore includono la produzione di veicoli con minori emissioni sonore dagli scarichi e dalle parti meccaniche, nonché con profili aerodinamici più efficienti, la realizzazione di pneumatici con una conformazione che consenta di ridurre la rumorosità durante il rotolamento dello stesso sopra la pavimentazione stradale e, infine, la realizzazione di pavimentazioni aventi superficie con caratteristiche particolari.

Per le concessionarie e i gestori della rete viaria principale, i costi dei materiali da costruzione, la gestione e la durata delle pavimentazioni costituiscono gli aspetti principali nella definizione del tipo di soluzione da adottare.

Analizzando il caso degli Stati Uniti, punto di riferimento anche per quanto riguarda la realizzazione di pavimentazioni con Asphalt Rubber, gran parte delle strade a scorrimento veloce sono state realizzate mediante finanziamenti federali che non hanno, però, previsto contributi per la manutenzione o il successivo rifacimento.

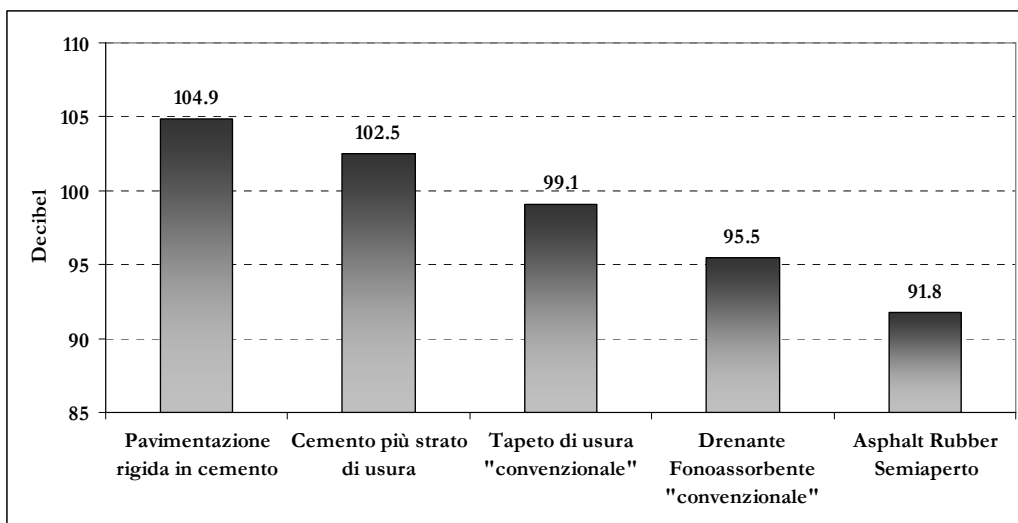
In questo modo, l'esiguità di fondi a disposizione delle società concessionarie ha spinto alla ricerca di soluzioni che, a fronte di un investimento contenuto, siano in grado di riabilitare vecchie pavimentazioni e fornire livelli qualitativi duraturi.

Tra queste, l'applicazione di uno strato di usura in conglomerato AR ha condotto ad ottimi risultati, come illustrato al punto 3.3.5.2. L'Asphalt Rubber viene, infatti, utilizzato indistintamente nei conglomerati bituminosi di tipo chiuso e di tipo aperto, quest'ultimo destinato a pavimentazioni drenanti-fonoassorbenti.

L'uso di tale legante ha consentito di registrare significative attenuazioni dei fenomeni di vibrazione da traffico veicolare e del rumore da rotolamento, con una riduzione fino a 13 dB del livello sonoro in ambiti urbani di circolazione (vedi Figura 3-25) [3-3].

---





**Figura 3-25: Livelli medi di emissioni di rumore per diversi tipi di pavimentazioni a confronto (ADOT)**

Come osservato, infatti, nei dati raccolti sino al 2003 in Arizona e California (vedi Figura 3-26), la pavimentazione maggiormente fonoassorbente è un *gap-graded* AR, con emissioni sonore inferiori tra 4 e 7 dB rispetto alle soluzioni convenzionali, e sino a 13 dB in confronto ad una pavimentazione rigida [3-21]. Ciò è dovuto alla maggior quantità di vuoti dello strato superficiale, in grado di attenuare gli aumenti di pressione dell'aria durante il transito di veicoli.

Inoltre, l'elevato contenuto di legante e la presenza di gomma conferiscono un ridotto modulo elastico ed una maggior duttilità dello strato di usura, e le ridotte dimensioni dell'aggregato comportano una minor deformazione del pneumatico durante il rotolamento.

Il tutto contribuisce ad una riduzione del rumore direttamente all'origine.

Una volta chiarito che i livelli di rumorosità del traffico variano modificando il tipo di pavimentazione o di pneumatico, va specificato che le variazioni ottenute nelle emissioni sonore aventi origine dal contatto tra pneumatico e pavimentazione sono sostanziali se comparate con le emissioni originate dagli scarichi o dalle parti meccaniche dei veicoli, soprattutto in presenza di una consistente percentuale di mezzi pesanti.

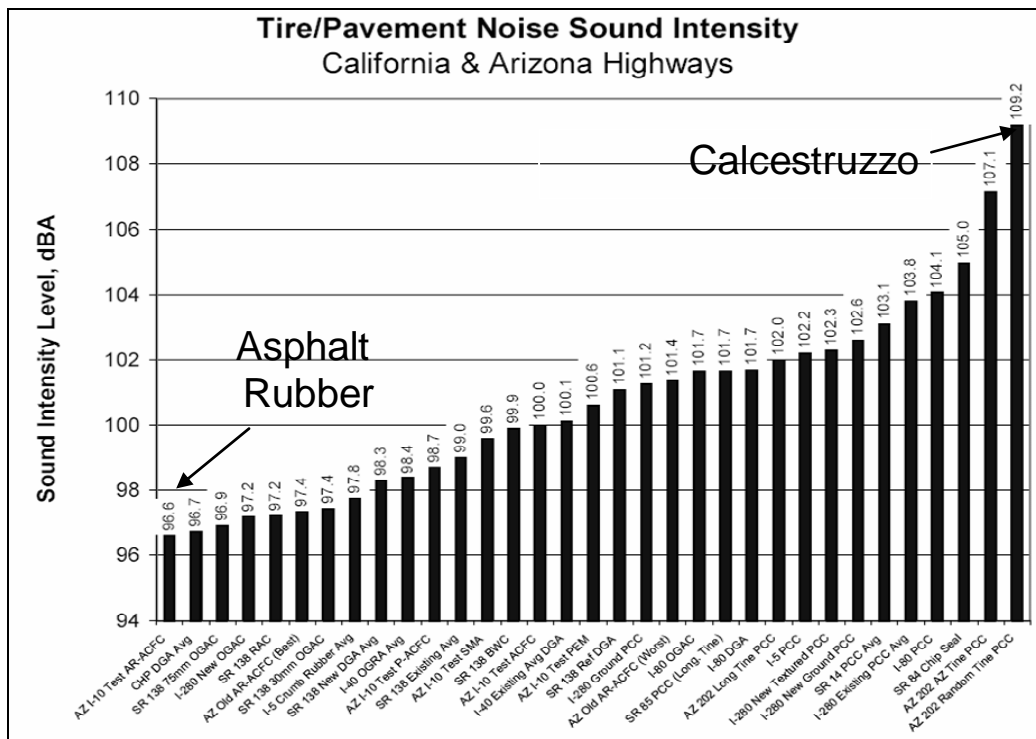


Figura 3-26: Confronto tra i dati di rumorosità raccolti sui diversi tipi di pavimentazione in Arizona e California

### 3.3.5.1 METODI DI MISURA DELLE EMISSIONI SONORE

I metodi di misura delle emissioni sonore di una pavimentazione stradale, si dividono principalmente in due tipologie: le misurazioni delle emissioni sonore percepite a lato della strada e la misura dell'intensità sonora all'origine.

La prima tipologia è costituita, a sua volta, da due metodi principali: nel primo si misurano i livelli di rumorosità in funzione del flusso di traffico, il secondo rileva l'intensità sonora per un prefissato livello di flusso di traffico. Così, mentre nel primo caso possono essere comparati tratti di strade con livelli di traffico differenti, il secondo fornisce un confronto più preciso ma limitato a tratti di strada con livelli di traffico paragonabili tra loro (ad esempio lo stesso tratto prima e dopo la stesura di un differente tappeto di usura).

Per entrambe le metodologie entrano in gioco variabili sia di tipo ambientale, sia legate alla velocità ed alla tipologia di veicoli transanti. Misurazioni ad una distanza compresa tra 7.5 e 15 m dal veicolo sono normalmente in grado di limitare l'influenza delle condizioni ambientali.

All'interno di questa categoria di misurazioni, la metodologia più diffusa in Europa è lo *Statistical Passby Method* (SPB), definito secondo lo standard ISO 11819-1, che misura la massima pressione sonora percepita ad una distanza non superiore ai 15 m e dovuta al passaggio di un determinato veicolo isolato in condizioni di basso flusso di traffico.

Le misurazioni dell'intensità sonora all'origine permettono di ottenere misure più precise del rumore dovuto al contatto tra pneumatico e pavimentazione. Sino a pochi anni, l'unico metodo di questo tipo disponibile era il cosiddetto *Close Proximity method* (CPX), come definito dallo Standard ISO/CD 11819-2. Tale metodo implica la costruzione o l'acquisto e il mantenimento di un rimorchio specificamente progettato, capace di misurare le emissioni sonore con un'accuratezza di 2 dB.

Più recentemente, nel 2004, il Caltrans ha messo a punto un nuovo strumento caratterizzato da una maggiore praticità ed economicità sia di realizzazione che di gestione. Tale strumento, come mostrato in Figura 3-27, si applica direttamente all'estremità di uno degli assi del veicolo, e rileva le emissioni sonore 75 mm sopra la pavimentazione ad una distanza laterale di 10 cm dal pneumatico.



**Figura 3-27: Strumentazione di misura dell'intensità sonora (SI) montata sulla ruota destra di un autoveicolo**

Ciascuna misurazione con questo tipo di strumento viene effettuata sia per l'asse anteriore che per quello posteriore del veicolo. Una media basata sull'energia determina, poi, l'intensità sonora effettiva dovuta al contatto tra pneumatico e pavimentazione.

Al fine di ottenere una procedura standardizzata per l'applicazione di tale metodo, in modo da comparare diverse pavimentazioni tra loro, viene prestabilita una velocità convenzionale di prova (nel caso di pavimentazioni autostradali pari a 97 km orari).

Un ulteriore vantaggio di quest'ultimo strumento è costituito dalla possibilità di misurare i livelli di rumorosità in continuo lungo una pavimentazione, potendone rilevare sia le caratteristiche medie che quelle locali.

### 3.3.5.2 GLI STUDI EFFETTUATI SULLE PROPRIETÀ FONOASSORBENTI DELL'AR

A seguito dell'aumento di interesse per l'AR a causa dei problemi di inquinamento acustico ed eccesso di pneumatici fuori uso, in diversi paesi a partire dagli anni '80 sono iniziati studi mirati a valutare l'efficacia di tale materiale anche come intervento di mitigazione del rumore associato al traffico veicolare. Un primo esempio di tali studi è stato effettuato nel 1981 in Belgio, su di un conglomerato Asphalt Rubber chiamato "*Drainasphalt*" [3-22]. Tale studio ha mostrato una notevole riduzione dei livelli delle emissioni sonore, incoraggiando studi analoghi in numerose altre nazioni.

Nel 1984 è stata condotta una ricerca in Francia per determinare la pressione idrostatica all'interno e al di sotto di un conglomerato drenate *Drainasphalt* lungo una strada cittadina adiacente alla Senna. I risultati ottenuti hanno mostrato una riduzione del rumore tra 3 e 5 dB in caso di traffico leggero, e tra 2 e 3 dB in presenza di un 5% di traffico pesante, portando alla proposta di rivestire le tangenziali Parigine con uno strato di open graded Asphalt-Rubber.

A seguito dei buoni risultati ottenuti, sono state effettuate ricerche sulle proprietà fonoassorbenti dell'AR in molti altri paesi, di cui la Tabella 3-5 fornisce un esempio.

Considerando, in particolare, la situazione nello stato dell'Arizona, a partire dal 1990 l'ADOT ha adottato un programma di riabilitazione delle vecchie pavimentazioni in PTCP ancora dotate di buone caratteristiche strutturali [3-23]. Al fine di uniformarle alla nuova rete viaria migliorandone le caratteristiche di regolarità e attrito superficiale, è stato messo a punto un ricoprimento mediante uno strato di nuovo PTCP di regolarizzazione, a sua volta ricoperto con un sottile strato in AR OGFC. Tale intervento ha consentito di ottenere prestazioni di attrito e drenaggio equivalenti alle nuove pavimentazioni in corso di realizzazione sul medesimo territorio.

Nonostante lo scopo primario non fosse, quindi, quello di ridurre i livelli di rumorosità della superficie stradale, questo effetto è stato notato sia dagli utenti della rete autostradale, sia dai residenti nelle zone adiacenti. Un'estesa analisi effettuata nel 1995 ha consentito di determinare una riduzione dei livelli di rumorosità di 4.7 dB dopo l'applicazione dello strato di usura in AR OGFC.

---

**Tabella 3-5: Studi degli effetti fonoassorbenti dell'AR eseguiti in vari stati negli anni '80 e '90 [3-22]**

Stato	Anno	Riduzione della rumorosità rilevata
Belgio	1981	8-10 dB (65-85%)
Francia	1984	2-3 dB/3-5 dB (50-75%)
Austria	1988	>3 dB
Olanda	1988	2.5 dB
Germania	1990	3 dB (50%)
Canada	1991	N.D.
Inghilterra	1998	N.D.
Arizona	1989	6.7 dB (78%)
	1990	10 dB (88%)
	1993	7.7 - 5.1 dB
California	1992	3-5 dB su di un conglomerato aperto
	1991	3-7 dB
	1998	N.D.
Texas	1992	N.D.
Oregon	1994	N.D.

Va notato che una barriera fonoassorbente è mediamente in grado di ottenere una riduzione di 1 dB per ogni 60 cm circa di altezza, ed il costo di tali strutture è di circa 700.000 euro al chilometro. Negli Stati Uniti, nella seconda metà della scorsa decade, la spesa per la realizzazione di barriere fonoassorbenti è ammontata a 118 milioni di dollari ogni anno; un contributo da parte di materiali da costruzione della pavimentazione che consentissero una riduzione di 1 dB, permetterebbe un risparmio del 16% nei costi di realizzazione di barriere fonoassorbenti.

Al fine di validare queste osservazioni sulle proprietà fonoassorbenti del bitume modificato con polverino di gomma, è stata eseguita più recentemente una serie di studi in diverse zone degli Stati Uniti.

In occasione della riabilitazione di una parte della rete viaria nei pressi di Phoenix eseguita nella primavera del 2002, l'ADOT ha monitorato i livelli di emissioni sonore generate del manto stradale prima e dopo l'intervento [3-23].

Sono state scelte tre localizzazioni rappresentative delle condizioni di esposizione al rumore lungo l'autostrada, e sono state monitorate in giorni feriali tra le ore 11.00 e le 13.00, con una frequenza di campionamento di 6 secondi. Il primo punto monitorato è situato immediatamente a ridosso della banchina stradale, a 15 metri di distanza dalla corsia più esterna, di fronte ad un muro di contenimento; il secondo è stato individuato sulla sommità di un rilevato parallelo alla sede stradale, a 30 metri di distanza rispetto alla corsia di marcia più esterna e dinnanzi ad una barriera fonoassorbente; l'ultimo punto di monitoraggio, infine, è ubicato in una zona residenziale, lungo una strada secondaria parallela all'autostrada, a 120 m di distanza dalla sorgente del rumore.

I dati del campionamento, mediati per ogni punto di osservazione, forniscono i valori riportati nella Tabella 3-6.

**Tabella 3-6: Confronto tra emissioni sonore prima e dopo la riabilitazione nel 2002 [3-23]**

<b>Localizzazione</b>	<b>Prima dell'intervento [dB]</b>	<b>Dopo l'intervento [dB]</b>	<b>Variazione [dB]</b>
Shoulder (15 m)	79.8	72.6	-7.2
Soundwall (30 m)	76.6	67.1	-9.5
Zona residenziale	51.7	45.6	-6.1

Tali valori mostrano notevoli riduzioni della rumorosità a seguito dell'applicazione dello strato superficiale in AR OGFC, anche in considerazione del fatto che le condizioni di traffico non hanno subito variazioni apprezzabili rispetto a prima dell'intervento.

Va ricordato, infatti, che una riduzione pari a 3 dB equivale a raddoppiare la distanza tra la sorgente sonora ed il ricettore, mentre una riduzione di 10 dB costituisce un dimezzamento del volume di traffico effettivo.

A completare l'analisi acustica effettuata nel 2002 dall'ADOT, sono stati rilevati i livelli sonori percepiti all'interno dell'abitacolo di un veicolo in transito lungo la stessa autostrada oggetto dell'intervento sopra descritto. Nel passaggio da un tratto con pavimentazione antica ad uno in cui è stato applicato lo strato superficiale in AR, si ottengono riduzioni della rumorosità all'interno del veicolo sino a 8.4 dB, come mostra la Tabella 3-7.

**Tabella 3-7: Valori di rumorosità rilevati all'interno dell'abitacolo prima e dopo la riabilitazione [3-23]**

	<b>Prima dell'intervento</b>	<b>Dopo l'intervento</b>	<b>Variazione</b>
Valore medio [dB]	67.0	61.8	-5.2
Massimo [dB]	72.8	64.4	-8.4
Minimo [dB]	64.3	60.1	-4.2

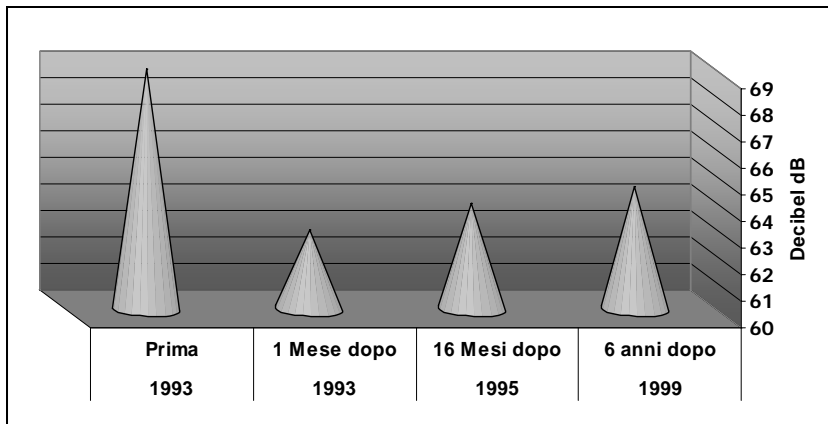
Attualmente non è ancora stato eseguito per pavimentazioni flessibili uno studio analogo a quanto visto per la riabilitazione di una pavimentazione in PCCP. Ma altri studi hanno messo a confronto AR con altri conglomerati tradizionali, sempre per quanto riguarda le capacità fonoassorbenti ma con particolare riferimento ad un altro aspetto.

Nella città di Sacramento (USA), ad esempio, negli anni '90 il locale Dipartimento dei Lavori Pubblici ha monitorato due gruppi di strade urbane, il primo trattato con AR e il secondo con *Dense Grade Asphalt Concrete*, per un periodo di tempo di 6 anni [3-23]. Tale studio, avente lo scopo di valutare l'effettiva durata delle caratteristiche di fonoassorbente di tali trattamenti, mostra come, a fronte di benefici immediati simili per entrambi, nel medio periodo vi siano sostanziali differenze che indicano il comportamento nettamente migliore dei manti in AR.

Un ulteriore studio analogo a quanto visto per il caso dell'Arizona, è stato effettuato nella città di San Antonio (Texas) confrontando una pavimentazione in CRCP prima e dopo l'applicazione di uno strato di 3.8 cm di un conglomerato PFC, con l'8.3% di legante avente il 18% di contenuto in polverino di gomma di pneumatico riciclata e una percentuale di vuoti non superiore al 18%. Per tale trattamento, che ha fornito un miglioramento del 61% in termini di attrito, è stata misurata una riduzione media della rumorosità da 85 a 71 dB.

A seguito delle positive esperienze documentate dagli studi sopra citati, l'ADOT ha programmato a partire dal 2003 il trattamento di ulteriori 185 km di strade urbane ed extraurbane tramite uno strato di 25 mm in ARFC entro la fine del 2006, con l'obiettivo di ottenere una riduzione dei livelli di rumorosità di almeno 4 dB a lato della pavimentazione. Tale programma su larga scala è stato definito il *Quiet Pavement Research Program*, e costituisce la concretizzazione della ricerca pluridecennale svolta in Arizona in questo settore.

A livello europeo, un recente studio è stato effettuato nella 2004 in Portogallo a cura della società concessionaria *Auto-Estradas do Atlantico S.A.*, nel corso del quale sono stati presi in considerazione tre tratti rappresentativi sia degli oltre 16 km di pavimentazione realizzata con conglomerato Asphalt Rubber lungo l'Autostrada A8, sia nei tratti realizzati con conglomerati bituminosi tradizionali e con cemento armato continuo. I risultati ottenuti mostrano, a parità di condizioni di traffico, una riduzione media delle emissioni sonore sino a 5-6 dB optando per uno strato superficiale in Asphalt Rubber (vedi Figura 3-28).



**Figura 3-28:** Livelli di rumorosità prima e dopo la riabilitazione dell'autostrada A8 con AR

#### *LO STUDIO NITE - NOISE INTENSITY TESTING IN EUROPE*

Il *California Department of Transportation* (Caltrans) ha condotto una serie di studi per esaminare l'impatto che diversi tipi di pavimentazioni possono avere sulle emissioni sonore. In particolare, durante questi studi il dipartimento californiano ha sviluppato un metodo di misurazione delle emissioni sonore pratico, preciso ed economico. Come anticipato, tale metodo misura l'intensità sonora, e si presenta come un'alternativa ai metodi comunemente utilizzati in Europa e basati sulla misurazione della pressione sonora (*Statistical Passby* - SPB - e *Close Proximity* - CPX).

Utilizzando l'intensità sonora, il Caltrans e l'ADOT hanno sviluppato un database delle caratteristiche acustiche di vari tipi di pavimentazioni [3-24]. Nel maggio del 2004 la *Federal Highway Administration* (FHWA) e l'*American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) hanno finanziato una campagna di misurazioni in situ per esaminare i livelli tecnologici raggiunti dalle pavimentazioni fonoassorbenti in Europa. Basandosi sui risultati di tale campagna, nel settembre 2004 il Caltrans, insieme alla General Motors e alla FHWA, ha finanziato uno studio comparativo che, basandosi sempre sulla misurazione dell'intensità sonora, confrontasse le pavimentazioni europee con quelle fonoassorbenti utilizzate in California ed Arizona.



Tale studio, denominato *Noise Intensity Testing in Europe* (NITE), costituisce la prima comparazione tra pavimentazioni fonoassorbenti a livello intercontinentale.

Uno degli aspetti principali nell'uso di pavimentazioni fonoassorbenti è la longevità degli effetti di abbattimento dei livelli sonori. Al fine di definire un quadro conoscitivo esauriente circa la fonoassorbente nel lungo periodo di diversi conglomerati, il Caltrans ha messo a punto una serie di studi caratterizzati da un monitoraggio pluriennale. Uno di questi ha implicato la costruzione, nel 2000, di un tratto di pavimentazione costituita da cinque sezioni caratterizzate da uno strato di usura differente.

Proprio durante la realizzazione di tutte queste misure di emissioni sonore, il Caltrans ha sviluppato un nuovo metodo per la determinazione in situ delle prestazioni fonoassorbenti delle pavimentazioni, utilizzando tecniche di misurazione direttamente a bordo di un veicolo. Nel 2002 è arrivato a definire una metodologia di misurazione dell'intensità sonora delle pavimentazioni autostradali pratica ed efficiente, risultata particolarmente utile durante il progetto NITE del 2004.

Ad integrazione dello sviluppo di tale metodologia, descritta precedentemente e denominata *Sound Intensity (SI) Method*, sono state effettuate una serie di misurazioni al fine di correlare l'intensità sonora rilevata all'origine con i livelli di emissioni sonore percepite ad una distanza prestabilita. Nello specifico, tramite l'utilizzo di tre differenti treni di gomme, sono state effettuate prove di rilevamento dell'intensità sonora a tre velocità diverse su 12 pavimentazioni differenti, sia AC che PCC. Contemporaneamente, sono state rilevate le missioni percepite a distanza posizionando microfoni a 7.5 e a 15 m di distanza dall'asse longitudinale del veicolo.

Una volta messo a punto, tramite il metodo SI è stato raccolto un database relativo alle emissioni sonore percepite lungo oltre 100 differenti pavimentazioni di autostrade e impalcati di ponti in California e Arizona. Nella raccolta di tali dati, riportati nella Figura 3-26, le pavimentazioni sono state divise in tre categorie: *Portland Cement Concrete* (PCC), *Dense Graded Asphalt Concrete* (DGA) e *Open Graded Rubber Asphalt Concrete* (OGRAC).

I risultati, rilevati per velocità costante di 97 km/h (corrispondente a 60 miglia orarie) mostrano differenze nei valori sino a 13 dB, ponendo prevalentemente OGRAC nella fascia meno rumorosa, DGA nella fascia intermedia e PCC nella fascia caratterizzata da emissioni sonore più elevate.

Uno studio effettuato a cura del Caltrans nel 2002 su di una porzione di strada extraurbana (State Route 138) di Los Angeles, in occasione della quale sono state realizzati cinque tratti con pavimentazione differente, ha consentito di monitorare nel tempo le prestazioni fonoassorbenti nei diversi conglomerati bituminosi.

---

In particolare, sono stati presi in considerazione un DGAC, un *Open Graded Asphalt Concrete* (OGAC) dello spessore di 75 mm, un ulteriore OGAC dello spessore dei 30 mm, un OGRAC e un *Bounded Wearing Course* (BWC), simile ad un *friction course*.

Nella Figura 3-29 e Figura 3-31 sono riportati i risultati di rilevamenti effettuati dall'autunno del 2002 alla primavera del 2004.

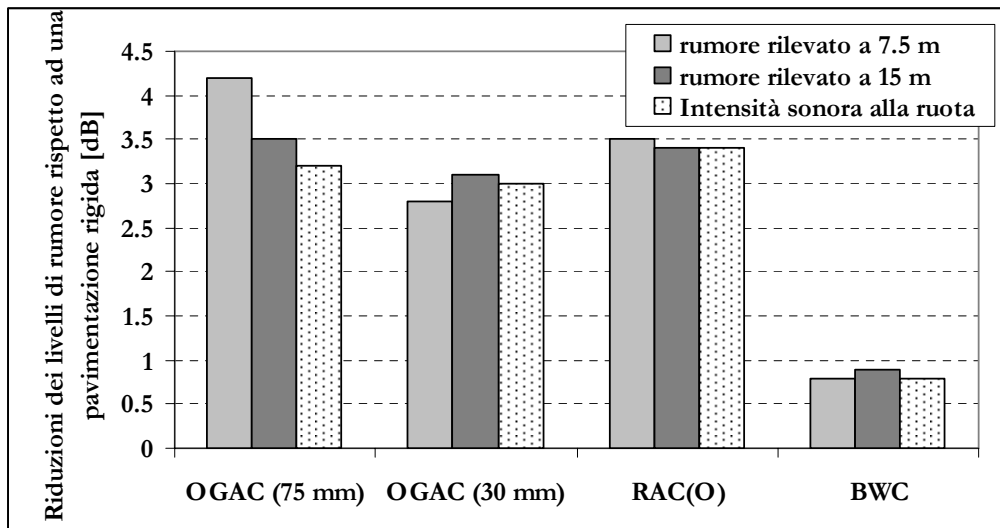


Figura 3-29: Riduzione dell'intensità sonora misurata nelle sezioni di prova della LA138 nel 2002 normalizzate rispetto a una pavimentazione rigida di riferimento

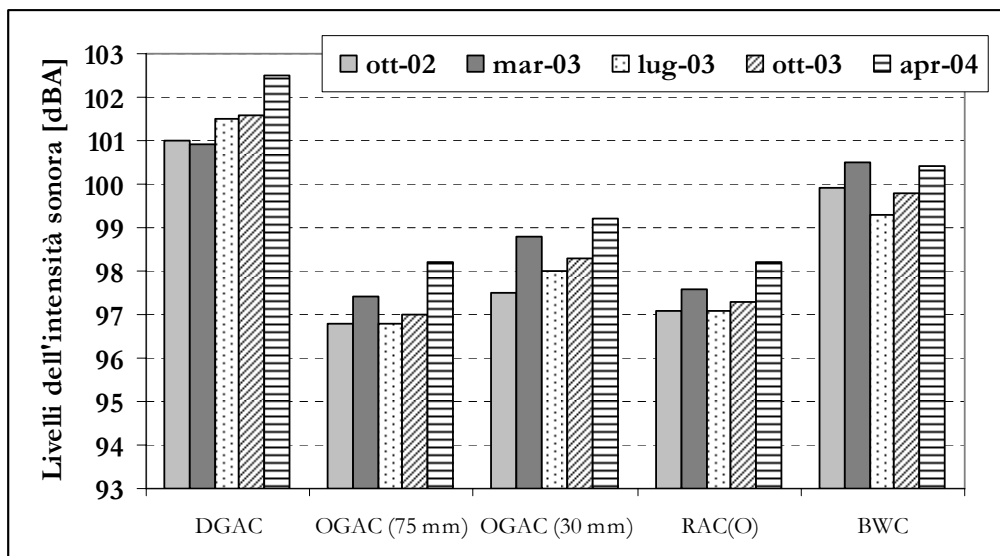


Figura 3-30: Livelli dell'intensità sonora delle sezioni di prova della pavimentazione sulla LA138 misurate per un periodo di 18 mesi

---

Un ulteriore studio è stato realizzato, sempre dal Caltrans, in occasione della riabilitazione di una porzione di autostrada (Interstate I-280, San Mateo County, California) tra giugno e novembre 2002. La pavimentazione esistente in PCC è stata sottoposta a trattamento superficiale e levigatura, sino a ottenere una variazione specifica di 19 mm/0.1 km; un tratto della pavimentazione è stato poi sottoposto ad una seconda levigatura, sino ad un valore di 8 mm/0.1 km. Infine, su altre porzioni dell'antica pavimentazione è stato applicato uno strato in conglomerato AR drenante. Sulle tre porzioni di pavimentazione così ottenute, sono state effettuate prove SI prima e dopo il trattamento di riabilitazione. I risultati dello studio mostrano una riduzione media della rumorosità che varia tra 0.4 dB nel caso di una semplice levigatura, fino a 6.6 dB nel caso dall'applicazione del conglomerato AR.

Una volta raccolto il consistente numero di misurazioni delle intensità sonore per le pavimentazioni di California e Arizona, è stato quindi messo a punto il progetto NITE per la raccolta e la definizione di un analogo database lungo le autostrade europee. Tutto ciò al fine di ottenere uno strumento che consentisse di comparare i risultati raggiunti dallo sviluppo tecnologico statunitense con quello europeo, quest'ultimo caratterizzato da una più lunga sperimentazione di materiali fonoassorbenti.

Eseguendo rilevamenti ad una velocità costante di 97 km/h, così come fatto precedentemente negli Stati Uniti, sono stati ottenuti risultati organizzati in maniera analoga ai dati statunitensi. Ai tre gruppi in cui sono state raccolte le pavimentazioni di California e Arizona, sono state aggiunte le categorie di *Porous Asphalt* (PA), caratterizzata da un indice dei vuoti compreso tra 15 e il 20%, *Double Layer Porous Asphalt* (DLPA) e *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Anche per i dati europei i valori di rumorosità variano all'interno di un intervallo di 13 dB, e in questo caso le pavimentazioni maggiormente fonoassorbenti mostrano livelli di rumorosità inferiori di circa 2 dB rispetto alle pavimentazioni statunitensi meno rumorose.

Per perfezionare la raccolta di dati, sono stati ripetuti gli stessi test alla velocità di 56 km/h. I risultati di quest'ultimo campionamento mostrano livelli di rumorosità dei conglomerati inferiori e contenuti in un intervallo di variabilità di 10 dB. Per alcune pavimentazioni, peraltro, la diminuzione di velocità non comporta una variazione apprezzabile delle emissioni sonore.

A completamento del quadro conoscitivo fornito dagli studi sinora effettuati, va considerato che gli attuali modelli di calcolo delle emissioni sonore sono in grado di considerare il rapporto costo-benefici associato all'uso di differenti tipi di pavimentazione.

---

Le indicazioni che si ottengono mostrano che, nonostante il costo superiore per determinati tipi di materiali quali l'AR, questi garantiscono un'elevata efficienza economica in considerazione della riduzione dei costi di opere di mitigazione quali barriere fonoassorbenti [3-25].

### 3.3.6 Efficienza Economica

Studi relativi al costo e beneficio nell'uso del bitume modificato con polverino [3-26], concordano che in un'analisi dell'intero ciclo di vita di questo materiale, i benefici superano i costi iniziali, nonostante questi ultimi risultino in genere più elevati rispetto alle applicazioni convenzionali. I bitumi Asphalt Rubber possono essere utilizzati per realizzare conglomerati dalle prestazioni superiori, particolarmente per quanto riguarda la propagazione di fessure e la fessurazione termica. L'uso di questo tipo di miscele può essere economicamente giustificato a seguito dell'analisi costi-benefici. Il risparmio è in ogni modo funzione del mercato locale, dello stato della tecnologia disponibile e delle soluzioni strutturali adottate.

I costi unitari dei leganti AR sono più elevati rispetto ai legante tradizionali, sia che si tratti di bitumi non modificati che di bitumi modificati con polimeri. La tabella seguente riporta i costi della fornitura e posa in opera di conglomerati (dati del 2001, in Arizona).

**Tabella 3-8: Confronto tra il costo di fornitura e posa in opera di diversi conglomerati (riferito al mercato dell'Arizona)**

	<b>Hot Mix [\$/ton]</b>	<b>Chip Seal [\$/yd<sup>2</sup>]</b>
Conventional	30-35	1.00-1.25
Polymer	35-40	1.25-1.50
Modified Asphalt Rubber	45-50	2.50-3.00

Come si può osservare, in genere i conglomerati Asphalt Rubber costano tra i 10 ed i 15 \$/ton in più rispetto ai conglomerati convenzionali. Questo costo iniziale è il risultato dei maggiori oneri per la produzione di AR, quali la mobilitazione dell'equipaggiamento in prossimità del cantiere, il costo dell'equipaggiamento stesso e la mano d'opera specializzata in grado di eseguire il controllo della qualità durante la fase di produzione.

---

A questi si aggiungono, inoltre, il costo della gomma ed il fatto che il conglomerato contenga più bitume. Un maggior quantitativo di legante nel conglomerato comporta, infatti, un maggior costo di questo ultimo, ma anche migliori caratteristiche prestazionali.

Un calcolo veloce per capire questo aumento dei costi per un conglomerato HMRA è il seguente:

- CRM – il costo del polverino è circa 0.15-17 \$/lb ( $\approx 0,06$  €/Kg). Per un conglomerato con circa il 7.5% di bitume (20% CRM) sul totale della miscela, influiscono circa 30 lbs/ton per il conglomerato e circa 4.50-5.00 \$/ton di costi di materiali addizionali;
- Bitume – nella maggior parte dei conglomerati il bitume è circa il 2% in più. Per un costo di 160\$/ton di bitume, questo significa circa \$3.20 in costi addizionali;
- Miscelazione – il costo di produzione associato all'impianto, incluso la sua mobilitazione in cantiere, implica un costo da 6 a 10 \$/ton.

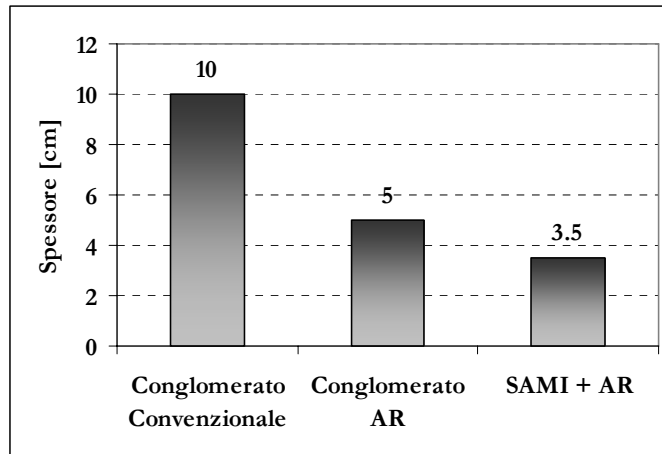
In questo modo, con riferimento al mercato statunitense, si raggiunge un aumento di costo compreso tra 13 e 18 \$/ton.

Questo tipo di analisi viene ripresa ed approfondita, con riferimento al mercato italiano, nell'Appendice 3 della presente Tesi.

Questo valore può aumentare o diminuire a seconda della dimensione del lavoro. Un lavoro piccolo comporta un maggior costo unitario dovuto ai costi di mobilitazione della apparecchiatura di produzione. Un maggior volume di produzione di Asphalt Rubber diminuirà i costi fissi associati alla produzione di AR e lo renderà un materiale più competitivo. Si ricorda che l'Asphalt Rubber non può essere prodotto utilizzando gli impianti tradizionali perché il polverino di gomma non può essere macinato nei molini utilizzati per modificare bitume, ad esempio, con SBS. Ci sono alcuni produttori che commercializzano un bitume che ha una percentuale minor di polverino di gomma, anche con una granulometria più fine. Questi bitumi non sono Asphalt Rubber e non hanno le stesse prestazioni.

È vero che i leganti AR hanno un costo di produzione più elevato, ma tale onere viene recuperato per via delle prestazioni lungo il tempo (vedi Figura 3-32). In alcuni casi, i costi di costruzione che ne derivano sono inferiori rispetto alle soluzioni convenzionali, basti pensare che uno strato di conglomerato tradizionale può essere sostituito da uno di metà spessore in Asphalt Rubber (Figura 3-31). Il risparmio dipende esclusivamente dal mercato locale e dalle soluzioni strutturali adottate.

Guardando soltanto il costo iniziale, AR può costare sino all'80% in più. Tuttavia, come già riferito, questi conglomerati possono essere applicati con un spessore ridotto sino alla metà. Ulteriori vantaggi, quali le caratteristiche di fonoassorbenza, possono giustificare un costo più elevato in fase di produzione.



**Figura 3-31: Spessori tipici di diversi esempi di strati di riabilitazione**

Nel 1990, l'*Arizona Department of Transportation* ha applicato su larga scala conglomerati Asphalt Rubber in Flagstaff, Arizona lungo la fortemente trafficata Interstate 40, con l'obiettivo di verificare se un strato sottile di Asphalt Rubber potesse ridurre effettivamente la riflessione della fessurazione.

Lo strato di usura è stato applicato su di una pavimentazione in cemento che aveva bisogno di riabilitazione, ed i risultati ottenuti hanno superato tutte le aspettative. Dopo 11 anni di servizio tale pavimentazione presenta ancora buone caratteristiche di rugosità e assenza di fessure. Il beneficio di avere utilizzato Asphalt Rubber in questo progetto è stato quantificato in 18 milioni di dollari risparmiati in opere di costruzione e manutenzione [3-26].

Nel 1998 la *Rubber Pavements Association* finanziò uno studio mirato ad una analisi di tipo economico, dimostrando che l'utilizzo di Asphalt Rubber può arrivare ad essere sino all'80% più vantaggioso.

Way [3-26], ha esaminato un progetto di riabilitazione di 16.7 km eseguito sulla Interstate 40 in Arizona, caratterizzata da traffico elevato (2000 veicoli al giorno, di cui circa il 35% costituito da traffico pesante) e da una pavimentazione rigida che si trovava in uno stato di degradazione molto severo, con elevate percentuali di disgregazione a pelle di coccodrillo.

Diverse soluzioni di riabilitazione sono state prese in considerazione, tuttavia, a causa di restrizioni economiche e temporali del progetto, si è optato per la stesa di uno strato chiuso da 12.5 cm, di cui 7.5 cm di conglomerato bituminoso tradizionale e 5 cm di conglomerato AR. In alcune zone della strada è stato realizzato uno strato drenante di 12.5 cm di Asphalt Rubber. Un breve tratto è stato realizzato soltanto con conglomerato convenzionale, in modo da avere una sezione di riferimento. Analizzando dati rilevati durante gli anni successivi, la strada ha presentato un'eccellente performance, non presentando una deformazione plastica decisiva, né fessurazione. Nella Figura 3-32 è riportato il confronto dei costi di manutenzione della strada con e senza Asphalt Rubber.

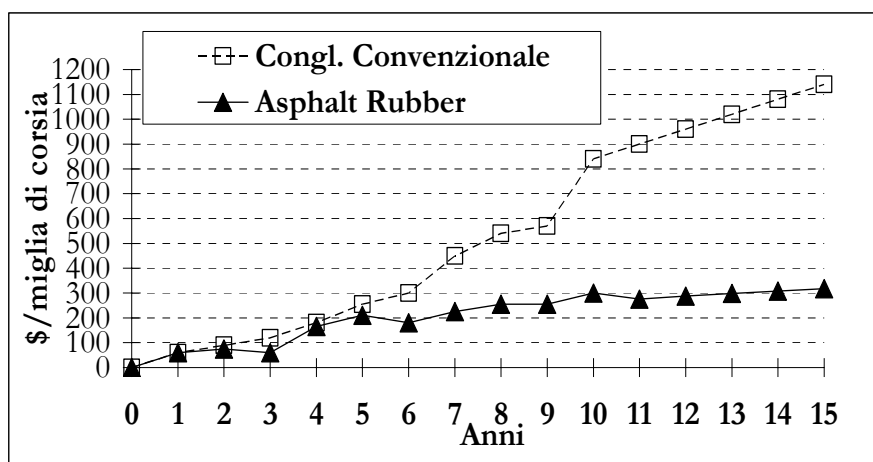


Figura 3-32: Costo di manutenzione in dollari per corsia/chilometro [3-26]

Un ulteriore studio [3-27] eseguito da Arizona State University e ADOT nel 2002 concluse che una pavimentazione realizzata con Asphalt Rubber risulta economicamente più efficiente di una convenzionale sia per quanto riguarda gli “agency costs”, sia per gli “user costs”.

Più in generale, anche alla luce dell’esperienza europea, studi relativi al costo e beneficio nell’uso del bitume modificato con polverino [3-29], concordano che in un’analisi del ciclo di vita di questo materiale, i benefici superano i costi iniziali, in genere più elevati rispetto alle attuali applicazioni convenzionali.

Uno studio decisivo per capire il risparmio economico relativo all’AR è stato eseguito da Hicks, Lundy e Epps, [3-28], dal momento che è stato il primo ad applicare il modello di analisi del Ciclo di vita economico adottato dal FHWA per l’Asphalt Rubber.

Infatti, il *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) (Vedi appendice 3), o ciclo di vita economico, per i materiali con Asphalt Rubber è riconosciuto dagli enti pubblici come uno strumento efficace per guidare la scelta tra soluzioni alternative per costruzione, riabilitazione e trattamenti di manutenzione. Per i conglomerati con Asphalt Rubber si ritiene che, per essere preferiti ai conglomerati convenzionali, questi devono dimostrarsi economicamente redditizi lungo il tempo, ossia devono avere un coefficiente LCC più basso delle loro alternative.

Il *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) ha completato una *Synthesis of Practice* sull'utilizzo di polverino di gomma di pneumatico riciclata nelle autostrade nel 1994. Questo report si è basato sull'analisi di circa 500 referenze e su informazioni raccolte da enti stradali espresse in una *survey practice* del 1991 aggiornata nel 1993. Una parte di questa relazione riguarda l'applicazione di Asphalt Rubber in pavimentazioni. Sono riportate alcune sezioni specifiche che riferiscono quali siano le performance durante il ciclo di vita economico per quanto riguarda applicazioni di chip seals, SAMI e conglomerati a caldo (HMRA) [3-28].

Tuttavia, i costi e le indicazioni sulle performance inclusi in questo documento si basano esclusivamente sui dati relativi a sezioni costruite negli anni '70 e '80, dal momento che le informazioni sono state fornite da relazioni effettuate da enti stradali e da una revisione della letteratura eseguita nel 1991.

Un'ulteriore indicazione dell'importanza dello studio economico dell'intero ciclo di vita di materiali alternativi per la costruzione di pavimentazioni viene fornita nell'*AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures* del 1986, in cui è stato raccomandato l'utilizzo dell'analisi LCCA per valutare il vantaggio economico delle alternative all'interno di un progetto [3-28].

Analizzando un altro contesto internazionale esterno agli Stati Uniti, una delle difficoltà per l'implementazione della tecnica dell'Asphalt Rubber in uno stato come il Brasile è stata la mancanza di dati relativi alla praticabilità socio economica di questa tecnologia. Uno studio dedicato [3-29] ha valutato in un modo descrittivo la sostenibilità ambientale dell'uso di questa tecnica ed ha eseguito un'analisi comparativa della convenienza economica fra l'uso di una soluzione convenzionale e di Asphalt Rubber, usando come indicatori i costi di realizzazione e di manutenzione. Per l'analisi sono stati utilizzati indicatori come il *Net Present Value* (NPV) e l'*Internal Rate of Return* (IRR). Alla fine è stata eseguita un'analisi di sensitività. L'obiettivo è stato quello di ridurre le incertezze riguardo ai valori adottati.

---



Sempre in Brasile, vicino alla città di Guaíba nello stato di Rio Grande do Sul, è stato costruito nell'agosto del 2001 il primo tratto con legante modificato con polverino prodotto secondo il metodo wet, avente un'estensione di circa 2 km.

Dai dati analizzati, l'AR appare rappresentare una soluzione valida in relazione al mercato locale. La differenza fra NPV e IRR fra le diverse soluzioni considerate è piccola, soltanto 1.2% per il IRR e 37.5 milioni per il NPV per 25 anni di vita utile, indicando come l'Asphalt Rubber sia la soluzione migliore.

#### *STRADE CHE RIDUCONO IL CONSUMO DI CARBURANTE*

Parecchi studi realizzati negli Stati Uniti hanno dimostrato che le strade più lisce e con minor fessurazione, disgregazione, rugosità e cracking a fatica aiutano a ottimizzare il consumo e l'efficienza di combustibile per i veicoli che viaggiano su di loro e le strade durano più a lungo.

Quando l'Università dell'Arizona ha confrontato le alternative progettuali per la riabilitazione della I-40 nei pressi di Flagstaff, Arizona, la scelta fra una pavimentazione convenzionali e una con Asphalt Rubber risultava irresoluta.

È stata, allora, eseguita un'analisi economica su quelli che potevano essere i vantaggi nei costi di gestione del veicolo da parte dell'utente per la durata del progetto, e la pavimentazione in Asphalt Rubber è risultata consentire un risparmio di \$9340000 (vedi Figura 3-33). Questo significa meno usura e problemi meccanici sul veicolo, risparmiando tempo e soldi. Lo stesso studio ha determinato un risparmio medio del 4.5% di carburante.

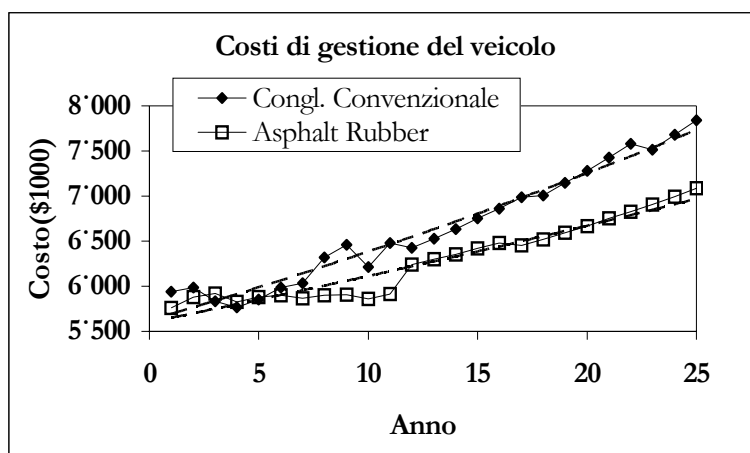


Figura 3-33: Costi di gestione del veicolo per l'utente per diverse età delle pavimentazioni in conglomerato convenzionale ed in AR (fonte: Rubber Pavement Association)

Un ulteriore studio condotto dall'U.S. "WesTrack", eseguito a Reno, Nevada, nel 1999 ha indicato che per circostanze identiche, le pavimentazioni danneggiate implicano un maggior consumo di combustibile, stimato attorno al 4.5%.

I camion utilizzati per studiare le sezioni di prova della pavimentazione hanno consumato meno combustibile nei tratti di pavimentazione meno fessurati.

Pavimentazioni più lisce aiutano a risparmiare. L'AR è la pavimentazione più regolare. L'indice di regolarità superficiale (IRI) nel progetto di riabilitazione eseguito a San Antonio, è passato da 209 pollici/miglia, ritenuto estremamente negativo, ad un valore ottimo di 81 pollici/miglia.

Al piacere di viaggiare su di una pavimentazione priva di irregolarità si aggiunge, come visto, un contemporaneo risparmio economico.

Dal 1997 al 1999, sono state effettuate prove con quattro camion, guidati per una media di 15 h al giorno su di una pista circolare di circa 2.9 km, simulando più di 10 anni di carichi con i livelli di traffico di una strada interstatale. Tali prove hanno consentito di determinare come la variazione del tipo di conglomerato possa influenzare le performance della pavimentazione, in modo da valutare le miscele proposte da Superpave e le sue procedure di analisi.

Durante questo periodo di tempo le diverse sezioni di pista di questo tratto hanno sviluppato diversi tipi di ammaloramenti: fessurazione, ormaimento, fessurazione la fatica, perdita delle caratteristiche di superficialità e alcune di queste sezioni hanno necessitato di una riabilitazione.

Per determinare l'effetto sui consumi di carburante del cambiamento di pavimentazione, sono stati esaminati due tratti di sezioni identiche per periodi di tempo precedenti e successivi ad una riabilitazione eseguita nel marzo del 1998. Prima di questa riabilitazione, entrambe le sezioni presentavano pessime caratteristiche superficiali, con fessurazione a fatica e presenza di ormaie dove erano state eseguite piccole riparazioni superficiali. Il risultato economico della riabilitazione è stato evidente per quanto riguarda l'IRI che ha dimostrato di ridursi in media almeno del 10%. Per quanto riguarda lo studio dell'economia di gestione del veicolo, sono stati analizzati giornalmente il tasso di consumo di carburante e la velocità di deperimento dei pneumatici dei camion. I dati dimostrano che in media il consumo di combustibile misurato per un periodo di otto settimane prima della riabilitazione era 1.79 km per litro. Dopo la riabilitazione questa media misurata per un periodo di sette settimane è stata 1.86 km per litro, indicando miglioramenti del 4.5%. Altri fattori come geometria del camion, temperatura ambiente e velocità del vento sono stati misurati prima e dopo la riabilitazione, compensati con appositi coefficienti utilizzati nel calcolo.

---

Questo porta alla conclusione, per esempio, che per una compagnia di trasporto che fa circa 1.6 milioni di km all'anno, guidare su una pavimentazione più regolare può portare a un risparmio di 46600 litri di combustibile.

L'aumento di rugosità della pavimentazioni aumenta anche le frequenze di guasti e fallimenti dei componenti dei veicoli. Durante due anni e mezzo di traffico in pista otto dei 17 guasti occorsi hanno avuto luogo nei due mesi precedenti alla riabilitazione. In questi due mesi, 265000 carichi sono stati applicati alla pista, contro i 350000 applicati nelle sette settimane seguenti alla riabilitazione, che hanno condotto ad un solo guasto.

### 3.3.7 Riciclabilità

Le pavimentazioni in Asphalt Rubber possono essere completamente riciclate. Non solo si possono riutilizzare gli aggregati, ma si è verificato che il bitume modificato con il polverino di gomma mantiene grande parte della sua adesività e può essere riutilizzato in un conglomerato.

All'inizio degli anni '90, relativamente al riciclaggio di Asphalt Rubber vi era la preoccupazione che questo potesse originare fumi ed altri problemi per la salute.

Il *Texas Transport Institute* (TTI) ha intrapreso studi nel 1995 a questo proposito, analizzando due delle prime operazioni di riciclaggio negli Stati Uniti. Questo studio ha concluso che *"il materiale è riciclabile e che il materiale riciclato, se progettato e costruito correttamente, ha buona performance, prestazioni e durata"*. Inoltre ha dichiarato che *"... l'effetto di CRM sulle emissioni durante il processo costruttivo e di riciclaggio può essere relativamente piccolo rispetto agli effetti di altre variabili."* Quelle variabili includono il tasso di rifornimento dell'essiccatore, la temperatura della miscela, il tasso di rendimento dell'asfalto e il contenuto di legante.

Un altro studio recente sul riciclaggio è stato presentato a Los Angeles, California, intitolato *"Olympic Boulevard Asphalt Rubber Recycling Project, City Of Los Angeles - Department Of Public Works"*, e ha avuto due obiettivi primari: determinare la riciclabilità dell'Asphalt Rubber utilizzando un metodo convenzionale di progettazione e determinare l'impatto di questa operazione sulla qualità dell'aria.

La pavimentazione in Asphalt Rubber era stata costruita nel 1982. Nel 1994 è stata fresata, immagazzinando il fresato in un cantiere vicino ad una centrale bituminosa. Sono state dimensionate pavimentazioni includendo il riciclaggio di AR tramite i metodi Marshall e il *"Marshall Mix Design Criteria"*.

Al 15% del fresato degli HMRA è stato mescolato a caldo l'85% di aggregato vergine e olio, in modo che il fresato componesse il 15% di miscela finale.

---

In un impianto di riciclaggio, tramite processo *microwave* si è ottenuto un conglomerato Asphalt Rubber 100% riciclato. Nel 1994 il *Bureau of Street Maintenance* ha pavimentato tre sezione test, due utilizzando le miscele con il fresato della pavimentazione AR metodo wet del 1982 ed una di controllo con conglomerato convenzionale. I tre materiali sono stati studiati usando *Sieve Analysis Tests*, *Marshall Tests* e *Nuclear Gauge Density Measurements*.

I risultati hanno dimostrato che l'Asphalt Rubber 100% riciclata ha avuto una performance paragonabile al nuovo conglomerato. Questo progetto ha dimostrato che i conglomerati AR possono essere riciclati anche a caldo, usando la tecnologia di microonda o la tecnologia di riciclaggio convenzionale della miscela. La qualità dell'aria è stata valutata dalla *City's Industrial Hygienist* utilizzando gli standart della OSHA, e si è potuto verificare che i livelli di fumi misurati rientravano nei limiti stabiliti.

Una ricerca di laboratorio è stata condotta presso l'Università della Florida [3-44] per determinare se la quantità di polverino di gomma recuperato da una pavimentazione avesse qualche effetto indesiderato durante il riciclaggio e sulle proprietà dei conglomerati riciclati. Il Dipartimento dei Trasporti della Florida comunemente usa il 12% di polverino incorporato nel bitumi tramite processo wet, formulazione tipicamente usata nelle strade interstatali e nelle autostrade.

Sono stati preparati in laboratorio diversi campioni di conglomerati contenenti diverse percentuali di polverino di gomma, simulando diversi fresati, e sono state eseguite prove con giratoria (prove di Variance ANOVA e Duncan). Il tipo e la quantità di polverino utilizzato non hanno mostrato nessun effetto nelle prove eseguite.

Il conglomerati riciclati con funzione strutturale, contenendo il 33 ed il 50% di fresato, hanno quindi dimostrato di essere insensibili ai contenuti di polverino utilizzato, dallo 0 fino al 9% sul peso totale del bitumi. La percentuale di vuoti e la *shear resistance* della giratoria sono poco condizionati dal tipo di polverino utilizzato, così come dalla sua granulometria. Tuttavia, il livello di compattazione influenza significativamente la *shear resistance* della giratoria e il contenuto di vuoti. La *shear resistance* dei conglomerati a caldo compattati a 18 giri hanno bassi *shear strenght* rispetto alla 18 più cinque giri testati a 60°C.

Questo è dovuto, soprattutto, all'effetto della temperatura delle prove e a una differenza nella densità. L'invecchiamento del fresato contenente il 6% di polverino ha avuto un effetto poco significativo nella *shear resistance*, ma ha condotto a un assorbimento maggiore del bitume da parte dell'aggregato. Come risultato il conglomerato contenente il fresato invecchiato ha l'1% in più di contenuto di vuoti. Si può concludere che 40% di fresato contenente fino al 20% di polverino può essere combinato con 60% di aggregato vergine senza cambiare significativamente il processo costruttivo e le performance in servizio.

---

### 3.3.8 Versatilità e Minori Tempi di Costruzione

La versatilità dell'Asphalt Rubber si traduce in una varietà di possibili applicazioni in cui questo legante può essere impiegato con buone performance:

- Applicazione Spray – Il legante AR può essere utilizzato in:
  - Chip Seals – Applicazione del bitume AR seguita dall'applicazione di un aggregato;
  - Interlayers – Applicazione di un chip seal AR prima di uno strato HMA;
  - **Cape Seals** – Applicazione di un chip seal AR seguito da un trattamento superficiale slurry seal.
  
- Conglomerati AR – I conglomerati a caldo HMRA utilizzati sono:
  - Chiuso, *Dense-Graded Mixes* – Contiene una percentuale di AR generalmente fra il 6 e l'8% sul peso dell'aggregato;
  - Semiaperto, *Gap-Graded Mixes* – Contiene una percentuale di AR generalmente fra il 7 e il 9% sul peso dell'aggregato, per assicurare un maggior ricoprimento degli aggregati stessi;
  - Drenante, *Open-Graded Mixes* – Contiene una percentuale di AR generalmente fra il 6 e l'8%, sul peso dell'aggregato, utilizzato come strato di usura per ridurre *splash and spray* dovuti a acqua sulla superficie stradale;
  - Aperto, *Open-Graded Mixes (High Binder)* – è simile al conglomerato AR drenante ma contiene una percentuale di AR generalmente fra l'8 e il 10% sul peso dell'aggregato, per assicurare un maggior ricoprimento degli aggregati e ottenere una maggior durabilità.

Dal momento che l'impianto di produzione di Asphalt Rubber è collocato vicino al cantiere, la fase di costruzione è più rapida; le pavimentazioni realizzate con queste miscele, inoltre, possono essere aperte al traffico quasi immediatamente dopo la compattazione, causando minor disagio all'utente. Un altro aspetto che contribuisce a ridurre i tempi di costruzione riguarda la riduzione dello spessore degli strati in AR.

Inoltre la costruzione con AR implica un minor disturbo del traffico. Siccome l'AR può essere utilizzato in spessori minori, il processo costruttivo è più veloce. Utilizzando spessori minori si ottiene anche un risparmio di energia e delle risorse naturali (Punto 3.4.2.3).



Figura 3-34: Esempio di impianto mobile per la produzione di Asphalt Rubber

## 3.4 Aspetti della Progettazione di Conglomerati Asphalt Rubber

### 3.4.1 Pavimentazioni Nuove

Date le sue caratteristiche, l'Asphalt Rubber viene preferibilmente utilizzato come strategia di riabilitazione. Il metodo di dimensionamento del Caltrans, spiegato in modo approfondito al punto 3.4.2.1, si basa su di una metodologia standard di progetto che permette la sostituzione parziale di strati in materiali convenzionali con strati in Asphalt Rubber di spessore inferiore.

Quando gli HMRA vengono utilizzati nella costruzione di pavimentazioni nuove, si deve valutare lo spessore da applicare, fortemente dipendente dal modulo E della fondazione e degli strati di base, dal momento che la riduzione dello spessore può condizionare la capacità strutturale del pacchetto stradale.

Così, uno strato in HMRA, rispetto ad uno strato di conglomerato convenzionale, può presentare una riduzione di spessore fino al 50% (fino a 60 mm di riduzione), nel caso si tratti di uno strato convenzionale *dense graded asphalt concrete* (DGAC).

A titolo di esempio, considerando una pavimentazione con un indice di traffico (*Traffic Index - TI*) pari a 11, un progetto che non includa HMRA richiederebbe uno spessore di 180 mm (7.2 in.) di DGAC sopra uno strato di base di classe 2. Come alternativa possono essere applicati 60 mm (2.4 in.) di HMRA collocati sopra uno strato di 60 mm (2.4 in.) di DGAC sopra la stessa base, risparmiando così 60 mm (2.4 in.) di spessore totale.

---

I conglomerati Asphalt Rubber sono usati maggiormente negli strati di usura per evitare fenomeni di propagazione della fessurazione del tipo *top-down* e aumentare la durabilità della pavimentazione. Data la loro performance per quanto riguarda la resistenza a fatica, gli HMRA sono stati anche utilizzati in strati di base per evitare la fessurazione del tipo *down-top*. Quando l'AR è utilizzato sopra pavimentazioni fessurate, la fessura che si sviluppa nello strato in AR generalmente inizia dalla parte inferiore e si propaga fino alla superficie. In questi casi è utile utilizzare una membrana del tipo SAMI.

Così nel dimensionamento di un pacchetto stradale nuovo va privilegiata la scelta di HMRA per strati di usura o intermedi, portando ad un vantaggio economico, tramite un eventuale riduzione dello spessore e sfruttando le proprietà funzionali conferite da questo materiale e la sua fonoassorbenza.

### 3.4.2 Manutenzione e Riabilitazione di pavimentazioni esistenti

Gli interventi su una pavimentazione possono essere di due tipi:

- **Manutenzione Preventiva:** si attua intervenendo sulla strada con un trattamento superficiale, prima che si verifichi il fenomeno di stress, ovvero l'ammalloramento. Questo tipo di intervento preserva la pavimentazione, ritarda il suo deterioramento, e migliora le caratteristiche superficiali, senza aumentarne la capacità strutturale. La Figura 3-35 mostra una curva tipica di deterioramento e l'intervento di manutenzione.
- **Manutenzione Correttiva:** si applica quando la pavimentazione presenta un difetto (fessurazione, ormaimento, disgregazione, perdita delle caratteristiche superficiali, o altro) che porta alla necessità di una riabilitazione della pavimentazione.

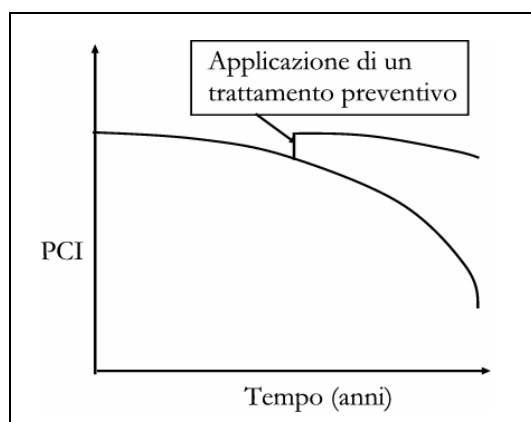


Figura 3-35: Tipica curva di deterioramento, con indicati gli effetti di un trattamento manutentivo preventivo

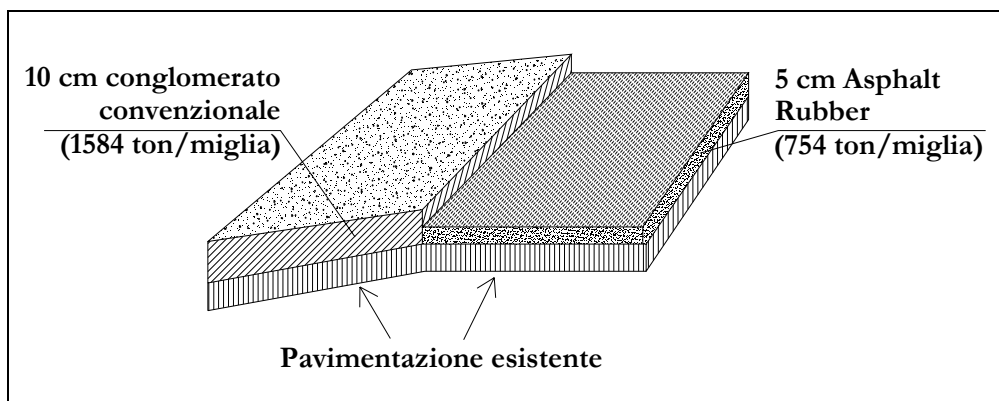
A seconda dello stato della pavimentazione da riabilitare si utilizzano diverse strategie di riabilitazione, soluzioni e materiali.

Uno dei principali problemi che si presentano nella riabilitazione delle pavimentazioni, deriva dalla propagazione delle fessure delle pavimentazioni esistenti. In questi casi, come riferito, l'utilizzo dell'Asphalt Rubber consente di ottenere una efficace barriera e, allo stesso tempo, fornisce un contributo strutturale che rende questa soluzione più economica rispetto ad una tradizionale. Per quanto riguarda le pavimentazioni in stato di rottura a fatica, l'utilizzo di conglomerati Asphalt Rubber, con l'eventuale applicazione di una SAMI, si è dimostrata una soluzione efficace.

In queste applicazioni, al contrario di quello che succede con i conglomerati tradizionali, non è necessario eseguire il fresaggio delle zone con fessurazione più accentuata, purché la pavimentazione presenti una deformazione compatibile con le caratteristiche meccaniche del conglomerato Asphalt Rubber da utilizzare. A questo punto, grazie alla minor rigidezza ed alla maggior resistenza a fatica che questo tipo di materiale presenta, gli strati di rinforzo hanno in genere spessori minori.

#### 3.4.2.1 STRATEGIE DI RIABILITAZIONE

Tipicamente, le riabilitazioni con Asphalt Rubber consistono nell'applicazione di un nuovo strato di usura (Figura 3-36) o in sistemi a doppio e triplo-strato (Figura 3-38 e Figura 3-39).



**Figura 3-36: Esempio di riabilitazione a singolo strato, con evidenziati i minori spessori consentiti dall'applicazione di AR.**

Nel primo caso, L'AR-OGFC può essere utilizzato efficacemente per riabilitare le pavimentazioni in stato di evidente deterioramento, come nel caso dei numerosi trattamenti di superfici in cemento Portland effettuate in Arizona nell'ultimo ventennio.



La superficie di AR-OGFC, oltre a migliorare le caratteristiche di attrito, tessitura, regolarità e fonoassorbente, limita il propagarsi della riflessione delle fessure, con conseguente riduzione dei successivi costi di manutenzione. Il primo esempio non sperimentale e ad ampia scala di questo tipo di trattamento si è avuto nel 1988 proprio in Arizona, lungo oltre tre chilometri della Interstate 19, al fine di riabilitare la pavimentazione in PCCP realizzata 23 anni prima [3-31]. Nello specifico, è stato applicato uno strato da un pollice di AR-OGFC, caratterizzato da un contenuto in peso di legante pari al 10% e da un contenuto in volume pari, rispettivamente, al 55% di aggregato, al 25% di legante e al 20% di vuoti d'aria.

Questi ultimi, in 14 anni di servizio sono diminuiti al 15%. Il legante al momento della posa in opera presentava una penetrazione di 48 mm e un punto di rammollimento di 60°C, mentre misure condotte nel 2000 hanno mostrato una diminuzione della penetrazione di 22 mm e un punto di rammollimento di 71°C, che indicano un'eccellente resistenza all'invecchiamento.

Altri esempi analoghi di applicazione di questa tecnica si sono avuti, sempre in Arizona, nel 1990 lungo la Interstate 17 e nel 1995 lungo la Flagstaff, entrambe con pavimentazioni in PCCP aventi, rispettivamente, 30 e 21 anni di esercizio. Questi due esempi risultano particolarmente significativi per i tipi di clima in cui si trovano, rispettivamente il primo particolarmente caldo, mentre il secondo particolarmente rigido e nevoso per via dell'altitudine superiore ai 2100 metri. In entrambe le applicazioni lo strato di riabilitazione in AR ha sinora mostrato buona resistenza alle condizioni climatiche particolarmente avverse, oltre che, nel primo caso, agli elevati livelli di traffico.

Oltre a questa tecnica di riabilitazione, l'utilizzo di Asphalt Rubber in applicazioni tipo spray (Chip Seals, SAM, SAMI e Cape Seals) di seguito descritte è risultato efficace nella maggior parte degli interventi sinora eseguiti.

### *CHIP SEALS*

Come menzionato, l'Asphalt Rubber era inizialmente utilizzato come legante in Chip Seals. Su questi progetti l'Asphalt Rubber esibiva uno dei suoi migliori vantaggi ovvero la resistenza alla rottura. Una delle significative differenze dell'AR è il tasso di applicazione del legante. In una emulsione normale e da bitume modificato, il tasso di applicazione è, rispettivamente, 1.4-1.8 e 1.6-2.0 litri per metro quadrato. Negli ARCS questo tasso è 2.0-3.0 litri per metro quadrato. Questo porta ad un vantaggio significativo non solo sigillando la superficie della pavimentazione, ma anche nella resistenza alla rottura, alleviando gli stress che vengono trasmessi dalla superficie della pavimentazione stessa.

### *SAMI*

Il chip seal AR è anche usato come membrana interstrato di assorbimento dello stress (SAMI). Una delle caratteristiche principali di questo tipo di rivestimento è la sua elevata flessibilità e conseguente capacità di resistenza alla propagazione di fessure. Parallelamente si garantisce con l'applicazione di questo tipo di trattamento superficiale l'impermeabilizzazione di una determinata superficie nel tempo.

L'applicazione di questa tecnica garantisce il recupero delle caratteristiche funzionali delle pavimentazioni invecchiate (macro e micro tessitura) e, in termini superficiali, la necessaria resistenza alla propagazione di fessure esistenti alla base delle pavimentazioni stesse. Questa soluzione può essere applicata in un'ottica di riabilitazione periodica delle pavimentazioni. Per quanto riguarda la costruzione di nuove pavimentazioni, con bassa intensità di traffico, questo tipo di applicazione può essere associato a una base trattata con leganti idraulici. Con questa soluzione si garantisce un'elevata capacità di trasferimento del carico alla base e adeguata impermeabilizzazione e resistenza alla propagazione di fessure. Questa soluzione presenta un'ottima relazione costo-beneficio in confronto ad altre soluzioni convenzionali.

Il suo utilizzo come membrana anti-propagazione di fessure e simultaneamente come impermeabilizzante di una determinata superficie, in una pavimentazione nuova o come tecnica di riabilitazione, può essere associato a una applicazione con altri strati di conglomerati Asphalt Rubber.

Nella Figura 3-37 viene mostrato un trattamento superficiale realizzato su di una strada bianca. Dopo un anno dalla costruzione la superficie è talmente elastica che può essere sollevata senza rompersi. Questa è la soluzione ottimale per questa strada del deserto dell'Arizona, caratterizzata da un traffico pesante ma con una intensità molto ridotta.

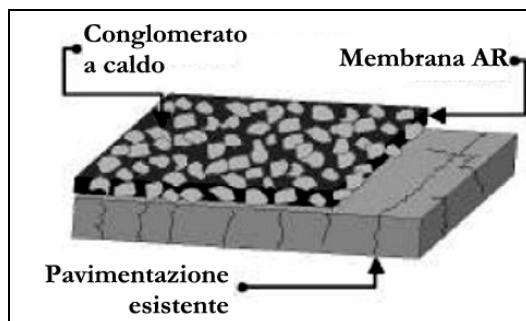
---



**Figura 3-37:** Immagine che mostra l'elevata elasticità e resistenza di un trattamento superficiale con AR applicato ad una strada bianca nel deserto dell'Arizona

La SAMI può essere applicata in uno, due o più strati semplici o gruppi di strati in funzione dello stato delle pavimentazioni e dei volumi di traffico previsto. In una SAMI, i tassi di applicazione di bitume modificato con gomma variano fra 1.8 e 2.6 kg/m<sup>2</sup> e il tasso di applicazione di aggregati varia fra 10 e 4 kg/m<sup>2</sup>, a seconda che si tratti di un sistema semplice o multiplo e della granulometria da utilizzare.

Ricerche hanno mostrato che SAMI fornisce l'equivalente di 52 mm di AC nell'abilità di alleviare la rottura. Comunque, recentemente molti campi di performance hanno indicato che questa equivalenza è molto conservativa. Come menzionato prima, poiché l'Asphalt Rubber ha la capacità di alleviare significativamente gli stress della superficie pavimentata, può anche portare queste stesse proprietà quando usato come SAMI e estendere significativamente la vita utile di una pavimentazione.



**Figura 3-38:** Sistema a doppio strato

Una strategia di riabilitazione che utilizza una SAMI in Asphalt Rubber, abbinata ad un HMRA consente un netto miglioramento della performance e un significativo risparmio (sistema a doppio strato – vedi Figura 3-38).

### CAPE SEALS

L'ARCS è stato anche utilizzato come applicazione in cape seals AR. Un cape seals AR è semplicemente un chip seal seguito da uno slurry seal. In una sottile superficie pavimentata consente il miglioramento della resistenza alla rottura. Questa strategia può portare al risparmio di costi quando confrontata con strategie convenzionali di rivestimento.

Nelle aree residenziali, dove i residenti vogliono pavimentazioni lisce, il chip seal AR può essere posizionato per controllare i problemi di rottura, seguito da un impasto liquido sigillante steso per regolarizzare la superficie. Cape seals in AR hanno dimostrato di poter lavorare oltre dieci anni in molti progetti.

### SISTEMI MULTISTRATO

SAMI di Asphalt Rubber e HMRA usate in abbinamento, consentono di ottenere ottime prestazioni e durabilità. Il sistema di tre strati composto da un conglomerato di asfalto convenzionale, una SAMI di Asphalt Rubber ed uno strato di usura in HMRA, ha fornito un significativo risparmio nei costi per le concessionarie della California, fornendo contemporaneamente performance superiori. L'utilizzo di combinazioni di conglomerato di asfalto convenzionale come base, HMRA come secondo strato e infine, un conglomerato aperto, del tipo Open-Graded Mixes (High Binder) ha evidenziato prestazioni migliori rispetto agli altri tipi di pavimentazioni. Questi sistemi in molti casi hanno fornito bassi costi iniziali e, parallelamente, riduzioni dei costi di manutenzione.

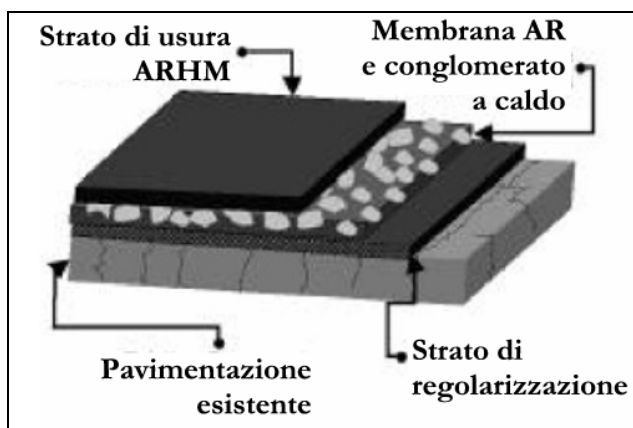


Figura 3-39: Sistema triplo strato

Questi sistemi di tre strati (Figura 3-39) sono stati utilizzati come alternativa per la completa ricostruzione e hanno fornito durate di servizio superiori a 15 anni. Alcuni di questi progetti hanno fornito risparmi di oltre 300.000\$ per ogni progetto [3-32].

### 3.4.2.2 VALUTAZIONE DELLO STATO DELLA PAVIMENTAZIONE

In un progetto di riabilitazione, per determinare lo spessore di uno strato di riabilitazione, o di un trattamento superficiale, è necessario valutare lo stato della pavimentazione esistente, in particolare relativamente a:

- Analisi della superficie della pavimentazione - tipo e quantità di ormaie, fessure ed altri difetti, tramite una ispezione visiva e rilievo delle caratteristiche superficiali ricorrendo a strumenti specializzati (IRI ed altri);
- Analisi di traffico - studio del volume e tipo di traffico (pesante) per verifica o calcolo della capacità strutturale che deve avere la pavimentazione durante la sua vita utile (es. conteggio delle vetture);
- Analisi della capacità strutturale (portanza) della pavimentazione tramite un *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Il *Falling Weight Deflectometer* (FWH) è una apparecchiatura per prove di carico non distruttive che applica, sulla superficie della pavimentazione, un carico di impatto risultante della caduta di una massa da una certa altezza. Gli spostamenti verticali della superficie, dovuti all'applicazione di questo carico, sono misurati in diversi punti tramite geofoni appoggiati su di un'asta parte integrante dell'equipaggiamento.

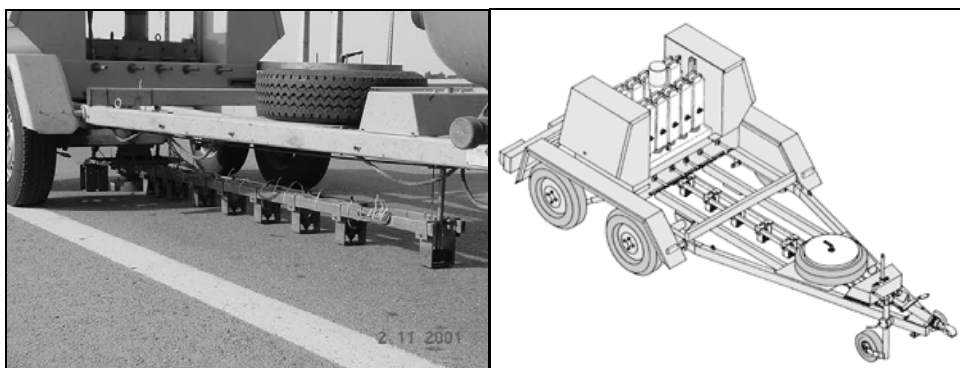


Figura 3-40: Vista globale della apparecchiatura *Dynatest HFWD 8081*

### 3.4.2.3 LA METODOLOGIA CALTRANS PER LA RIDUZIONE DELLO SPESSORE

Dal 1980 al 1992 il Caltrans ha condotto diverse ricerche comparando le prestazioni in situ di diversi conglomerati convenzionali con conglomerati AR. Durante questo periodo sono state anche costruite sezioni di pavimentazioni CRM all'interno di alcune città in California. È stato determinato, tramite queste valutazioni, che l'Asphalt Rubber può ridurre significativamente lo spessore di uno strato di pavimentazione mantenendo la stessa vita in servizio di un conglomerato convenzionale con spessore più elevato [3-7].

Nelle sezioni costruite dal Caltrans prima del 1983, gli strati in Asphalt Rubber erano realizzati con lo stesso spessore di un conglomerato convenzionale. Dopo le prime valutazioni prestazionali di queste sezioni si è optato, nel 1987, per ridurre lo spessore degli strati in Asphalt Rubber. La strategia del Caltrans è quindi cambiata, stabilendo che gli interventi di riabilitazione con Asphalt Rubber dovevano includere soluzioni con spessore inferiori relativamente alle soluzioni convenzionali.

Nelle applicazioni successive, si è arrivati a realizzare strati di riabilitazione in conglomerato AR di altezza inferiore sino al 50% rispetto ai materiali convenzionali. Da quel momento e sino al 1992 in California sono stati realizzati ben 750 progetti di questo tipo, che hanno dimostrato ottimi risultati, convincendo il Caltrans a presentare, proprio nel 1992, un documento alla *Federal Highway Administration* (FHWA) contenente una proposta per stabilire a livello normativo la riduzione dello spessore degli strati in conglomerato AR impiegati come strategia di riabilitazione. Questo manuale, basato su prove di laboratorio e 20 anni di esperienze, raccomandava per le HRMA una riduzione dello spessore, rispetto a un conglomerato convenzionale, fino a 50%.

Il Caltrans ha sviluppato il suo manuale in forma di tabella semplice da utilizzare. Per determinare lo spessore di uno strato in HMRA, prima si determina lo spessore di un HMA, dopo di che si utilizza la tabella per convertire lo spessore.

#### *DIRETTIVE PER LA PROGETTAZIONE DI PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI*

Le direttive stabilite dal Caltrans per la progettazione di pavimentazioni flessibili si basano su prove di deflessione non distruttive eseguite su pavimentazioni esistenti (FWH).

La deflessione massima misurata sotto carico è usata per determinare i requisiti dello spessore di uno strato per una vita utile di progetto di 10 anni. Questa procedura utilizza il criterio della deflessione massima per ottenere lo spessore richiesto dal Caltrans (Test 356).

Lo spessore richiesto è selezionato per rispondere sia ad una esigenza strutturale che al criterio della riflessione della fessurazione. I requisiti strutturali sono basati su deflessioni contenute entro un certo livello ammissibile.

---

Quando la pavimentazione in servizio presenta fessure ma le deflessioni misurate rientrano nei limiti consentiti dalla norma, prevalgono i criteri della riflessione della fessurazione. In generale, la riflessione della fessurazione può anche essere progettata assumendo che lo spessore necessario è il 50% di quello che sarebbe necessario per ottenere la richiesta resistenza strutturale.

#### *DIRETTIVE PER LA PROGETTAZIONE DI STRATI DI PAVIMENTAZIONI DRENANTI GAP GRADED*

Dalla performance delle sezioni testate dal Progetto Ravendale ed altri ha avuto origine lo sviluppo di un guida progettuale per pavimentazioni flessibili drenanti utilizzando Asphalt Rubber. Questa guida è stata utilizzata di recente per strati di cemento Portland, dove sono state registrate fessurazioni e cedimenti alla base. Il Caltrans, come anticipato, ha raccomandato una riduzione dello spessore circa del 50%, utilizzando Asphalt Rubber, rispetto a quello richiesto da un conglomerato convenzionale. Dal 1992, il Caltrans ha utilizzato questa guida in tutte le riabilitazioni progettate prevedendo l'impiego di Asphalt Rubber.

La procedura consiste inizialmente nel determinare lo spessore necessario in funzione della risposta e portanza strutturale di un conglomerato convenzionale, basandosi sulle deflessioni misurate tramite FWH e sulla struttura della sezione. Dopo di che viene determinato lo spessore necessario per evitare il fenomeno della riflessione della fessurazione. Il maggiore tra questi spessori determinati per un conglomerato convenzionale viene tradotto in uno spessore per HMRA. Se questo spessore è inferiore a 30 mm non è necessario costruire un strato in conglomerato bituminoso e viene, quindi, applicato un trattamento superficiale con un Chip Seal in Asphalt Rubber.

#### *IPOTESI ASSUNTE*

- La fessurazione negli strati è causata da una combinazione di carichi di traffico e movimenti della base della pavimentazione;
- I conglomerati in Asphalt Rubber possono sopportare maggiori deflessioni misurate con FWH senza fessurazione e presentano una maggior resistenza alla riflessione della fessurazione. I risultati migliori con Asphalt Rubber si ottengono con strati drenanti gap-graded. Questo può essere ricondotto al fatto che i conglomerati Asphalt Rubber hanno una percentuale significativamente maggiore di bitume rispetto ai tradizionali. Per i conglomerati chiusi, le percentuali di bitume risultano superiori del 20%, mentre per i gap-graded si arriva al 40 o 50%;

- Il grado di rigidità fornito da un specifico spessore di gap-graded è minore dell'aumento di rigidità fornito da un conglomerato convenzionale dello stesso spessore.

#### TABELLE DI EQUIVALENZA

La Tabella 3-9 è utilizzata per le equivalenze strutturali, mentre la Tabella 3-10 riguarda il ritardo del fenomeno di riflessione della fessurazione.

In entrambi ci sono due colonne per i conglomerati AR, la prima si riferisce a un HMRA-GG, la seconda alla combinazione di un conglomerato HMRA-GG con una SAMI in Asphalt Rubber (30 mm). L'introduzione di questa SAMI è equivalente a 45 mm di spessore.

**Tabella 3-9: Equivalenze Strutturali per la Riabilitazione\***

DGAC	ARHM-GG <sup>1</sup>	ARHM-GG e SAMI
0.15	0.10 <sup>2</sup>	æ
0.20	0.10	æ
0.25	0.15	0.10
0.30	0.15	0.10
0.35	0.20	0.15
0.40	0.20	0.15
0.45	0.15 <sup>3</sup>	0.20
0.50	0.15 <sup>4</sup>	0.20
0.55	0.20 <sup>3</sup>	0.15 <sup>3</sup>
0.60	0.20 <sup>4</sup>	0.15 <sup>4</sup>

Note:

1. \*Spessori in piedi
2. La massima equivalenza non sperimentale per ARHM-GG è 2:1.
3. Lo spessore minimo ammissibile per ARHM-GG è 0.10<sup>è</sup>.
4. Posizionare prima 0.15<sup>è</sup> di DGAC nuovo.
5. Posizionare prima 0.20<sup>è</sup> di DGAC nuovo.
6. ARHM-GG può non prevenire la rottura trasversale dovuta alle basse temperature.



Tabella 3-10: Equivalenze per il Ritardo della Riflessione della Fessurazione \*

DGAC	ARHM-GG	ARHM-GG e SAMI
0.15	0.10 <sup>1</sup>	æ
0.20	0.10	æ
0.25	0.15	æ
0.30	0.15	æ
0.35 <sup>2</sup>	0.15 or 0.20 <sup>3</sup>	0.10 <sup>4</sup>

Note:

1. \*Spessori in piedi
2. Lo spessore minimo ammissibile per ARHM-GG è 0.10.
3. Uno spessore di DGAC pari a 0.35 è il massimo raccomandato dal Caltrans per ritardare la riflessione della fessurazione.
4. Usare 0.15 se la larghezza delle fessure è  $< 1/8$  e 0.20 se la larghezza è  $> 1/8$ .
5. Usare se la larghezza delle fessure è  $> 1/8$ . Se  $< 1/8$ , usare un'altra strategia.
6. ARHM-GG può non prevenire la rottura trasversale dovuta alle basse temperature.

#### VALUTAZIONE DEL MANUALE

Nel 1993 il Caltrans ha portato avanti una ricerca per valutare le raccomandazioni del suo manuale. Per questa ricerca ha avuto la collaborazione della *University of California, Berkeley* (UCB), dal *Dynatest Consulting* e dal *Council for Scientific and Industrial Research* (CSIR). Il lavoro ha coinvolto l'uso del *Heavy Vehicle Simulator* (HVS) della Repubblica del Sud Africa. Questo studio è già stato riferito nel punto 3.3.2 della presente tesi.

I risultati di tale studio hanno permesso all'allora ingegnere dirigente del Caltrans, Richard Land, di concludere che l'AR è più duraturo, resistente alla fessurazione e alle escursioni termiche, presentando la stessa vita utile con metà dello spessore. Inoltre in questo studio lo strato in AR presenta una riduzione di 2/3 dello spessore, quindi questi risultati non solo validano il manuale del Caltrans come indicano che questo può essere conservativo.

Ulteriori studi dell'Università della California, Berkeley (1994) e dei laboratori dell'Università dell'Alaska, Fairbanks (1995), hanno supportato queste conclusioni. L'esperienza in Arizona [3-3] ha dimostrato che, utilizzando Asphalt Rubber nella riabilitazione, si riesce a ridurre lo spessore da 1/3 a 1/2 rispetto ad un conglomerato tradizionale, con costi di manutenzione sostanzialmente inferiori.

### 3.4.3 Altri Aspetti Progettuali

Per ogni tipo di applicazione di Asphalt Rubber sopra descritto ci sono un numero di considerazioni progettuali importanti per assicurare il successo della progettazione.

#### - Spessore Minimo

Questo aspetto è importante, dovuto principalmente a motivazioni di carattere pratico. Una questione riguarda la ritenzione del calore durante la costruzione; la stesa di strati molto sottili può provocare il raffreddamento del conglomerato prima della compattazione. Un altro aspetto riguarda la dimensione degli aggregati; lo spessore minimo deve essere 2-3 volte maggiore che la dimensione massima dell'aggregato per evitare che durante la fase di compattazione questo venga schiacciato o che ci siano straccamenti.

Per una dimensione massima dell'aggregato di 12.5 mm, lo spessore minimo deve essere fra i 25 e i 37.5 mm.

#### - Zone più delicate

Ci sono tratti più propensi all'ormaiamento come: intersezioni, rampe di accesso, corsie in salita dedicate al traffico pesante o tratti dove la velocità è inferiore e il traffico è più pesante. L'uso di Asphalt Rubber aumenta la resistenza all'ormaiamento, grazie ad una maggior viscosità del legante. Una strategia di progetto può essere quella di ridurre il contenuto di bitume per aumentare la stabilità del conglomerato.

#### - Condizione Climatiche

L'Asphalt Rubber è particolarmente sensibile alle condizioni climatiche, soprattutto all'umidità (la maggior parte delle specifiche riferisce che l'AR deve essere steso su una superficie completamente asciutta) e alla temperatura. La miscelazione del bitume con l'aggregato e la stesa del conglomerato devono essere seguite con particolare attenzione. I conglomerati stesi in regioni fredde ( $< 13^{\circ}\text{C}$ ) sono più soggetti a problemi di compattazione.

#### - Preparazione della Superficie

Dal momento che l'Asphalt Rubber viene generalmente utilizzato in strategie di riabilitazione, si deve assicurare che la superficie della pavimentazione esistente sia trattata prima della stesura del conglomerato o del trattamento superficiale.

Questo include la sigillatura di tutte le fessure maggiori di 6 mm, almeno sei mesi prima, o la riparazione di disgregazioni particolarmente accentuate. Nel caso la superficie non sia livellata, si deve eseguire il fresaggio e applicare un strato di livellamento.

---

---

Immediatamente prima della applicazione degli HMRA si deve spruzzare una mano di attacco.

- **Considerazione sul Traffico**

I materiali in Asphalt Rubber possono essere utilizzati nelle maggioranze delle situazioni di traffico, ma è importante eseguire un adeguato controllo del traffico. Se questo è autorizzato ad entrare nella stuoia ancora calda può verificarsi spogliamento o rimanere dei segni che possono portare ad una scarsa performance.

Per evitare questi inconvenienti, in California dopo la compattazione viene spruzzata sabbia, mentre in Arizona si utilizza un bagno di calce. Questo bagno di calce non è autorizzato nel capitolato del Caltrans.

### 3.4.4 Specifiche e capitolati per la formulazione di HMRA

Nonostante il termine Asphalt Rubber rappresenti un tipo specifico di bitume, è stato finora liberamente utilizzato per definire un elenco di materiali che vedono mescolati bitumi e gomma. Nel corso della ricerca bibliografica per questa Tesi si è trovato il termine “Asphalt Rubber” associato, in alcuni studi, al:

- Metodo wet con 15% gomma e a volte con l’aggiunta di additivi
- Metodo wet con 10% di gomma, mescolata alla fine
- Metodo wet mescolando 5% di polverino con SBS
- Metodo wet con 3.5% di gomma
- Metodo dry (da 1 a 5% di gomma sul peso dell’aggregato), tempi di reazione rapidi e lunghi
- Terminal Blend (da 5 a 7% di gomma), anche con l’aggiunta di additivi
- Altri metodi, senza informazione tecnica sul processo di produzione

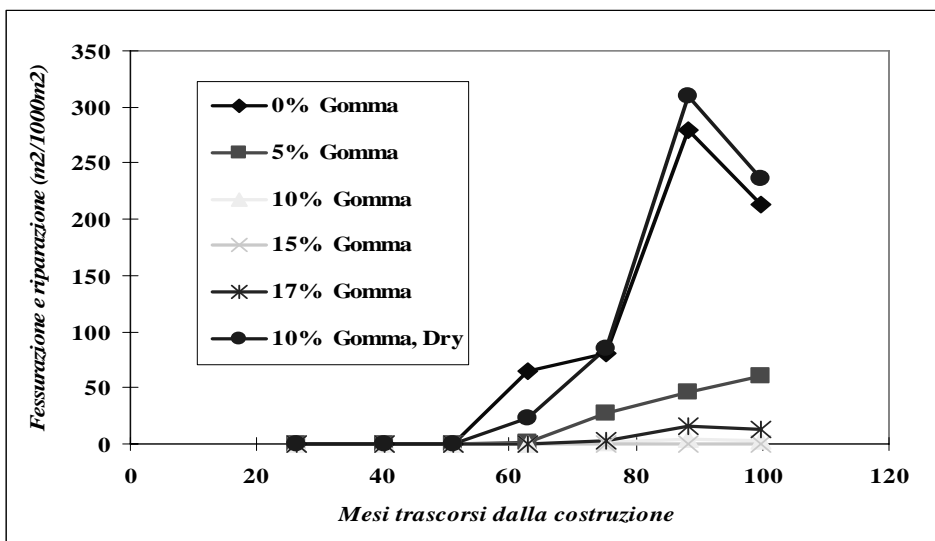
Come è già stato riferito, “Asphalt Rubber” è di fatto un tipo specifico di bitumi, che utilizza un tipo e una granulometria specifica di polverino di gomma, e che viene prodotto in stretta prossimità del cantiere stradale, tramite apparecchiature specializzate.

È importante distinguere questi metodi, poiché portano a materiali dalle prestazioni molto diverse.

Ad esempio, la promozione del processo wet di Mc Donald passa da una serie di riscontri sperimentali sull’influenza della quantità di polverino di gomma impiegato e del processo di reazione con il bitume.

---

Un studio eseguito in tratti pilota in Florida [3-35] ha dimostrato che il processo wet esibisce prestazioni superiori rispetto ad una pavimentazione realizzata con bitume tradizionale e, inoltre, le prestazioni migliorano, ossia diminuiscono la fessurazione e la manutenzione stradale, con l'aumento della quantità di gomma fino al 16% in peso nei conglomerati chiusi (Figura 3-41). Dunque non tutti i processi di modifica del bitume con polverino di gomma producono risultati equivalenti.



**Figura 3-41: Fessurazione dei manti stradali al variare della percentuale di polverino**

Da questo studio, si capisce l'importanza della aggiunta di 15-22% di polverino di gomma, tramite processo wet, d'accordo con quanto specificato dalla citata norma ASTM D-6114.

Poiché, soprattutto nell'ultimo decennio, si è consolidato anche l'impiego di granulometrie più fini (< 0.8 mm, tipicamente circa 0.4 mm) che vengono aggiunte al bitume in quantità minori ai 15% stabiliti da ASTM, è cresciuta la necessità di definire più specificamente l'Asphalt Rubber, per distinguerlo dal Terminal Blend. Questa tecnologia, ancora poco divulgata, tramite miscelazione wet, impiega un massimo del 10% di polverino e non raggiunge l'elevata viscosità dell'Asphalt Rubber.

#### - **Necessità di una Specifica Uniforme**

Dal momento che vari enti sono coinvolti nel mercato dell'Asphalt Rubber diventa imperativo adottare delle specifiche ben definite. La letteratura riferisce che un fallimento può cancellare 100 successi e quindi è importante fornire dei parametri specifici di progettazione, costruzione e controllo di qualità e assicurare che questi vengano rispettati.

- Una specifica per le applicazioni con Asphalt Rubber deve precisare i seguenti aspetti:
- requisiti per il CRM, per quanto riguarda proprietà fisico-chimiche e granulometria
  - richiesta di una certificazione della origine omogenea del CRM con garanzia delle sue proprietà fisico-chimiche
  - definizione delle procedure di campionamento e di test per il CRM e per il bitume Asphalt Rubber
  - definizione della metodologia di formulazione (con suggerimento dei quantitativi) del legante Asphalt Rubber
  - specifiche di progetto per il conglomerato HMRA con richiesta di certificazione della origine, composizione e proprietà degli aggregati, del legante AR e di eventuali additivi
  - raccomandazione riguardo alle temperature di miscelazione e di compattazione
  - definizione del metodo di miscelazione del CRM con il bitume base nel processo di produzione di Asphalt Rubber, con indicazione esatta di temperature e tempi di reazione
  - specificazione del tipo di compattatori da utilizzare; il compattatore pneumatico non è adeguato per gli HMRA, ma può essere utilizzato per i chip seals per assicurare una completa imbibizione del bitume.

Attualmente esistono diverse specifiche riguardanti i materiali Asphalt Rubber, come ad esempio la Specifica Caltrans, il Greenbook e la Specifica del Sacramento Country. In Europa, a titolo di esempio, si cita il capitolato delle *Autoestradas do Atlantico* (Portogallo).

### 3.5 Formulazione e posa in opera

Ancor oggi si associa il termine Asphalt Rubber al concetto di tecniche costruttive complicate. In realtà non è così.

#### 3.5.1 Legante Asphalt Rubber

##### 3.5.1.1 MATERIALI

La specifica Californiana distingue due tipi di Asphalt Rubber. Il Tipo 1 con CRM 100% da pneumatico e il Tipo 2 con un 25% di gomma naturale. Il Caltrans utilizza il Tipo 2 soltanto per migliorare la resistenza alla propagazione della fessurazione in HMRA e l'adesione degli aggregati in chip seals. I materiali utilizzati nella produzione del legante Asphalt Rubber sono:

---

**CRUMB RUBBER MODIFIER (CRM) - POLVERINO DI GOMMA DI PNEUMATICO RICICLATA**

I metodi per ottenere il polverino di gomma di pneumatico riciclata sono già stati descritti nel Capitolo 2.

Per quanto riguarda il CRM, le specifiche riguardano le proprietà fisiche e /o chimiche, che includono: la granulometria, la densità specifica, l'estratto di acetone, % di ceneri, % di idrocarburi e di gomma naturale.

La granulometria del CRM può influenzare la reazione fra bitume e gomma. Una granulometria fine generalmente necessita di tempi più brevi di reazione.

La Tabella 3-11 contiene le granulometrie più utilizzate per i due tipi di AR [3-35].

**Tabella 3-11: Tipiche gradazioni di polverino per AR Tipo 1 e 2**

a) Tipo 1

Sieve #	Sieve Size (mm)	% Passing
10	2.0 mm	100
16	1.18 mm	75-100
30	600 mm	25-100
50	300 mm	0-45
100	150 mm	0-10
300	75 mm	0

b) Tipo 2

Sieve #	Sieve Size (mm)	% Passing	
		Scrap Tire CRM	High Natural CRM
8	2.36 mm	100	100
10	2.00 mm	98-100	100
16	1.18 mm	45-75	95-100
30	600 mm	2-20	35-85
50	300 mm	0-6	10-30
100	150 mm	0-2	0-4
200	75 mm	0	0-1

---

*BITUME BASE*

La maggior parte dei Bitumi può essere utilizzata nella produzione di Asphalt Rubber, ma questi non reagiscono tutti allo stesso modo con il CRM.

In tutti casi è necessario eseguire un studio della compatibilità bitume-gomma e determinare la percentuale ottima di CRM da incorporare nel bitume.

La compatibilità è controllata dalla composizione chimica di bitume e polverino di gomma, come dimostrato dall'aumento della viscosità lungo il periodo di reazione.

La composizione chimica del bitume dipende dell'origine del greggio. Se questo è basso in aromatici, si possono sviluppare problemi di compatibilità perché la gomma ha pochi componenti da adsorbire; in questi casi è utile utilizzare oli di estensione per fornire aromatici (es. Tipo 2 di AR).

Il grado del bitume è un altro fattore molto importante. Più soft è il bitume base, migliori saranno le sue proprietà alle basse temperature. La gomma aumenta la viscosità alle temperature elevate.

*OLIO DI ESTENSIONE*

È importante notare che gli *oli di estensione*, specificati come una resina, non sono utilizzati generalmente come parte del legante a meno che le proprietà a bassa temperatura del legante debbano essere migliorate [3-35].

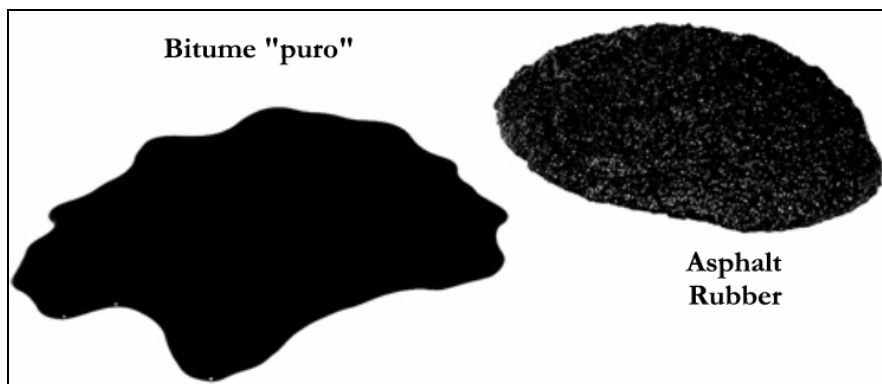
### 3.5.1.2 FORMULAZIONE DEL LEGANTE

Come riferito, la norma ASTM D 6114 definisce il prodotto "Asphalt Rubber" come una miscela di bitume, polverino di gomma e (eventualmente) additivi, in cui la gomma rappresenta almeno il 15% in peso del totale ed ha reagito sufficientemente col bitume caldo così da provocare un assorbimento (non una solubilizzazione) delle particelle di gomma.

Fra bitume e gomma non esiste una vera e propria reazione chimica, ma una digestione. In queste condizioni si ottiene solo un assorbimento sulla gomma delle frazioni oleose del bitume, senza solubilizzazione della gomma, così che il prodotto finale risulta non omogeneo e "granuloso".

Dal punto di vista pratico, la reazione si manifesta tramite un aumento di volume, come mostrato nella Figura 3-42.

---



**Figura 3-42: Aspetto del bitume prima e dopo la modifica con CRM.**

I fattori che influenzano le proprietà dell'Asphalt Rubber sono:

- le proprietà fisiche e chimiche del legante base;
- le proprietà fisiche e chimiche del polverino di gomma;
- il tempo di reazione e la relativa temperatura;
- le condizioni di confezionamento;
- l'eventuale uso di additivi.

Date le elevate percentuali di polverino incorporato (circa 20%) esiste la possibilità che le fasi non compatibili possano introdurre proprietà non desiderate nei leganti AR. Dall'altro lato, in funzione della percentuale relativa di malteni e acidi nel bitume, va trovata la quantità minima per ogni tipo di gomma, in termini di origine e grado.

**Tabella 3-12: Proprietà del legante AR al variare del tempo di reazione**

Prova	Minuti di reazione					Limiti specificati
	60	90	240	360	1440	
Viscosità @177°C [Pas] [cP]	2.7	2.8	2.8	2.8	2.0	1.5-4.0
	2700	2800	2800	2800	2000	1500-4000
Resilienza [%] (ASTM D3407)	34		34		34	Minimo 30
Punto di Rammollimento [°C] (ASTM D36)	65.5	65.5	67	68	63	Minimo 57
Penetrazione a 4°C, 200g, 60s [dmm] (ASTM D5)	22		24		26	Minimo 10



Dal punto di vista chimico-fisico, il polverino di pneumatico miscelato con un bitume naturale di base è in grado di assorbire e fissare la frazione maltenica propria dei costituenti volatili aromatici del bitume. Proprio la fissazione dei malteni permette di ottenere un significativo aumento della resistenza all'invecchiamento delle miscele bituminose, dal momento che questo costituente del bitume in genere è destinato a perdersi nel tempo per fenomeni di ossidazione e per l'azione dei raggi UV [3-35].

L'introduzione del polverino di gomma nel bitume ad alte temperature (185°C) provoca una reazione fisico-chimica dalla quale si forma un sistema di tre componenti: bitume, "gel" e gomma. Tale "gel" consiste nella reazione chimica della gomma con i malteni ed è responsabile dell'elevata viscosità del prodotto finale.

La viscosità è funzione del tempo di reazione (vedi Tabella 3-12) e del tipo e quantità del polverino di gomma. L'esperienza dimostra che la viscosità minima è ottenuta dopo i primi 15 minuti, e che l'evoluzione nel tempo (maturazione) è molto stabile, eliminando i problemi di stoccaggio dell'Asphalt Rubber. Si sottolinea che non tutti i bitumi base utilizzati hanno, con lo stesso tipo di gomma, la stessa evoluzione della viscosità nel tempo. I bitumi con maggior percentuale di malteni tendono a reagire più rapidamente con il polverino. Ad oggi sono stati studiati diversi tipi di bitume base di varia provenienza, consentendo di conoscere in maniera attendibile i tempi di reazione per ciascun tipo di bitume base utilizzato [3-36].

Secondo i parametri di classificazione del bitume per uso stradale, il bitume modificato con polverino, ovviamente fatta salva la percentuale di gomma impiegata, è caratterizzato da bassi valori di penetrazione a 25°C (circa 20 dmm) e da alti valori del punto di rammollimento (superiori a 80°C).

Nell'ambito di una cooperazione tra la *Universidade do Minho* e la *Universidade de Coimbra* (Portogallo) con la *Universidade de Brasilia* (Brasile) è nato uno studio [3-37] finalizzato all'analisi dell'influenza dell'aumento della percentuale di polverino di gomma incorporata nei bitumi base sulla prestazione meccanica dei conglomerati AR. Sono state eseguite prove di trazione diretta, di trazione indiretta e di fatica per valutare la resistenza allo sviluppo di deformazioni permanenti (ormaiamento). Da questo studio è emerso che l'incorporazione di polverino di gomma nei bitumi origina una riduzione dello sforzo di tensione indiretta rispetto ai conglomerati convenzionali. Il processo di invecchiamento produce un piccolo aumento dello sforzo di tensione per tutti i conglomerati studiati. Tuttavia la differenza dello sforzo di tensione non è significativa quando comparata con altri aspetti studiati, come la vita a fatica o la resistenza all'ormaiamento.

I risultati del modulo resiliente e dell'angolo di fase dimostrano che un aumento della percentuale di polverino conduce al miglioramento delle proprietà elastiche del conglomerato.

Questo miglioramento si riflette sull'aumento della vita a fatica dei conglomerati AR, rispetto ai conglomerati convenzionali. Il miglioramento nella vita a fatica è stato circa del 50% con l'incorporazione del 21% di polverino CRM, e del 150% per un'aggiunta di 25% di polverino di gomma. Le misure sono state condotte assumendo uno sforzo di tensione di 800 micron come rappresentativo del traffico pesante, mentre per rappresentare il traffico leggero lo sforzo di tensione utilizzato è stato di 400 micron.

Questi conglomerati, con percentuali di polverino superiori a quelle normalmente utilizzate, hanno presentato maggior resistenza alle deformazioni permanenti ottenuta in prove ripetute di *shear test* a carico costante.

Questo aumento di resistenza alle deformazioni permanenti è stato osservato alle temperature di 50 e 60°C. Per la temperature di 50°C i conglomerati con 21% e 25% di polverino hanno resistito ad un numero di cicli prima del limite di rottura, rispettivamente, 3 e 2 volte superiore rispetto a quello di conglomerati convenzionali. Sempre per i conglomerati con 21% e 25% di polverino, a 60°C il miglioramento è stato, rispettivamente, di 1.3 e 3 volte.

La produzione di bitumi modificati con polverino di gomma fino al 25% di CRM è stata possibile diminuendo la superficie specifica del polverino di gomma riciclata usata nell'indagine citata, ossia è stato utilizzato un fuso granulometrico diverso di quello della normativa. A questo scopo è stato necessario utilizzare polverino con particelle di dimensioni maggiori di quelle accettate dalla normativa.

I risultati delle prove meccaniche dei conglomerati Asphalt Rubber dimostrano che un aumento della dimensione delle particelle di gomma produce un miglioramento delle proprietà elastiche dei conglomerati e del loro comportamento alle temperature elevate, aumentando la resistenza allo sviluppo di ormaie.

Così nella formulazione del legante si deve eseguire uno studio in modo da stabilire la quantità e granulometria ottima di polverino di gomma e di oli (se usati). Nella specifica si deve assicurare che il tipo di bitume di polverino non cambierà durante la produzione, poiché da questo dipendono il tempo e la temperatura di reazione. Inoltre deve essere indicata la curva di relazione fra viscosità e tempo di reazione dell'Asphalt Rubber, funzione della temperatura, per permettere il controllo del legante durante la fase di produzione.

---

---

*TEMPERATURA E TEMPI DI REAZIONE*

Il bitume base e il CRM sono mescolati in un sistema omogeneo Asphalt-Rubber, che deve reagire a temperature elevate per un minimo di 45 minuti. Questo tempo richiesto per disperdere, mescolare e digerire la gomma dipende dai diversi fattori già citati.

Più fine è la granulometria del CRM, più veloce sarà la reazione. Il tempo di reazione diminuisce con l'aumento della temperatura.

Aggiungendo CRM al bitume vergine, la temperatura diminuisce di circa  $14\div 28^{\circ}\text{C}$ , per questo il bitume base deve essere consegnato a temperature intorno ai  $190\text{-}218^{\circ}\text{C}$ .

Le temperature normalmente utilizzate per miscelare il CRM al bitume sono comprese fra i  $176\text{-}204^{\circ}\text{C}$  per il Tipo 1 e  $190\text{-}218^{\circ}\text{C}$  per il Tipo 2 di Asphalt Rubber.

Temperature più elevate di quelle indicate conducono spesso alla produzione di fumi. Temperature più basse di reazione, implicano tempi più lunghi di reazione, con il rischio che la gomma non reagisca completamente con il bitume.

Negli ultimi quaranta anni sono state condotte, soprattutto negli Stati Uniti, ricerche da parte di agenzie concessionarie per valutare gli effetti degli ingredienti di miscelazione sulle performance dell'Asphalt Rubber, sia in laboratorio che su strada. Queste indagini si basano sul fatto che i risultati alcune volte hanno verificato che i conglomerati con Asphalt Rubber non hanno performance su strada superiori nella misura indicata dalle prove in laboratorio [3-38].

Questo è dovuto in parte al fatto che, durante la fase di costruzione, i conglomerati AR sono sottoposti a controlli di qualità e a procedure che generalmente sono le stesse applicate per i conglomerati convenzionali, con risultati a volte scadenti.

L'Asphalt Rubber è influenzato generalmente dalle modalità di reazione, definita come l'assorbimento di polverino di gomma da parte del bitume. Tuttavia, i risultati più recenti indicano che anche dopo i tempi di reazione dell'asfalto con polverino a temperature elevate, estraendo il polverino dal bitume la sua granulometria non è cambiata. Gli investigatori hanno scoperto che per una completa digestione del polverino nel bitume è necessaria una reazione di 54 ore a una temperatura di  $287^{\circ}\text{C}$  [3-38].

Per valutare l'effetto di differenti tempi e temperature di miscelazione sul comportamento viscoelastico del bitume Asphalt Rubber, sono stati testati un totale di sei diversi tipi di bitumi AR e convenzionali. I test indicano che il 91% di polverino reagisce in 45 minuti. Inoltre, dall'analisi del bitume recuperato si arriva alla conclusione che si riesce a recuperare più del 90% di polverino di gomma e che la granulometria di questo polverino è la stessa che aveva prima della miscelazione con il bitume.

---

Le prove di viscosità, penetrazione, resilienza e punto di rammollimento eseguite su bitumi senza polverino indicano un aumento della viscosità del bitume di due unità, reversibile dopo che il polverino è stato separato dal bitume. Così il polverino agisce come un additivo e non come un modificante.

Così non c'è una vera reazione chimica fra bitume e polverino, e l'aumento dell'elasticità nella pavimentazione è dovuto al polverino di gomma indipendentemente del bitume [3-39].

### 3.5.1.3 IMPIANTI DI PRODUZIONE DI AR

Gli impianti di produzione di Asphalt Rubber sono del tipo *batch plant* o del tipo *continuous drum dryer plant*, richiedono un spazio dedicato alla loro installazione in cantiere, vicino all'impianto di produzione di conglomerati bituminosi a caldo.

Questi impianti generalmente sono mobili e includono (vedi Figura 3-43)[3-35]:

- un serbatoio per lo stoccaggio del CRM;
- serbatoi di miscelazione e di reazione;
- sistema di contatori, per le quantità di CRM, di bitume vergine pompato dentro all'impianto e di AR prodotto.

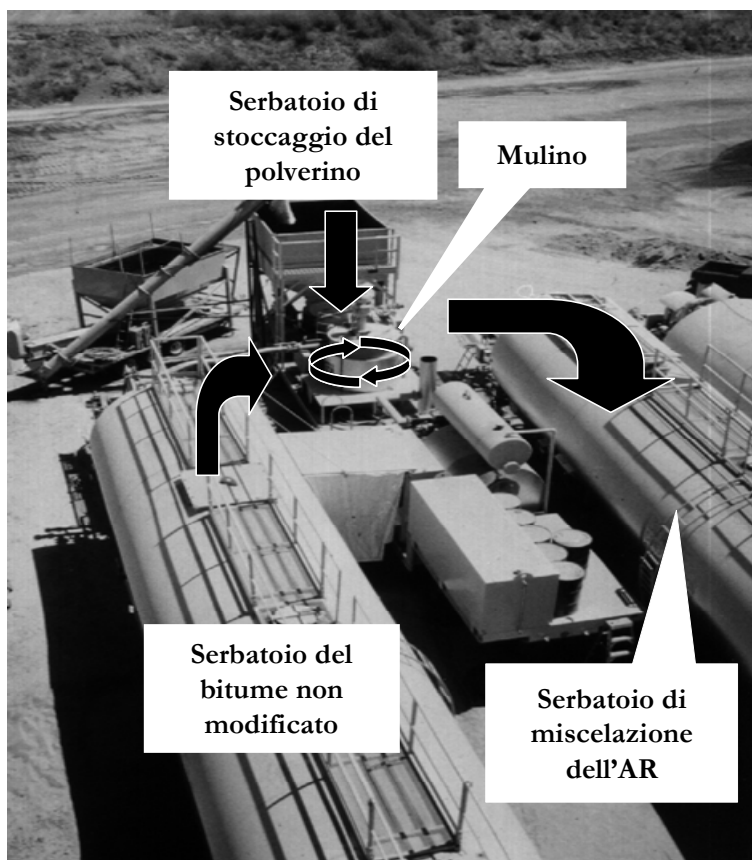


Figura 3-43: Esempio di impianto di produzione di Asphalt Rubber del tipo *continuous drum dryer plant*

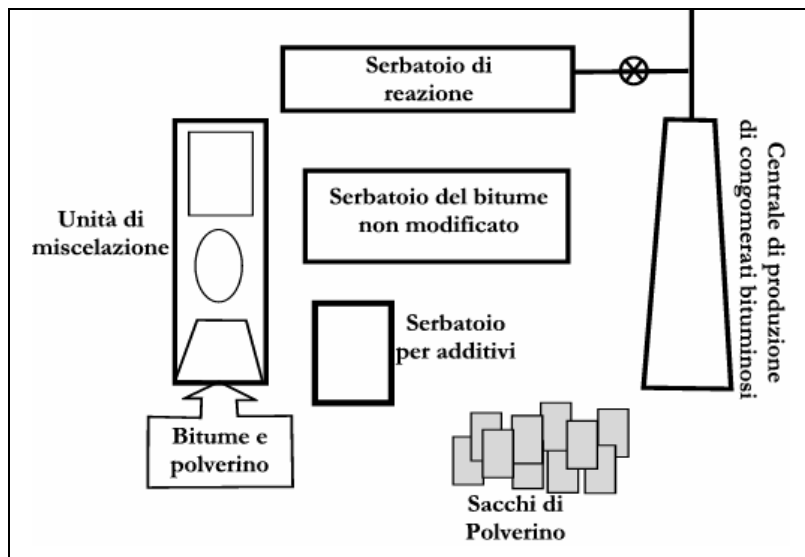
Quando viene utilizzato un sistema del tipo *drum plant*, si installano due o tre valvole nella linea esistente di alimentazione dell'impianto di conglomerato, per pompare l'Asphalt Rubber. Quando viene utilizzato un sistema del tipo *batch plant*, la valvola è installata direttamente nella linea di fornitura di bitume all'impianto.

Come è già stato riferito le pompe devono avere una maggior potenza per riuscire a pompare l'Asphalt Rubber che ha una viscosità maggior rispetto al bitume convenzionale. Lo stesso discorso viene applicato alle tubazioni che devono avere un diametro sufficientemente grande da permettere il passaggio di un liquido più viscoso.

Le perdite di linea devono essere minimizzate usando piegature a 45°. Questo può richiedere l'utilizzo di tubazioni riscaldate.

L'installazione dell'apparecchiatura per la fabbricazione del bitume Asphalt Rubber è schematizzata nella Figura 3-44.

Generalmente lo spazio aggiuntivo da considerare per un impianto di produzione di Asphalt Rubber è circa dal 15-20% in più rispetto ad un impianto convenzionale, a seconda del tipo di apparecchiatura [3-35].



**Figura 3-44: Tipico schema di impianto per la produzione di Asphalt Rubber [3-35]**

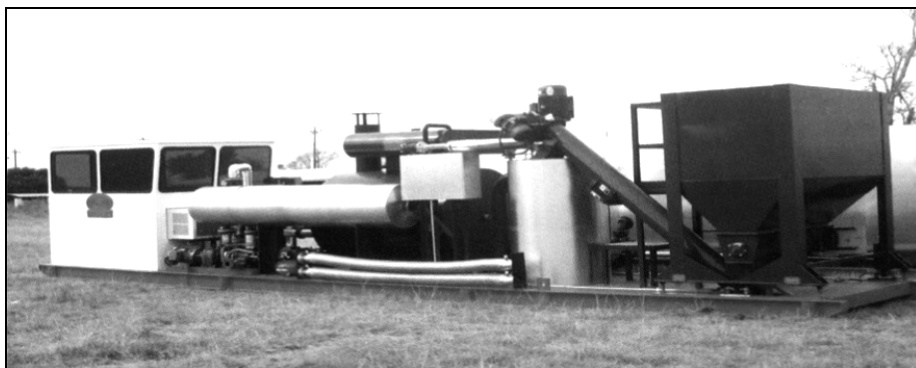
#### *FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO*

Il bitume vergine e il CRM sono combinati e miscelati insieme in una unità che ha due piattaforme di miscelazione continua capace di produrre una miscela omogenea di bitume e CRM, programmata da un computer centrale per quanto riguarda quantitativi, intensità di agitazione e temperatura.

L'unità è equipaggiata con un sistema di alimentazione per il CRM (*feed system*) in modo da non interrompere la continuità del processo di miscelazione.

In abbinamento all'unità di miscelazione del bitume con il CRM è utilizzata una cisterna di reazione per lo stoccaggio del legante già modificato. Tale cisterna è equipaggiata con un sistema di riscaldamento per mantenere la temperatura del legante tra 163°C e 191°C durante il periodo di reazione e pompaggio e con un dispositivo di miscelazione, orientato orizzontalmente nella cisterna, capace di mantenere l'uniformità della miscela di bitume e CRM.

Infine è utilizzato un sistema aggiuntivo equipaggiato con una pompa e un dispositivo di collegamento capace di pompare il legante direttamente nell'impianto di produzione di conglomerato.



**Figura 3-45: Esempio di unità di miscelazione**

L'intensità della miscelazione durante il periodo di reazione può influenzare le proprietà della miscela di bitume e CRM: una velocità di agitazione troppo bassa mantiene le particelle di gomma in sospensione, mentre una velocità di agitazione troppo elevata può causare la rottura delle particelle di gomma.

Durante la miscelazione ad alta intensità, infatti, le particelle di gomma rigonfiano a causa dell'assorbimento del bitume, e l'alta energia di miscelazione tende a tagliare fuori la gomma più superficiale e a produrre una dissoluzione della componente di gomma nella fase di bitume. È, quindi, importante impostare una velocità adeguata alla reazione.



**Figura 3-46: Serbatoio di reazione del legante AR**

#### CONTROLLO DEL LEGANTE IN IMPIANTO

L'impianto di produzione di Asphalt Rubber deve essere programmabile in modo da potere ottenere sempre una miscela uniforme di materiale, al fine di evitare indesiderati tempi di attesa in cantiere. Ad esempio, se a causa di un qualunque imprevisto l'Asphalt Rubber, prima di essere miscelato all'aggregato, deve aspettare più di 4 ore, questo deve essere raffreddato. Dopo di ch , nel momento del suo utilizzo, deve essere riscaldato lentamente ad una temperatura fra i 176-204 C per il Tipo 1 e 190-218 C per il Tipo 2.

Il legante dovr  essere ben miscelato prima di entrare nell'impianto di produzione di conglomerati a caldo e la sua viscosit  deve essere controllata. Se risulta fuori dal range desiderato, pu  essere aggiustata programmando l'impianto in modo da aggiungere pi  bitume o pi  polverino fino a raggiungere la viscosit  desiderata.

Questo "imprevisto" avviene comunemente, senza comunque compromettere la qualit  degli HMRA.



Figura 3-47: Cabina di controllo dei vari parametri del processo di produzione dell'Asphalt Rubber

---



## 3.5.2 Conglomerati HMRA

### 3.5.2.1 FORMULAZIONE

L'obiettivo della progettazione di conglomerate bituminosi è determinare i quantitativi ottimali di aggregato e legante per una applicazione particolare. Questa fase condizionerà la performance in servizio.

Generalmente, si usano due metodi di progetto per determinare le proporzioni dei materiali di un conglomerato [3-35]:

- Metodo Marshall
- Metodo Hveem

In California il metodo Hveem è il più utilizzato. In generale, il calcolo consiste nel determinare la percentuale ottima di legante AR da miscelare all'aggregato di progetto. La progettazione si concentra sulle seguenti caratteristiche del conglomerato e su come queste possano influenzare le sue prestazioni:

- Densità
- Contenuto di vuoti
- Contenuto di vuoti dell'aggregato minerale
- Stabilità
- Sensibilità all'umidità

#### TEMPERATURA

Durante i processi di miscelazione e compattazione dell'Asphalt Rubber all'aggregato, risulta determinante il controllo delle temperature.

Il processo di miscelazione del legante Asphalt Rubber con gli aggregati dura da 1 a 2 minuti e avviene negli stessi impianti per la produzione di conglomerati convenzionali. La compattazione della miscela è realizzata usando i metodi standard Marshall o Hveem [3-35].

La Tabella 3-13 indica le temperature utilizzate nei processi di miscelazione e compattazione per i conglomerati chiusi e gap-graded.

**Tabella 3-13: Temperature di miscelazione per conglomerati AR chiusi e gap-graded [3-35]**

Tipo di Conglomerato	Temperature di miscelazione (°C)*	Temperature di compattazione (°C)**
HMRA Chiuso	149-163	143-149
HMRA Gap-graded	149-163	143-149

\* Temperatura minima dell'aggregato. Temperatura minima del legante = 190°C  
 \*\* Temperatura minima del conglomerato

*CONTENUTI DI LEGANTE*

I conglomerati Asphalt Rubber sono caratterizzati da una percentuale significativamente maggiore di bitume rispetto ai conglomerati tradizionali. Per i conglomerati chiusi, le percentuali di bitume risultano superiori del 20%, mentre per i gap-graded si arriva al 40 o 50%.

Infatti, un conglomerato semiaperto in Asphalt Rubber contiene in media il 7,4% in peso di bitume, mentre un drenate circa il 9%; tale quantità può essere in genere determinata dalla formula seguente [3-3]:

$$\text{Quantità di Bitume \%} = (0.38W+8.6) (2.620/C) \quad (3-2)$$

dove:

W = % Acqua assorbita dall'aggregato (Max=2.5%)

C = *Combined Oven Dry Specific Gravity* dell'aggregato (tra 2.35 e 2.85)

I contenuti di legante risultanti dal dimensionamento sono funzione del tipo e della gradazione dell'aggregato. I contenuti tipici di legante utilizzati negli HMRA sono indicati nella Tabella 3-14.

**Tabella 3-14: Quantità tipiche di legante per gli HMRA [3-35]**

Tipo di Conglomerato	Contenuto di legante (%) <sup>*</sup>	% di legante oltre il normale
Chiuso	6-8	20
Gap-graded	7-9	40-50
Aperto	6-8	50-60

\* determinato in base al peso dell'aggregato secco

*CARATTERISTICHE GENERICHE DEGLI HMRA*

Senza dubbio il fattore chiave che permette di capire il comportamento degli HMRA è la percentuale di legante incorporata nel conglomerato bituminoso. Generalmente un HMA convenzionale contiene approssimativamente tra il 4.5 e il 5.75 % di legante rispetto al peso dell'aggregato, mentre negli HMRA tale percentuale sale a valori compresi tra l'8.5 e il 10%. Questo risulta possibile grazie all'elevata viscosità dell'AR, 3000 cP a 175°C contro 200-600 cP per un bitume modificato con polimero.

Le granulometrie utilizzate devono consentire di incorporare tali quantità di legante. In caso di granulometria discontinua, si ricorre al metodo di dimensionamento di Marshall imponendo una stabilità superiore a 8.5 kN e un indice dei vuoti superiore al 5%.

È, inoltre, richiesta la prova di compressione in immersione, con una resistenza residua superiore al 75%. Nelle prove di pista in laboratorio devono essere rispettati i consueti parametri relativi ad una granulometria discontinua per un bitume convenzionale.

**Tabella 3-15: Caratteristiche dei conglomerati Asphalt Rubber [3-35]**

Proprietà	Metodo di Prova	Chiuso	Drenante
Bitume AR sul peso totale [%]	ASTM D 6307	8,5±0,5	10±0,5
Prova Marshall <sup>(1)</sup>	ASTM 1559		
Numero di colpi		75	50
VMA, min		19	25
Porosità [%] <sup>(2)</sup>	ASTM D 2726	4÷6,5	9÷15
Resistenza Conservata min [%]	ASTM D 1075	80	85
Cantabro umido, perdita max [%]	NLT 362		15
Velocità deform. V105-120 [mm/min]	NLT 174	1,5	3

<sup>(1)</sup> Temperatura di confezionamento dei provini 175°C; Temperatura di compattazione 140-150°C

<sup>(2)</sup> La porosità va calcolata in base a misure geometriche su provini da 1 kg

I valori medi della forza di rottura e della deformazione, ottenuti tramite la prova Marshall per i conglomerati chiusi, sono riportati nella Tabella 3-16.

**Tabella 3-16: Forza di rottura e deformazione Marshall [3-13]**

Proprietà	Metodo di Prova	Drenante
Prova Marshall	ASTM 1559	-
Forza di Rottura min [N]	-	12000
Deformazione max [mm]	-	4

Sempre in termini di formulazione del conglomerato bituminoso, si ricorre normalmente alla prova di pista per valutare la resistenza alle deformazioni permanenti ed eventuali deformazioni plastiche. I conglomerati AR presentano valori di deformazione molto inferiori ai limiti imposti, ad esempio, dalla normativa spagnola (PG-3 e OC 5/2001), secondo la quale i valori massimi per le velocità di deformazione V105-120, per la classe di traffico più elevata (T00) e per la zona termica con temperature più elevate, sono di  $12 \times 10^{-3}$  mm/min per i conglomerati drenanti.

Tenendo conto che sono le caratteristiche del drenante a determinare, in linea di massima, la resistenza dei conglomerati alle deformazioni permanenti, si può concludere che l'elevata viscosità che l'Asphalt Rubber presenta a 175 °C (15-20 volte superiore a un bitume modificato SBS) permette di ottenere un conglomerato molto poco deformabile (vedi Tabella 3-15).

L'elevata resistenza alla deformazione permanente di un conglomerato Asphalt Rubber è infatti una delle proprietà che lo distingue dagli altri tipi di conglomerati. L'inserimento di una quantità simile (nell'ordine del 9%) di un altro tipo di legante, provocherebbe deformazioni molto più elevate.

Strutturalmente questi due conglomerati presentano i seguenti valori caratteristici presentati nella Tabella 3-17. Tenendo conto che la quantità di polverino nel conglomerato Asphalt Rubber è molto superiore a quella normalmente utilizzata, risulta normale che questi abbiano dei moduli di deformabilità leggermente inferiori ad un conglomerato modificato con SBS. Però, la loro resistenza a fatica è molto superiore. È questa elevata resistenza a fatica che fornisce, indirettamente, una elevata resistenza alla propagazione delle fessure.

**Tabella 3-17: Moduli di Deformabilità dei conglomerati Asphalt Rubber [3-13]**

Proprietà	Metodo di Prova	Chiuso	Drenante
Modulo di Deformabilità (@20°C, 10 Hz) [Mpa]	AASHTO TP48-94	4000	2000

### 3.5.2.2 PRODUZIONE DI CONGLOMERATI ASPHALT RUBBER

Le operazioni da eseguire per un impianto di produzione di conglomerati Asphalt Rubber sono essenzialmente le stesse che per i conglomerati convenzionali, ad eccezione delle temperature più elevate.

L'impianto di produzione del legante Asphalt Rubber può essere semplicemente collegato a quello di produzione dei conglomerati. Normalmente viene equipaggiato con delle pompe di capacità superiore (data l'elevata viscosità dell'AR) e può essere programmato in modo da pompare la quantità giusta di legante nell'impianto di conglomerato. In alternativa, questo controllo può essere eseguito dallo stesso impianto di produzione delle miscele, che apre e chiude le pompe dell'apparecchiatura di produzione dell'Asphalt Rubber.

*QUANTITATIVI PRODOTTI*

I tassi di produzione dei conglomerati sono influenzati dal fatto che per produrre HMRA, l'impianto deve girare più lentamente, non solo a causa della viscosità dell'Asphalt Rubber, ma soprattutto per le maggiori percentuali di legante utilizzate.

Un altro aspetto è legato al fatto che anche la capacità di produzione dell'impianto di conglomerati è limitata dal tasso di produzione dell'impianto di produzione di Asphalt Rubber, che è di circa 25-30 tons di legante per ora, dipendente dall'output del controllo di qualità del legante (range di viscosità).

I tassi tipici di produzione dei materiali con Asphalt Rubber sono riportati nella Tabella 3-18.

**Tabella 3-18: Tassi tipici di produzione dei materiali con AR [3-35]**

<b>Tipo di Prodotto</b>	<b>Tassi di Produzione</b>
AR Binders (ton/ora)	25-30
AR Hot Mix (ton/ora)	200-400*
AR Chip Seals (miglia di corsia/giorno)	5-7

\*Tassi superiori alle 300 ton/ora possono comportare la necessità di un ulteriore fornitore di bitume

È importante assicurare la simultaneità delle attività di produzione e posa in opera, data la riferita elevata sensibilità dell'Asphalt Rubber alla temperatura. Se l'impianto di conglomerato produce più velocemente rispetto ai tempi di posa in opera, gli HMRA si raffredderanno prima della stesa. Se, viceversa, l'impianto di conglomerato produce meno della capacità del *paver*, le operazioni di posa in opera saranno interrotte più volte, compromettendo l'uniformità e la qualità dello strato in HMRA.

Le stesse considerazioni valgono per i *chip seals* in AR.

### 3.5.2.3 POSA IN OPERA

Le raccomandazioni per la posa in opera degli HMRA sono le stesse per assicurare una buona qualità costruttiva nei conglomerati convenzionali, tra cui: uniformità di distribuzione del materiale sulla superficie, tassi di applicazione rispettati, macchine nella linea centrale, controllo delle temperature.

Il trasporto degli HMRA può essere eseguito con camion convenzionali, senza particolari accorgimenti (ad es., *dump trucks* o *belly dumps*). La pulizia dei camion può essere eseguita tramite un bagno in acqua saponata o con una emulsione siliconica; in nessun caso si deve utilizzare un solvente (es. diesel). Si consiglia di coprire i camion con teli durante il trasporto per evitare dispersioni di calore, in modo da consentire la stesa della miscela a circa 143°C e la sua compattazione a 135°C.

La posa in opera degli HMRA deve essere eseguita in modo da minimizzare la segregazione, effettuando la stessa in condizioni climatiche e di temperatura della superficie ottimali. Dal momento che questa miscela è più viscosa di una convenzionale, la temperatura superficiale minima ammissibile è di 13°C. Anche se questo requisito è stato soddisfatto, la costruzione deve essere interrotta nel caso ci siano delle condizioni climatiche sfavorevoli alla stesa o alla compattazione.

Si deve eseguire un controllo visivo del conglomerato prima della stesa, al fine di verificare che l'HMRA sia una miscela uniforme, senza segregazione, grumi o fluidimenti del legante. Può essere necessario coprire l'unità di spandimento per minimizzare le perdite di calore.

Il materiale deve essere consegnato in una quantità che permetta di pavimentare continuamente, al fine di evitare che il *paver* si fermi e la miscela inizi a raffreddarsi, compromettendo la qualità della pavimentazione nel punto di "giunto non voluto".

Quando una corsia viene ultimata, è necessario costruire un piccolo muro di sostegno o un cordolo con lo scopo di fornire un giunto verticale compattato da cui riprendere i lavori il giorno successivo.

I giunti longitudinali nelle pavimentazioni generalmente sono a freddo, per assicurare un buon legame fra le corsie, e devono essere sigillate prima di pavimentare la corsia adiacente.

#### *LIVELLAMENTO DEL CONGLOMERATO*

I conglomerati Asphalt Rubber non possono essere livellati con la stessa facilità dei conglomerati convenzionali, a meno che la miscela non sia sufficientemente calda. Alcuni accorgimenti da considerare al fine di limitare questo tipo di intervento includono la rimozione del materiale in eccesso dai giunti, prestando attenzione a non spagliare il materiale sul resto della pavimentazione. Va verificato, inoltre, che durante la compattazione l'altezza dell'apparecchiatura sia regolata in modo da compattare allo stesso livello delle corsie adiacenti.

#### *CONSIDERAZIONE SULLA TEMPERATURA*

Come è già stato detto, la temperatura è un fattore critico rispetto alla qualità degli HMRA. Le temperature devono essere misurate periodicamente per verificare che stiano dentro al range specificato.

---

I fumi sono indicatori che la temperatura è troppo elevata e che la miscela è surriscaldata, ed in tal caso è necessario attendere il raffreddamento a 135°C prima della compattazione. Una miscela troppo rigida e difficile da lavorare e compattare indica che la temperatura è, al contrario, troppo bassa.

#### 3.5.2.4 COMPATTAZIONE

La viscosità e il contenuto di legante nel conglomerato influenzano la compattazione. Tanto più elevata è la viscosità, tanto più rigida è la miscela, richiedendo una maggior temperatura. Una buona performance può essere raggiunta quando gli HMRA sono compattati sino al 5-8% di vuoti.

La curva granulometrica utilizzata nel conglomerato AR è un altro fattore che condiziona la compattazione: una maggior uniformità della granulometria degli aggregati favorisce la compattazione, per la quale è necessaria la presenza di sufficienti fini.

La compattazione può essere eseguita con compattatori vibratori o statici con rullo in acciaio. I conglomerati aperti o gap-graded non possono essere compattati con vibratori. I compattatori pneumatici non possono essere utilizzati quando si tratta di Asphalt Rubber perché, date le sue proprietà di viscosità e adesività, la miscela può incollarsi ai rulli pneumatici del compattatore.

La compattazione deve iniziare quando la miscela è ancora a circa 144°C e terminare prima che questa raggiunga i 130°. La compattazione finale deve eseguirsi prima che la temperatura della superficie sia inferiore a 115°.

La corsia può essere aperta al traffico poco dopo la compattazione; in alcuni casi è utile spruzzare un po' di sabbia per assicurare che non si verifichino spogliamenti della superficie. Per i conglomerati drenanti (aperti), è utile bagnare la superficie dopo la compattazione.

#### 3.5.2.5 ACCORGIMENTO E LIMITI NELL'APPLICAZIONE DEGLI HMRA

In seguito alle considerazioni sopra esposte, si sconsiglia l'utilizzo di Asphalt Rubber se si verificano alcune delle condizioni sfavorevoli di seguito riportate.

L'Asphalt Rubber è stato usato con successo nelle regioni più diverse dal punto di vista geografico e climatico. I problemi riportati sono legati a difficoltà costruttive che possono verificarsi nel caso la pavimentazione sia effettuata in un periodo stagionale non favorevole.

Gli HMRA non devono essere applicati quando la temperatura ambiente è inferiore ai 13°C o in condizioni di pioggia. La miscela deve essere compattata mentre è ancora calda, in modo da raggiungere una buona performance in relazione alla elevata viscosità dell'Asphalt Rubber, che può renderne difficoltosa la lavorabilità.

Inoltre si deve assicurare che l'impianto di produzione di Asphalt Rubber non disti troppo del cantiere dove si deve applicare il conglomerato HMRA, in modo da evitare l'eccessivo raffreddamento della miscela.

Prima di scegliere di utilizzare una pavimentazione in AR, è necessario possedere dati di traffico e di deflessioni (FHW) dello strato fessurato. Se le fessure esistenti nella pavimentazioni sono più larghe di 6 mm, queste devono prima essere sigillate.

Le stesse considerazione valgono per i chip seals in Asphalt Rubber, i quali non devono essere realizzati quando la temperature ambiente o della superficie è inferiore a 13°C (55°F) o durante giorni di pioggia o elevato tasso di umidità. Il legante deve essere spruzzato su una superfici pulita e asciutta. La temperatura ambiente non deve, inoltre, eccedere i 40°C [3-35].

### **3.5.3 Chip seals**

Come è già stato riferito, il primo utilizzo dell'Asphalt Rubber è stato come chip seal, sia per interventi di manutenzione che di riabilitazione di pavimentazioni. Il vantaggio più grande è la resistenza alla propagazione delle fessure, legata al fatto che una maggior quantità di bitume spruzzata, non solo permette la sigillatura delle fessure esistenti sulla pavimentazione esistente, ma evita che queste si propaghino alla superficie del nuovo strato, dal momento che riduce gli sforzi trasmessi agli strati superiori. Esistono ulteriori vantaggi associati all'impiego di chip seals AR, quali:

- Prevenzione del passaggio di acqua agli strati inferiori.
- Riduzione dell'ossidazione della superficie della pavimentazione.
- Ripristino di una superficie con disgregazione.

Questa strategia di manutenzione (preventiva o di riabilitazione) porta ad un'aumento della vita utile della pavimentazione, ripristina le sue proprietà funzionali, permettendo di continuare ad assicurare un determinato livello di sicurezza all'utente.

#### **3.5.3.1 MATERIALI**

In queste applicazioni, l'Asphalt Rubber è spruzzata sulla superficie della pavimentazione, sulla quale viene applicato in seguito un aggregato di granulometria uniforme. I materiali utilizzati per ottenere un chip seal sono:



---

### LEGANTE AR

Essenzialmente viene utilizzato lo stesso legante che negli HMRA. In alcuni casi è preferibile utilizzare il Tipo 2, perché la gomma naturale favorisce una maggior ritenzione dell'aggregato; in questo caso si può aggiungere anche un olio estensivo aromatico. Alcune volte il contenuto di CRM viene aumentato di circa 1-2%.

### AGGREGATI

In queste applicazioni si scelgono aggregati con granulometria uniforme. Di solito la dimensione è compresa fra 9 e 12.5 mm.

Nella scelta dell'aggregato ci sono diversi fattori da considerare:

- Tessitura della superficie – Se si desidera una tessitura più grezza e ruvida si devono scegliere aggregati di dimensione attorno ai 12.5 mm. Una tessitura più fine e liscia può essere ottenuta con un aggregato di dimensione massima di 9 mm.
- Volume di Traffico – Per volume di traffico più elevati è meglio scegliere un aggregato di dimensioni più piccole, per evitare la disgregazione e perché questi forniscono una maggior resistenza alla compressione.
- Superficie uniforme – Se si desidera questo effetto la scelta deve orientarsi verso una granulometria più fine.
- Durabilità – In questo aspetto risulta più determinante la resistenza dell'aggregato, che deve essere testato secondo le stesse prove utilizzate per gli strati di usura.

#### 3.5.3.2 TASSO DI APPLICAZIONE

Il modo più comune di calcolare la quantità di legante è quello di utilizzare le esperienze passate che hanno condotto a risultati ottimali. Nonostante ciò, esiste un test semplice per determinare se il tasso di applicazione è corretto e consiste nel verificare se gli aggregati sono immersi nel legante ad una profondità del 50-70% dopo il passaggio dei rulli e se il traffico ha favorito la loro ricopertura.

I tassi di applicazione per chip seals AR tipicamente utilizzati in California sono riportati a titolo di esempio nella Tabella 3-19.

---

**Tabella 3-19: Tipici tassi di applicazione per chip seals AR [3-35]**

	<b>Binder</b>	<b>Stone</b>
Chip Size	gal/yd <sup>2</sup>	lbs/yd <sup>2</sup>
12.5 mm (1/2 in.)	0.55-0.65	28-40
9 mm (3/8 in.)	0.55-0.65	28-40

### 3.5.3.3 POSA IN OPERA

L'apparecchiatura richiesta per la posa in opera di un *chip seal* in Asphalt Rubber è la stessa utilizzata nei trattamenti superficiali con materiali convenzionali (distributore, camion e rulli), ad eccezione della spruzzatrice (*chip spreader*) che deve permettere di spruzzare un legante più viscoso.

### 3.5.3.4 APPLICAZIONE

L'aggregato utilizzato deve essere pulito da polveri e il legante Asphalt Rubber deve essere applicato sopra una superficie asciutta.

In alcuni casi, gli aggregati sono preriscaldati o prericoperti in modo da potere essere applicati anche di notte. Il riscaldamento, inoltre, permette l'asciugatura dell'aggregato e l'assenza di umidità favorisce l'adesione aggregato-legante.

L'applicazione dell'aggregato deve seguirsi alla stesa del legante il più rapidamente possibile, preferibilmente entro tre minuti, dal momento che il legante deve essere ancora abbastanza caldo e fluido da permettere l'imbibizione dell'aggregato, preferibilmente tra circa il 50 e il 70% di imbibizione.

Il *chip spreader* deve operare ad una velocità tale da permettere la sua rullatura quasi simultaneamente alla sua applicazione. Se, per caso, viene spruzzato un eccesso di aggregato in alcune aree, deve essere spazzato fuori dalla corsia e quindi raccolto. Nei punti dove non è stata applicata la quantità giusta di aggregato, questo deve essere aggiunto manualmente.

### 3.5.3.5 RULLATURA E FINITURA

Per i chip seals in Asphalt Rubber, sono normalmente utilizzati i rulli pneumatici perché questi non frantumano l'aggregato e vanno a rullare anche dove ci sono delle piccole depressioni. La rullatura in un chip seal è eseguita anche con la funzione di orientare l'aggregato, rivolgendo le facce lisce verso il basso. I rulli devono operare a velocità basse (6 – 10 km/h) in modo che ogni chip (aggregato) venga collocato e pressionato, e non spostato.

---

Il numero di rulli richiesti dipende dalla velocità dell'operazione, dal momento che sono necessari 2-4 passaggi del rullo per fissare l'aggregato.

Dopo circa 30 minuti la superficie deve essere spazzata. La spazzatura ha la funzione di rimuovere l'aggregato in eccesso dalla superficie per ridurre la possibilità che gli aggregati sciolti vengano sollevati dal passaggio del traffico, compromettendo la sicurezza. Questa operazione deve essere eseguita nel periodo più freddo della giornata per assicurare che il legante e gli aggregati ricoperti non vengano compromessi.

#### 3.5.3.6 MANUTENZIONE

I trattamenti di manutenzione utilizzati per gli HMRA e chips seals in Asphalt Rubber sono praticamente gli stessi utilizzati per i materiali convenzionali. L'unica eccezione riguarda la frequenza di questi interventi di manutenzione che, come abbiamo visto, è inferiore quando il legante utilizzato è Asphalt Rubber.

### 3.6 Controllo della Qualità

Il sempre più diffuso utilizzo dei leganti Asphalt Rubber nei conglomerati bituminosi a caldo (HMRA) e nei chip seals, ha imposto la definizione e la formalizzazione di programmi in grado di uniformare le prove per il controllo della qualità.

Infatti, come descritto, parametri quali il tempo e la temperatura di reazione possono influire in maniera determinante sul processo di modifica del bitume. Allo stesso modo il tipo di bitume base e di polverino di gomma prescelti possono dare origine a bitumi modificati caratterizzati da differenti proprietà reologiche.

Al fine di monitorare la qualità dei bitumi Asphalt Rubber, vengono utilizzate prove in grado di determinare parametri quali:

- viscosità
- penetrazione
- resilienza
- punto di rammollimento

Tali prove, utilizzate sin dagli anni '70 nell'ambito dei bitumi modificati con polverino di gomma di pneumatico, sono definite dalla norma ASTM D-3407.

---

Le procedure attualmente utilizzate per monitorare l'uniformità dei componenti utilizzati durante la produzione dei bitumi Asphalt Rubber, prevedono, ad esempio, che il campione di bitume base per il controllo della qualità debba essere prelevato presso il luogo di miscelazione con il polverino, direttamente dal veicolo in cui viene trasportato; non può essere prelevato né direttamente dalla fabbrica né dal veicolo di trasporto in una fase diversa da quella immediatamente antecedente alla miscelazione stessa, in modo da evitare di analizzare un campione che non sia stato soggetto a tutte le fasi di raffreddamento e successivo riscaldamento del bitume effettivamente utilizzato per la produzione di AR.

Nello sviluppo di un legante Asphalt Rubber gli effetti di ciascuno dei fattori elencati deve essere considerato in funzione dal specifico uso a cui il materiale è destinato. Di seguito vengono esposti i principali aspetti per ciascuno dei fattori citati.

### **Bitume base**

Le proprietà fisiche del legante bituminoso quali la rigidità, la suscettibilità termica e le caratteristiche di invecchiamento influenzano le prestazioni della miscela sia alle alte che alle basse temperature.

Nella Tabella 3-20 vengono riportati i parametri tipici utilizzati per la produzione di bitume Asphalt Rubber a seconda delle applicazioni e delle regioni climatiche.

**Tabella 3-20: Caratteristiche del bitume base per la produzione di AR in diverse regioni climatiche**

Clima	PG minimo del bitume base	classe di AR	PG del bitume AR
freddo	AC-5	AR-2000	PG 52-28
temperato	AC-10	AR-4000	PG 58-22
caldo	AC-20	AR-8000	PG 64-16

L'utilizzo di bitumi base più duri produrrà bitumi Asphalt Rubber caratterizzati da una maggior rigidità alle alte temperature rispetto all'utilizzo di bitumi base più soft. L'utilizzo di tali bitumi origina, d'altro lato, materiali che risultano più duri alle basse temperature.

Le proprietà chimiche del legante base influenzano le caratteristiche finali del bitume Asphalt Rubber agendo sulla reazione della gomma. Un bitume con livelli bassi di componenti che vengono assorbiti dalla gomma può produrre, infatti, bitumi modificati caratterizzati da una viscosità inferiore e da un minor grado di modifica delle proprietà.

### **Polverino di gomma**

Le ricerche effettuate sinora hanno mostrato come i parametri che maggiormente influenzano le proprietà dei bitumi Asphalt Rubber siano legati alla quantità di gomma utilizzata e alla granulometria della stessa. A questi si aggiungono la superficie delle particole di polverino di gomma, i processi di triturazione, la composizione chimica del polverino e la presenza di contaminanti come acqua, fibre, minerali o metalli, come di seguito descritto.

All'aumentare della quantità di polverino utilizzata corrispondono maggiori cambiamenti delle proprietà del bitume, quali l'aumento della viscosità, l'aumento della resilienza, l'aumento del punto di rammollimento ed una diminuzione della penetrazione.

Grandi variazioni nella granulometria del polverino impiegato possono produrre differenze apprezzabili nelle caratteristiche del materiale ottenuto. In particolare, una granulometria più fine può produrre un più rapido assorbimento della gomma da parte del bitume a causa dell'aumento della superficie specifica del polverino, causando un aumento della viscosità nel bitume modificato. Inoltre, l'utilizzo di particelle di polverino estremamente sottili tende ad accelerare la perdita di viscosità durante lo stoccaggio a causa dell'eccessiva velocità di assorbimento e conseguente depolimerizzazione.

Il processo di triturazione della gomma riciclata determina le caratteristiche legate alla forma dalla superficie delle particelle di gomma. Inoltre, nel caso avvenga tramite processo ambientale si ottiene una maggior ruvidità della superficie delle particelle di gomma, mentre nel caso di processo criogenico la superficie ottenuta è più liscia.

I pneumatici, come illustrato nel Capitolo 2, sono composti da una serie di diversi tipi di gomma e le principali variabili riguardano il contenuto di gomma sintetica, di gomma naturale, il contenuto totale di idrocarburi della gomma e di estratti dell'acetone. Il contenuto di ceneri e di carbone nero risulta normalmente simile anche per differenti composizioni della gomma dei pneumatici. I principali effetti della composizione del polverino sulle proprietà fisiche delle bitume modificato ottenuto, sono legati al contenuto totale di idrocarburi ed al contenuto di gomma naturale.

La gomma di pneumatico è tipicamente composta soltanto per circa la metà da polimero gomma, ed è questa parte che reagisce con il bitume assorbendo la frazione maltenica e rigonfiandosi. Gli altri ingredienti, carbone nero, ceneri e oli, invece, non reagiscono quando aggiunti al bitume caldo.

Così, il contenuto effettivo di idrocarburi di gomma diventa un fattore rilevante durante la progettazione di un bitume Asphalt Rubber.

---

### **Contaminanti**

Nel polverino possono essere presenti diversi tipi di contaminanti. I più comuni sono umidità, tessuti, fibre, metalli e particelle minerali.

L'effetto della presenza di umidità nel polverino quando questo è addizionato al bitume, può originare la formazione di schiuma, che aumenta il volume del bitume subito dopo l'aggiunta del polverino e che può causare dei problemi nella produzione o provocare fuoriuscite nei serbatoi di stoccaggio.

Il contenuto di umidità di un polverino può essere determinata con semplici procedure che prevedono il riscaldamento della gomma a 110° fino a raggiungere un peso costante. La presenza anche di piccoli quantitativi di umidità può provocare la comparsa di schiuma. L'esperienza ha dimostrato che percentuali superiori all'1% di umidità non possono essere tollerate.

### **Condizioni di miscelazione**

L'intensità della miscelazione può influenzare le proprietà del bitume Asphalt Rubber. Una velocità di agitazione troppo bassa può far sì che le particelle di gomma rimangano in sospensione in superficie, e che non reagiscano col legante. In tal caso gli asfalteni sono semplicemente adsorbiti dalle particelle di gomma ma la dispersione non è completa.

A sua volta, una velocità di miscelazione troppo elevata può rompere meccanicamente le particelle di gomma. Durante il periodo di miscelazione alla corretta intensità, le particelle di gomma rigonfiano e assorbono il bitume, ottenendo la dispersione completa della gomma.

### **Tempo e temperatura**

Il processo di reazione delle particelle di gomma con bitume dipende, quindi, sia dal tempo che dalla temperatura. Temperature più elevate e miscelazione più veloce possono condurre ad un maggiore rigonfiamento e assorbimento. Questi effetti sono stati documentati in diversi studi. Temperature tipicamente utilizzate sono comprese tra i 163 e i 205°C. I bitumi modificati con polverino di gomma generalmente mantengono le loro proprietà fisiche almeno per 24 ore per temperature intorno ai 170°C. A temperature più elevate (da 190 fino a 205°C), il polverino inizia a depolimerizzarsi dopo circa 3 a 6 ore, modificando le sue proprietà fisiche.

### **Oli additivi di estensione**

Esistono diversi additivi che possono essere utilizzati per modificare le proprietà del bitume Asphalt Rubber. Gli oli additivi di estensione rendono il bitume più soft e ne diminuiscono la rigidità alle basse temperature.

---

---

A seconda delle caratteristiche chimiche del bitume, questi possono essere meglio assorbiti dalla gomma. Generalmente quelli che portano a risultati migliori sono oli di origini aromatica o napténica.

#### **Formulazioni comunemente utilizzate**

Le proprietà fisiche dei leganti AR dipendono delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali utilizzati, dalla reazione fra questi materiali e dalle condizioni di interazione. Così, per ottenere le proprietà desiderate, si devono utilizzare materiali e metodologie adeguate. Le condizioni di cui tener principalmente conto sono:

- origini del bitume base e grado di penetrazione.
- origini del polverino di gomma e granulometria.
- quantità di polverino
- condizioni di interazione per quanto riguarda tempo, temperatura, velocità di miscelazione.
- aggiunta di additivi, se necessario.

Dal momento che le caratteristiche del bitume Asphalt Rubber dipendono dalla temperatura e dal tempo di riscaldamento, è importante che le caratteristiche del legante siano valutate nello stesso range di temperature di riscaldamento e intensità di miscelazione al quale il bitume verrà sottoposto durante il periodo di utilizzo.

Si raccomanda, inoltre, di studiare le caratteristiche fisiche del bitume Asphalt Rubber variando temperatura, intensità di miscelazione per periodi brevi, medi e lunghi di interazione.

L'intensità di miscelazione per misure di laboratorio deve essere analoga a quelle utilizzate nell'impianto di produzione. Diversi tipi di condizioni di miscelazione possono essere utilizzati per simulare le condizioni in impianto.

La Tabella 3-21 presenta i parametri delle formulazioni di bitume Asphalt Rubber correntemente più utilizzati dai produttori.

---

**Tabella 3-21: Tipici parametri progettuali**

Tipo I - Arizona						
Tipo di prova	Minuti di Reazione					Limiti specificati
	60	90	240	360	1440	
Viscosità, Haake a 177°C [PA·s]	2.8	2.8	2.6	2.3	2.1	1.5-4.0
Resilienza a 25°C [%]	31		31		30	Minimo 30
Punto di rammollimento Palla Anello [°C]	67.0	67.0	67.5	65.0	60.0	Minimo 135
Penetrazione a 4°C, 200g, 60, 1/10mm	21		22		26	Minimo 10
Tipo II - California						
Tipo di prova	Minuti di Reazione					Limiti specificati
	60	90	240	360	1440	
Viscosità, Haake a 177°C [cP]	3600	3200	3400	3400	2900	1500-4000
Resilienza a 25°C [%]	43		41		38	Minimo 25
Punto di rammollimento Palla Anello [°C]	69.5	68.0	68.2	68.0	65.0	Minimo 130
Penetrazione a 4°C, 200g, 60, 1/10mm	24		24		27	Minimo 15

### Procedure per conglomerati e bitumi Asphalt Rubber

Nel controllo della qualità dei conglomerati Asphalt Rubber ci sono diversi fattori che devono essere verificati:

#### *Luogo del campionamento*

La maggior parte dei produttori preleva il campione direttamente dal serbatoio di stoccaggio dell'impianto di produzione di Asphalt Rubber, anziché, come corretto, a monte della pompa che spinge il bitume verso la centrale del conglomerato.

#### *Tempistica di campionamento e Scadenza del campione*

Dal momento che si verifica una variazione delle proprietà al variare del tempo di reazione, si raccomanda che il campione venga raccolto dopo almeno 45 minuti di reazione, e non più di 360 minuti.



Come sappiamo, il bitume AR risulta poco stabile allo stoccaggio, quindi si raccomanda che il campione venga testato nel più breve tempo possibile, o altrimenti raffreddato alla temperatura ambiente e dopo riscaldato per almeno 45 min sotto agitazione a 185° prima di eseguire le prove.

*Temperature di reazione e di stoccaggio*

Questi tre fattori possono alterare significativamente le proprietà del bitume. Il range di temperature deve essere compreso fra 163 e 205°. Il tempo di reazione generalmente inizia quando la gomma viene introdotta nella unità di miscelazione.

*Frequenza di campionamento*

La maggior parte dei produttori raccolgono un campione al giorno. Per le aziende pubbliche si raccomanda la raccolta di un campione per ogni produzione.

*Test per il controllo della qualità*

La maggior parte dei produttori ricorre al viscosimetro rotazionale del tipo Haake per misurare la consistenza del bitume. Tuttavia, tale prova non fornisce valori significativi a causa delle temperature a cui viene effettuata.

Basandosi sulle esperienze sinora condotte, si raccomanda l'esecuzione delle prove riassunte nella Tabella 3-22.

**Tabella 3-22: Prove raccomandate per il controllo della qualità dei materiali**

Materiale	Frequenza di campionamento	Prova da effettuare	Frequenza di prova raccomandata	Note
Legante bituminoso	Ogni carico ricevuto	viscosità	Ogni carico ricevuto	Deve essere ottenuta una certificazione
Bitume AR	Ogni caricamento sull'impianto di produzione del conglomerato	Granulometria	400 lbs	Deve essere ottenuta una certificazione
		Composizione chimica	250 ton	

**Tabella 3-23: Prove raccomandate per il controllo della qualità del legante AR**

Proprietà	Frequenza di campionamento	Frequenza di prova	Temperatura di prova	Note
Viscosità Haake	Ogni produzione	Ogni produzione	Specificata $\pm 5^{\circ}\text{F}$	Utilizzare strumento calibrato
Resilienza	Ogni produzione	Quando necessario	Specifiche ASTM	Prove eseguite in laboratori certificati
Penetrazione	Ogni produzione	Quando necessario	Specifiche ASTM	Prove eseguite in laboratori certificati
Punto di rammollimento	Ogni produzione	Quando necessario	Specifiche ASTM	Prove eseguite in laboratori certificati

**Tabella 3-24: Prove raccomandate per il controllo della qualità del conglomerato AR**

Proprietà	Frequenza di campionamento	Frequenza di prova	Note
Conglomerato	Durante la formulazione della miscela	Quando necessario	Campioni prelevati per la formulazione
Adsorbimento, <i>crushed faces</i> , abrasione, granulometria, equivalente in sabbia, PI	da 500 a 4000 ton	da 500 a 4000 ton	Campioni prelevati dall'alimentazione a freddo
Contenuto di legante AR	da 500 a 4000 ton	da 500 a 4000 ton	Utilizzare forno a iniezione
Contenuto di polverino nel bitume	da 500 a 4000 ton	da 500 a 4000 ton	Monitorare l'immissione di gomma
Proprietà volumetriche (vuoti)	da 500 a 4000 ton	da 500 a 4000 ton	Utilizzare un compattatore Marshall o giratoria

Altri aspetti a cui prestare attenzione sono legati al periodo di tempo che trascorre tra la progettazione/formulazione dei leganti e la loro produzione. In questo periodo di tempo potrebbe cambiare il greggio di origine, che è uno dei fattori che più influenza il calcolo della quantità ottima di polverino incorporato nel bitume. Anche l'origine del polverino di gomma riveste particolare importanza, perché la gomma di pneumatico ha una composizione diversa a seconda che sia di automobile o di camion. Queste alterazioni possono condurre ad un diverso comportamento del legante AR, soprattutto relativamente allo stoccaggio.

---

### **CONTROLLO DI QUALITÀ E GARANZIA DELLA QUALITÀ**

Un aspetto non strettamente legato agli obblighi del produttore riguarda la garanzia di qualità, ovvero l'insieme di procedure e accorgimenti di verifica che lo stesso produttore ha interesse ad adottare al fine di tutelarsi contro possibili imperfezioni del materiale prodotto, che risulta così garantito. I tipi di prova adottati sono quelli previsti per il controllo della qualità, variandone adeguatamente la frequenza.

Le specifiche per quanto riguarda la garanzia stano diventando sempre più frequenti per le applicazioni con Asphalt Rubber, al fine di garantire una performance minima.

Il periodo tipico di garanzia è compreso tra 1 e 5 anni. Il Caltrans ha adottato questo concetto e utilizza dal 2002 una garanzia per i "progetti pilota" [3-35].

Negli Stati Uniti è pratica comune stabilire degli incentivi/penali dove l'impresa costruttrice riceve dei compensi addizionali se il lavoro finale eccede le aspettative (ad es. in termini di IRI) o paga una penale se non sono verificati i limiti stabiliti (es. densità, granulometria, contenuto in legante). Tipicamente, un incentivo massimo è del 5% del valore dell'opera, mentre la penale può raggiungere il 25% di tale importo. Se la qualità scende al di sotto di una determinata soglia, la pavimentazione viene rimossa e ricostruita.

### **3.7 Qualità dell'aria**

Come per qualunque altro nuovo prodotto, l'Asphalt Rubber ha generato preoccupazioni ambientali, legate soprattutto al dubbio che la presenza della gomma nel processo di modifica del legante potesse rendere più nocivo il processo di fabbricazione e applicazione di questi conglomerati rispetto ad altri tipi di conglomerato convenzionale. Una ulteriore perplessità riguardava la possibilità di riciclare le pavimentazioni in AR.

Tali questioni sono state ampiamente studiate nell'ultimo decennio negli Stati Uniti, partendo dalle indicazioni dell'*International Surface Transportation Efficiency Act*, del 1995, che ha richiesto lo studio approfondito della emissione di gas nel processo di fabbricazione e costruzione di strade, così come nel riutilizzo di pneumatici nella fabbricazione di conglomerati a caldo.

In particolare, tre studi hanno indagato le presunte differenze a livello ambientale fra i conglomerati convenzionali e i conglomerati AR. Il primo risale al 1994 ed è stato condotto dal *Michigan Department of Transportation*, il secondo studio dal *Texas Transportation Institute* nel 1995, mentre il terzo è stato concluso nel 2001 dal *Northen California Rubberized Asphalt Technology Center* [3-40].

---

Il primo studio, “*Evaluation of Exhaust Gas Emissions and Worker Exposure from Asphalt Rubber Binders in Hot Modified Asphalt Mixtures*” di Kathryn O’Connor Gunkel, *Wildwood Environmental Engineering Consultants*, ha valutato la tossicità dei fumi prodotti nella fabbricazione e applicazione dell’Asphalt Rubber, studiando sette tipi diversi di conglomerati, dei quali cinque avevano gomma incorporata (uno tramite processo dry e gli altri quattro tramite processo wet), uno da bitume non modificato ed uno da modificato SBS. È giunto alla conclusione che:

- la gomma non induce un significativo aumento di emissioni di componenti indesiderati;
- la differenza nel tipo di bitume di base e di oli di combustione utilizzati condiziona molto di più l’emissioni che non la gomma;
- il processo dry ha avuto risultati simili a quello wet, il che conferma che la gomma non condiziona l’emissione di gas.

Il secondo studio si è focalizzato sul riciclaggio di pavimentazioni in Asphalt Rubber, valutandone le emissioni di gas durante il processo costruttivo. Questo studio, intitolato “*Recycling Crumb Rubber Modified Asphalt Pavements*” eseguito da Crockford, Makunike, Davison, Scullion e Billiter (T.C. Report FHWA/TX\_95/1333-1F, Maggio 1995) conferma che la qualità dell’aria non peggiora e che l’effetto del polverino di gomma nelle emissioni può essere considerato relativamente piccolo in confronto con gli effetti delle altre variabili prese in considerazione.

Il terzo studio, richiesto dal *Bay Area Air Quality Management District* al *Northern California Rubberized Asphalt Technology Center*, aveva lo scopo di determinare se i conglomerati AR utilizzati in California erano più impattanti.

I risultati di questo studio sono stati poi comparati con il “*Hot Mix Asphalt Plants Emission Assessment Report*” del 2000, che aveva misurato gli indici di qualità dell’aria nel processo costruttivo di conglomerati convenzionali.

Da questo terzo studio, concluso nella fine del 2001, è emerso che le pratiche costruttive di conglomerati AR non comportano differenze, per quanto riguarda gli indicatori ambientali, rispetto agli altri tipi di conglomerati a caldo. I limiti stabiliti per la produzione di conglomerati a caldo possono essere applicati anche ai conglomerati AR.

---



**Figura 3-48: Impianto di produzione di AR in funzione. Come si vede non si verificano emissioni di fumi**

Più recentemente, studi sulla qualità dell'aria durante la pavimentazione e riciclaggio condotti dall'*Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) hanno determinato che l'esposizione dei lavoratori ad aria contaminata era ben al di sotto dei limiti ammissibili, e nella maggior parte dei casi sotto i limiti di segnalazione.

Ulteriori studi [3-41] confermano che le emissioni risultanti dal processo costruttivo di pavimentazioni in Asphalt Rubber non sono significativamente diverse, in termini ambientali, da quella della produzione di conglomerati convenzionali. L'Asphalt Rubber è soltanto uno dei tanti tipi di asfalto. Le particelle di polverino rimangono insolubili all'interno della struttura del bitume e così non diventano volatili.

Così gli impianti di produzione di Asphalt Rubber non presentano nessun tipo di emissione pericolosa per la salute.

Altri studi in cui sono state esaminate le emissioni legate alla produzione di AR e dai quali è emerso che queste sono dello stesso livello di nocività di un conglomerato a caldo convenzionale, sono:

- Air Pollutant Emissions Test Asphalt Plant Baghouse Stack-San Antonio, Texas
- Southwestern Laboratories, Houston, Texas, July 1992

- Evaluation of Exhaust Gas Emissions and Worker Exposure from Asphalt-Rubber Binders in Hot Modified Asphalt Mixtures, Kathryn O’C. Gunkel
- Wildwood Environmental Engineering Consultants, Inc.
- Michigan Department of Transportation 1994
- NIOSH Health Hazard Evaluation Report: HETA #2001-0536-2864
- Crumb-Rubber Modified Asphalt Paving: Occupational Exposures and Acute Health Effects, 2001
- California Stack Emission Testing of Asphalt-Rubber and Conventional Asphalt Concrete
- Bay Area Air Quality Management District
- Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center, February 5, 2002

#### 3.7.1.1 SUGGERIMENTI PER DIMINUIRE I DISAGI NEL PROCESSO COSTRUTTIVO

Alcuni piccoli disagi relativi alla produzione dei conglomerati AR riguarda la possibile emanazione di odori sgradevoli. Al fine di risolvere questo inconveniente, esistono sul mercato appositi additivi che, introdotti nello stesso impianto, risolvono il problema all’insorgere dello stesso

Bisogna sempre assicurarsi che gli impianti di produzione siano puliti e in buono stato di funzionamento, al fine di evitare che l’insorgere di guasti origini la produzione di fumi. Anche semplici attenzioni, come la corretta introduzione dell’aggregato nell’impianto, minimizza la produzione di fumi.

Tassi di produzione più bassi riducono le emissioni visibili, quindi prevedere nella fase di programmazione una produzione maggiormente distribuita nel tempo evita di concentrare l’utilizzo dell’impianto solo in un determinato momento, riducendo disagi di tipo ambientale.

### 3.8 Sviluppi Futuri

L’Asphalt Rubber è sempre più soggetta a specifiche relative ai materiali ed alle metodologie impiegati, al fine di ottenere un prodotto ottimale.

Alcune aziende produttrici hanno introdotto la classificazione SHRP Performance Grade come un requisito aggiuntivo per la classificare dell’AR.

---

---

Attualmente, il Caltrans sta lavorando alla definizione di una specifica che includa la formulazione e la caratterizzazione prestazionale del prodotto finale, ricorrendo al DSR come prova di accettazione del materiale. Ricorre anche ad una modifica del protocollo SHRP, utilizzando per la prima volta cono e piatto per accettare il legante. Con questo nuovo approccio sono apparsi anche nuovi problemi. Il più importante è relativo al fatto che i risultati finali non sempre sono correlabili con la performance su strada. Ad esempio, uno dei migliori bitumi Asphalt Rubber utilizzato in California viene rigettato da questa specifica, anche se è stato usato con successo in più di 400 progetti. Un'altra lacuna di questa specifica è il fatto di non richiedere una percentuale minima di polverino per ottenere il bitume Asphalt Rubber finale. Questo permette di accettare alcuni leganti che esistono già sul mercato, per esempio con percentuali inferiori al 10% di polverino e aggiunta di alcuni polimeri, che non sono Asphalt Rubber, potendo condurre a problemi su strada nel caso questi materiali non vengano applicati correttamente

Per quanto riguarda l'emulsione dell'AR, sono stati eseguiti diversi tentativi senza ottenere risultati positivi. Uno dei pochi successi, se non l'unico, riferito in bibliografia è stato ottenuto da Reed e Holleran a Sacramento nel 2000.

La difficoltà nell'ottenimento di tale risultato è legata all'elevata viscosità dell'Asphalt Rubber, che ne rende difficile l'emulsione con l'acqua a causa della inadeguata capacità dei mulini convenzionali. Inoltre, risulta molto difficile ottenere una dispersione omogenea del polverino, impossibilitando lo stoccaggio dell'emulsione, la quale tende a separarsi e formare grumi (le particelle di polverino tendono a raggrupparsi).

Riconoscendo le enormi potenzialità di un'emulsione di bitume con l'elasticità dell'AR, nello studio degli autori citati sono stati effettuati tre tentativi, rispettivamente di emulsione con metodo convenzionale, di addizione di polverino con metodo dry ad uno slurry seal, ed aggiunta di polverino con metodo dry a chip seals. Gli ultimi due metodi hanno condotto a risultati positivi, ma il processo costruttivo risulta eccessivamente complicato e dispendioso da non risultare fattibile.

Un'ulteriore aspetto preso in considerazione dall'ASU è lo studio del riscaldamento ambientale causato dal tipo di pavimentazione applicato. Nella Figura 3-49 si nota come il livello di riscaldamento risulti inferiore per le numerose pavimentazioni in Asphalt Rubber (che appaiono in giallo, corrispondente a emissioni termiche inferiori) rispetto alle altre pavimentazioni dell'area metropolitana di Phoenix (che appaiono in diversi gradi di colore rosso, corrispondenti a emissioni termiche superiori).

---



**Figura 3-49: Riscaldamento ambientale nell'area di Phoenix (da [www.urbanheat.org](http://www.urbanheat.org))**

La tecnologia per la produzione di Asphalt Rubber continua a svilupparsi. Sia per quanto riguarda le apparecchiature specializzate, che stanno diventando sempre più semplici sotto forma di piccoli impianti mobili quasi senza necessità di un operatore, sia per quanto riguarda specifiche e capitolati.

### 3.8.1.1 SUPERPAVE

Basandosi sui dati raccolti in più di 5 anni di *Strategic Highway Research Program* sui Bitumi Asphalt Rubber e HRMA, la *Federal Highway Administration* e l'*American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) hanno implementato negli Stati Uniti, ancora in fase di valutazione[3-35]:

- Una serie di test sui leganti che possono relazionare fessurazione e deformazione permanente. Queste prove devono portare a delle specifiche per il legante Asphalt Rubber;



- Una serie di prove sui conglomerati bituminosi che relazionano la performance in laboratorio con quella in campo. Questi test associano la fessurazione a fatica, la fessurazione termica e la sensibilità all'umidità;
- Definizione di una performance iniziale per i conglomerati da bitume modificato, incluso un criterio adeguato per assicurare la relazione fra leganti e le performance in campo.

### 3.8.1.2 SPECIFICHE PER LA PERFORMANCE DEL LEGANTE

La *Pacific Coast Conference on Asphalt Specifications* (PCCAS) sta lavorando allo sviluppo di specifiche per Asphalt Rubber e Terminal Blend [3-35], con particolare riferimento a:

- Misura delle proprietà di performance del legante utilizzando le specifiche SUPERPAVE® per i bitumi modificati;
- Relazione fra proprietà prestazionali del legante e relativi test sui conglomerati con la performance in campo;
- Sviluppo di un criterio di prova per i leganti per assicurare una buona performance per quanto riguarda la resistenza a fatica, fessurazione e deformazione permanente;
- Un totale di 10 progetti Caltrans sono ancora in fase di monitoraggio, e si è quindi in attesa di 10 report di performance.

Non si deve, quindi, assumere che non si prevedano sviluppi importanti per l'Asphalt Rubber.

L'esperienza ha portato all'utilizzo e all'accettazione di questo prodotto, manifestando, però, il bisogno di approfondire le seguenti tematiche:

- comparazione delle performance delle tecniche di produzione di Asphalt Rubber e Terminal Blend;
- relazioni fra le proprietà del materiale e la performance delle pavimentazioni tramite test di laboratorio e test accelerati sulle pavimentazioni del tipo APT;
- valutazione dell'Asphalt Rubber utilizzando le metodologie di prova AASHTO 2000;
- sviluppo di specifiche basate sulla performance;
- sviluppo di metodologie di progetto per la valutazione sistematica della granulometria degli aggregati da utilizzare negli HMRA;
- sviluppo di specifiche PG per l'Asphalt Rubber;
- applicazioni di Asphalt Rubber in pavimentazioni aeroportuali.

Questa Tesi si propone di contribuire allo sviluppo di questi obiettivi, mediante la valutazione delle proprietà reologiche dei leganti *Asphalt Rubber*. Inoltre, in considerazione dei buoni risultati riscontrati sinora dalla recente applicazione dei *Terminal Blend*, si è deciso di prendere in considerazione anche questi ultimi nel corso dell'analisi sperimentale illustrata nei capitoli seguenti.

## Capitolo 4

# Caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi

La realizzazione di pavimentazioni stradali ad elevate prestazioni è il prodotto di una serie di fattori tra i quali assume importanza rilevante l'accurata selezione dei materiali di base, primo tra tutti il bitume. Per quest'ultimo, caratterizzato da un complesso comportamento viscoelastico, le esperienze di ricerca degli ultimi anni hanno dimostrato che risulta particolarmente indicato fondare le procedure di accettazione e controllo su prove effettuate impiegando dei reometri di tipo rotazionale, del tipo *Dynamic Shear Rheometer* [4-1].

È quindi logico pensare che specifiche riguardanti il comportamento dei bitumi modificati con polimeri si debbano basare su prove reologiche che consentano sia di valutare adeguatamente i migliori dal punto di vista del comportamento, sia di disporre per ciascuna proprietà di un sistema di classificazione.

La reologia è quella disciplina che studia il comportamento tenso-deformativo dei materiali, e comprende lo studio e la valutazione della dipendenza dal tempo e dalla temperatura della risposta dei materiali sollecitati da una forza applicata. Si tratta di una scienza che ha una forte componente sperimentale e il cui scopo ultimo è quello di costruire un modello matematico che rifletta in modo adeguato la dipendenza del materiale oggetto di studio da tutte le possibili variabili che ne descrivono il comportamento della tensione, deformazione e flusso.

La risposta reologica è di particolare interesse per tutti quei materiali che possono essere messi in condizione di scorrere anche alle temperature di esercizio, per i quali diventa quindi indispensabile conoscere la dipendenza della deformazione dal tempo [4-2].

I semplici metodi di prova, adatti a caratterizzare il comportamento tenso-deformativo dei materiali in laboratorio, sono quelli monoassiali (prove di allungamento) e di taglio [4-3].

Tali prove possono essere condotte in condizioni di sollecitazione controllata o di deformazione controllata ed il risultato conseguito può essere espresso con formule diverse in base alla risposta del materiale.

I materiali, il cui comportamento tenso-deformativo è lineare e largamente dipendente dal tempo e dalla temperatura, possono essere caratterizzati attraverso il modulo elastico. I fluidi Newtoniani, invece, vengono descritti dal coefficiente di viscosità. I materiali, quali il bitume, che esibiscono sia un comportamento elastico sia uno viscoso, sono chiamati viscoelastici e devono essere caratterizzati attraverso metodi di prova e tecniche analitiche che tengano conto del tempo e della temperatura [4-2].

Il legame tra sforzi e deformazioni può essere scritto come segue:

$$\underline{\sigma} = f(\underline{\gamma}, t, T) \quad \text{oppure} \quad \underline{\sigma} = f(\underline{\dot{\gamma}}, \underline{\gamma}, T) \quad (4-1)$$

dove:

$\underline{\sigma}$  rappresenta il tensore degli sforzi

$\underline{\gamma}$  rappresenta il tensore delle deformazioni

t rappresenta il tempo

$\underline{\dot{\gamma}}$  rappresenta il tensore dei gradienti di deformazione

T rappresenta la temperatura

La dipendenza del legame costitutivo dal tempo di applicazione delle sollecitazioni può, quindi, essere espressa in forma diretta o indiretta, facendo riferimento all'influenza della temperatura e, nel secondo caso, al tensore delle velocità di deformazione, che riassume la cinematica delle deformazioni del materiale.

Caratterizzare un materiale dal punto di vista reologico significa esplicitare le relazioni (4-1), in modo da poter successivamente modellare il comportamento meccanico del materiale per qualsiasi condizione di impiego. A livello sperimentale, operando in una particolare condizione di sollecitazione e/o deformazione nella quale il flusso avvenga in maniera semplice e controllata, si ricava un legame costitutivo che può essere impiegato per descrivere situazioni in condizioni di flusso riconducibili a quelle prese in esame.

Questi principi operativi costituiscono i fondamenti della reometria, la branca della reologia che si occupa della misurazione delle grandezze reologiche e, più in generale, delle proprietà di flusso.

---

## 4.1 Viscoelasticità

Il bitume è un materiale viscoelastico termodipendente, in grado di mostrare una componente elastica della deformazione solo allo stato solido o semisolido, la quale svanisce all'aumentare della temperatura. In particolare, il bitume ha la caratteristica di essere un materiale elastico a 10°C ed un materiale fortemente viscoso a 40°C.

Una delle prove reologiche più semplici, in grado di differenziare le componenti della risposta tenso-deformativa di tale materiale, è la prova di *creep*. Essa consiste nell'applicare, a partire dal tempo  $t_0$ , una tensione costante al campione (*creep* statico) consentendone la libera deformazione fino al tempo  $t_1$ , in cui la tensione applicata è rimossa.

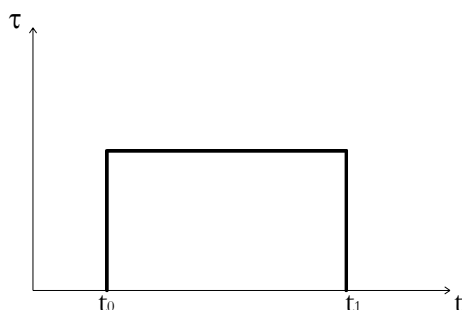


Figura 4-1: Sollecitazione applicata

Con tale prova vengono evidenziate le differenze esistenti tra il comportamento elastico, quello viscoso e quello viscoelastico. Un materiale perfettamente elastico, quando sottoposto a carico in una prova di *creep* si deforma istantaneamente in modo indipendente dal tempo e dalla temperatura. La deformazione rimane, in tal caso, costante fino al momento in cui il carico applicato viene rimosso, la deformazione viene immediatamente recuperata ed il materiale ritorna nella sua forma iniziale.

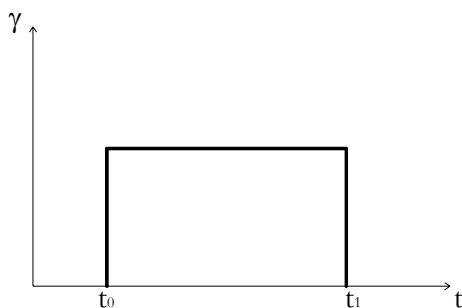
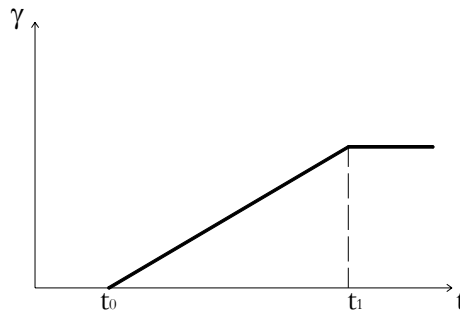


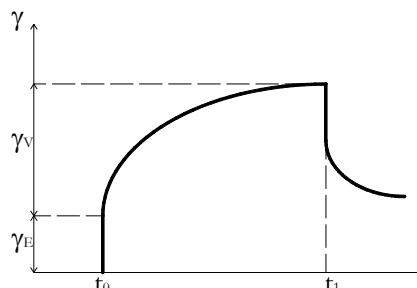
Figura 4-2: Esempio di risposta elastica

Un materiale viscoso, invece, si deforma con velocità costante dall'atto dell'applicazione del carico, all'istante  $t_0$ , fino alla rimozione del carico all'istante  $t_1$ , dal quale non si evidenzia un'ulteriore deformazione o rilassamento.



**Figura 4-3: Esempio di risposta viscosa**

Un materiale viscoelastico, infine, se sollecitato in modo costante in una prova di *creep*, presenta entrambe le componenti di risposta elastica e viscosa. Al momento dell'applicazione del carico si determina una deformazione istantanea, corrispondente alla risposta elastica e, nello stesso istante inizia a manifestarsi (con continuità della tangente) una deformazione graduale dipendente dal tempo. Questa è il risultato di una deformazione elastica ritardata la quale, una volta esauritasi, cede il passo alla fase viscosa (sempre con continuità della tangente). Alla fine del periodo di carico, all'istante  $t_1$ , il flusso viscoso cessa e la deformazione ad esso corrispondente non viene recuperata; si ha dapprima un recupero elastico, quindi un recupero elastico ritardato fino al raggiungimento del grado di deformazione irreversibile, che rappresenta la condizione di stabilità.



**Figura 4-4: Esempio di risposta viscoelastica**

---

Le definizioni di risposta elastica, risposta viscosa e risposta viscoelastica viste sopra si riferiscono ad un comportamento lineare dei materiali, verificato quando la deformazione, ad un generico istante e per una temperatura prefissata, risulta direttamente proporzionale al carico applicato, come espresso dalla seguente [4-4]:

$$\frac{\gamma_1(E)}{\tau_1} = \frac{\gamma_2(E)}{\tau_2} = \dots = \frac{\gamma_n(E)}{\tau_n} = \text{cost} \quad (4-2)$$

La risposta non lineare risulta di difficile caratterizzazione in laboratorio e modellazione nei problemi ingegneristici pratici, soprattutto nel caso di materiali viscoelastici. In linea di massima i metodi lineari di caratterizzazione e di analisi consentono, comunque, di risolvere i problemi di progettazione.

D'altro canto, l'analisi desunta dai dati di prova ottenuti nell'ambito dell'attività di ricerca del progetto SHRP (*Strategic Highway Research Program* – vedi capitolo 5) indica che sia i leganti bituminosi tal quali che quelli modificati possono essere trattati come materiali viscoelastici lineari sotto le condizioni di carico che si incontrano normalmente in una pavimentazione stradale. Per questa ragione, il modello per la caratterizzazione tenso-deformativa di un bitume ai fini della previsione del comportamento dello stesso, è stato necessariamente limitato alla sola risposta lineare.

I concetti della viscoelasticità lineare costituiscono, quindi, il fondamento teorico necessario per l'analisi del comportamento reologico dei materiali bituminosi.

Coerentemente con quanto sopra esposto, si definisce visco-elastico un qualunque corpo che presenta proprietà intermedie tra quelle di un solido e di un fluido. L'interazione delle due fasi solida-elastica e la liquida-viscosa determina una dissipazione di energia, con conseguente deviazione della risposta tenso-deformativa rispetto ad uno stato perfettamente elastico, secondo il quale l'energia potenziale acquisita nel corso della deformazione verrebbe, invece, totalmente restituita in modo da rispettare la perfetta reversibilità della trasformazione dal punto di vista termodinamico.

Il variare dell'influenza della matrice solida su quella liquida determina una risposta viscoelastica intermedia rispetto agli stati ideali di solido puramente elastico e fluido perfettamente viscoso. Tale variazione, nel caso dei bitumi, può essere ottenuta facendone variare la temperatura.

Di seguito vengono riportate le definizioni di corpo elastico e di fluido viscoso, accompagnate dalla descrizione dei principali modelli di comportamento viscoelastico utilizzati per l'analisi reologica dei materiali.

### 4.1.1 Corpo elastico

Con tale termine si definisce un corpo che, una volta deformato per effetto di una forza, al cessare della sollecitazione riassume la forma iniziale [4-2]. Considerando, ad esempio, un provino cilindrico di altezza  $l$  e diametro  $d$ , sottoponendolo ad una forza verticale si osserva sperimentalmente che la deformazione è pari a:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \frac{N}{S} \quad (4-3)$$

con:

$E$  = modulo elastico di Young [N/mm<sup>2</sup>]

$\Delta l$  = accorciamento verticale

$N$  = forza verticale

$S$  = area di applicazione della forza verticale ( $\pi d^2/4$ )

Nel caso in cui  $E$  sia indipendente dal livello di deformazione a cui è soggetto il provino, la tensione  $\frac{N}{S}$  risulta direttamente proporzionale alla deformazione unitaria  $\frac{\Delta l}{l}$ , si parla di elasticità lineare e la (4-3) prende il nome di legge di Hooke.

Contemporaneamente alla deformazione verticale si verifica anche una deformazione radiale, definita dall'espressione:

$$\frac{\Delta d}{d} = \mu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (4-4)$$

con:

$\mu$  = coefficiente di Poisson

$\Delta d$  = variazione del diametro

$d$  = diametro

In un corpo elastico il lavoro fornito per il processo deformativo viene totalmente recuperato una volta rimossa la sollecitazione, tornando nella condizione iniziale indeformata.

---



### 4.1.2 Fluido viscoso

Con fluido viscoso si intende un processo di deformazione nel quale l'energia meccanica applicata a un materiale viene completamente o in parte dissipata in maniera irreversibile sotto forma di calore; quando l'energia meccanica viene interamente convertita in calore si parla di flusso puramente viscoso.

Una delle componenti fondamentali nell'analisi reologica è la viscosità, che può essere misurata ricorrendo ad un reometro rotazionale.

La viscosità, ossia la grandezza che caratterizza il flusso viscoso, è definita come la resistenza allo scorrimento che il materiale oppone quando soggetto all'azione di uno sforzo. Il comportamento viscoso ha origine dal moto laminare degli elementi componenti il mezzo, che può configurarsi in una delle quattro forme di flusso sotto descritte:

- *tra due piani paralleli* - avviene tra un piano fisso ed uno in movimento, per piani paralleli alle due superfici in movimento; lo spessore delle due piastre non influisce sul moto e sul flusso che si genera;
- *rotazionale tra cilindri coassiali* - avviene per un fluido contenuto nell'intercapedine formata da due cilindri coassiali, uno fisso mentre l'altro ruota trascinando con se in moto relativo strati successivi di fluido;
- *capillare* - si realizza nel fluido che scorre in un tubo o in un elemento sottile, soggetto a una differenza di pressione tra l'ingresso e l'uscita; il profilo delle velocità che si generano assume un andamento parabolico;
- *tra una piastra ed un cono* - in questo caso la piastra costituisce l'elemento fisso mentre il cono ruota; il fluido presente tra i due elementi assume un moto di tipo circolare che avviene su strati paralleli.

La relazione tra flusso viscoso e viscosità è definita dalla legge di Newton:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{d\gamma}{dt}} \quad (4-5)$$

dove:

$\tau$  = sforzo di scorrimento (*shear stress*)

$\frac{d\gamma}{dt}$  = gradiente di velocità di scorrimento (*shear rate*)

$\eta$  = viscosità dinamica [Pa·s]

Per  $\eta$  costante, la viscosità varia solamente al variare della temperatura ed il fluido è detto newtoniano. Oltre alla viscosità dinamica  $\eta$  è presente la viscosità cinematica  $\nu$ , legata alla prima dalla relazione

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4-6)$$

dove:

$\nu$  = viscosità cinematica [mm<sup>2</sup>/s]

$\eta$  = viscosità dinamica

$\rho$  = densità

La viscosità cinematica viene misurata per mezzo di strumenti particolari, detti viscosimetri capillari, ed è definita dimensionalmente in base a grandezze cinematiche quali lunghezza e tempo, mentre per la viscosità dinamica è necessario valutare anche l'intensità della forza che la determina.

Nel caso di fluido newtoniano, il diagramma dello sforzo tangenziale in funzione del gradiente di velocità di scorrimento è rappresentato da una retta, il cui la viscosità rappresenta il coefficiente angolare.

I fluidi per i quali non vale la legge di proporzionalità tra tensione e gradiente di deformazione vengono definiti non-newtoniani, per i quali la viscosità dipende non solo dalla temperatura, ma anche dalla velocità di scorrimento. In questi casi si parla di viscosità apparente  $\eta_{app}$  e la legge di Newton assume la forma:

$$\tau = \eta_{app} \dot{\gamma} \quad (4-7)$$

A seconda della legge con la quale  $\eta_{app} = f(\dot{\gamma})$  la non linearità di comportamento si può manifestare in maniera diversa.

### 4.1.3 Modelli di comportamento viscoelastico

Sia per il solido di Hooke (materiale elastico ideale) che per il fluido di Newton (fluido viscoso ideale), esistono relazioni lineari fra sforzo e deformazione o tra sforzo e velocità di deformazione, dal momento che i coefficienti di proporzionalità, espressi da moduli e viscosità, risultano indipendenti dalle condizioni di sollecitazione. Quando questo tipo di relazione vale anche per i materiali viscoelastici si può parlare di viscoelasticità lineare.

---

I modelli per la descrizione del comportamento meccanico di un corpo viscoelastico, detti modelli analogici, sono composti dalla combinazione di molle elastiche ideali e ammortizzatori contenenti un fluido newtoniano, capaci di descrivere sia la componente elastica che quella viscosa.

La prima componente di tali modelli si basa, quindi, sul modello d'elasticità lineare, noto come molla di Hooke, tipico di un corpo perfettamente elastico per il quale l'applicazione di una forza è immediatamente seguita da una deformazione linearmente proporzionale alla forza stessa secondo una costante elastica. Al cessare della sollecitazione tutta la deformazione viene recuperata, senza che vi sia dispersione di energia. A tale modello è associato il legame costitutivo espresso come:

$$\begin{cases} \sigma = E \cdot \varepsilon \\ \tau = G \cdot \gamma \end{cases} \quad (4-8)$$

dove E rappresenta il modulo elastico normale e G il modulo elastico tangenziale.

La seconda componente dei modelli analogici si basa, invece, sul modello di viscosità lineare, noto come smorzatore viscoso di Newton, secondo il quale in un corpo viscoso ideale la diretta proporzionalità tra deformazione e tempo di applicazione della tensione è governata dalla viscosità dinamica  $\eta$ . Una volta rimossa la sollecitazione, la deformazione avvenuta non viene recuperata, dal momento che l'energia spesa nel processo deformativo viene completamente dissipata. Lo smorzatore viscoso così definito obbedisce alla legge di Newton:

$$\begin{cases} \tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \\ \sigma = \lambda \cdot \dot{\varepsilon} \end{cases} \quad (4-9)$$

dove  $\eta$  è la viscosità dinamica e  $\lambda$  la cosiddetta viscosità elongazionale.

I modelli analogici più noti sono quelli di Maxwell e di Kelvin-Voigt, in grado di descrivere sia l'elasticità ritardata che lo scorrimento viscoso, proprio di materiali viscoelastici quali il bitume.

Il primo costituisce il più semplice modello viscoelastico, costituito dalla combinazione di una molla di rigidezza G e di un ammortizzatore contenente un fluido ideale di viscosità  $\eta$  posti in serie, e descrive il comportamento di un liquido visco-elastico. La legge differenziale che regola tale modello, ottenuta dall'applicazione delle leggi di Hooke e di Newton alle velocità di deformazione di molla e dissipatore, è la seguente:

$$\left( \frac{d\gamma}{dt} \right) = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \quad (4-10)$$


---

Il rapporto fra la viscosità  $\eta$  dello smorzatore e la rigidità  $G$  della molla è definito tempo di rilassamento  $\lambda$ . Per tale relazione lo sforzo si annulla in un tempo sufficientemente lungo, al termine del quale la deformazione imposta permane in modo irreversibile.

Il modello viscoelastico lineare di Kelvin-Voigt è, invece, costituito da una molla di rigidezza  $G = \frac{1}{J}$  (inverso della deformabilità) e da uno smorzatore avente costante  $\eta$  posti in parallelo, e descrive il comportamento di un solido viscoelastico tramite l'equazione differenziale ottenuta dall'applicazione delle equazioni di Hooke e Newton allo sforzo insistente su molla e dissipatore:

$$\tau = \frac{\gamma}{J} + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (4-11)$$

La grandezza  $\eta J = \lambda$  viene chiamata tempo di ritardo del sistema. Tale modello è caratterizzato dal fatto che il corpo descritto risulta soggetto non a deformazioni permanenti, ma a deformazioni recuperabili per un periodo di tempo sufficientemente lungo, rappresentando, quindi, un corpo ad elasticità ritardata.

I modelli di Maxwell e di Kelvin-Voigt, quindi, si rivelano inadeguati a descrivere il comportamento viscoelastico reale dei materiali, se non in particolari circostanze quali tempi di carico molto brevi e/o basse temperature (solido viscoelastico), oppure tempi di carico molto lunghi e/o alte temperature (liquido viscoelastico). Per poter descrivere gli andamenti di  $G(t)$  in prove di rilassamento degli sforzi e di  $J(t)$  in prove di *creep* condotte su un'ampia scala dei tempi e di temperature, è invece opportuno ricorrere a modelli più complessi. Il modello più semplice che viene tradizionalmente considerato è quello di Burger, costituito da due molle di modulo  $G_0$  e  $G_1$  e da due smorzatori con coefficienti  $\eta_0$  ed  $\eta_1$ , disposte secondo uno schema meglio dettagliato in seguito (vedi §5.1). Utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti per gli elementi collegati in serie, è possibile scrivere l'equazione del sistema nella forma seguente:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{\eta_0} t + \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}} \right) \quad (4-12)$$

Secondo tale modello, all'applicazione del carico si verifica una deformazione elastica istantanea  $\tau_0/G_0$  e inizia contemporaneamente a manifestarsi la deformazione viscosa. Subito dopo si ha una deformazione elastica ritardata che, una volta esauritasi, viene seguita dalla fase viscosa.

---

Al cessare del carico si ha dapprima un recupero elastico, poi un recupero elastico ritardato fino al raggiungimento della condizione di stabilità rappresentata dal grado di deformazione irreversibile.

Per materiali come il bitume il comportamento viscoelastico, più complesso di quanto definito dal modello di Burger, non può essere descritto semplicemente facendo riferimento ad un tempo di rilassamento o ad un tempo di ritardo. Nel caso in cui non sia sufficiente riferirsi ad un solo tempo di rilassamento, ovvero ad un solo sistema con molla e smorzatore in parallelo, si considerano molteplici tempi di ritardo, ottenendo un modello generalizzato che rappresenta l'estensione del modello di Kelvin-Voigt. Nel caso in cui si osservi che la deformazione elastica e viscosa non sono caratterizzabili con una sola costante elastica ed un solo smorzatore viscoso, si fa riferimento a molteplici sistemi del tipo di Maxwell collegati in parallelo, ottenendo un'estensione del modello di Maxwell.

Per un modello generalizzato con  $n$  elementi di Kelvin-Voigt in serie, ad esempio, la deformazione conseguente all'applicazione di una tensione tangenziale costante  $\tau_0$  varia secondo la legge:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G_o} \left( 1 + \frac{t}{\lambda_o} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\tau_0}{G_i} \left[ 1 - \exp\left( -\frac{t}{\lambda_i} \right) \right] \quad (4-13)$$

dove  $G_o$  e  $\lambda_o$  rappresentano le costanti del primo elemento di Maxwell.

## 4.2 Reometria

La reometria è il ramo della reologia che si occupa della misura delle grandezze reologiche, ed i cui compiti discendono dalle problematiche relative all'esecuzione delle prove reologiche, alla definizione dei protocolli operativi e dall'interpretazione dei risultati sperimentali. Di seguito vengono forniti gli elementi principali attraverso i quali vengono classificate le prove reologiche, distinti in relazione alla storia della forzante ed alla configurazione di prova.

### 4.2.1 Storia della forzante

Una prima importante distinzione tra le prove reometriche dipende dalla legge di variazione nel tempo con cui viene applicata la forzante, ossia la sollecitazione, la deformazione o il gradiente di deformazione che viene imposto durante la prova e che rappresenta, quindi, la variabile indipendente.

Possono essere eseguite sia prove in regime continuo che in regime variabile. Nel primo caso viene applicato un momento costante e viene contemporaneamente misurato l'andamento dello scorrimento angolare o del tasso di scorrimento, mentre nel secondo caso la forzante varia nel tempo secondo una legge predefinita, normalmente di tipo sinusoidale, in regime oscillatorio.

#### 4.2.1.1 PROVE IN REGIME CONTINUO

A seconda della particolare proprietà del materiale che si intende misurare, viene scelto il tipo e la legge di variazione del momento di forzante da applicare.

Una prova di *creep* prevede l'applicazione di una sollecitazione costante,  $\sigma_0$  o  $\tau_0$ , misurando il corrispondente andamento della deformazione nel tempo ed è, normalmente, seguita da una fase di recupero nella quale viene rimosso il carico e monitorato il progressivo recupero della deformazione. La risposta deformativa di un materiale viscoelastico sotto l'azione di un carico costante può assumere una delle forme descritte (vedi §4.1.3), e una prova di *creep* consente di ricavare direttamente la deformabilità  $J(t)$  definita come:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} \quad (4-14)$$

dimensionalmente espressa in  $[\text{Pa}^{-1}]$  e corrispondente all'inverso della rigidità  $S(t)$ :

$$S(t) = \frac{\tau_0}{\gamma(t)} = \frac{1}{J(t)} \quad (4-15)$$

Una prova di rilassamento consiste, invece, nel sottoporre il materiale ad una deformazione unitaria costante nel tempo. Il termine rilassamento si deve alla progressiva distensione nel tempo che in tali condizioni si verifica nel materiale, causata da un continuo processo di adattamento strutturale che si instaura in conseguenza delle proprietà viscoelastiche del materiale.

Una prova di rilassamento consente di ricavare il modulo di rilassamento definito come:

$$E(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma_0} \quad (4-16)$$

in genere non coincidente con il modulo  $S(t)$  ottenuto dalla prova di *creep*. Un'ulteriore modalità in regime continuo è rappresentata, infine, dalla prova eseguita in controllo del gradiente di deformazione  $d\gamma/dt$ .

---

Con questo tipo di prova è possibile misurare la viscosità del materiale, imponendo una certa velocità di deformazione costante nel tempo fino al raggiungimento delle condizioni di stazionarietà (flusso a regime), a seguito della quale si procede misurando la sollecitazione necessaria per mantenere il flusso a quella velocità. La viscosità si ricava dalla legge di Newton (4-5).

Per alcuni materiali non sempre è possibile ottenere condizioni di flusso stazionario. Per i bitumi, ad esempio, tale condizione si verifica quando non si abbiano temperature sufficientemente elevate. In tali casi è possibile comunque risalire alla viscosità tramite metodi di misura indiretti.

#### 4.2.1.2 PROVE IN REGIME OSCILLATORIO

Come visto, normalmente quando per prove in regime variabile si intendono prove di tipo oscillatorio, che consistono nel sottoporre il campione ad una sollecitazione o ad una deformazione che varia nel tempo secondo una legge armonica. La sollecitazione e la corrispondente deformazione, ad esempio, possono essere definite come:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ \gamma = \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta) \end{cases} \quad (4-17)$$

dove:

$\tau_0$  = ampiezza di oscillazione della tensione

$\omega$  = pulsazione (pari alla frequenza a meno del fattore  $2\pi$ )

$\gamma_0$  = ampiezza della deformazione

$\delta$  = angolo di fase

A causa delle proprietà viscoelastiche del bitume, la deformazione oscilla con la stessa frequenza della sollecitazione ma con un ritardo rappresentato dall'angolo di fase  $\delta$ , avente valori compresi tra 0 e  $\pi/2$  e rappresentativi del rapporto tra le componenti reversibili e viscosi: al valore 0 corrisponde una condizione di perfetta elasticità mentre in corrispondenza di  $\delta=\pi/2$  il materiale si comporta come un fluido viscoso ideale.

Sfruttando la proprietà dei numeri complessi di potersi scrivere come:

$$C = C_0 (\cos \omega t + \text{sen} \omega t) = C_0 e^{i\omega t} \quad (4-18)$$

sforzo e deformazione possono esprimersi nella forma:

$$\begin{cases} \gamma^*(t) = \gamma_0 e^{i\omega t} \\ \tau^*(t) = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} \end{cases} \quad (4-19)$$

Il modulo complesso  $G^*$ , definito come rapporto tra sforzo e deformazione, diviene:

$$G^* = \frac{\tau^*(t)}{\gamma^*(t)} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i(\omega t + \delta) - \omega t} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i\delta} \quad (4-20)$$

Nota la sollecitazione applicata, una volta misurata la deformazione è quindi possibile calcolare il modulo complesso  $G^*$ :

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (4-21)$$

Definito complesso perché rappresentabile nella forma:

$$G^* = G' + iG'' \quad (4-22)$$

Dove la parte reale  $G'$ , detta modulo di restituzione elastica (*storage modulus*), rappresenta la componente in fase alla sollecitazione del modulo complesso, mentre la parte immaginaria  $G''$ , definita modulo di dissipazione viscosa, costituisce la componente in opposizione di fase (*loss modulus*).

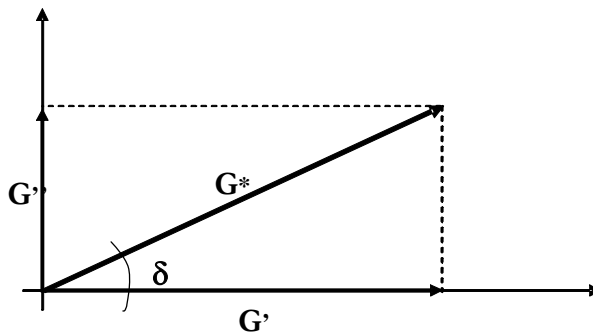


Figura 4-5 - Scomposizione del modulo complesso  $G^*$  sul piano complesso

Questi termini, a volte, sono erroneamente interpretati, rispettivamente, come modulo elastico e modulo viscoso; in realtà la componente elastica della risposta rappresenta soltanto una parte del modulo d'immagazzinamento e, la risposta viscosa una parte del modulo di dissipazione.



Oltre alla risposta elastica e a quella viscosa, la maggior parte dei materiali viscoelastici esibisce una significativa risposta elastica ritardata che viene riflessa in entrambi i parametri sopra indicati.

Dal grafico di Figura 4-5, dove sono riprodotte le componenti di  $G^*$  sul piano complesso, si ricava:

$$\begin{cases} G' = G^* \cdot \cos \delta \\ G'' = G^* \cdot \sin \delta \\ G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \end{cases} \quad (4-23)$$

Considerazioni analoghe possono essere fatte nel caso si operi in controllo di deformazione anziché di sforzo.

La realizzazione di prove in regime oscillatorio consente di effettuare un'analisi dinamica del comportamento del legante, che simula le condizioni di esercizio dovute al transito di veicoli.

La scelta di indagare un legante in capo lineare consente di mantenere, a frequenza costante, una deformazione proporzionale alla tensione applicata, e vale la condizione che  $\tau_0/\gamma_0$  sia costante.

## 4.2.2 Configurazioni di prova

Durante la realizzazione di prove reologiche risulta particolarmente importante individuare la configurazione che meglio si addice alle condizioni in cui la misura viene eseguita, con particolare attenzione alle condizioni che possono influenzare la fattibilità della misura stessa quali, ad esempio, la temperatura. Vengono di seguito passate in rassegna le principali configurazioni di laboratorio e le relative condizioni di applicazione a cui si ricorre per le analisi sperimentali.

### 4.2.2.1 PROVE DI MISURA DELLA VISCOSITÀ

#### CONDIZIONI AL CONTORNO

Uno dei ruoli fondamentali nell'analisi della viscosità riguarda la sollecitazione scelta per indagare le proprietà reologiche del materiale, al variare della quale emergono diverse caratteristiche dalla relativa prova reologica.

Si parla, in particolare, di sollecitazione assiale, flessionale e di taglio, distinguendo ancora, come visto sopra, tra sollecitazione costante nel tempo e sollecitazione armonica.

Per i fini del presente lavoro si fa particolare riferimento alla sollecitazione a taglio. La modellazione matematica del fenomeno fisico di un fluido che si deforma sotto l'azione di una forza di taglio conduce, come visto precedentemente, ad equazioni complesse, difficilmente risolvibili nella loro forma generale. Il problema può essere, però, ricondotto ad una soluzione matematica accettabile qualora le condizioni di prova soddisfino determinate restrizioni, rappresentate da condizioni al contorno che consentano di restare all'interno della regione lineare, per la quale è valida la legge di Newton (4-5).

Si assume, in particolare, che il comportamento viscoso sia originato da un flusso laminare indotto dal gradiente di deformazione di taglio applicato. Inoltre, visto l'ostacolo causato da tale tipo di flusso agli scambi degli elementi di volume tra le diverse lamelle, è importante che i campioni siano omogenei. Dovranno, inoltre, valere le ipotesi semplificative di seguito indicate.

#### Condizione di flusso stazionario

Nella legge di Newton la sollecitazione di taglio applicata è correlata al gradiente di deformazione: per sollecitazione di taglio si intende quella appena sufficiente a mantenere un andamento di flusso stazionario, mentre l'energia addizionale richiesta per accelerare o decelerare il flusso non potrà essere presa in considerazione nell'ambito di tale equazione.

#### Ipotesi di mezzo continuo

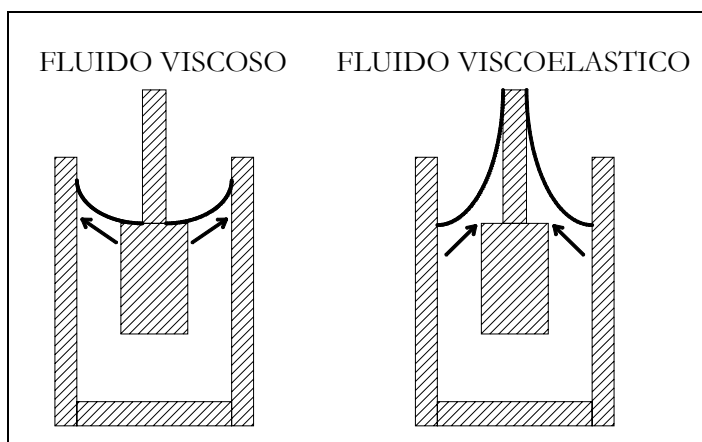
L'analisi reologica può essere condotta sia a scala microscopica, descrivendo la risposta del materiale in funzione del comportamento fisico-chimico delle fasi componenti, oppure a livello macroscopico, assumendolo come mezzo continuo. L'ipotesi di mezzo continuo presenta un'apparente contraddizione rispetto agli scopi della reologia, assumendo che il mezzo sia continuo ed omogeneo per indagare sistemi polifase. Di fatto, l'ipotesi di mezzo continuo cade in difetto solo quando le grandezze degli elementi strutturali che compongono il sistema divengono comparabili con quelle dei contorni degli elementi che circoscrivono il moto.

Ovviamente, analizzando sistemi polifase è necessario assicurarsi che nel corso della prova non si determini alcuna separazione di fase. In tale caso, infatti, il flusso viscoso sarebbe presente solo all'interno di un sottilissimo strato liquido di spessore non noto ed i risultati della prova non potrebbero essere sottoposti ad alcun tipo d'interpretazione reologica.

---

Assenza di elasticità

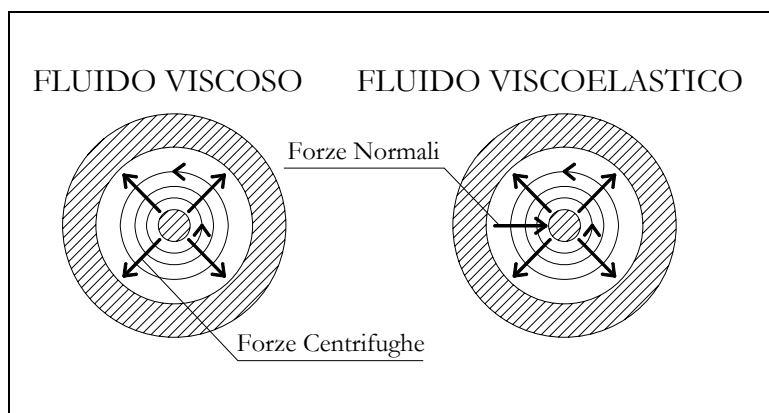
Un fluido Newtoniano ed uno viscoelastico mostrano un comportamento completamente diverso quando, disposti all'interno di un recipiente, vengono mescolati velocemente per mezzo di un elemento rotante. Mentre il fluido Newtoniano, a seguito delle forze centrifughe che si generano, è spinto verso l'esterno e verso l'alto contro le pareti del recipiente, il fluido viscoelastico, si solleva lungo l'asta dell'elemento rotante contro la forza di gravità (vedi Figura 4-6).



**Figura 4-6: Comportamento di un fluido newtoniano ed uno viscoelastico quando mescolati velocemente**

Per comprendere tale fenomeno si immagini il flusso determinato dalla rotazione prodotta dall'elemento di miscelazione, come uno spostamento tra strati di fluido viscoelastico concentrici, disposti l'uno all'interno dell'altro, la cui velocità di rotazione sia decrescente dall'interno verso il bordo esterno del recipiente. Le molecole di fluido presenti all'interno dei singoli strati andranno via districandosi ed orientandosi nella direzione propria dello strato di appartenenza, ma, essendo queste le molecole viscoelastiche, si può assumere che quelle degli strati più esterni siano più allungate di quelle presenti in prossimità dell'elemento rotante. Una più alta libertà di allungamento significa, però, un più alto stato di energia dal quale le molecole tendono a fuggire; la sola via di fuga possibile per le molecole maggiormente estese dello strato più esterno è allora quella in direzione dell'asse rotante, spazio, questo, che diviene presto "affollato" costringendo le molecole stesse a sollevarsi verso l'alto lungo l'asta dello stesso elemento che ne aveva prodotto il moto.

La rotazione determina quindi, insieme alla sollecitazione di taglio agente lungo gli strati concentrici, una sollecitazione addizionale (sollecitazione normale), agente perpendicolarmente alla prima, che forza il fluido a sollevarsi lungo l'asta rotante (vedi Figura 4-7).



**Figura 4-7: Forze generate in un fluido viscoso ed in uno viscoelastico quando mescolati velocemente**

La viscoelasticità del fluido è, pertanto, la causa della forza normale che nel caso di prove di taglio, oltre a voler separare il cono dal suo piatto (o i due piatti paralleli), al crescere della velocità di rotazione richiama il liquido fuori dal gap e verso l'alto sul bordo esterno del cono. Questo fenomeno decreta la perdita di significato della prova.

Inoltre, mentre nei fluidi puramente viscosi l'energia totale fornita determina un flusso ben definito e si ha una conversione totale dell'energia di deformazione in energia termica, nei materiali viscoelastici una parte dell'energia di deformazione fornita viene immagazzinata elasticamente e soltanto dopo averne accumulato una certa quantità induce il flusso. In queste condizioni la viscosità, quale fattore di correlazione diretto tra la quantità nota di energia fornita ed il flusso risultante, non è più un coefficiente esatto e non può, quindi, essere applicata la legge di Newton.

Moltissimi materiali presentano sia una risposta viscosa che una risposta elastica alla sollecitazione di taglio o al gradiente di deformazione a taglio impressi. In particolare, tutti i fluidi risultano puramente viscosi e le relative componenti elastiche in condizioni di flusso possono considerarsi nulle in corrispondenza di gradienti di deformazione estremamente bassi. La situazione è completamente ribaltata nel caso in cui vengano applicati forti gradienti di deformazione.

Le proprietà di elasticità, caratteristiche dei fluidi viscoelastici, non possono essere eliminate, ma è possibile cercare delle condizioni di prova e, in modo più specifico, gradienti di deformazione a taglio sufficientemente bassi da rendere la risposta elastica poco significativa.

Per garantire l' idoneità delle misure sperimentali, occorre inoltre assicurare l' assenza di slittamenti durante l' applicazione della sollecitazione a taglio al materiale testato, oltre a garantire che non avvenga nessun cambiamento chimico o fisico del campione durante la prova, evitando l' ossidazione dello stesso insufflando nella camera che lo circonda un gas inerte.

#### PROVA DI TAGLIO ROTAZIONALE CON ACCOPPLAMENTO PIATTO-PIATTO

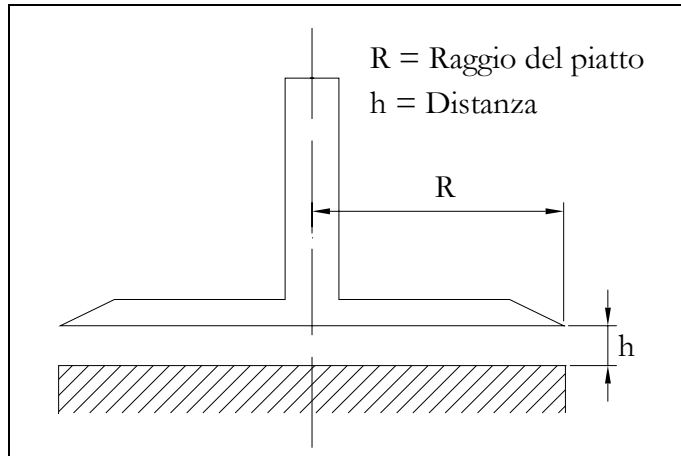
Lo strumento per la realizzazione di tale prova è generalmente costituito da un piatto inferiore fisso ed uno superiore a cui viene applicata la rotazione tramite l' albero motore (vedi Figura 4-8). Tale sistema è definito dalla distanza tra i piatti in posizione di misura, denominato raggio  $R$  o gap, la quale va opportunamente determinata in base al materiale da testare, considerando come criterio generale che  $h$  sia almeno tre volte più grande della massima dimensione delle particelle contenute nel provino al fine di non determinare interferenze.

In un sistema di questo tipo, la deformazione prodotta nel campione non è uniforme ma è funzione della distanza dall' asse di rotazione, e le grandezze di interesse possono essere calcolate, in termini di sforzi e deformazioni medie, noti il momento torcente applicato  $M_d$ , l' angolo di rotazione  $\phi$  e la velocità angolare  $\Omega$ , applicando le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \tau = A \cdot M_d \\ \gamma = M \cdot \phi \\ \dot{\gamma} = M \cdot \Omega \end{cases} \quad (4-24)$$

dove  $A$  ed  $M$  sono coefficienti definiti come:

$$\begin{cases} A = \frac{2}{\pi R^3} \\ M = \frac{R}{h} \end{cases} \quad (4-25)$$



**Figura 4-8 – Accoppiamento piatto-piatto**

*PROVA DI TAGLIO ROTAZIONALE CON ACCOPPIAMENTO PIATTO-CONO*

Il sistema per l'esecuzione di tale prova prevede la sostituzione del piatto superiore da un tronco di cono. Mentre le equazioni per la determinazione di sforzi e deformazioni sono analoghe al caso dell'accoppiamento piatto-piatto (4-22), i parametri A e M variano in modo da tener conto della nuova geometria del sistema, definita dal raggio esterno  $R_k$  e dall'angolo di apertura  $\alpha$  secondo le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} A = \frac{2}{2\pi R_k^3} \\ M = \frac{1}{\alpha} \end{cases} \quad (4-26)$$

Un accoppiamento di questo tipo consente di ottenere uno stato di deformazione uniforme, indipendente dalla distanza dall'asse, ma non permette la regolazione del gap, limitando le possibilità di prova a materiali aventi particelle di dimensioni contenute entro valori non eccessivi.

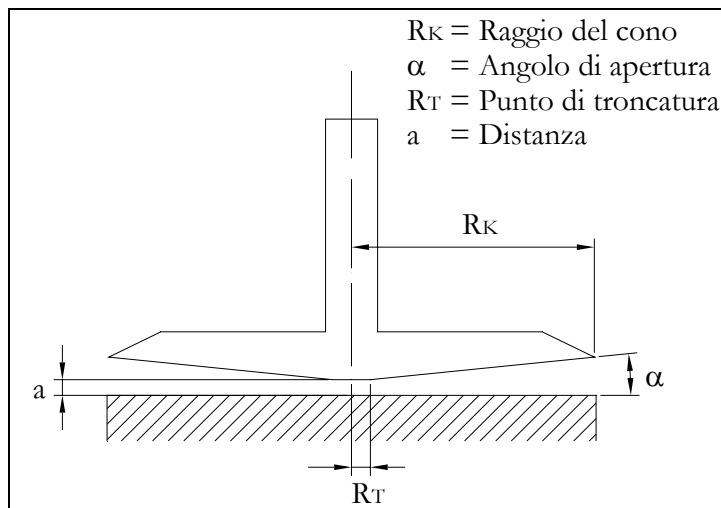


Figura 4-9 - Schema dell'accoppiamento piatto-cono

*PROVA A CILINDRI COASSIALI*

Il sistema è costituito da un cilindro interno di raggio  $R_i$ , detto rotore, e da un involucro cilindrico esterno di raggio  $R_a$  (vedi Figura 4-10). Il materiale da testare viene posto nell'intercapedine, dove viene sollecitato dalla rotazione del rotore. Un sistema di questo tipo risulta idoneo ad eseguire prove su materiali caratterizzati da una consistenza ridotta, quali i bitumi alle elevate temperature, che non sono in grado di mantenere una forma propria.

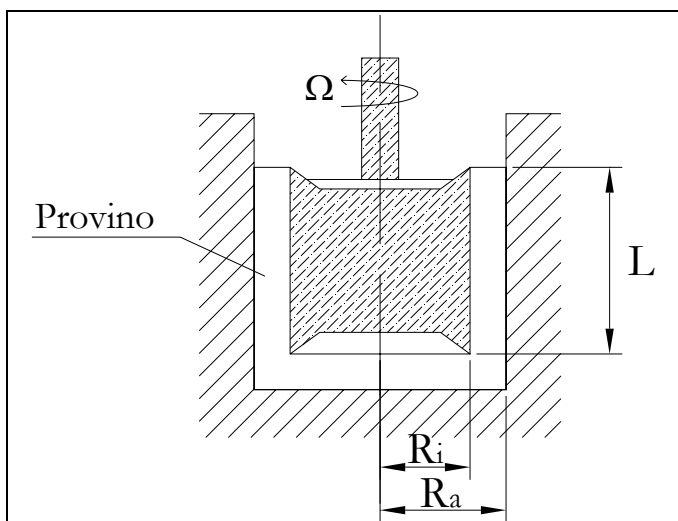


Figura 4-10: Sistema di misura a cilindri coassiali

Il gradiente di deformazione sulla superficie del rotore è dato da:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 2\Omega \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \\ \Omega = \frac{2\pi n}{60} \end{cases} \quad (4-27)$$

dove  $\Omega$  rappresenta la velocità angolare, espressa in minuti<sup>-1</sup>, ed introducendo il rapporto tra i raggi  $\delta = R_a/R_i$  ed il parametro geometrico  $M$  si ottiene:

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \right) \Omega = M \cdot \Omega \quad (4-28)$$

Le restanti grandezze di riferimento, rappresentate dalla tensione  $\tau_r$  ad una distanza  $r$  dall'asse di rotazione e la deformazione  $\gamma$  possono essere calcolate come:

$$\begin{cases} \tau_r = \frac{M_d}{2\pi L \cdot r \cdot Cl} \\ \gamma = M \cdot \varphi \end{cases} \quad (4-29)$$

dove  $M_d$  è il momento torcente,  $L$  è la lunghezza effettiva di immersione del rotore,  $Cl$  un fattore di correzione del momento torcente valutato sperimentalmente e  $\varphi$  l'angolo di rotazione espresso in radianti.

#### 4.2.2.2 PROVA DI CREEP

Il termine *creep*, che letteralmente significa “scorrimento viscoso”, viene usato per indicare una prova in cui un certo materiale viene sollecitato da una tensione costante nel tempo, per effetto della quale il campione subisce una lenta deformazione che ne determina un cambiamento di forma.

Realizzare una prova di *creep* rispettando la condizione di viscoelasticità lineare significa fare in modo che la risposta deformativa sia direttamente proporzionale alla sollecitazione applicata. La scelta di sollecitazioni eccessive, oltre a determinare deformazioni non proporzionali, porta ad acquisire dati fortemente influenzati dall'insieme dei parametri di prova scelti e dalla geometria del sistema di misura, col risultato che questi non possono considerarsi assoluti, ma si limitano a consentire il confronto tra diversi campioni sottoposti alle medesime condizioni.



Nel caso di viscoelasticità lineare, la deformazione misurata nel corso di una prova di *creep* risulta correlata alla sollecitazione applicata attraverso la seguente espressione:

$$\gamma(t) = J(t) \cdot \tau \quad (4-30)$$

dove

$$J(t) = \gamma(t) / \tau \quad (4-31)$$

viene definito *creep compliance* e costituisce una costante caratterizzante il grado del materiale, all'aumentare della quale risulta più agevole la deformazione del campione ad opera di una certa sollecitazione. Per definizione, fin quando il campione è sottoposto a condizioni di prova all'interno della regione viscoelastica lineare il *compliance* risulta indipendente dalla sollecitazione applicata. Sfruttando tale proprietà vengono comunemente definiti i limiti di tale regione, entro cui è possibile analizzare i fluidi viscoelastici con prove di *creep* e di rilassamento in modo piuttosto semplice.

Sottoponendo, all'interno della regione di viscoelasticità lineare, un campione a diverse prove con sollecitazioni di diversa entità e costanti durante la fase di *creep*, si ottengono diverse curve deformazione-tempo. Dividendo i valori di deformazione per le sollecitazioni corrispondenti si ottengono i relativi dati di *compliance*, che diagrammati in funzione del tempo forniscono curve di *compliance* sovrapposte. Le sollecitazioni che mantengono i campioni entro il proprio range viscoelastico lineare sono, generalmente, contenute entro l'1%.

Applicando sollecitazioni molto più grandi, l'inclinazione della curva deformazione-tempo, che esprime il gradiente di deformazione a taglio, aumenta in modo significativo a causa della riduzione di viscosità. Come conseguenza, la deformazione cresce più che proporzionalmente alla sollecitazione e le curve di *compliance* iniziano ad allontanarsi l'una dall'altra, indicando che le condizioni di prova scelte forniscono dati di viscosità non lineare.

Mentre il valore di *compliance* risulta utile per il controllo della bontà del rispetto della condizione di viscoelasticità lineare, nell'analizzare i dati ottenuti da una prova di *creep* si fa generalmente riferimento al modulo di rigidità, definito come:

$$S(t) \equiv \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (4-32)$$

dove:

$S(t)$  è il modulo di rigidità in funzione del tempo

$t$  è il tempo di carico

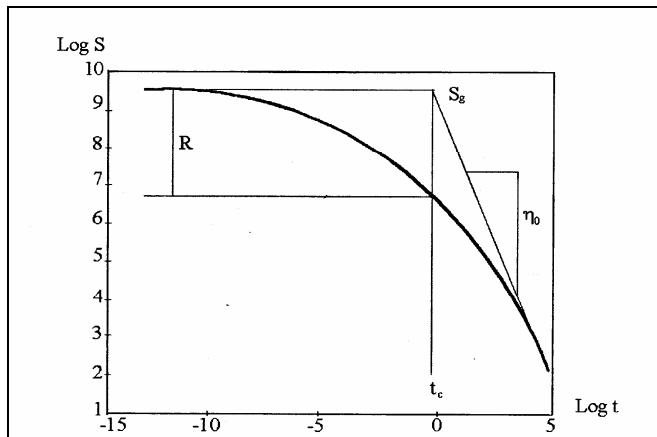
$\sigma_0$  è la sollecitazione monoassiale applicata

$\varepsilon(t)$  è la deformazione monoassiale risultante al tempo  $t$ .

Il modulo di rigidezza rappresenta l'inverso del *compliance* di *creep* monoassiale  $D(t)$ , a cui risulta direttamente correlata anche  $J(t)$ . Tra gli studiosi di reologia e nella letteratura relativa alla teoria viscoelastica, è pratica comune impiegare il *creep compliance* per la caratterizzazione della risposta di *creep*; il termine modulo di rigidezza, coniato da Van der Poel è stato conservato per dare continuità alla letteratura tradizionale.

Un tipico diagramma di rigidezza di *creep*, rappresentato in Figura 4-11, risulta funzione del tempo di carico su scala bilogarithmica. Per tempi di carico molto brevi la rigidezza di *creep* tende ad un valore limite, detto modulo vetroso  $S_g$ , che assume un valore prossimo ai 3 GPa per tutti i bitumi, derivando dalla rigidezza della catena carbonio-carbonio di cui le molecole dei bitumi sono ampiamente costituite.

All'aumentare del tempo di carico il modulo diminuisce con velocità costante, finché l'inclinazione del diagramma, su scala bilogarithmica, tende ad un valore negativo. A questo punto il bitume si comporta come un semplice fluido Newtoniano ed il gradiente di deformazione è direttamente proporzionale alla sollecitazione applicata. Per questa ragione, l'asintoto tracciato in corrispondenza di questa parte della curva di rigidezza viene definito asintoto viscoso [4-7]. Se, a partire dal modulo vetroso, si traccia l'asintoto orizzontale fino ad incontrare quello di viscosità, l'inclinazione su scala bilogarithmica della curva di *creep* in corrispondenza di tale punto risulta sempre prossima a  $45^\circ$ .



**Figura 4-11: Rappresentazione della curva di rigidezza di *creep* di un bitume rispetto al tempo**

Nel processo deformativo che subisce un corpo sottoposto ad un carico costante, in generale, si possono individuare tre differenti stadi, che si concludono con la rottura del campione. Applicando all'istante  $t=0$  un certo carico e mantendolo costante, si produce una deformazione elastica immediata (vedi Figura 4-12) seguita, nei primi istanti di

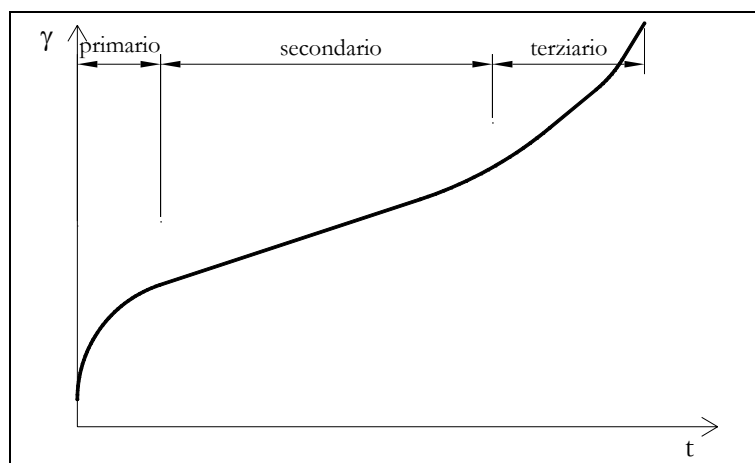


Figura 4-12 - Schematizzazione dei diversi stadi di *creep*

Tale comportamento, definito *creep* primario o transiente, può durare all'infinito alle basse temperature, mentre per temperature elevate la continua diminuzione del gradiente di deformazione giunge ad essere indipendente sia dal tempo che dalla deformazione stessa, definendo il *creep* secondario o stadio stabile. Successivamente a questo secondo stadio, con il proseguimento della sollecitazione costante, può seguire un terzo stadio, detto *creep* terziario, nel quale la velocità di deformazione torna a crescere nel tempo sempre più rapidamente sino alla rottura. Nel caso dei leganti bituminosi le modalità con cui possono manifestarsi i diversi stadi dipendono essenzialmente dalla temperatura di prova e dalla durata del tempo di carico. Alla fine della fase di *creep*, dopo la rimozione del carico può seguire un fase, detta di *recovery*, durante la quale viene monitorato il recupero graduale della deformazione totale, valutando l'entità delle componenti elastiche e viscosi del materiale per le condizioni di prova.

La scelta della durata delle fasi di *creep* e *recovery* risulta condizionare la significatività dei dati acquisiti dalla prova, a causa della diversa entità del processo deformativo che le molecole di bitume subiscono durante la fase di carico, e quindi del diverso grado di accuratezza con cui possono essere evidenziate le varie componenti della deformazione.

La Figura 4-13 [4-7] mostra un esempio di andamento delle deformazioni al variare della durata del tempo di carico, all'aumentare del quale le componenti viscosi diventano più elevate ed il materiale si porta progressivamente verso le condizioni di flusso, caratterizzato da velocità di deformazione costante. Tale aspetto influenza sia la deformazione elastica ritardata che la deformazione permanente raggiunta nelle condizioni di lungo periodo.

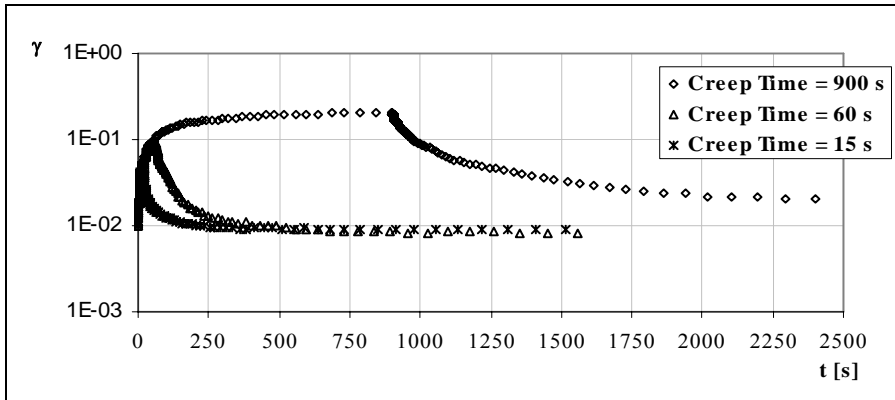


Figura 4-13 – Esempio di diagramma deformazione-tempo durante la fase di carico

La durata della fase di *recovery* deve, invece, essere sufficientemente grande da consentire il compiersi del processo di recupero della deformazione, verificato il quale il gradiente di deformazione diventa nullo (vedi Figura 4-14) [4-7].

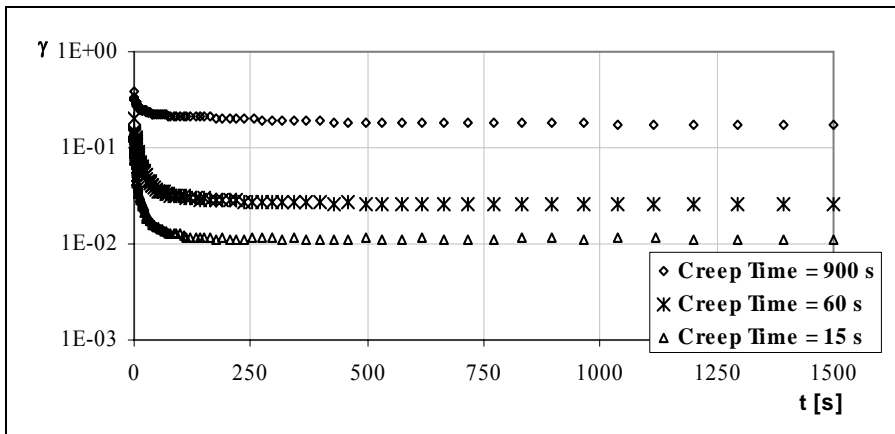


Figura 4-14 – Esempio di andamento della deformazione nella fase di *recovery* al variare del tempo di carico

L'andamento della deformazione nella fase di *recovery* consente di analizzare direttamente il comportamento elastico complessivo del materiale, ottenendo informazioni importanti per la caratterizzazione della tendenza all'ormaiamento che si verificherà in fase di esercizio della pavimentazione. In particolare, l'analisi delle deformazione effettiva normalizzata rispetto alla tensione applicata  $J(t)$ , definita dalla (4-28) e distinguibili nelle due componenti  $J_r$  e  $J_p$ , consente di quantificare la risposta del materiale in termini di componenti reversibile ed irreversibile della deformazione (vedi Figura 4-15).

In particolare,  $J_p$  rappresenta la deformabilità permanente che si registra al termine della fase di *recovery*, funzione dei fenomeni dissipativi viscosi che avvengono durante la sollecitazione, mentre  $J_r$  costituisce la deformabilità reversibile, legata alla componente elastica. Quest'ultima componente assume particolare rilevanza nel caso di bitumi modificati.

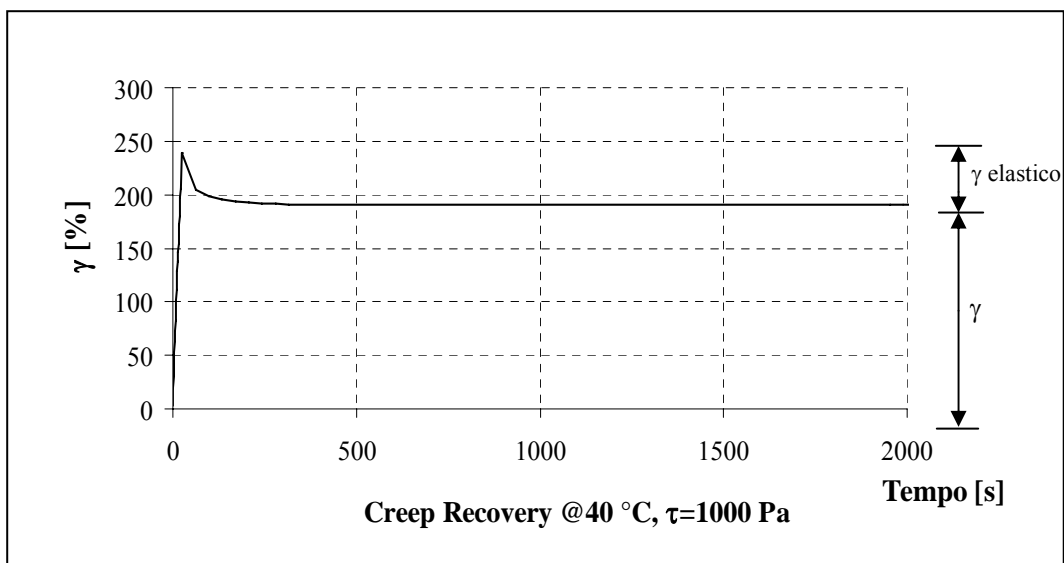


Figura 4-15 – Componenti della deformabilità, reversibile e permanente, al termine di una fase di *recovery*

#### 4.2.2.3 PROVE DI TRAZIONE DIRETTA

La configurazione per le prove di trazione diretta, basata su di un impianto teorico estremamente semplice, presenta alcune difficoltà di esecuzione pratica legate all'attuazione di una condizione di trazione pura, in cui la sollecitazione risulta perfettamente allineata all'asse al fine di escludere l'insorgere di un momento flettente. Per l'esecuzione delle prove di trazione diretta viene utilizzata l'apparecchiatura *Direct Tension* (vedi capitolo 5).

La prova viene generalmente eseguita imponendo un gradiente di deformazione normale  $d\varepsilon/dt$  costante nel tempo, e determinando la tensione e la deformazione a rottura dall'andamento del diagramma sforzo-deformazione.

#### 4.2.2.4 PROVE DI FLESSIONE

Nelle prove di flessione si inducono tensioni normali su di un campione prismatico, detto trave, sottoposto ad uno o più carichi. A seconda del numero di punti di applicazione di carico e delle reazioni vincolari, la configurazione a flessione viene definita su due punti, tre punti, ecc.

Nel caso più semplice dato da una trave semplicemente appoggiata caricata verticalmente in mezzeria, quindi di flessione su tre punti, la forza  $P$  origina un momento flettente in mezzeria pari a:

$$M = \frac{P \cdot l}{4} \quad (4-33)$$

dove  $l$  è l'interasse tra i due appoggi, e una volta misurata la deflessione  $\delta(t)$  si ricava il modulo di rigidità come

$$\delta = \frac{P \cdot l^3}{48EJ} \quad (4-34)$$

Tale configurazione viene impiegata esclusivamente per prove a basse temperature, quando con buona approssimazione il materiale si comporta come un solido e sono, quindi, soddisfatte le ipotesi della teoria dell'elasticità che validano l'espressione (4-31).

### 4.3 Analisi dinamica e principio di equivalenza Tempo - Temperatura

La viscoelasticità viene comunemente studiata tramite oscillazioni forzate, ricorrendo alla tecnica denominata *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA), secondo la quale il campione viene sottoposto ad una sollecitazione oscillatoria variabile con legge sinusoidale del tipo:

$$\tau = \tau_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4-35)$$

la quale origina, come anticipato (vedi §4.2.1.2), una deformazione oscillatoria avente uguale frequenza ma, generalmente, diversa fase:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (4-36)$$

Il comportamento viscoelastico del materiale ritarda, infatti, la risposta deformativa del sistema in oscillazione forzata rispetto alla tensione applicata, e l'entità del ritardo viene quantificata dall'angolo di fase  $\delta$ .

Come visto, il modulo complesso  $G^*$  può essere scomposto nel modulo di restituzione elastica  $G'$  e nel modulo di dissipazione viscosa  $G''$ , legati all'angolo di fase secondo l'espressione:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (4-37)$$

---

In campo oscillatorio viene introdotto un nuovo parametro di viscosità, detto viscosità complessa, definito come:

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} \quad (4-38)$$

che rimane, coerentemente, un rapporto tra tensione e gradiente di deformazione [4-5].

### 4.3.1 Rappresentazione della curva maestra e dei fattori di traslazione

Nell'analizzare i dati reologici ottenuti mediante l'analisi meccanica dinamica, è necessario costruire curve maestre che evidenzino l'andamento di una grandezza relativa al comportamento del bitume, lungo tutta la scala utile delle frequenze. Poiché nessuna macchina riesce a coprire un intervallo così vasto, l'unica via possibile per ottenere una curva maestra è quella di sfruttare il principio di equivalenza tempo-temperatura, o metodo delle variabili ridotte, seguendo i seguenti passaggi:

- raccogliere dati sperimentali su un intervallo di frequenze a varie temperature;
- scegliere una temperatura di riferimento;
- traslare orizzontalmente le curve relative alle altre temperature fino ad ottenere una curva con caratteristiche di continuità di secondo grado.

L'intervallo di frequenze da adottare corrisponde generalmente a quello consentito dall'apparecchiatura, mentre è preferibile mantenere ridotte differenze tra le temperatura di prova (5-10°C) in modo da avere una zona di sovrapposizione tra porzioni di curva piuttosto estese, in modo da evitare errori durante la costruzione. La temperatura di riferimento è quella per la quale si vogliono determinare le caratteristiche della dipendenza del bitume dalla frequenza di carico.

Particolare importanza è assunta dalla traslazione in orizzontale (*shifting*) delle curve relative a temperature diverse da quella di riferimento, la cui entità viene definita dai cosiddetti *shift factors*  $a(T)$ , funzioni esclusivamente della temperatura.

Normalmente, il grafico di una curva maestra è accompagnato dal grafico di  $a(T)$  in funzione della temperatura (vedi Figura 4-16) [4-6].

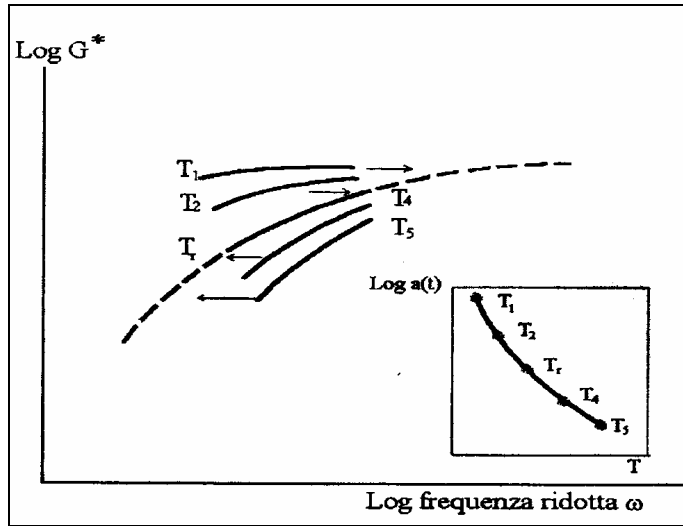


Figura 4-16: Esempio di curva maestra accompagnata dal grafico dello shift factor

Tracciare una curva maestra sulla base dei dati ricavati dinamicamente significa, quindi, diagrammare una o più variabili viscoelastiche in funzione della frequenza. Un diagramma a cui si fa ampio ricorso è quello in cui il modulo complesso  $G^*(\omega)$ , e l'angolo di fase  $\delta$  sono rappresentati su scala bilogarithmica in funzione della frequenza. In Figura 4-17 sono riportati gli andamenti qualitativi di tali parametri relativamente al caso di un bitume [4-6].

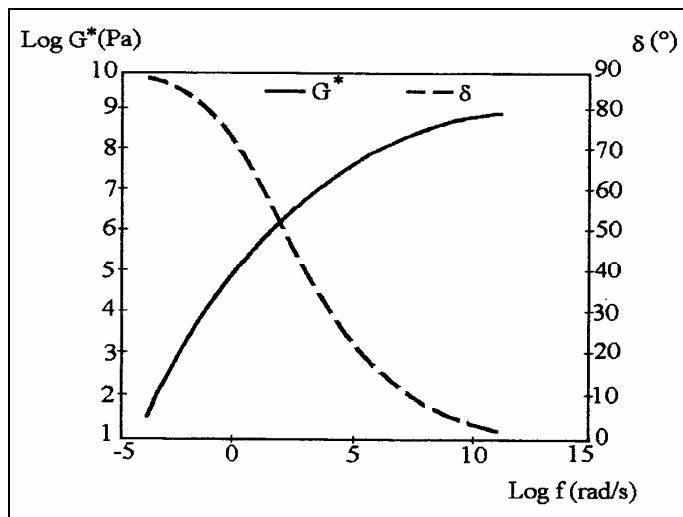


Figura 4-17: Andamento del modulo complesso e dell'angolo di fase di un bitume in funzione della frequenza

Alle alte frequenze, il modulo complesso tende ad un valore limite detto modulo vetroso in condizioni di taglio.



Esso è pari circa ad un terzo del modulo di rigidità monoassiale, ossia circa 1 GPa. Per le basse frequenze, l'inclinazione del diagramma bilogarithmico del modulo complesso rispetto alla frequenza tende a  $45^\circ$ , indicando il raggiungimento del flusso viscoso ed il carattere di fluido Newtoniano del bitume. Alle frequenze intermedie, infine, il bitume presenta una trasformazione graduale da fluido semplice a solido vetroso. In questa regione, situata intorno all'intersezione tra l'asintoto vetroso e quello viscoso, la maggior parte della deformazione è di tipo elastico ritardato. La curva maestra del modulo complesso in funzione della frequenza risulta essere, in definitiva, l'immagine speculare della curva di rigidità di *creep*, dalla quale differisce per un leggero spostamento verso il basso dovuto al diverso valore assunto dai due moduli di taglio e monoassiale.

Esaminando ora il comportamento dell'angolo di fase in funzione della frequenza, si osserva che la forma del diagramma è quella di una "esse"; in particolare, l'angolo di fase tende a  $90^\circ$  in corrispondenza delle frequenze più basse e, a  $0^\circ$  in corrispondenza di frequenze molto alte. Da un esame dei valori assunti da tale grandezza si nota una proporzionalità diretta tra l'angolo di fase  $\delta$ , ottenuto da prove meccaniche di tipo dinamico, e l'inclinazione della curva di rigidità di *creep*, rappresentata su scala bilogarithmica in corrispondenza dei tempi  $1/\omega$ , con la frequenza è espressa in Hertz. Questa conversione può essere usata ogni qual volta si esegua un confronto tra i dati di prove dinamiche e quelli di prove di *creep* [4-2].

### 4.3.2 Conversione di funzioni viscoelastiche

Ai fini della costruzione di un modello di comportamento del bitume a fronte di condizioni di sollecitazione diverse, per la quale si deve procedere alla stima di moduli viscoelastici diversi mediante differenti prove meccaniche, risulta necessario saper convertire le varie funzione viscoelastiche tra loro. Nel caso dei materiali reali non esistono, in generale, espressioni esatte in forma chiusa che consentano di ricavare una funzione viscoelastica da un'altra, e si rende, quindi, necessario l'impiego di metodi numerici o di equazioni approssimate. Quest'ultimo tipo di approccio risulta estremamente più pratico e quindi raccomandato.

La trattazione rigorosa della conversione delle proprietà di taglio in proprietà assiali, richiede la conoscenza del modulo di taglio e del coefficiente di Poisson  $\nu$ .

Per i bitumi, per i quali si assume comunemente l'ipotesi di incompressibilità, viene adottato un valore del coefficiente di Poisson pari a 0.5 che conduce alla seguente equazione approssimata che lega la rigidità assiale alla rigidità di taglio:

$$E(t) = 2(1 + \nu) \cdot G(t) = 3G(t) \quad (4-39)$$

Analogamente il modulo dinamico assiale  $E^*(\omega)$  è approssimativamente pari a tre volte il modulo dinamico di taglio  $G^*(\omega)$ . Esiste, inoltre, una simile relazione approssimata anche tra il *compliance* di *creep* assiale  $D(t)$  e quello di taglio  $J(t)$  espresso come:

$$D(t) = \frac{J(T)}{[2(1+\nu)]} = \frac{J(t)}{3} \quad (4-40)$$

la quale, unitamente al concetto di rigidità indicato in precedenza, conduce ad una relazione approssimata che descrive la rigidità stessa, così come definita da Van der Poel, in termini di *compliance* di taglio e di modulo dinamico:

$$\begin{cases} S(t) = \frac{1}{D(t)} = \frac{3}{J(t)} \\ S(t)_{t \rightarrow \frac{1}{\omega}} \approx E^*(\omega) = 3G^*(\omega) \end{cases} \quad (4-41)$$

Considerando la sola sollecitazione di taglio è possibile ricavare, sulla base di quanto indicato sopra, la seguente relazione tra il modulo complesso trovato in regime oscillatorio e la deformabilità trovata in regime continuo:

$$G^*(\omega)_{t \rightarrow 1/\omega} \approx \frac{1}{J(t)} \quad (4-42)$$

Oltre alle relazioni esposte, particolarmente diffuse nell'ambito della caratterizzazione reologica dei bitumi, esistono molte altre formule approssimate che correlano le diverse funzioni viscoelastiche.

I risultati delle prove di taglio dinamiche sono generalmente espressi in termini di modulo complesso e di angolo di fase, mentre il *Bending Beam Rheometer* fornisce dati espressi in termini di *compliance* di *creep* monoassiale, invertito al fine di ottenere il modulo di rigidità. Risulta, quindi, evidente come la rigidità flessionale ottenuta dal *Bending Beam Rheometer* all'istante  $\bar{t}$ , sia approssimativamente pari a tre volte il modulo di taglio dinamico quando la frequenza, espressa in Hertz, è uguale a  $\bar{t}^{-1}$ . L'ipotesi dell'uguaglianza dei moduli di trazione e di flessione è rigorosa soltanto se le proprietà assiali del materiale in tensione e in compressione si equivalgono. In molti materiali ciò accade per deformazioni inferiori a qualche per cento. Nel caso del bitume tale ipotesi può sempre ritenersi valida in quanto può essere testato a flessione solo quando è allo stato rigido e le deformazioni sono, quindi, molto piccole.

### 4.3.3 Il modello viscoelastico lineare PSU

Tale modello è stato definito nell'ambito delle attività del progetto SHRP, approfondite nel Capitolo 5, le quali sono state indirizzate alla definizione di un modello matematico in grado di riprodurre, per tutte le temperature e le frequenze che si verificano in fase di esercizio, il comportamento del bitume sottoposto a prove di *creep* e a prove in oscillatorio.

#### 4.3.3.1 DEFINIZIONE DEL LIMITE LINEARE

Per definizione, come illustrato precedentemente, si ricade in campo lineare se risulta soddisfatta in ogni punto la condizione  $\tau/\gamma = \text{costante}$ . Nel modello PSU, per determinare il limite viscoelastico lineare si realizza una "spazzata" di deformazione (*strain sweep*) alla frequenza di 10 rad/s in corrispondenza di ciascuna temperatura di prova. Analizzando la curva deformazione-modulo complesso ottenuta si definisce, quindi, il limite nel punto in cui il valore di  $G^*$  misurato scende al 95% del valore massimo ottenuto (vedi Figura 4-18). È buona norma pratica eseguire le prove con tensioni non superiori al 75% di quella corrispondente al limite lineare.

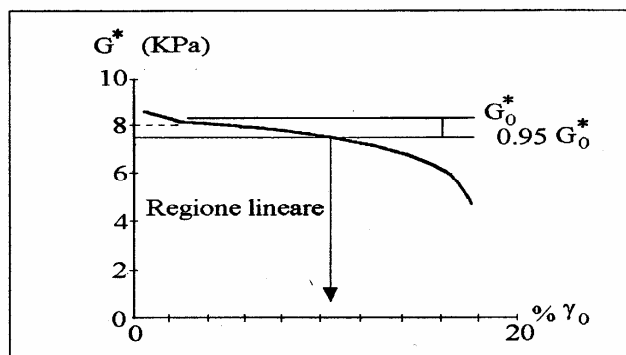


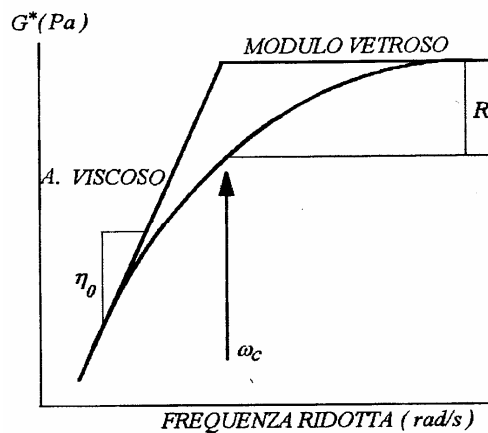
Figura 4-18: Esempio di strain sweep impiegata per determinare la regione lineare

#### 4.3.3.2 PARAMETRI CARATTERISTICI DELLA CURVA MAESTRA

Sono necessari quattro parametri principali (vedi Figura 4-20) per caratterizzare completamente le proprietà viscoelastiche lineari di qualunque bitume:

- *Modulo vetroso (glassy modulus)* – valore a cui tende il modulo complesso o il modulo di rigidità alle basse temperature e alle alte frequenze di carico o per brevi tempi di carico. È un valore costante per ogni tipo di bitume ed è circa pari ad 1 GPa. L'angolo di fase, quando il bitume s'avvicina al modulo vetroso, tende a zero.

- *Viscosità stazionaria o newtoniana  $\eta_0$*  – è approssimativamente il valore a cui tende la viscosità dinamica  $\eta^*$ , quando l'angolo di fase si avvicina a  $90^\circ$ . La zona di viscosità newtoniana è raggiunta ad alte temperature e a basse frequenze di carico; è detta anche asintoto viscoso ed è rappresentata da una retta con coefficiente angolare pari ad 1.
- *Frequenza di crossover  $\omega_c$*  – è la frequenza in corrispondenza della quale, ad una data temperatura, l'angolo di fase  $\delta$  è pari a  $45^\circ$  ( $\tan\delta=1$ ). In corrispondenza di tale punto i moduli di restituzione elastica di dissipazione viscosa si eguagliano. Sul diagramma della curva maestra, essa corrisponde circa all'intersezione tra l'asintoto vetroso e l'asintoto viscoso. Può pensarsi come un parametro di durezza generale del materiale alla temperatura di riferimento. Il suo inverso è detto *crossover time*.
- *Indice reologico R* – è definito come la differenza tra il modulo vetroso ed il modulo complesso dinamico ottenuto alla frequenza di *crossover*, e risulta di particolare importanza perché direttamente proporzionale all'ampiezza dello spettro di rilassamento. La ricerca ha, infatti, dimostrato che l'insieme dei tempi di rilassamento propri di ciascun materiale reale è descritto da una funzione continua  $H(\tau)$ , detta spettro di rilassamento. Tale proporzionalità conferisce a R la proprietà di essere un ottimo indicatore del tipo reologico del materiale, in grado di caratterizzare l'andamento delle curve reologiche. Risulta, inoltre, indipendente dalla temperatura di riferimento, ma non dal tipo di legante.



**Figura 4-19:** Rappresentazione dei parametri della curva maestra

#### 4.3.4 Modello matematico della curva maestra

Il complesso comportamento meccanico dei materiali viscoelastici è il risultato dell'interazione tra la dipendenza dal tempo e la dipendenza dalla temperatura della risposta deformativa alle sollecitazioni applicate.

Nell'ambito della modellazione matematica del comportamento viscoelastico lineare del bitume, questi due effetti devono essere trattati separatamente. La dipendenza dal tempo, infatti, si riflette nella posizione  $t_c$  o  $\omega_c$  e nella forma (R) della curva maestra, mentre la dipendenza dalla temperatura, è rappresentata dal diagramma  $\log a(T)$ -Temperatura, dove per  $a(T)$  si intende il coefficiente di traslazione della curva di *frequency sweep* relativa alla temperatura T per la costruzione della curva maestra alla temperatura di riferimento selezionata.

Il modello PSU, sviluppato sulla base delle considerazioni esposte, in virtù della rigosità nella sua trattazione, di una ragionevole precisione e sufficiente semplicità dal punto di vista matematico, risulta idoneo ai fini di consentire calcoli ingegneristici diretti. Per conservare la snellezza delle equazioni, inoltre, fornisce due insiemi di relazioni, uno per la zona viscosa ed uno per il restante campo delle frequenze. Questo modello viene di seguito presentato attraverso una serie di equazioni per le principali funzioni viscoelastiche dinamiche.

##### 4.3.4.1 RELAZIONI PER LA ZONA VISCOELASTICA-LINEARE

Per il modulo complesso viene proposta la funzione:

$$G^*(\omega) = G_g \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]^{\frac{R}{\log 2}} \quad (4-43)$$

dove:

$G^*$  è il modulo complesso dinamico [Pa] alla frequenza  $\omega$  [rad/s];

$G_g$  è il modulo vetroso, tipicamente pari ad 1GPa ;

$\omega_c$  è la frequenza di *crossover*, espressa in rad/s;

R è l'indice reologico.

Per l'angolo di fase, espresso in gradi e corrispondente alla frequenza  $\omega$ , ci si serve dell'equazione:

$$\delta(\omega) = \frac{90}{\left[ 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]} \quad (4-44)$$

A partire dalle due equazioni precedenti, si ricava l'espressione esplicita dell'indice reologico, che risulta di grande utilità qualora non si disponga di dati relativi alla regione  $\delta=45^\circ$ :

$$R = \log 2 \frac{\log \left[ \frac{G^*(\omega)}{G_g} \right]}{\log \left( 1 - \frac{\delta}{90} \right)} \quad (4-45)$$

#### 4.3.4.2 RELAZIONI PER LA ZONA VISCOSA

L'indice reologico presenta l'importante proprietà di essere costante per la zona viscosa, per la quale risulta  $R=0.81$ . Questo consente di ricavare il valore dell'angolo di fase che separa le due regioni:

$$\delta_v = 90 \cdot \left( \frac{\eta_{ss} \cdot \omega_c}{G_g} \right)^{\frac{\log 2}{R-0.81}} \quad (4-46)$$

dove:

$\delta_v$  è l'angolo di fase di transizione, espresso in gradi;

$\eta_{ss}$  è la viscosità stazionaria [Pa·s];

$\omega_c$  è la frequenza di *crossover* [rad/s];

$G_g$  è il modulo vetroso [Pa].

Da quest'ultima equazione risulta evidente che il rapporto  $G_g/\omega_c$  debba essere minore o uguale al valore assunto dalla viscosità stazionaria  $\eta_{ss}$  al fine di evitare valori impossibili ( $>90^\circ$ ) dello sfasamento. Se i due valori si eguagliano, gli stessi parametri viscoelastici lineari si applicano all'intera regione su cui si sviluppa il comportamento viscoelastico complessivo. Questo si verifica, in alcuni casi, per bitumi che presentano un contenuto di asfaltini molto alto.

La frequenza di transizione corrispondente è data da:

$$\omega_v = \omega_c \left[ \frac{90 - \delta}{\delta_v} \right]^{\frac{R}{\log 2}} \quad (4-47)$$

Si stima il modulo limite della regione di flusso tramite l'equazione:

$$G_{gv} = G_g \left( \frac{90}{90 - \delta_v} \right)^{\frac{0.81-R}{\log 2}} \quad (4-48)$$

dove:

$G_{gv}$  è il modulo limite nella regione di flusso viscoso;

$G_g$  è il modulo vetroso;

$\delta_v$  è l'angolo di fase di transizione, in gradi;

$R$  è l'indice reologico.

La frequenza  $\omega_c$ , valutata per la zona viscosa ed espressa in rad/s, viene calcolata come:

$$\omega_{cv} = \omega_c \left[ \frac{(90 - \delta_v)}{\delta_v} \right]^{\frac{R}{\log 2}} \quad (4-49)$$

I parametri che rivestono maggiore interesse sono quelli relativi alla prima delle due regioni suddivise della curva maestra, in quanto applicabili con sicurezza alle temperature non superiori ai 45°C e per i tempi di carico di traffico reali [4-7]. Per le temperature più elevate l'unico parametro che deve essere definito è la viscosità stazionaria, peraltro direttamente ottenibile dalla curva maestra.

#### 4.3.4.3 FUNZIONI MATEMATICHE PER LA DESCRIZIONE DELLA TERMODIPENDENZA

La dipendenza dalla temperatura del comportamento viscoelastico del bitume può essere rappresentata attraverso due equazioni. La prima, usata al di sopra della *defining temperature*, temperatura caratteristica di ogni bitume, e nella regione Newtoniana, è espressa dall'equazione di Williams, Landel e Ferry:

$$\log[a(T)_d] = \frac{-C_1(T - T_d)}{C_2 + (T - T_d)} \quad (4-50)$$

dove:

$a(T)_d$  è il fattore di spostamento relativo alla *defining temperature*;

$C_1, C_2$  sono costanti determinate in modo empirico ( $C_1=19, C_2=92$ );

$T$  è la temperatura scelta, in °C o in °K;

---

$T_d$  è la *defining temperature*.

In pratica risulta:

$$a(T) = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_d)} \quad (4-51)$$

con:

$\eta_0(T)$  viscosità Newtoniana alla temperatura  $T$ ;

$\eta_0(T_d)$  viscosità Newtoniana alla temperatura di riferimento.

La seconda equazione, di Arrhenius, viene utilizzata al di sotto della *defining temperature* e all'interno della regione Newtoniana:

$$\log[a(T)_d] = 2,303 \frac{E_a}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_d} \right) \quad (4-52)$$

dove:

$E_a$  è l'energia di attivazione del flusso al di sotto di  $T_d$  e può essere assunta pari a 261 KJ/mol;

$R$  è la costante ideale dei gas, pari a 8.34 J/mol·K

La temperatura  $T_d$ , come visto, è l'unica grandezza che caratterizza la termodipendenza dei bitumi, e al fine di determinare tale valore si ricorre ad una interpolazione con i minimi quadrati, imponendo un intervallo di confidenza del 95%.

## 4.4 Proprietà di viscoelasticità non lineare

I materiali bituminosi rivestono un ruolo essenziale nella costruzione e nel rinforzo delle pavimentazioni. Molto lavoro già è stato fatto per mettere in relazione le proprietà del legante con il comportamento della miscela, attraverso approcci basati su qualità del legante quali penetrazione, rammollimento, viscosità, o su proprietà reologiche dinamiche. È evidente che la stima del comportamento della miscela soggetta a traffico a partire dalle proprietà del legante si basi sull'analisi meccanica e dinamica del bitume. Analizzando un materiale con prove meccaniche appaiono due domini di comportamento: il dominio lineare ed il dominio non-lineare, il quale generalmente esibisce deformazioni istantanee irreversibili (vedi Figura 4-20).

---



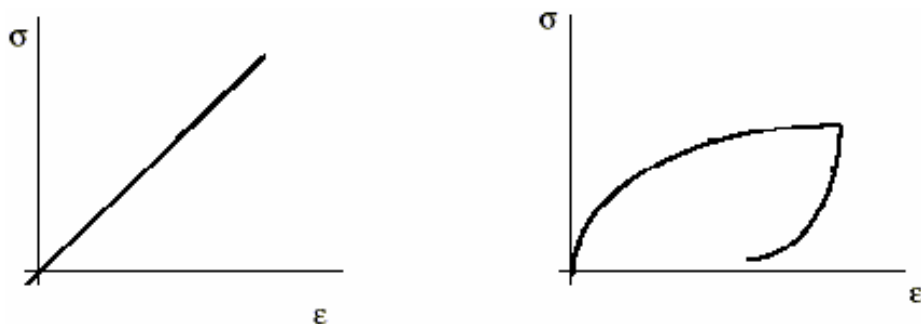


Figura 4-20: Comportamento elastico-lineare (a sinistra) e non lineare (a destra)

Il più semplice modello per un materiale si basa sull'elasticità lineare espressa dalla legge di Hooke (vedi §4.1.3), per la quale la sollecitazione risulta proporzionale alla deformazione, ma classicamente per un materiale reale si verifica tra sollecitazione e deformazione una relazione non lineare ed irreversibile.

Queste irreversibilità possono essere istantanee (sabbia), viscosi (bitume) o una combinazione di questi due fenomeni (miscele bituminose). Generalmente gli effetti della non linearità e le irreversibilità istantanee diventano trascurabili per ampiezze di sforzo inferiori ad un certo limite, che dipende dal materiale considerato. Risulta quindi necessario, per poter prendere in considerazione entrambi i domini lineare e non lineare, definire anzitutto la risposta reologica completa di un materiale.

La Figura 4-21 mostra i confini approssimati di questi due domini per miscele bituminose nel piano ampiezza di sforzo ( $\epsilon_0$ )-numero di cicli di carico (N), nel quale è possibile indicare la posizione delle diverse prove meccaniche eseguite sulle miscele bituminose. Ogni prova meccanica risulta definita dalle condizioni di carico, che possono ricadere nel dominio lineare o nel dominio non-lineare. La risposta del materiale e l'interpretazione di questa risposta dipenderà da queste condizioni [4-8].

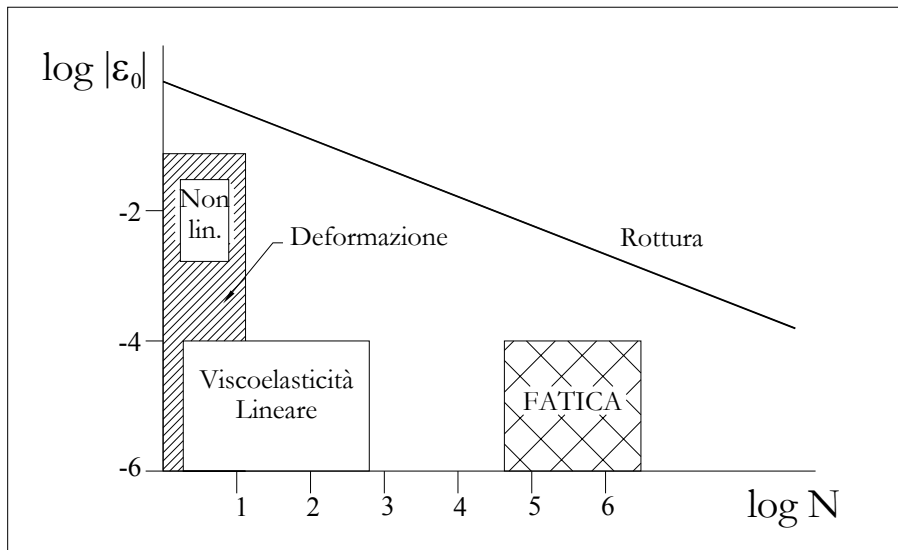


Figura 4-21: Domini di comportamento

#### 4.4.1 Linearità e non linearità

I più recenti studi reologici condotti per mettere in relazione le proprietà di viscoelasticità lineare di leganti bituminosi aventi stesso *Performance Grade*, con le proprietà reologiche di miscele bituminose aventi stessa tipologia di inerti, gradazione, e proporzioni volumetriche, con unica variabile il tipo di modifica usata nella produzione del legante, dimostrano come le proprietà lineari non costituiscano buoni indicatori della risposta del conglomerato bituminoso in fase di esercizio.

In particolare, uno studio condotto da Bahia ed altri per valutare il ruolo delle proprietà di viscoelasticità non lineare nella risposta della miscela [4-9], ha evidenziato una differenza significativa tra il comportamento dei bitumi non modificati e quello dei bitumi modificati, i quali presentano una risposta non lineare.

Gli attuali protocolli di prova sui leganti (SUPERPAVE®), sviluppati come parte del programma SHRP, si concentrano sulle proprietà di viscoelasticità lineare. La scelta del range lineare è suffragata sia dal fatto che un buon progetto dovrebbe limitare le deformazioni degli strati della pavimentazione, sia perché in tale ambito è più semplice e conveniente effettuare prove sperimentali.

A favore della scelta di considerare il comportamento non lineare vi sono, però, diverse ragioni:

- i leganti bituminosi che mostrano comportamento simile in campo lineare, possono mostrare comportamento non lineare estremamente variabile, richiedendo una valutazione diretta delle proprietà nella regione non lineare;
- i comportamenti lineari dei leganti non mostrano buone relazioni con il comportamento della miscela: la non linearità potrebbe spiegare alcune discrepanze;
- il riscontro che l'ampiezza della deformazione all'interno del legante possa essere molto più grande della deformazione della massa della miscela rende necessario rivedere i protocolli di prova usati nella usuale valutazione dei leganti, specialmente per quanto riguarda la non linearità dei bitumi modificati;
- in alcuni materiali il comportamento non lineare è indicativo del danno;
- a causa della natura ripetitiva dei carichi di traffico, i leganti che operano in campo non lineare accumulano danno più velocemente e mostrano prestazioni molto differenti da quelle che il comportamento lineare potrebbe indicare. [4-9]

#### **4.4.2 Distribuzione della deformazione**

I bitumi formano un film sottile attorno agli inerti e, a causa dello spessore ridotto e della significativa differenza tra i moduli di leganti e aggregati, possono trovarsi ad operare nella regione non lineare. L'ampiezza della deformazione all'interno del legante è funzione dello spessore del film e mostra, quindi, una distribuzione legata a quella dello spessore del film, la quale a sua volta è funzione della qualità e della forma degli aggregati. Il concetto di stimare uno spessore medio del film basato su una forma ideale degli aggregati non risulta realistico e, a causa della variabilità delle forme e delle dimensioni degli aggregati, si può trovare un'ampia distribuzione di spessori del film di bitume all'interno di una certa miscela.

A causa della grande differenza di rigidità tra legante e aggregati, la maggior parte della deformazione va a gravare sul legante, portando a credere che l'usuale procedura di valutazione della deformazione dei leganti basata sulle proporzioni volumetriche non possa dare una rappresentazione accurata. Per dimostrare la complessità della distribuzione deformativa all'interno del bitume, in uno studio condotto negli Stati Uniti nel 1999 è stata usata una semplice analisi agli elementi finiti. Avvalendosi di una descrizione elasto-lineare delle proprietà del materiale, è stato osservato che l'applicazione di una deformazione pari all'1% nel conglomerato bituminoso può dar luogo a una distribuzione di deformazioni nel legante compresa in un intervallo che va dallo 0.3 al 32% .

In generale è realistico assumere che le deformazioni all'interno dei film di legante possano essere da 10 a 100 volte più grandi delle deformazioni del volume della miscela [4-9].

---

### 4.4.3 Caratterizzazione del comportamento non lineare

Prove effettuate sul comportamento non lineare dei leganti bituminosi, nell'ambito del programma NCHRP Project 9-10 (vedi Capitolo 5), hanno evidenziato l'esistenza di molti fattori che è necessario considerare per una oggettiva caratterizzazione del comportamento non lineare, elencati di seguito.

#### 4.4.3.1 DIPENDENZA DALLA DEFORMAZIONE

La dipendenza dalla deformazione risulta correlata alla rigidezza del materiale determinata tramite  $G^*$ . Infatti l'attuale versione del AASHTO TP5 "*Standard procedure for testing with the Dynamic Shear Rheometer*" include un'equazione che fornisce il limite lineare della deformazione come una funzione di  $G^*$  (AASHTO 93). Dal momento che sia la temperatura che la frequenza influenzano il valore di  $G^*$  dei leganti bituminosi, ci si aspetta un'interazione tra deformazione, frequenza e temperatura.

#### 4.4.3.2 EFFETTI DELLA TEMPERATURA E DELLA FREQUENZA

La dipendenza della rigidezza dalla deformazione è funzione di temperatura e frequenza, ed entrambi questi fattori possono in qualche modo relazionare la non linearità al livello di rigidezza ( $G^*$ ). È importante notare l'effetto significativo della dipendenza dalla deformazione, come mostrato da alcune esperienze da cui è risultato che il valore di  $G^*$  a 10°C crolla da 1000 kPa a 40 kPa, portando la deformazione dall'1% al 50%. Esiste, inoltre, una forte interazione tra deformazione e frequenza, come evidenziato dal fatto che, anche se a basse frequenze l'effetto della deformazione è minimo, ad alte frequenze (15 Hz) un cambiamento di deformazione dal 2 al 50% determina una variazione di  $G^*$  di almeno un ordine di grandezza. Recenti lavori su miscele bituminose e modelli di comportamento non lineare hanno suggerito semplici *shift factors* di sollecitazione o deformazione per spiegare gli effetti in campo non lineare. La non linearità di alcuni leganti bituminosi risulta, però, più complessa e il loro comportamento non può essere rappresentato con semplici traslazioni sulla scala delle frequenze.

L'effetto della deformazione sull'angolo di fase non è così significativo come quello su  $G^*$ , mostrando un cambiamento di pochi gradi.

#### 4.4.3.3 COMPOSIZIONE DEL LEGANTE

Un altro fattore importante da considerare è la tipologia del legante. Confrontando *strain sweeps* effettuate su bitumi modificati della stessa classe, prodotti a partire dallo stesso bitume, si è visto che la dipendenza dalla deformazione è anche una funzione fortemente dipendente dal tipo di modificatore usato.

---

I risultati ottenuti ad oggi indicano che bitumi modificati con alcuni elastomeri, plastomeri o ossidati mostrano una dipendenza significativa dalla deformazione che può arrivare ad essere così elevata da far diminuire la rigidità di due ordini di grandezza a seguito di un incremento della deformazione dal 2 al 50%. Risulta importante anche l'andamento del cambiamento, che in alcuni leganti è rappresentato da un decremento continuo di  $G^*$ , mentre per altri da una zona a *plateau* (andamento sub-orizzontale) a basse deformazioni seguita da un'improvvisa caduta e, quindi, un'altra zona a *plateau* ad alte deformazioni [4-10]. Tali andamenti potrebbero essere legati alla morfologia del legante e alle tipologie dei legami esistenti al suo interno.

I risultati raccolti portano a pensare che le grandezze reologiche dei leganti bituminosi siano fortemente dipendenti dal livello di deformazione a tutte le temperature entro il campo di esercizio della pavimentazione. Le grandezze misurate per piccole deformazioni (regione lineare) difficilmente possono essere usate per predire il comportamento che si avrà per grandi deformazioni (regione non lineare). Se i leganti presenti all'interno di una certa miscela sono soggetti a deformazioni elevate, allora risulta necessario prevedere anche una caratterizzazione non lineare.

#### 4.4.3.4 PERIODI DI RIPOSO ED AUTORIPARAZIONE DEI LEGANTI

Il fenomeno dell'autoriparazione dei leganti è stato oggetto di diversi studi, tra cui si citano lavori significativi condotti da ricercatori della University of Texas A&M [4-6] e della North Carolina State University [4-11], che hanno mostrato come i periodi di riposo possano influenzare il recupero del danno nelle miscele bituminose. Tale comportamento, benché generalmente riconosciuto nei leganti bituminosi, finora non è stato misurato e quantificato. In particolare, questo fenomeno non è funzione solo del tempo, ma anche della composizione del legante, ed il recupero di un legante modificato prodotto a partire dallo stesso bitume, risulta più rapido rispetto a quello che si riscontra nel bitume originario. Ciò indica che la modifica può alterare il comportamento di autoriparazione, oltre a suscitare interesse relativamente alla valutazione degli effetti della chimica del bitume sulla autoriparazione del danno causato da grandi deformazioni.

### 4.4.4 Comportamento dei bitumi nella regione di viscoelasticità non lineare

La dipendenza dalla deformazione dei leganti bituminosi può giocare un ruolo fondamentale nella definizione delle relazioni esistenti tra la reologia dei bitumi e quella delle miscele bituminose.

---

Sulla base di simulazioni al computer e di analisi agli elementi finiti è stato mostrato che i leganti bituminosi possono essere soggetti a livelli di deformazione molto più alti rispetto a quelli cui sono sottoposte le miscele. A seconda della distribuzione granulometrica degli aggregati, i leganti possono essere soggetti a deformazioni anche 10 volte più elevate rispetto alla miscela. Risulta, perciò, necessario considerare prove con grandi deformazioni (in campo non lineare) al fine di stimare in maniera accurata il ruolo dei leganti nelle prestazioni delle miscele.

I bitumi, specialmente quelli modificati, variano significativamente la loro dipendenza dalla deformazione, dal momento che alcuni sono più sensibili al livello di deformazione rispetto ad altri a causa della loro composizione o della loro microstruttura. La dipendenza dalla deformazione è una funzione fortemente dipendente dalla temperatura e dal tempo di carico, e basse temperature e/o basse frequenze portano a una maggiore sensibilità nei confronti del livello di deformazione.

Alcuni leganti sono così sensibili alla deformazione che il modulo complesso decresce del 1000% quando la deformazione passa dal 2 al 50%. È plausibile ritenere che nei sottili film di bitume presenti all'interno delle miscele usate nelle pavimentazioni si abbiano livelli deformativi compresi tra il 20% e il 50%.

Esiste una significativa interazione tra il livello di deformazione e il tempo di carico (frequenza), ed i risultati raccolti mostrano che tale interazione è un fenomeno complesso e non può essere rappresentata semplicemente con *shift factors*.

Gli andamenti della dipendenza dalla deformazione non sono uniformi per tutti i leganti, alcuni dei quali mostrano un semplice passaggio dalle piccole alle grandi deformazioni, mentre altri mostrano specifiche regioni di transizione. Il comportamento di dipendenza dalla deformazione può dare alcune indicazioni sull'integrità del legante e sulla compatibilità degli additivi.

Il livello di deformazione influenza in maniera significativa il classico comportamento di fatica dei leganti bituminosi. Il danno da fatica, definito dalla riduzione della rigidità ( $G^*$ ), aumenta rapidamente con l'aumento della deformazione.

Poiché la riduzione del valore di  $G^*$  e l'incremento del valore di  $\delta$  possono avere conseguenze diverse in termini di prestazione della pavimentazione, è stata proposta la dicitura *Mechanical Work Disturbance* (MWD) al posto delle classiche “fatica a deformazione controllata” e “fatica a sollecitazione controllata”.

Gli effetti del MWD su  $G^*$  risultano molto più pronunciati rispetto a quelli che si riscontrano sull'angolo di fase, e riduzioni di  $G^*$  di almeno 100 volte sono state osservate in seguito a solo 10 cicli in condizioni di moderata deformazione (20%). L'incremento dell'angolo di fase all'aumentare della deformazione può essere messo in relazione con una rottura della struttura molecolare [4-12].

---

Il tempo di carico e la temperatura hanno un effetto sul disturbo da fatica, comunque trascurabile rispetto a quello riconducibile al livello di deformazione, che è quello che maggiormente influenza il disturbo da fatica.

Sulla base di un numero limitato di leganti testati, il disturbo da fatica appare essere fortemente dipendente dalla composizione del bitume e dal tipo di modifica. I modificatori polimerici (sia gli elastomeri che i plastomeri) limitano fortemente il disturbo da fatica e si oppongono alla riduzione del valore di  $G^*$ . I periodi di riposo mostrano un effetto significativo sul recupero dallo *shear thinning* (dipendenza dalla deformazione) e dall'accumulo del danno da fatica, e l'autoriparazione è il più probabile meccanismo alla base del loro recupero, la quale a sua volta appare essere funzione della composizione del bitume originario e del tipo di modificanti [4-9].

---





## Capitolo 5

# Quadro normativo e metodologia SHRP

La reologia, come descritto nel capitolo precedente, assume un'importanza particolare per la caratterizzazione dei leganti bituminosi, offrendo la possibilità di descriverne il comportamento visco-elastico in maniera rigorosa, ricorrendo a specifiche prove per la determinazione delle grandezze fisiche e chimiche caratteristiche del materiale. Questo tipo di approccio si rivela di primaria importanza per lo studio di materiali, quali bitumi modificati, per i quali il tradizionale sistema di classificazione empirico non consente di definirne e distinguerne in maniera appropriata le diverse proprietà.

Da circa 10 anni, il programma di ricerca statunitense denominato *Strategic Highway Research Program* (SHRP) procede all'attuazione di tale approccio, giungendo a definire un sistema di classificazione dei bitumi stradali denominato SUPERPAVE® (acronimo di Superior Pavements), recepito per la parte riguardanti i bitumi nella norma AASHTO MP1 "*Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*". Il sistema SHRP è articolato in specifiche tecniche che, basandosi su grandezze reologiche, risultano direttamente correlate ai principali dissesti che possono verificarsi durante la fase di esercizio di una pavimentazione stradale sotto particolari condizioni di invecchiamento e di temperatura.

In tale sistema i leganti bituminosi risultano classificati secondo classi di prestazione, denominate *Performance Grade* (PG), definite come intervalli di temperatura all'interno dei quali risultano garantiti degli specifici livelli prestazionali minimi.

La metodologia SHRP, tuttavia, ha visto il suo sviluppo decennale concentrarsi principalmente sui materiali bituminosi non modificati, e come conseguenza l'applicabilità dei metodi di prova e delle specifiche tecniche ai bitumi modificati non è stata validata. A tal proposito, con l'obiettivo di affinare tale metodologia, negli Stati Uniti è stato messo a punto il programma di ricerca denominato Project 9-10 nell'ambito del *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP).

## 5.1 La metodologia SHRP

I materiali bituminosi devono soddisfare requisiti qualitativi sempre più esigenti e specifici. Le esigenze di mercato, unite all'interesse scientifico, fanno sì che tecnici ed operatori del settore, partendo dalle prescrizioni relative alle caratteristiche empiriche, indaghino in maniera sistematica il comportamento in opera di tali materiali.

L'attuale normativa europea di classificazione preliminare dei bitumi è basata su prove di penetrazione che rivelano la consistenza dei bitumi alla temperatura di 25 °C. Il bitume è un materiale il cui comportamento fisico dipende, però, fortemente dalla temperatura, e le pavimentazioni stradali risultano soggette ad uno spettro di temperature molto ampio. Così, una classificazione dei bitumi ottenuta basandosi su di una prova effettuata a una temperatura standard di 25°C presenta notevoli limitazioni e risulta priva di una espressione in termini di unità di misura fondamentali.

La classificazione secondo il grado PG (Performance Grade) risponde a questa limitazione. Il Performance Grade di un bitume è costituito da un intervallo di temperature che ne definisce il campo di condizioni di esercizio consentite ed all'interno del quale la pavimentazione è esente da ammaloramenti attribuiti alla sola componente legante (deformazioni plastiche e rotture fragili). Attraverso il Performance Grade, che di fatto coincide con la nuova "classe" da attribuire al bitume stradale, è possibile riconoscere in modo immediato le specifiche condizioni ambientali di impiego del bitume ed, indirettamente, le caratteristiche di consistenza attese. Al fine di migliorare l'applicabilità di tale criterio anche ai leganti bituminosi non modificati, come anticipato, è stato più recentemente istituito il programma Project 9-10 del NCHRP.

### 5.1.1 Il sistema di classificazione SUPERPAVE®

La descrizione dei principi basilari della reologia, analizzati nel capitolo precedente sia sotto l'aspetto teorico che applicativo, illustra la complessità del problema della caratterizzazione delle proprietà viscoelastiche dei leganti bituminosi.

La necessità di poter disporre di un modello fisico e matematico che consenta di prevedere il comportamento delle pavimentazioni stradali durante le varie fasi di esercizio, ha portato tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90 all'attuazione negli Stati Uniti del programma SHRP; tale programma, nato dalla collaborazione tra diverse Università, persegue l'obiettivo di riordinare e aggiornare le norme ed i sistemi di qualificazione esistenti per i materiali stradali, basati su criteri più o meno empirici, mediante una nuova metodologia caratterizzata da un evidente rigore scientifico.

---

La pavimentazione stradale subisce in opera danneggiamenti a causa di una molteplicità di fenomeni. Gli studi in ambito SHRP hanno evidenziato come gli ammaloramenti più ricorrenti nelle pavimentazioni (ormaiamento, fessurazione da fatica e fessurazione termica), dipendano essenzialmente dalle caratteristiche reologiche della fase legante, funzione della temperatura e della frequenza di carico, e come queste, a loro volta, siano fortemente condizionate dalla struttura e dalla natura chimica dei bitumi. Tale programma di ricerca ha individuato le proprietà viscoelastiche significative per il verificarsi o per la prevenzione di questi ammaloramenti ed impone nella norma di misurarle in determinate condizioni di temperatura e di cinematica, sia prima che dopo invecchiamento.

Partendo dalle prove sperimentali condotte nell'ambito del programma statunitense, è stato messo a punto il sistema di classificazione SUPERPAVE®, costituito da una serie di metodi di prova e di relative norme di accettazione aventi l'obiettivo di "obbligare" alla realizzazione di pavimentazioni stradali ad elevate prestazioni. Tale sistema si concentra principalmente sugli ammaloramenti più ricorrenti nelle pavimentazioni flessibili, fortemente dipendenti dalle proprietà reologiche del legante e funzione di temperatura, frequenza di carico e tempo di esposizione agli agenti atmosferici. L'innovatività di tale classificazione consiste, quindi, nella caratterizzazione di un bitume dal punto di vista prestazionale, ottenuta mediante un'analisi completa del comportamento reologico, in grado di valutare le grandezze fondamentali in un ampio intervallo di temperature di esercizio.

L'ambizioso obiettivo del programma di ricerca consiste nella definizione delle correlazioni esistenti tra le proprietà viscoelastiche del legante bituminoso della pavimentazione ed il comportamento della pavimentazione stessa. I risultati delle prove di caratterizzazione permettono di definire i parametri di progetto delle sovrastrutture e le condizioni di applicabilità delle stesse, al fine di limitare i tipici e più frequenti fenomeni di degrado.

### **5.1.2 Il Performance Grade**

Attraverso una caratterizzazione meccanica e prestazionale dei materiali stradali, misurati mediante prove geometriche di laboratorio, è possibile individuare i parametri critici di una pavimentazione stradale flessibile ai principali ammaloramenti (ormaiamento, fessurazione da fatica e fessurazione termica), non individuabili con un approccio di prova di tipo tradizionale. Tali parametri vengono riassunti in quello che viene definito il Performance Grade (PG) del legante bituminoso.

---

La norma classifica ciascun bitume con una doppia sigla (Performance Grade, PG) che rappresenta un intervallo di temperatura indicativo dell'intervallo di temperatura di progetto della pavimentazione stradale.

Il valore di Performance Grade determinato individua il range di temperature di utilizzo di un bitume all'interno del quale nella pavimentazione non si verificano ammaloramenti (forti deformazioni, in particolare ormaimento, o rotture) ad esso imputabili. Un bitume che, per esempio, è classificabile PG(64-24) è un bitume che può essere impiegato senza produrre ammaloramenti dovuti a carenze prestazionali del legante nell'intervallo + 64°C, -24°C.

La logica nuova è quella di fornire all'utilizzatore diverse mappe territoriali, suddivise in aree climatiche, all'interno di ciascuna delle quali si prescrive un determinato Grado PG del legante, sempre subordinato all'importanza della strada.

I principi fondamentali su cui si basa la classificazione SHRP possono essere riassunti come segue:

- Non si può prescindere dalle temperature (minima e massima) della località dove il bitume verrà applicato;
- In funzione di tali valori di temperatura viene attribuito un grado PG X-Y, che rappresenta le caratteristiche minime che dovrà rispettare il bitume che verrà utilizzato (per una dettagliata definizione dei valori X e Y, vedi l'Appendice 2.1).

In particolare, le diverse aree territoriali vengono caratterizzate dalle temperature minima e massima, che divengono parametri di progetto della pavimentazione e sono determinati sulla base di appositi modelli sviluppati proprio nell'ambito SHRP (vedi Tabella 5-1).

**Tabella 5-1 – Temperature massime e minime di progetto che definiscono le classi prestazionali**

Temperature minime [°C]	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46
Temperature massime [°C]	+46	+52	+58	+64	+70	+76	+82

Al fine di stabilire l'adeguatezza di un bitume ad un determinato contesto, tramite la determinazione del PG, vengono, quindi, prescritte una serie di prove di caratterizzazione eseguite non alla temperatura standard, bensì alle temperature a cui la pavimentazione risulterà soggetta durante la fase di esercizio. È necessario che da tali prove risulti che il bitume in esame rispetti alcuni parametri minimi, corrispondenti alle prestazioni minime che la pavimentazione dovrà essere in grado di garantire.

---

Il criterio alla base di tale metodologia è quello di arrivare a definire una serie di mappe territoriali che consentano una immediata individuazione, a seconda dell'area climatica e dell'importanza della strada, dei leganti idonei, identificabili proprio tramite il PG.

Le prove SUPERPAVE® quantificano la performance del bitume nei tre stati della sua "vita": stato originale, condizioni di fine stessa e condizioni proprie di una esposizione in opera di circa 10 anni.

I meccanismi di invecchiamento principali sono sintetizzabili nella volatilità degli oli leggeri e nell'ossidazione per reazione con l'ossigeno dell'aria. Per simulare questa forma d'invecchiamento, la specifica SUPERPAVE® utilizza l'apparecchiatura *Rolling Thin Film Oven* (RTFO), che simula l'invecchiamento primario del bitume stradale (invecchiamento a breve termine, dovuto agli effetti della miscelazione e stesa del conglomerato bituminoso).

Dopo la costruzione della pavimentazione, il bitume continua a invecchiare, seppur in questa fase risultino predominanti le azioni aggressive di carattere ambientale (esposizione ai raggi UV, indurimento sterico); per simulare l'invecchiamento dopo la compattazione e durante la vita della pavimentazione la specifica in esame utilizza il *Pressure Aging Vessel* (PAV).

I bitumi stradali sono caratterizzati da un comportamento reologico complesso descrivibile, in generale, come di tipo visco-elasto-plastico fortemente termodipendente; tuttavia, sulla base della previsione dell'entità degli sforzi attesi nelle pavimentazioni i metodi e i modelli reologici adottati dal progetto SHRP ipotizzano un comportamento di tipo visco-elastico lineare.

La modellazione teorica è subordinata alla verifica sperimentale delle proprietà di flusso del bitume ovvero allo studio ed alla quantificazione della dipendenza dal tempo e dalla temperatura della risposta dei materiali sollecitati da uno stato tensionale applicato.

Solo la conoscenza del comportamento reologico del bitume, attraverso l'impiego di strumenti pensati e costruiti per questo specifico scopo, permette di caratterizzare un bitume dal punto di vista prestazionale, con risultati espressi in unità fondamentali e ottenibili in un campo esteso di temperature.

Così, la determinazione del Grado PG prevede la realizzazione di quattro prove reologiche attraverso l'uso delle seguenti apparecchiature (Tabella 5-2):

**Tabella 5-2: Apparecchiature SHRP- SUPERPAVE®**

<b>Apparecchiatura</b>	<b>Obiettivo</b>
Rolling Thin Film Oven - RTFO Pressure Aging Vessel - PAV	Simulare rispettivamente l'invecchiamento primario (breve termine) e secondario (lungo termine) del bitume.
Viscosimetro Rotazionale -Tipo Brookfield Dynamic Shear Rheometer – DSR	Misurare le proprietà reologiche del legante alle alte e medie temperature di esercizio. Studio dell'Ormaiamento e della Fessurazione da Fatica
Bending Beam Rheometer - BBR Direct Tension Test - DTT	Misurare le proprietà reologiche del legante alle basse temperature. Studio della Fessurazione Termica.

### 5.1.3 Invecchiamento dei bitumi

L'invecchiamento è la variazione nel tempo delle proprietà del bitume. Questo particolare fenomeno appare inevitabilmente durante la preparazione e la vita di servizio del bitume in strada e nelle pavimentazioni aeroportuali, ed è particolarmente evidente nel caso di azioni combinate di ossidazioni e di esposizione per lunghi periodi agli agenti atmosferici.

Le proprietà del bitume vengono, infatti, alterate dall'effetto di ossigeno, di radiazioni ultraviolette e dei vari trattamenti termici a cui viene sottoposto durante le fasi di stoccaggio, di preparazione e posa in opera del conglomerato e, infine, durante la fase di esercizio della pavimentazione stessa. Tutti questi fattori causano un decadimento delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche, mentre dal punto di vista reologico, l'invecchiamento corrisponde ad un indurimento del materiale, con conseguente aumento della rigidità, ma anche un maggiore grado di elasticità, cosicché i conglomerati invecchiati risultano meno sensibili al fenomeno dell'ormaiamento.

Le più chiare manifestazioni dei processi di invecchiamento sono generalmente caratterizzate da un incremento della consistenza bituminosa, come indicato dai risultati sui test convenzionali in campo stradale come: diminuzione del valore di penetrazione, incremento del valore palla-anello e aumento della viscosità.

Quando si analizza l'invecchiamento del bitume bisogna sempre distinguere tra:

- invecchiamento a breve termine
- invecchiamento a lungo termine.

L'invecchiamento a breve termine avviene nelle fasi iniziali di vita del conglomerato, vale a dire durante la miscelazione, il trasporto e la messa in opera.

L'invecchiamento a lungo termine si verifica, invece, durante la vita utile della pavimentazione ed è causato principalmente dagli agenti atmosferici e climatici, in particolare dall'irraggiamento solare.

Tra i fenomeni che si verificano durante tale processo, si evidenziano i seguenti.

- **Volatilizzazione:** consiste nella perdita delle componenti più leggere da parte del bitume. Durante la miscelazione, infatti, gli aggregati ed il bitume vengono portati ad elevate temperature, comprese tra 130°C e 170°C, e le parti più leggere del bitume, caratterizzate da basse temperature di ebollizione, tendono a volatilizzare. La perdita degli elementi volatili dipende dalla natura e dalla quantità di sostanze volatili contenute nel bitume, e le alterazioni reologiche che si ottengono sono irreversibili. Questo fenomeno nel bitume si verifica soltanto durante la fase di miscelazione.
  - **Ossidazione:** è un fenomeno che scaturisce dalla reazione del bitume con l'ossigeno alle alte temperature, ed è una modificazione di tipo chimico che provoca evidenti cambiamenti sia alla struttura interna del legante che alle sue proprietà reologiche. Questo fenomeno si verifica sia a breve che a lungo termine anche se nel primo caso l'intensità di tale ossidazione è molto più elevata, dal momento che il bitume viene a contatto con un'ingente quantità di ossigeno ad alte temperature; nel secondo caso, invece, l'ossidazione è meno accentuata, ma procede in maniera lenta e continua nel tempo.
  - **Polimerizzazione:** è un fenomeno chimico attraverso il quale molecole semplici si uniscono per formare in sequenza un composto di elevato peso molecolare e di grandi dimensioni. Anche la polimerizzazione avviene sempre alle alte temperature.
  - **Azione dell'acqua:** il contatto con l'acqua può provocare, nel corso del tempo, effetti indesiderati. In particolare l'acqua può essere assorbita dal bitume, specialmente se quest'ultimo contiene piccole quantità di componenti idrosolubili, quali tracce di sale. Attraverso il meccanismo osmotico l'acqua si diffonde nel bitume e dissolve i cristalli salini producendo nel legante numerosi globuli. Il processo è molto lento a causa della scarsa solubilità molecolare dell'acqua nel bitume e del basso valore della costante di diffusione in quest'ultimo. L'assorbimento dell'acqua diventa un fattore importante nel processo di invecchiamento del bitume solo in casi particolari, cioè quando il legante viene usato insieme ad elementi lapidei molto permeabili. In questo caso un contatto continuo e prolungato con acqua pura ad alte temperature risulta dannoso.
-

### 5.1.3.1 ROLLING THIN FILM OVEN TEST – RTFOT, (AASHTO T240/ASTM D 2872-88)

Il programma SHRP prescrive il RTFOT per simulare l'invecchiamento del bitume a breve termine, cioè quello che si ottiene durante la fase di miscelazione, trasporto e posa in opera della miscela bituminosa. Come già detto, ciò accade poichè durante questa fase l'elevata temperatura e la miscelazione favoriscono la reazione d'ossidazione delle molecole del bitume con l'ossigeno.

Questo test mostra gli effetti combinati di calore e aria sul film bituminoso durante il processo di preparazione e durante la fase di diffusione della miscela bituminosa (invecchiamento a breve termine).

L'invecchiamento RTFO viene eseguito in un forno (con termostato capace di mantenere la temperatura a  $163^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) ventilato, a doppia parete, riscaldato elettricamente, di altezza 38.1 cm, larghezza 48.3 cm e profondità (a porta chiusa) di 44.5 cm. Lo sportello ha una finestrella con doppi vetri, di 33 cm di larghezza e 22.9 cm di altezza. Durante la prova, viene soffiata aria dentro ogni contenitore di vetro da una cannella di diametro 1.016 mm, con un flusso di 4 litri/minuto.

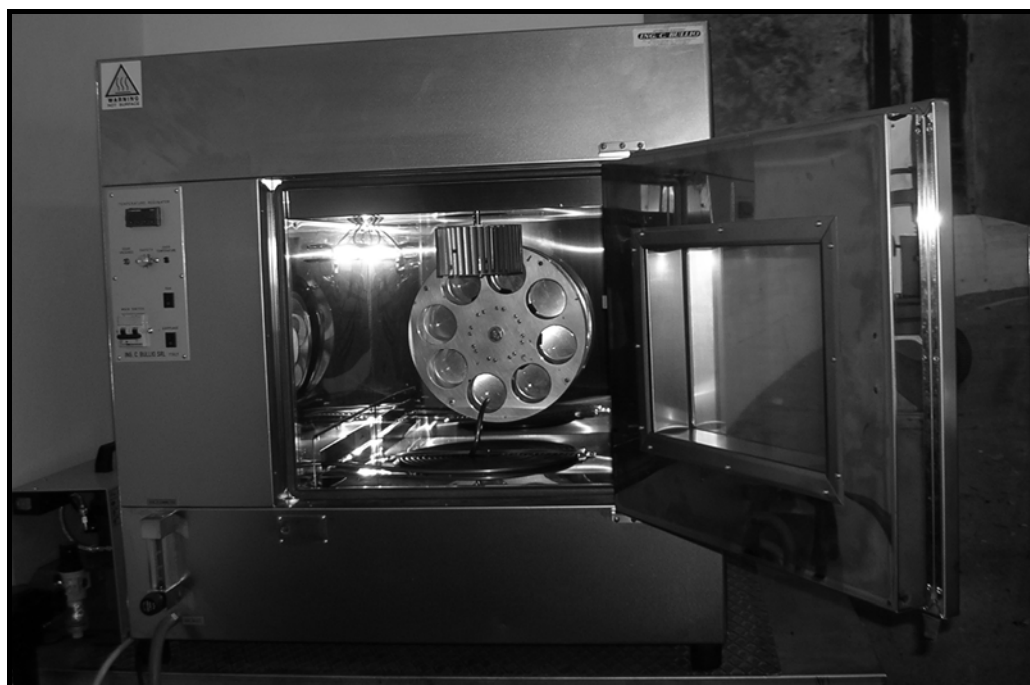


Figura 5-1: Il Rolling Thin Film Oven (RTFO)

---



Nella esecuzione della prova viene anche usata la seguente attrezzatura: fornello elettrico, bilancia elettronica, bussolotti cilindrici di vetro per RTFO, di altezza 13.97cm  $\pm$ 1,5mm e diametro 6.4cm  $\pm$ 1.5mm.

I provini da inserire nella macchina per la prova sono preparati versando 35g  $\pm$ 0.1 di materiale in appositi bussolotti di vetro. I bussolotti vengono introdotti nel forno precedentemente riscaldato, tenuti in piedi, coperti con carta alluminio, per circa 30 minuti alla temperatura di 163°C, e in seguito vengono inseriti nei fori della giostra.

La prova inizia tenendo la temperatura costante a 163°C, e mentre la giostra gira ad una velocità di 15 giri/minuto viene soffiata aria direttamente nei bussolotti.

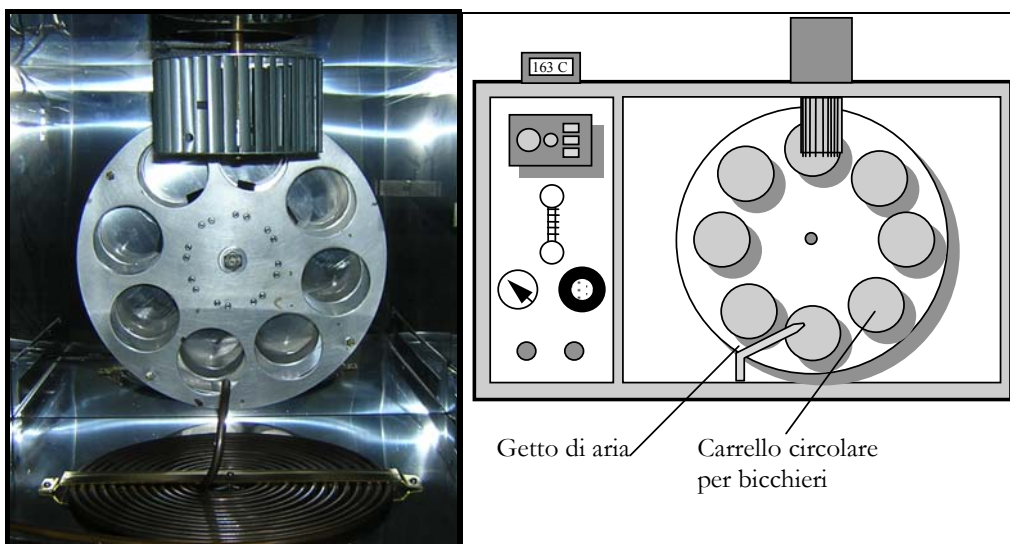


Figura 5-2: Schema dell'interno del RTFO

L'utilizzo del RTFO ha due funzioni:

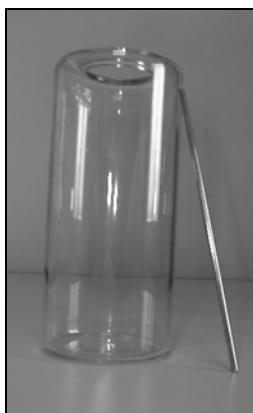
- Ottenere un bitume invecchiato da utilizzare nelle prove successive per determinare le sue proprietà fisiche;
- Calcolare la massa degli elementi volatili che si perdono durante il processo di invecchiamento.

La perdita di massa è definita come la perdita media percentuale dei campioni di bitume dopo invecchiamento RTFO ed è calcolata come segue:

$$\text{Perdita di Massa [\%]} = \frac{\text{Massa iniziale} - \text{Massa invecchiata}}{\text{Massa iniziale}} \times 100 \quad (5-1)$$

Questa costituisce un'indicazione del comportamento del bitume dopo invecchiamento. Alcuni bitumi aumentano il loro peso dopo RTFO a causa della formazione di prodotti per reazione ossidativa.

L'invecchiamento MRTFOT (*Modified Rolling Thin Film Oven Test*) [5-1], si differenzia da quello fin qui descritto solo perché all'interno del bussolotto viene posizionata una bacchetta metallica (nel nostro caso avente diametro pari a 2.9 mm e lunghezza 127 mm) che, continuando, a mescolare energicamente il bitume, dovrebbe, secondo alcuni ricercatori, evitare una possibile segregazione del polimero e quindi garantire un più efficace invecchiamento. Ovviamente bitumi non modificati dovrebbero dar luogo ai medesimi risultati, mentre ci sarebbe da aspettarsi differenze nel caso di bitumi modificati.



**Figura 5-3: Bicchiere e bacchetta per invecchiamento MRTFOT**

#### 5.1.3.2 PRESSURE AGING VESSEL - PAV (AASHTO PP1)

Per simulare invecchiamenti a lungo termine si è usato il metodo PAV. Per mezzo di questa tecnica il bitume precedentemente invecchiato con RTFO è posto in contenitori di alluminio, contenenti 50 g di bitume, che sono esposti per 20 ore alla pressione di 2.1 Mpa a 100° C. Questo tipo di azione è particolarmente dura e riproduce l'invecchiamento in situ che può essere rilevato dopo circa 10 anni di esposizione agli agenti atmosferici. Questa procedura è sotto convalida in laboratorio e in situ specialmente nel campo dei bitumi modificati.

L'apparecchiatura è costituita da una camera d'invecchiamento pressurizzata riscaldata. La pressione dell'aria è fornita da un cilindro ad aria compressa, pulito e asciutto, dotato di un regolatore di pressione, una valvola di sicurezza ed una valvola di soffio a fuoriuscita lenta. Il supporto è in grado di contenere 10 provini.

---



Figura 5-4: Pressure Aging Vessel (PAV)

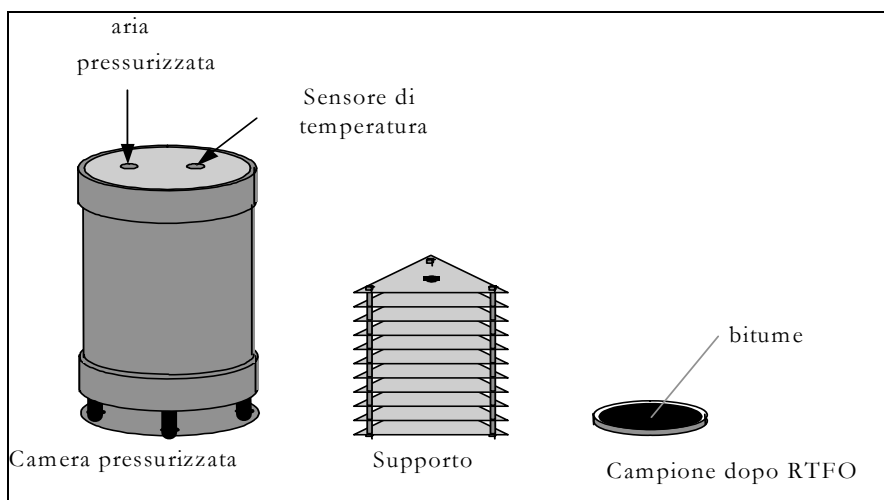


Figura 5-5: Schema dell'apparecchiatura PAV

Dopo queste 20 ore, la pressione viene fatta diminuire attraverso la valvola di sfiato per un tempo normalmente variabile tra 8 e 10 minuti. In caso la depressurizzazione sia molto rapida, potrebbe verificarsi la formazione di schiuma. Dopo questo passaggio viene, quindi, ritirato il supporto dal PAV e i campioni vengono collocati in un forno alla temperatura di 163°C per 30 minuti, in modo da rimuovere l'aria presente all'interno degli stessi.

## 5.1.4 Prove Reologiche

### 5.1.4.1 VISCOSIMETRO ROTAZIONALE – VR (ASTM D4402)

Questo strumento, più conosciuto come viscosimetro di Brookfield, permette di calcolare la viscosità rotazionale, ottenuta misurando la torsione necessaria al fine di mantenere costante la velocità di rotazione di un asse cilindrico immerso in un provino di bitume ad una temperatura costante (vedi Figura 5-6). Tale torsione dipende dalla viscosità del legante bituminoso, la quale viene calcolata automaticamente dal viscosimetro.

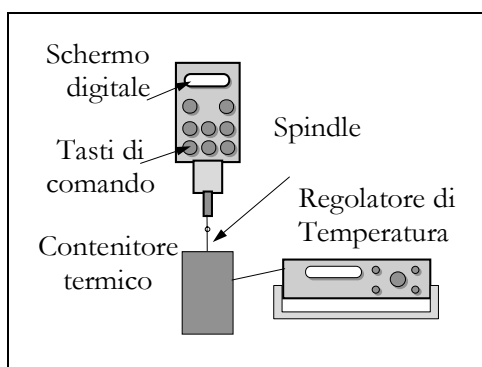


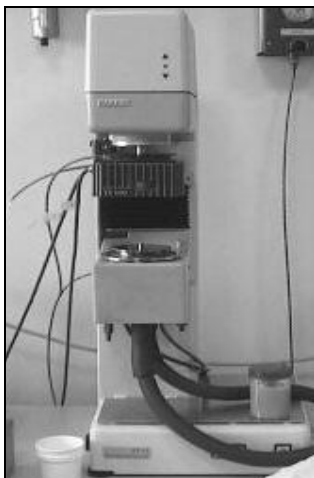
Figura 5-6: Schema dei componenti del viscosimetro di Brookfield

La conoscenza del valore della viscosità è importante per determinare se la fluidità del legante è sufficiente a garantirne il corretto pompaggio e miscelazione con l'aggregato. Per tale ragione, la prova con il viscosimetro viene effettuata su di un campione non invecchiato del bitume.

Vengono registrate tre letture della viscosità, ad un intervallo di un minuto, ed il valore caratteristico di viscosità per la temperatura di 135°C è dato dalla media dei tre. Secondo le specifiche SUPERPAVE®, tale valore, espresso in Pascal per secondo (Pa.s), dovrà risultare inferiore a 3.0 Pas per il bitume non invecchiato.

### 5.1.4.2 DYNAMIC SHEAR RHEOMETER – DSR (AASHTO TP5)

Il *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) è lo strumento in grado di determinare i parametri viscoelastici del bitume, controllando perfettamente la cinematica del flusso del legante, sottoposto a condizioni di carico e di temperatura esattamente determinate (vedi Figura 5-7). Il campione di bitume, in forma solida, semisolida e liquida può essere testato in tutte le temperature di impiego, dalla fase di confezionamento del conglomerato, fino alle temperature proprie della pavimentazione stradale in esercizio [5-3].

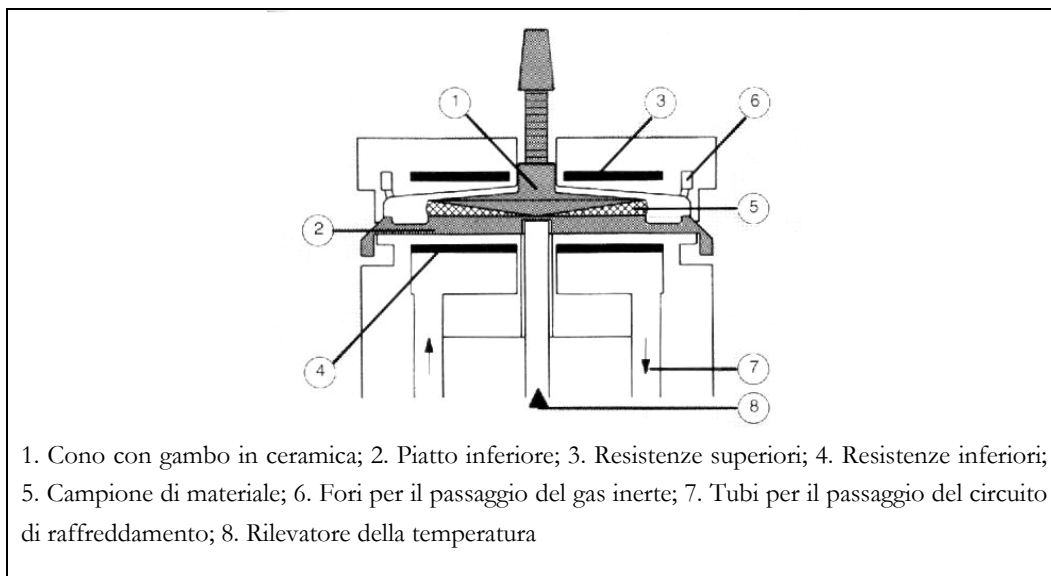


**Figura 5-7: Reometro DSR utilizzato nell'indagine sperimentale Haake Rotovisco RT10**

Qualsiasi operazione eseguita dal reometro è comandata attraverso una centralina elettronica posta in una sede separata, affiancata al reometro stesso, e regolata mediante un software di controllo. Il controllo elettronico consente i movimenti verticali (in salita ed in discesa) del supporto mobile del piatto inferiore e la sua collocazione nella posizione di misura; permette, inoltre, di imporre il giusto valore di coppia all'albero motore e di regolare il *gap* correggendone in tempo reale le fluttuazioni, sia di origine termica che di origine meccanica (forze di Poisson) (vedi Figura 5-8).



**Figura 5-8: Apparecchiatura DSR**

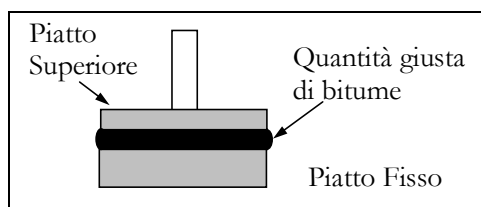


**Figura 5-9 - Elementi costitutivi del reometro.**

### **Preparazione del campione**

Il bitume in forma liquida viene versato all'interno del sistema costituito dal piatto di base e dal sensore di misura. Al fine di evitare errori di posizionamento ed indurre indesiderati fenomeni di condensazione o di *slippage*, l'alloggiamento del campione viene effettuato con il piatto posto alla temperatura superiore a 60°C. In particolare sono stati raggiunti i 67°, temperatura media tra quelle di prova, adatta a garantire l'aderenza tra i piatti e il legante e idonea anche per l'imposizione del punto di zero del reometro.

L'operazione di trasferimento del campione sul piatto inferiore del reometro ha tenuto conto delle indicazioni di letteratura atte ad evitare il fenomeno di *underfilling*. La figura 5-10 mostra la quantità adeguata di bitume per evitare questo fenomeno.



**Figura 5-10: Schema della quantità giusta di bitume per la prova DSR**

### **Preparazione del reometro**

L'introduzione del campione in macchina richiede la preventiva realizzazione delle seguenti operazioni al reometro:

- montaggio dei sistemi di misura;
- raggiungimento della temperatura media nel reometro tramite un segmento di “*Temperature setting*” (vedi Tabella 5-3);
- imposizione dello zero;
- verifica della temperatura di trasferimento del campione;
- elevazione della base alla posizione di misura.

**Tabella 5-3: Impostazioni del *Temperature setting* per il raggiungimento della temperatura media nel reometro**

Sollecitazione	nessuna
Temperatura	67 °C
Tolleranza	0.05 °C
Tempo di attesa	3000 s

Risulta particolarmente importante l'imposizione dello zero soltanto nel momento in cui il reometro raggiunge la temperatura di prova prevista, in modo tale che le dilatazioni o, viceversa, le contrazioni, normalmente prodotte nell'acciaio dei sistemi di misura delle variazioni termiche non alterino il gap impostato per la configurazione in uso (problema che è tanto più sentito quanto minore è il gap previsto).

Sebbene, infatti, il reometro RT10 sia dotato del controllo elettronico di gap termico, è in ogni caso preferibile eseguire questa operazione in modo da mettersi, per quanto possibile, al riparo da eventuali errori di mancato gap.

Portare il reometro alla temperatura di prova significa impostare un segmento di *Temperature Setting*.

Ulteriori avvertenze sull'utilizzo del reometro riguardano, a questo punto, la temperatura del bagno di raffreddamento proveniente dal criostato; per garantire, infatti, la stazionarietà della temperatura del provino nel corso della prova, è necessario programmare uno scarto termico di almeno dieci gradi tra la temperatura alla quale si intende eseguire la misura e la temperatura del bagno di raffreddamento, senza però esagerare nel divario, onde evitare che i continui colpi di calore imposti dalle resistenze del reometro per compensare la bassa temperatura del bagno vadano a ledere l'obiettivo perseguito. Il criostato può essere spento soltanto per temperature superiori a 150°C.

#### ***Condizionamento del campione***

Il protocollo di prova da seguire prevede, prima della misura, che il provino trascorra un certo tempo a temperatura costante affinché possa annullarsi al suo interno ogni eventuale gradiente termico presente.

Per condizionamento si intende, quindi, il tempo necessario alla macchina per portare il campione alla temperatura desiderata entro la tolleranza prevista, più un tempo pari a venti minuti a temperatura costante (vedi Tabella 5-4).

**Tabella 5-4: Variabili di condizionamento del segmento 1**

<b>Condizionamento: segmento 1</b>	
Sollecitazione	nessuna
Temperatura	Temperatura di Prova
Tolleranza	0.05°C
Tempo di attesa	3000s

Il secondo segmento viene, invece, definito in modo tale che il programma di gestione lasci trascorrere venti minuti a temperatura costante, grazie all'annullamento del suo controllo elettronico di temperatura, ottenuto impostando a 0.00°C la tolleranza sulla stessa (vedi Tabella 5-5).

**Tabella 5-5: Variabili di condizionamento del segmento 2**

<b>Condizionamento: segmento 2</b>	
Sollecitazione	Nessuna
Temperatura	quella di prova
Tolleranza	0.00°C
Tempo di attesa	1200 s

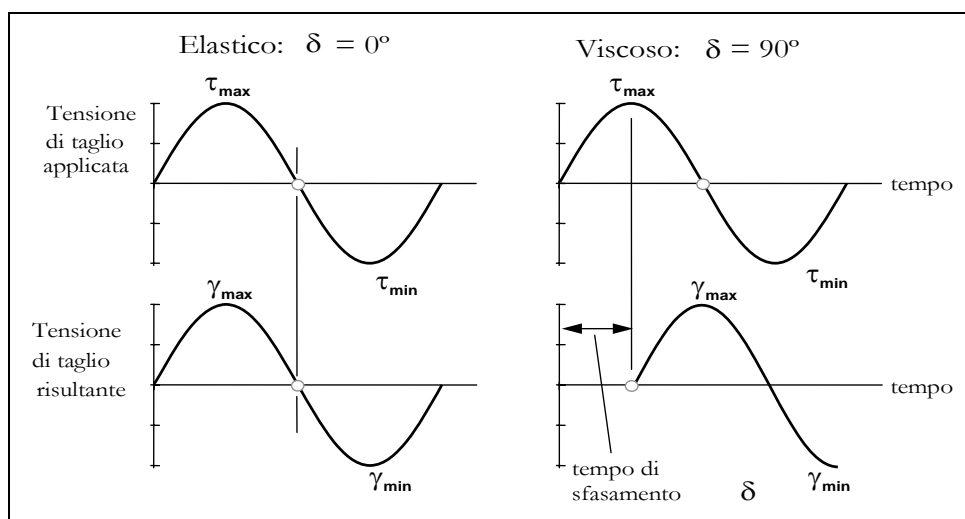
### **Procedimento**

La configurazione di prova tipica è quella di campione sottoposto a puro sforzo di taglio secondo uno schema reometrico classico di “piatto-piatto” sia in controllo di sforzo applicato (CS-mode) che in controllo di deformazione (CR-mode).

Il sistema di classificazione in esame richiede una velocità di oscillazione pari a 10 rad/s. I valori di deformazione dovuta al taglio variano tra 1 e 12% e dipendono dalle condizioni di invecchiamento a cui è stato sottoposto il bitume. I bitumi originali (non invecchiati) e quelli invecchiati mediante RTFO vengono testati con valori di deformazione pari al 10-12%, mentre i bitumi invecchiati con PAV sono sottoposti a prove con deformazioni dell'1%. I valori di deformazione devono, comunque, essere tali da consentire alla risposta del bitume, intesa come modulo complesso  $G^*$  (definito come rapporto tra la tensione di taglio totale  $\tau_{\max}-\tau_{\min}$  e la deformazione totale dovuta al taglio  $\gamma_{\max}-\gamma_{\min}$ ), di rimanere all'interno di variazioni viscoelastiche lineari. Per le percentuali di variazione citate, il valore del modulo complesso non varia in maniera apprezzabile.



La Figura 5-11 mostra i due tipi “puri” di comportamento, totalmente elastico e totalmente viscoso. Lo sfasamento temporale tra l'applicazione dello sforzo di taglio e la deformazione che ne risulta, per reometro a tensione costante, o tra la deformazione applicata e la tensione risultante, per reometro a deformazione costante, dipende dall'angolo di fase  $\delta$ .



**Figura 5-11: Comportamenti puramente elastico e puramente viscoso**

Per un materiale completamente elastico, l'applicazione di un carico comporta una risposta immediata. In questo caso, l'intervallo di tempo o angolo di fase risulta pari a zero. Un materiale viscoso, come un bitume alla temperatura di miscelazione, mostra, invece, uno sfasamento temporale piuttosto grande tra carico e risposta; in tal caso, l'angolo di fase si approssima ai  $90^\circ$ .

Per le normali temperature di esercizio di una pavimentazione, il bitume ha un comportamento viscoelastico intermedio tra le due posizioni estreme, e il DSR fornisce una risposta del tipo riportato nella Figura 5-12.

Le formule utilizzate dal software proprio di un reometro per il calcolo di  $\tau_{\max}$  e  $\gamma_{\max}$ , sono rappresentate nella Figura 5-13.

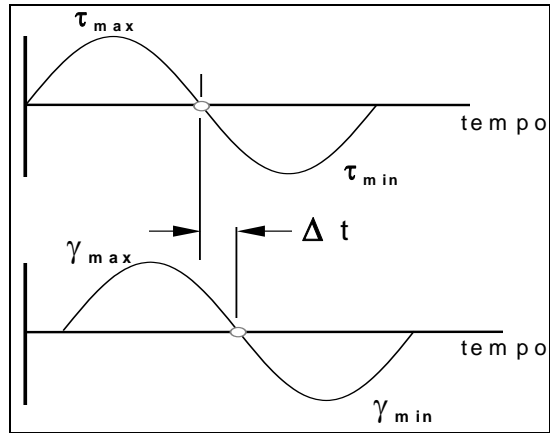


Figura 5-12: Risposta di un materiale viscoelastico

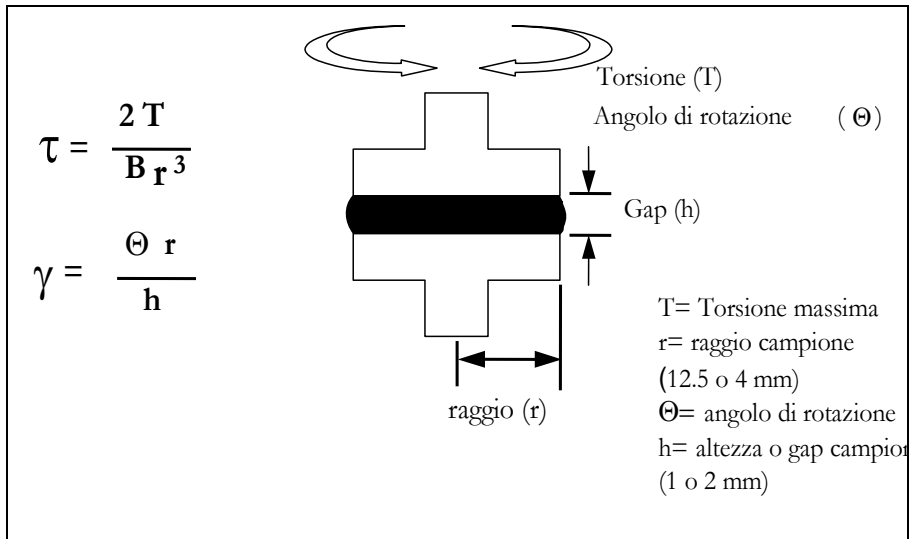


Figura 5-13: Schema delle equazioni di calcolo per il DSR

**Risultato**

Essendo il bitume un materiale viscoelastico, il DSR è utilizzato per caratterizzare tanto il comportamento viscoso quanto il comportamento elastico dei bitumi attraverso la misura del Modulo Complesso di Taglio ( $G^*$ ) e dell'Angolo di Fase ( $\delta$ ). Nonostante il DSR sia in grado di fornire informazioni su molti più parametri, solo i valori di  $G^*$  e  $\delta$  sono utilizzati dalla Specifica Superpave. Questa esige che i bitumi alle temperature di prova possedano le seguenti caratteristiche:

- Verifica della resistenza all'ormaiamento:
  - $G^*/\sin \delta$  (alla temperatura di prova) > 1.00 kPa nei bitumi vergini
  - $G^*/\sin \delta$  (alla temperatura di prova) > 2.20 kPa nei bitumi sottoposti a RTFO
- Verifica della resistenza a fatica della pellicola di bitume:
  - $G^* \sin \delta$  (alla temperatura di prova) < 5000 kPa nei bitumi sottoposti a PAV

#### 5.1.4.3 BENDING BEAM RHEOMETER - BBR (AASHTO TP1)

L'apparecchiatura BBR è stata appositamente ideata nell'ambito delle ricerche SHRP. Il metodo di prova si basa sull'ultima versione della norma ASTM D 6648-01 (Feb. 2002) e sulla norma francese XP T 66-062 e consiste essenzialmente nella misura della deformazione, a basse temperature, in prove di fluenza di un provino prismatico di bitume.

Il BBR permette di testare bitumi a temperature basse, quando questi presentano un comportamento più prossimo ai solidi elastici, permettendo così di simularne il comportamento quando è previsto un impiego in zone climatiche caratterizzate da temperature rigide.



**Figura 5-14: Prova BBR**

#### ***Procedura di calibratura***

Una delle fasi più importanti di tutta la prova risulta essere la calibratura del sistema: il compimento delle operazioni ad essa connesse è indispensabile per la qualità dei risultati dei test.

Ogni qualvolta si effettua un test o si varia la temperatura di termostatazione occorre procedere preventivamente, al fine di ottenere dei dati rappresentativi, con la taratura dell'LVD'T e della cella di carico, seguendo la procedura guidata da parte del software (vedi Figura 5-15).

Tale procedura consiste in una prima fase in cui si misurano gli spostamenti verticali dell'LVDT mediante un cilindro metallico normalizzato che serve da comparatore/spessimetro.

Questo elemento va posto sulla sinistra della piattaforma nell'unità di carico sopra un piccolo piede che ne permette la sua rotazione in modo semplice.

In seguito, per la taratura del carico verticale vengono forniti una trave di acciaio inossidabile spessa 6.37 mm e 4 pesi da 100 grammi.

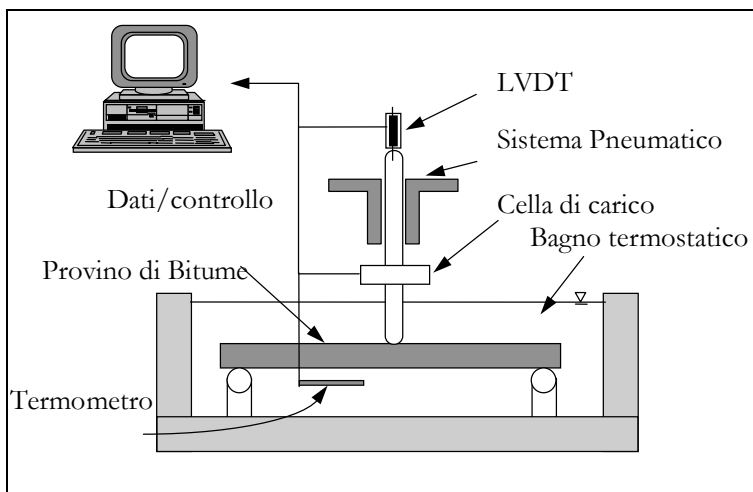


Figura 5-15: Schema di una apparecchiatura BBR

### *Test di conformità*

Preliminarmente all'esecuzione delle prove con lo strumento, occorre procedere al controllo di confidenza mediante la misura del modulo di rigidezza di una sottile trave di acciaio campione, di cui si conoscono modulo e dimensioni; tale prova si affianca alla procedura di calibratura di forze, deflessioni e temperatura al fine della verifica della procedura stessa di calibratura, e va di norma eseguito sia immediatamente prima di testare il campione di legante che dopo il raggiungimento della temperatura di prova. L'ottenimento di un valore del modulo compreso tra 174 GPa e 212 GPa indica una buona affidabilità dei valori ottenibili dalle successive prove.

Nella pratica, seguendo una procedura guidata impartita dal software di controllo, si agisce su di una sottile lamina di acciaio dello spessore di 1.19 mm e su 4 pesi da 100 grammi. Come risultato, lo strumento fornisce un valore della "compliance" misurata: per valori inferiori a 5.0  $\mu\text{m}/\text{N}$  il test è da ritenersi valido, altrimenti occorre ripetere la sequenza dall'inizio.

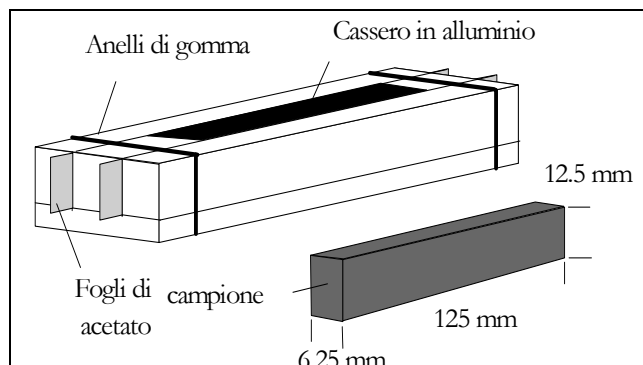
Per l'esito di queste prove rivestono particolare importanza il confezionamento del campione, da effettuarsi ricorrendo a formelle speciali, e l'allestimento della prova con sistemi autocentranti e con un rilevatore della deformazione del campione a luce laser. Dall'analisi dei risultati di tale prova si perviene alla valutazione della duttilità del bitume, tradotta dall'energia dissipata, misurabile dall'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione e sempre esprimibile in unità fondamentali.

### ***Preparazione del cassero***

La prova viene eseguita su campioni di bitume precedentemente invecchiati tramite RTFO e PAV, quindi la prova individua le caratteristiche dei bitumi come se fossero stati esposti al processo di miscelazione a caldo e invecchiamento in servizio.

Si usano tre barre rettangolari d'alluminio (una base e due lati) e due elementi per chiudere le estremità.

Prima si devono lubrificare le piastre con il lubrificante (glicerina o un lubrificante a base di petrolio) e dopo applicare le fasce in carta d'acetato. Queste possono essere di plastica resistente alle alte temperature, carta trasparente o fogli d'acetato. Bisogna far attenzione a non lasciare bolle d'aria. Di seguito si devono coprire le due estremità del cassero con un lubrificante (che può essere una miscela di glicerina e talco), montare il cassero e legare le estremità con due anelli elastici.



**Figura 5-16: Schema di preparazione del cassero**

### ***Preparazione del provino***

Si lascia raffreddare per circa 60 min fino ad aver raggiunto l'equilibrio termico e di seguito eliminare gli eccessi di bitume con una spatola calda. Di seguito si colloca il provino con il cassero nel congelatore per circa 5 min per prevenire la distorsione quando si toglie il cassero. Subito si deve scasserare il provino facendo scivolare l'alluminio, tirando la plastica. Quando la barra si è raffreddata si ritirano gli elementi di chiusura e si osservano i possibili difetti. Con le pinze si colloca la barra in bagno alla temperatura di prova per circa 60 min.

I provini sottoposti ad invecchiamento tramite PAV hanno evidenziato, come si osserva nelle Figure da 3.6 a 3.8, una fragilità tale che, in fase di scasseratura, la semplice aderenza tra bitume e acciaio del cassero ha comportato la rottura degli stessi provini.

Tale comportamento fragile è ancor più delineato dal fatto che la rottura è avvenuta su piani prevalentemente longitudinali rispetto al provino.

Per ovviare al problema si è provato a rivestire alcuni provini con carta forno in alternativa alla semplice lubrificazione. A seguito di tale operazione, nonostante sia stata facilitata l'operazione di scassero, è stata inevitabile la formazione di alcune piccole bolle d'aria sulle pareti del provino, il che ha condotto in alcuni casi ad avere una sezione non perfetta.



**Figura 5-17: Provino di Bitume modificato SBS hard**

### ***Esecuzione della prova***

La prima cosa da fare, prima di iniziare la prova, è assicurarsi che lo strumento sia calibrato.

Il BBR applica automaticamente un pre-carico di 35 mN. Di seguito applica un carico di 980 mN (circa 100g) per 1 sec, tornando al pre-carico per 20 sec.

Si inizia, quindi, la prova con un carico di 980 mN per 240 sec. Il carico è applicato a metà della barra, provocando la sua flessione.

Come riferito, per ogni temperatura si ottengono due parametri:

- Rigidezza a Flessione dopo un tempo specifico di carico (60 sec).
- Valore “m” (tasso di variazione di rigidezza ad un tempo di 60 sec).

La prova fornisce così la temperatura per una rigidezza critica e la temperatura per un valore critico di “m”.

Il Modulo di Rigidezza a Flessione,  $S(t)$ , è definito dal rapporto fra la tensione normale e la deformazione ad essa associata secondo uno schema statico proprio della trave semplicemente appoggiata, caricata puntualmente in mezzzeria.

---

Il valore assoluto della pendenza del diagramma costituito dal logaritmo del Modulo di Rigidezza ( $S(t)$ ) ed il logaritmo del tempo ( $t$ ), fornisce il valore “ $m$ ”, capace di dare un’informazione circa la dipendenza dal tempo della stessa rigidezza.

Imposto il carico in mezzzeria sulla trave semplicemente appoggiata e registrando la deformazione che progredisce nel tempo si genera nel materiale un flusso puramente estensionale, con una rigidezza che evolve in funzione della durata del carico imposto:

$$S(t) = Pl^3 / 4bh^3\delta(t) \quad (5-2)$$

dove:

$S(t)$  = modulo di rigidezza a flessione del bitume (kPa);

$t$  = tempo di applicazione del carico (sec);

$P$  = carico concentrato (N);

$\delta(t)$  = abbassamento della trave di bitume in mezzzeria (mm);

$b, h$  = base ed altezza della sezione della trave di bitume (mm);

$l$  = lunghezza della trave di bitume (mm).

Il Valore “ $m$ ” rappresenta la velocità di variazione del modulo di rigidezza  $S(t)$  nel tempo.

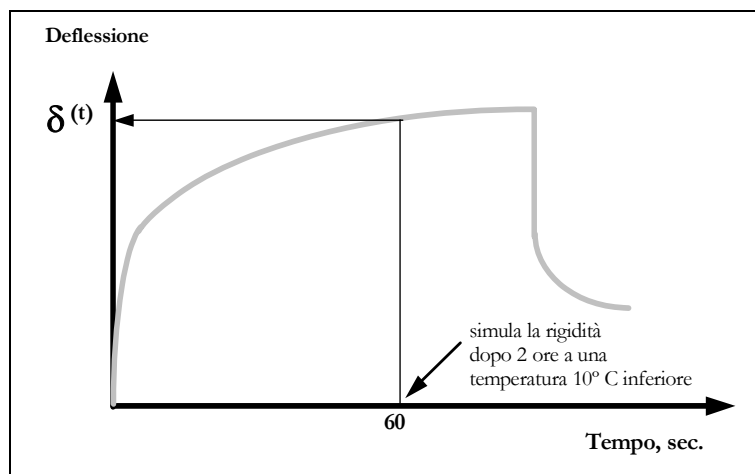


Figura 5-18: Rappresentazione della curva Deflessioni vs. tempo

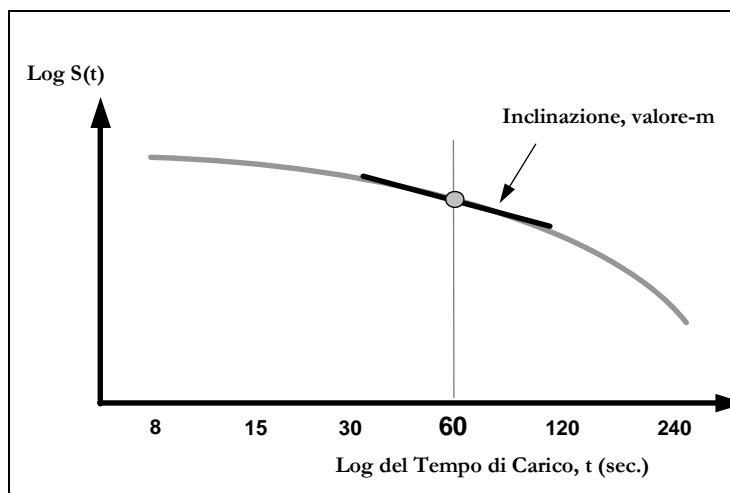


Figura 5-19: Curva Log di  $S(t)$  vs. Log del tempo di carico

### **Risultato**

Come noto, il verificarsi del fenomeno della fessurazione termica nelle sovrastrutture flessibili è correlato a repentini abbassamenti di temperatura e, nello specifico, il meccanismo che si instaura può essere spiegato con la tendenza alla contrazione degli strati della pavimentazione legati a bitume; tale contrazione risulta, però, impedita per motivi di continuità strutturale e per effetto dell'attrito presente tra i vari strati ed il supporto di fondazione, dando così origine a stati di coazione. Se le tensioni di trazione superano la resistenza della miscela, si verifica la rottura termica (*thermal cracking*).

La prova BBR viene impiegata nell'ambito del sistema SHRP come metodo di controllo in laboratorio sui bitumi relativamente alla fessurazione di origine termica, dal momento che l'applicazione di un carico costante consente di simulare le tensioni che, al diminuire della temperatura, gradualmente si generano e propagano nella pavimentazione.

La Specifica SUPERPAVE®, al fine di stabilire l'accettabilità del legante testato e di preservarlo da fenomeni di fessurazione termica, impone il rispetto dei seguenti requisiti:

- $S(t=60s)$  (alla temperatura di prova) < 300 MPa sul bitume invecchiato tramite RTFO+PAV e in corrispondenza della temperatura minima di progetto incrementata di 10°C;
- Valore "m" (alla temperatura di prova) > 0,3, al tempo = 60 secondi, sul bitume invecchiato tramite RTFO+PAV e in corrispondenza della temperatura minima di progetto incrementata di 10°C.



La correlazione tra detti parametri ed il comportamento del bitume alle basse temperature è buona per i bitumi naturali, ma non è ancora pienamente validata per bitumi modificati.

#### 5.1.4.4 DIRECT TENSION TEST - DTT (AASHTO TP3)

All'interno del progetto SHRP, l'apparecchiatura Direct Tension è stata messa a punto per misurare la resistenza a trazione diretta del bitume ovvero le sue caratteristiche di fragilità.

Particolare attenzione è rivolta nel dettaglio del confezionamento del campione, con l'utilizzo di alcune formelle speciali, e nell'allestimento della prova con sistemi autocentranti e con un rilevatore della deformazione del campione a luce laser. In questa prova si induce nel bitume un flusso di tipo estensionale, mirando a condizioni di rottura con una cinematica nota, tradotta da una velocità di deformazione prefissata.

Dall'analisi dei risultati di tale prova si perviene alla valutazione della duttilità del bitume, tradotta dall'energia dissipata, misurabile dall'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione e sempre esprimibile in unità fondamentali.

La Specifica SUPERPAVE® stabilisce che i bitumi che abbiano una rigidità nel BBR relativamente alta (tra 300 e 600 MPa), debbano essere testati fino a rottura. Se la rigidità del bitume risulta, invece, inferiore ai 300 MPa non è necessario arrivare alla rottura.

Il DTT viene eseguito in un intervallo di temperatura in cui il bitume presenta un comportamento fragile, da 0 a  $-36^{\circ}\text{C}$ , analizzando bitumi precedentemente invecchiati tramite RTFO e PAV.

I provini per il DTT vengono preparati in casseri con silicone (vedi Figura 5-20); dopo la collocazione delle parti in materiale plastico alle estremità, il provino viene preriscaldato in modo che il bitume si distribuisca all'interno del cassero. Ogni provino così ottenuto presenta un peso di circa 3 grammi ed una lunghezza di 100 mm, incluse le due estremità.

Le due parti collocate alle estremità del provino sono realizzate in polimetilmetacrilato o con altro materiale avente un coefficiente lineare di espansione termica simile a quello del bitume ( $0.00006 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ ). I bitumi aderiscono facilmente a questo tipo di materiale, senza l'aggiunta di nessun tipo di legante.

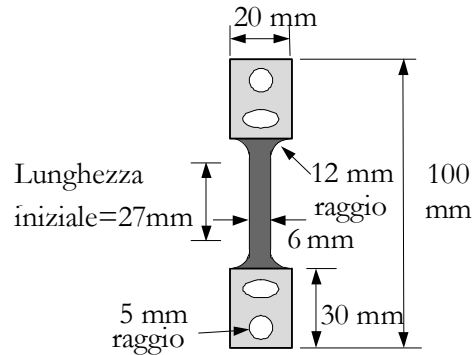
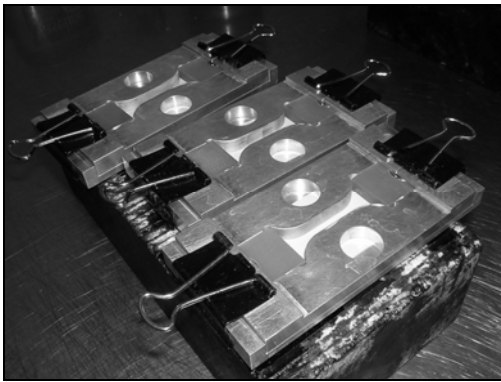


Figura 5-20 e 5-21: Casseri per provini DTT e schema di un provino DTT

Prima dell'esecuzione della prova, i provini vengono ritirati dai casseri ed assoggettati ad un condizionamento termico nella camera di ambientazione, ad una temperatura prestabilita e per un tempo di 60 minuti.

L'apparecchiatura per l'applicazione del carico deve essere in grado di applicare almeno 500 N ad una velocità di 1.0 mm/min, oltre ad essere dotata di una cellula di carico elettronica dotata di una risoluzione di  $\pm 0.1$  N.

Dato i ridotti valori di estensione di rottura che si verificano per questo tipo di prova, dovuto alle basse temperature di esecuzione della prova, non si possono applicare i tradizionali metodi meccanici di misura dell'estensione. Si ricorre, quindi, ad un micrometro laser, costituito da una sorgente che emette un fascio luminoso lungo un piano, il quale passa attraverso il provino e raggiunge un'unità di rilevamento. Quest'ultima effettua il monitoraggio del movimento relativo tra i punti luminosi superiori ed inferiori, in modo da misurare l'allungamento del campione.

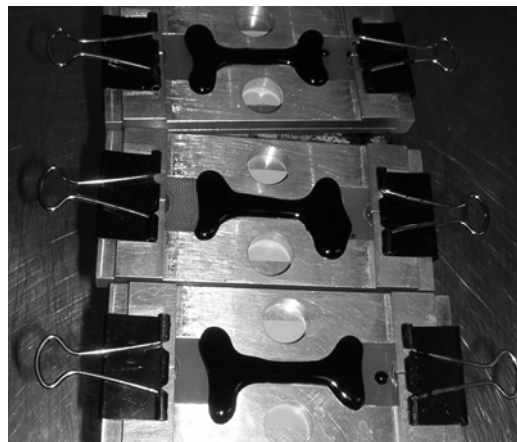


Figura 5-22: Provini DTT

Ciascuno dei quattro provini viene testato individualmente (vedi Figura 5-22). Prima dell'inizio della prova, vengono attivati gli indicatori di carico e di estensione e viene azzerato il micrometro laser. Il carico tensionale viene applicato tirando una delle estremità alla velocità di 1.0 mm/min. La durata della prova, dall'applicazione del carico sino alla rottura, è generalmente inferiore al minuto.

La deformazione ottenuta al momento della rottura viene utilizzata per il calcolo della tensione di rottura, indice del comportamento fragile o duttile che assumerà il bitume, riferendosi alla temperatura minima raggiunta durante la prova. La deformazione a rottura  $\epsilon_f$  è ottenuta come il rapporto tra la differenza di lunghezza  $\Delta L$  e la lunghezza iniziale  $L_e$  (Figura 5-23).

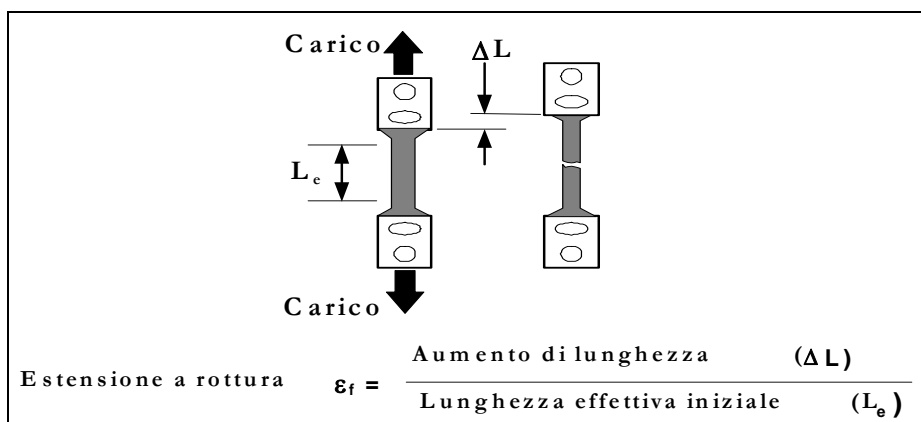


Figura 5-23: Deformazione di rottura nella prova DTT

Nella prova di tensione diretta, la rottura viene definita dal carico raggiunto al momento della massima tensione ottenuta (vedi Figura 5-24), e non necessariamente corrispondente al momento della rottura del provino.

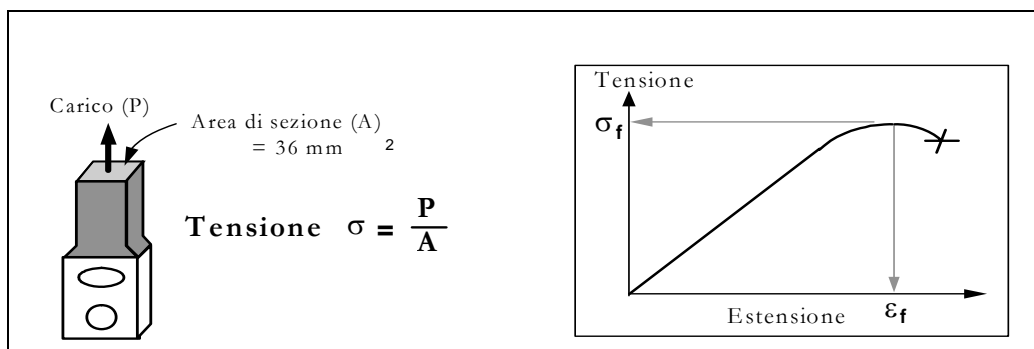


Figura 5-24: Tensione di rottura nella prova DTT

Per la prova D'TT, la Specifica SUPERPAVE® stabilisce:

- Estensione di rottura (alla temperatura di prova) > 1.0%, bitumi invecchiati tramite RTFO + PAV.

### 5.1.5 Applicazione Pratica della Classificazione SHRP

Le quattro prove sopra descritte caratterizzano i bitumi all'interno di un ampio intervallo di temperature, quando sottoposti a carichi elevati e ripetuti.

Per controllare la fessurazione alle basse temperature si effettua la prova BBR. Se, nonostante si ritenga che la fessurazione alle basse temperature sia minima, nel corso di tale prova dopo 60 secondi si verifica che  $S(t) \leq 300$  MPa o che  $m \geq 0.3$  (ovvero in caso di fallimento della prova BBR), si abbinata un'ulteriore prova eseguita con il D'TT.

Nel campo delle temperature intermedie, che caratterizzano la maggior parte dei climi, i leganti bituminosi presentano caratteristiche sia di liquidi viscosi che di solidi elastici. In questo caso, la principale preoccupazione riguarda il controllo delle deformazioni permanenti che si verificano quando il bitume non riesce a recuperare le deformazioni imposte dall'applicazione di un carico o dovute a fatica. Tali deformazioni, così come la fessurazione da fatica, vengono controllate tramite il DSR effettuato, appunto, per temperature intermedie.

Alle temperature per le quali dovesse verificarsi che  $G^*/\text{sen}\delta \geq 1.00$  kPa, per un bitume tal quale, o  $G^*/\text{sen}\delta \geq 2.20$  kPa per un campione di bitume invecchiato mediante RTFO, viene garantita la performance alle temperature medio-alte.

D'altro lato, alle temperature per le quali si verifica che  $G^*\text{sen}\delta < 5000$  kPa, per un campione di bitume invecchiato mediante PAV, viene garantito il controllo della fessurazione a fatica.

Quando soggetti a temperature particolarmente elevate, i bitumi si comportano come fluidi. In particolare, le condizioni di maggior temperatura vengono raggiunte durante la fase di miscelazione con gli aggregati, per la quale è necessario garantire le necessarie caratteristiche di miscibilità e pompaggio. La prova con viscosimetro eseguita a 135°C conferma tali caratteristiche del legante nel caso in cui la viscosità del bitume tal quale risulti inferiore a 3.0 Pa-secondo.

La Figura 5-25 riassume i parametri associati a ciascuna prova.

---

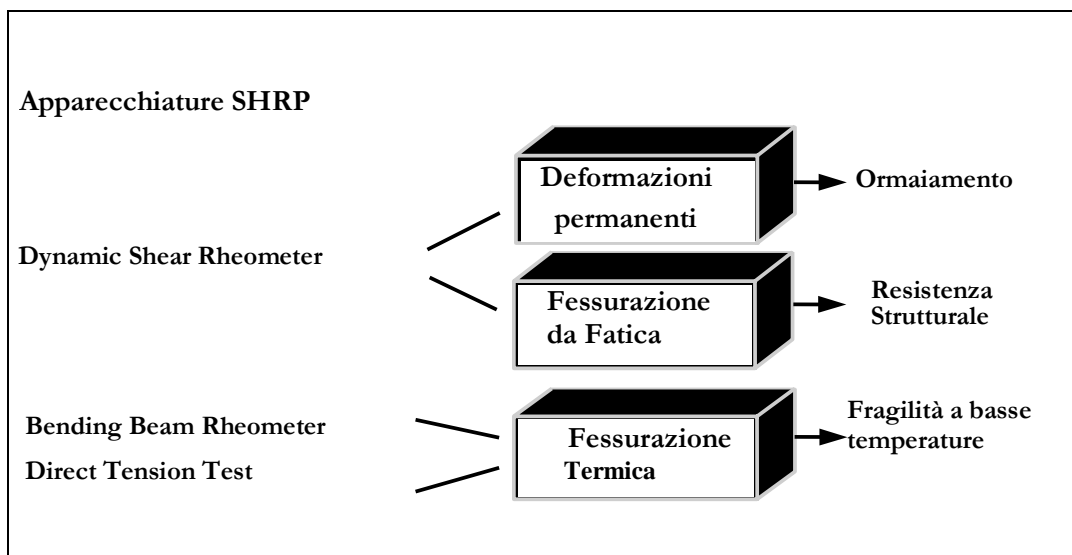


Figura 5-25: Prove SHRP

### 5.1.6 Criticità della metodologia SHRP

Come riferito nel precedente capitolo, l'esigenza di arrivare alla produzione di bitumi modificati di qualità e prestazioni sempre più elevate ha condotto le ricerche più recenti ad approfondire la relazione esistente fra la reologia dei bitumi e quella dei conglomerati bituminosi, portando a ritenere, supportati dal comportamento fisico dei bitumi (in particolare dei bitumi modificati) in pavimentazioni esistenti, che tali bitumi abbiano un comportamento viscoelastico non lineare [5-2]. Il principio della metodologia SHRP, secondo cui i bitumi hanno un comportamento viscoelastico lineare, è attualmente oggetto di vari dibattiti, dal momento che ci si chiede se si possa limitare la caratterizzazione al solo campo lineare [5-4].

Questa domanda nasce dai risultati ottenuti in uno studio condotto in USA nel 1999, dove è stato osservato che piccole deformazioni (1%) nel conglomerato bituminoso possono dar luogo a grandi deformazioni nel legante (32%), che bitumi con comportamenti simili in campo lineare possono mostrare differenze in campo non lineare e che la caratterizzazione SHRP non è stata in grado di evidenziare in maniera adeguata le differenze tra bitumi modificati e non [5-5].

### 5.1.7 National Cooperative Highway Research Program

Il *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), istituito nel 1962, è soggetto all'amministrazione del *Transportation Research Board* del *National Research Council* ed è sponsorizzato dai dipartimenti membri dell'*American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), in cooperazione con la *Federal Highway Administration* (FHWA). L'obiettivo del NCHRP è di condurre programmi di ricerca su specifiche problematiche di interesse concernenti i diversi aspetti delle infrastrutture stradali (pianificazione, progettazione, realizzazione, esercizio e manutenzione) sull'intero territorio nazionale.

In particolare, il Project 9-10 dal titolo "Specifiche SUPERPAVE® per i leganti bituminosi modificati", verte sull'area dei materiali bituminosi. Nell'ambito di tale progetto, un gruppo di ricerca costituito dall'*Asphalt Institute of Lexington* (Kentucky), dalla *University of Wisconsin* e dal *National Center for Asphalt Technology di Auburn* (Alabama), ha ricevuto l'incarico di condurre studi teorico-sperimentali al fine di verificare l'applicabilità delle specifiche e dei protocolli del sistema SUPERPAVE® ai leganti bituminosi modificati, oltre che di approfondire le conoscenze circa le reali modalità di incremento delle prestazioni dei bitumi conseguenti alla modifica.

Le attività del gruppo sono consistite dapprima nella pianificazione ed esecuzione di un vasto programma di prove di laboratorio, finalizzato a caratterizzare in maniera completa un ampio e rappresentativo gruppo di materiali. Sono, poi, stati condotti studi mirati all'individuazione di possibili migliorie da apportare alla norme esistenti e ai relativi metodi di prova applicati ai bitumi modificati. Infine, per confermare la validità delle alterazioni proposte, è stato attuato un programma di prove prestazionali su miscele bituminose realizzate mediante i leganti precedentemente testati. Una delle prerogative del programma di ricerca è stata quella di utilizzare e mantenere le medesime strumentazioni sviluppate nello SHRP.

I risultati della ricerca hanno dimostrato come il sistema SHRP non consenta di caratterizzare adeguatamente le prestazioni dei bitumi modificati, pervenendo in generale ad una sottostima delle effettive proprietà.

Per ovviare a tale limitazione, i tentativi furono convogliati verso la ricerca di nuovi metodi, approfondendo alcuni concetti base quali quelli di flusso viscoso ed energia di dissipazione, con lo scopo di pervenire a nuovi parametri di valutazione maggiormente correlati con le proprietà delle miscele. Sono state, pertanto, elaborate e sviluppate nuove specifiche e protocolli di prova per ognuna delle principali tipologie di ammaloramento: deformazioni permanenti, rottura per fatica, rottura di origine termica.

---

In aggiunta, sono stati proposti nuovi metodi per la determinazione di altri importanti aspetti, quali la stabilità allo stoccaggio, le temperature ottimali di miscelazione e di addensamento. I risultati del programma non sono, tuttavia, da considerarsi definitivi, come conferma il fatto che i nuovi metodi proposti non sono stati ancora recepiti come standard di prova. Risulta necessario procedere, previamente, ad una significativa verifica di campo.

Di seguito si traccia un quadro dell'attuale evoluzione della caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi, con particolare riferimento, in funzione del presente lavoro, a quelli modificati. Seguendo il criterio di prestazionalità che sta alla base delle metodologie sopra esposte, viene esaminato singolarmente ciascuno dei requisiti legati ai principali ammaloramenti verificabili nei conglomerati bituminosi in opera.

#### 5.1.7.1 RESISTENZA A FATICA

Lo studio della resistenza alla fatica (*fatigue cracking*) dei bitumi ha riscosso una certa attenzione solo recentemente. Una delle ragioni risiede nella mancanza sia di una comoda prova di fatica per il bitume, sia di evidenze sperimentali che mostrino il suo impatto sul comportamento a fatica della miscela.

La rottura da fatica è una forma di fratturazione causata dalla ripetuta applicazione di carichi. Si è osservato che alcuni materiali, come polimeri, acciaio e ceramica, si rompono a causa di sollecitazioni che, pur essendo inferiori a quelle necessarie per avere una rottura immediata, sono applicate ripetutamente. Quindi, sollecitazioni di per sé insufficienti per produrre rottura in un solo ciclo, possono danneggiare il materiale mediante più cicli di carico a seguito dell'accumulo di danno fino al cedimento. Questo fenomeno si evidenzia se la rigidità è superiore ad un certo valore o per temperature sufficientemente basse. Nella rottura da fatica, la formazione e lo sviluppo di fessure sono accompagnate da una graduale diminuzione del modulo con l'incremento del numero di oscillazioni.

La proposta più attuale per la classificazione di un legante relativamente alla resistenza alla fatica, sviluppata proprio nell'ambito del NCHRP 9-10, è legata al concetto di danno (*damage behaviour*). Come per l'intero programma, l'obiettivo basilare è stato quello di verificare l'effettiva correlazione esistente tra il parametro di fatica SHRP del legante ed il comportamento a fatica delle relative miscele. Il tipo di test impiegato è la prova di fatica flessionale conforme alla norma AASHTO TP8, eseguita su campioni prismatici in condizioni di controllo di deformazione e ad una frequenza di oscillazione di 10 Hz.

Ai fini dell'esecuzioni della prova, le temperature dei diversi campioni vengono determinate riferendosi al Performance Grade dei relativi bitumi secondo le specifiche SHRP, ed in particolare assumendo la temperatura intermedia tra quella massima e minima di progetto determinata sul materiale invecchiato mediante PAV ( $G^* \text{sen} \delta = 5000$  kPa per  $\omega = 10$  rad/s). Per eliminare una componente di variabilità, i campioni vengono realizzati con il medesimo contenuto di vuoti e condizionati in forno per 4 ore alla temperatura di 135°C. Nel corso della prova di fatica flessionale viene misurato l'andamento del modulo di rigidità all'aumentare del numero di cicli; nel corso del Progetto 9-10, per l'interpolazione dei punti sperimentali è stata adottata la legge seguente:

$$S = S_0 - S_1 N^n \quad (5-3)$$

dove  $S$  è la rigidità flessionale,  $S_0$  la rigidità iniziale (valutata per  $N=50$ ), mentre  $S_1$  ed  $n$  sono due costanti di regressione.

Convenzionalmente, la durata alla fatica della miscela è rappresentata dal numero di cicli in corrispondenza del quale il modulo iniziale si riduce del 50%. I risultati ottenuti in ambito NCHRP hanno evidenziato come, relativamente alla resistenza delle miscele, gli effetti dovuti alla natura degli aggregati ed alla loro granulometria siano molto meno significativi rispetto a quelli dovuti al legante (grado e tipologia di modifica). Dal momento che, per le temperature di prova e secondo le specifiche SHRP, tutti i bitumi presentavano le medesime proprietà (ossia, appartenevano alla stessa classe prestazionale), le differenze di comportamento delle miscele hanno messo in evidenza i limiti dell'effettiva validità del parametro  $G^* \text{sen} \delta$ .

Una successiva serie di prove reologiche tramite il DSR sugli stessi bitumi, invecchiati però mediante RTFO, ha evidenziato una correlazione piuttosto debole tra i valori di  $G^* \text{sen} \delta$  dei leganti e la resistenza alla fatica delle corrispondenti miscele, in ragione del fatto che tale parametro, la cui definizione è legata al concetto di energia dissipata, viene misurato nel campo di comportamento visco-elastico lineare (ipotesi non verificata nella realtà pratica).

Un altro aspetto non considerato dalla metodologia SHRP è rappresentato dalle variazioni che le proprietà del bitume subiscono durante la sollecitazione ciclica. Nella definizione di una metodologia alternativa, il NCHRP 9-10 si è focalizzato sulla simulazione dei fenomeni di fatica all'interno del materiale, monitorando direttamente il meccanismo di accumulo del danno.

---



Sempre mediante il DSR sono state eseguite prove denominate “*time-sweep test*”, che consistono nel sottoporre il bitume ad una sollecitazione o ad una deformazione ciclica costante nel tempo per determinate frequenza e temperatura.

In particolare, sono state eseguite prove sia in controllo di deformazione che in controllo di tensione sui bitumi invecchiati mediante RTFO, per simulare gli effetti dovuti alla produzione e messa in opera dei conglomerati, alla frequenza di 10 Hz e temperatura pari a quella impiegata nelle prove di fatica eseguite sulle corrispondenti miscele.

L'andamento, per i bitumi testati, del modulo complesso al variare del numero di cicli mostra una fase iniziale estremamente regolare seguita, dopo un certo numero di cicli funzione della natura del materiale, da un decadimento delle proprietà più o meno rapido.

Dal punto di vista pratico, la fatica del campione è visibile come una rottura completa e, in caso la sollecitazione venga imposta per mezzo di un reometro, i piatti superiore e inferiore dello stesso non sono più connessi. In prove a sollecitazione costante, il tempo o il numero di oscillazioni necessari a rompere il campione è preso come "tempo di fatica". La velocità del danneggiamento rallenta appena la sollecitazione diminuisce. Analogamente, può essere imposta al campione una deformazione; nelle prove a deformazione controllata, il "tempo di fatica" è assunto come quel tempo al quale la rigidità è ridotta al 50% del suo valore iniziale, in analogia con le prove di fatica effettuate sulle miscele.

Durante il danneggiamento da fatica, sottili fessure iniziano a crescere dal bordo verso il centro del campione. Se il campione è lasciato a riposo per un lungo periodo di tempo, le fessure si richiuderanno lentamente e si formerà una superficie liscia. La velocità con la quale le fessure scompaiono dipende fortemente dalla rigidità del bitume e quindi indirettamente dalla temperatura. All'aumentare della deformazione sono necessarie meno oscillazioni per produrre danno da fatica, e questa relazione è lineare in un piano logaritmico. Il danno da fatica avviene indipendentemente se lo sforzo iniziale è all'interno o meno del dominio di viscoelasticità lineare.

I bitumi più duri esibiscono rottura per fatica a temperature più elevate rispetto a quelli più soft, e tale dipendenza dal grado di penetrazione è stata riscontrata anche per misurazioni effettuate a deformazione costante.

I leganti ossidati sono più resistenti alla fatica a bassi livelli di deformazione, ma a livelli di deformazione elevati sono molto soggetti a rottura. Per scopi pratici, ciò indicherebbe che per strade con traffico pesante e strati sottili, sottoposte ad elevate sollecitazioni e deformazioni, prodotti estremamente ossidati possono mostrare una maggiore rottura da fatica. Al contrario, per strade con strati spessi e traffico leggero, prodotti ossidati possono apportare effetti benefici sempre relativamente alla resistenza a fatica.

Inoltre, negli esemplari ossidati le temperature alle quali si hanno fenomeni di fatica sono più elevate rispetto ai leganti tal quali.

L'invecchiamento ha un effetto simile all'ossidazione. Come risultato dell'aumentata rigidità, la temperatura di prova per l'esemplare invecchiato è più alta rispetto al prodotto non invecchiato. La modifica con polimeri può avere un effetto positivo sul comportamento a fatica, ma questo effetto positivo dipende dalla quantità di polimeri aggiunti.

#### 5.1.7.2 ORMAIAMENTO

Il fenomeno dell'ormaiamento (*rutting*), dipende da molteplici variabili mutuamente intergenti, legate sia alle proprietà dei componenti base che alle caratteristiche volumetriche finali della miscela. In tale contesto risulta, quindi, piuttosto complesso isolare il contributo del legante bituminoso.

Attualmente gli approcci maggiormente interessanti sono quello proposto nell'ambito del NCHRP e quello basato sul concetto di *Zero Shear Viscosity (ZSV)*.

Relativamente al primo, analogamente a quanto visto a proposito della resistenza a fatica, lo studio sperimentale ha preso inizio con la ricerca di correlazioni tra proprietà dei leganti e prestazioni delle miscele bituminose.

Queste ultime, relativamente all'ormaiamento, sono state valutate mediante prove di taglio ripetuto ad altezza costante (*Repetead Shear Constant Height*), secondo la norma AASHTO TP7, imponendo una tensione di taglio pari a 207 kPa, ad una temperatura pari a quella massima di progetto del bitume diminuita di 12 gradi.

I risultati della sperimentazione mostrano come l'entità della deformazione progressivamente accumulata dipenda sia dal legante che dalle proprietà degli aggregati [5-6]. Al fine di determinare un indicatore della tendenza all'ormaiamento, si è fatto ricorso alla seguente legge di regressione dei dati sperimentali:

$$\log \varepsilon_p = \log \varepsilon_{p1} + S \log N \quad (5-4)$$

dove

$\varepsilon_p$  = deformazione totale accumulata

$\varepsilon_{p1}$  = fattore di deformazione iniziale

N = numero di cicli di carico.

---

All'interno di tale espressione, la pendenza logaritmica  $S$  rappresenta una misura della velocità di accumulo delle deformazioni permanenti e può essere considerata come un valido indicatore dell'influenza del legante sul processo di *rutting*.

I differenti risultati ottenuti per miscele aventi medesimi aggregati e bitumi dello stesso PG dimostra, anche in questo caso, come il criterio SHRP non descriva correttamente l'effettivo comportamento delle miscele. Inoltre, prove DSR sui bitumi, previamente sottoposti ad invecchiamento mediante RTFO, eseguite a temperature pari a quelle delle prove sulle miscele, mostrano una ridotta correlazione tra i valori del parametro  $G^*/\sin\delta$  ed il comportamento dei conglomerati relativamente all'ormaiamento.

Questo conferma la scarsa adeguatezza di tale parametro come indicatore del comportamento dei conglomerati.

Un'ulteriore critica alla validità di  $G^*/\sin\delta$  riguarda il fatto che tale parametro viene misurato dopo pochi cicli di carico in un campo di comportamento visco-elastico lineare, durante i quali non si è verificato alcun danno. Il tipo di sollecitazione ciclica reversibile non permette, inoltre, una misura diretta dell'accumulo delle deformazioni durante la successione di ripetizioni del carico [5-6]. Al fine di ovviare il problema, è stata messa a punto una nuova procedura denominata prova di *creep* ripetuto, che consiste nel sottoporre il provino a cicli ripetuti di *creep* e di *recovery*, e nel corso della quale è possibile osservare l'andamento della deformazione permanente nel tempo. Questo tipo di prova permette di misurare il danno accumulato sia nel campo lineare che non lineare e di quantificare in maniera diretta l'entità della deformazione permanente, oltre a consentire l'impiego di strumentazioni già esistenti, quali il DSR.

Nella Figura 5-26 è riportato un esempio dei risultati ottenibili da un prova di *creep* ripetuto.

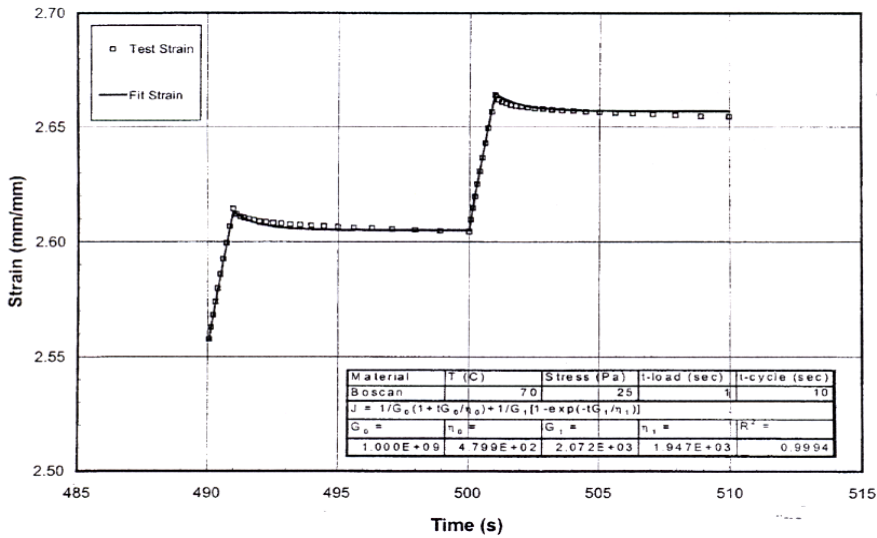


Figura 5-26 –Esempio di risultati di una prova di creep ripetuto

Una volta definite le procedure di prova, sempre in ambito NCHRP è stato definito un metodo che consenta di riassumere i risultati sperimentali con un unico valido indicatore. Provata sperimentalmente la scarsa validità del parametro S quale indicatore sintetico dell'ormaiamento, è stato messo a punto un approccio basato sull'impiego del modello di Burgers (vedi Capitolo 4) per descrivere l'andamento delle deformazioni nel tempo nei diversi cicli di carico, riportato schematicamente in Figura 5-27.

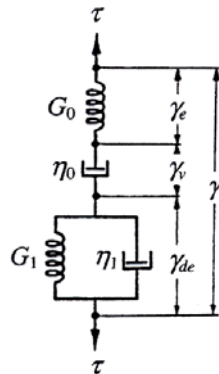


Figura 5-27 - Modello analogico di Burgers

Secondo tale modello, i cui parametri sono rappresentati dalle costanti elastiche delle due molle e dalla viscosità dei due dissipatori, l'equazione che esprime la deformabilità (creep compliance) nelle tre componenti elastica ( $J_E$ ), elastica ritardata ( $J_{DE}$ ) e viscosa ( $J_V$ ) è la seguente:

$$J(t) = J_E + J_{DE}(t) + J_V(t) \quad (5-5)$$

La componente della rigidità  $G_V$ , definita come l'inverso della deformabilità viscosa  $J_V$ , è risultata essere un valido indicatore del contributo fornito dal bitume relativamente all'ormaiamento.

Il protocollo messo a punto durante il programma di ricerca prevede l'esecuzione della prova di *creep* ripetuto mediante il DSR. La temperatura di prova è pari alla massima temperatura di progetto d'accordo con la norma AASHTO MP1, mentre la tensione di taglio deve essere compresa tra 25 e 300 Pa, in funzione della capacità di risoluzione di misura delle deformazioni da parte dello strumento. I cicli di carico sono costituiti dalla successione di una fase di *creep* della durata di 1 secondo e una fase di *recovery* di 9 secondi, o comunque con un rapporto  $t_{creep}/t_{recovery}$  pari a 9.

Il numero totale di cicli previsto è pari a 100, ed i dati di deformazione e tempo corrispondenti ai cicli 50 e 51 vengono utilizzati per ricavare i parametri del modello di Burgers visto sopra.

L'analisi eseguita per valutare la correlazione esistente tra il comportamento delle relative miscele bituminose e la componente viscosa della rigidità del rispettivo legante, relativamente al fenomeno dell'ormaiamento, ha messo, tuttavia, in evidenza un modesto grado di dipendenza reciproca.

Il metodo messo a punto nell'ambito del NCHRP 9-10 relativamente al fenomeno del *rutting*, nonostante rappresenti un'evoluzione rispetto al metodo SHRP, necessita quindi di ulteriori sviluppi ed approfondimenti.

### 5.1.7.3 ZERO SHEAR VISCOSITY

Un approccio alternativo per la caratterizzazione dei bitumi relativamente all'ormaiamento, si incentra sul concetto di viscosità, la quale risulta direttamente legata ai fenomeni dissipativi che si instaurano in tale processo di ammaloramento. Dal momento che nei leganti, soprattutto in quelli modificati, la viscosità dipende anche dalle condizioni di carico, o di flusso, si fa riferimento ad uno specifico valore di viscosità denominato *Zero Shear Viscosity* ( $\eta_0$ ).

Quando sottoposto ad un processo deformativo caratterizzato da un gradiente di deformazione estremamente basso, un materiale si adatta in modo continuo alle sollecitazioni esterne, mantenendo in ogni istante una condizione molto prossima a quella di equilibrio termodinamico e senza subire alcuna modifica strutturale. In tali condizioni un fluido visco-elastico presenta, per ogni temperatura, un valore limite della viscosità, denominata appunto  $\eta_0$ . Tale grandezza, entro un certo intervallo, risulta indipendente dalla velocità di flusso, evidenziando una diretta proporzionalità tra tensione e gradiente della deformazione: si dice che il materiale si trova nella prima regione di comportamento newtoniano.

Secondo la definizione stessa di  $\eta_0$ , una sua misura diretta richiederebbe l'imposizione di gradienti di deformazione estremamente piccoli, non realizzabili mediante gli strumenti disponibili, per cui risulta necessario ricorrere a metodi indiretti, ricavando tale parametro da altre tipologie di prove [5-7].

Un primo metodo, sviluppato da Marasteanu e Anderson [5-8], ricava la *Zero Shear Viscosity* da prove DSR in regime oscillatorio, basandosi su alcune proprietà delle curve maestre e del modulo complesso come funzione della frequenza. L'angolo di fase  $\delta$  risulta, infatti, rappresentare con buona approssimazione la pendenza della curva  $\log|G^*| - \log \omega$  a meno del fattore moltiplicativo 90.

Nella parte della curva maestra prossima all'asintoto viscoso,  $|G^*|$  risulta direttamente proporzionale a  $\omega$ , mentre  $\delta$  è prossimo a  $90^\circ$ . Ne consegue che un valore di  $\delta$  uguale o molto prossimo a  $90^\circ$  corrisponde ad una condizione di flusso in regime stazionario, che si può tradurre come segue:

$$\eta_0 \cong \eta \cong \frac{G''}{\omega} \cong \frac{|G^*|}{\omega} \quad (5-6)$$

Dal momento che portare bitumi modificati in condizioni prossime all'asintoto viscoso risulta particolarmente difficile, il metodo in esame prevede il ricorso alla modellazione dei dati reologici secondo il modello C-A-M (Christensen-Anderson-Marasteanu) [5-2], espresso dalla relazione

$$|G^*(\omega)| = G_g \left[ 1 + \left( \frac{\omega_c}{\omega} \right)^v \right]^{\frac{w}{v}} \quad (5-7)$$

---

dove:

$G_g$  = modulo limite vetroso

$\omega_c$  = frequenza di cross-over

$v = \log 2/R$

$R$  = indice reologico

$w$  = parametro sperimentale del modello

Derivando l'equazione precedente si ottiene l'angolo di fase espresso come

$$\delta(\omega) = 90 \frac{w}{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^v} \quad (5-8)$$

ed imponendo  $\delta=90^\circ$  si ottiene

$$\omega_{90} = \omega_c (w-1)^{\frac{1}{v}} \quad (5-9)$$

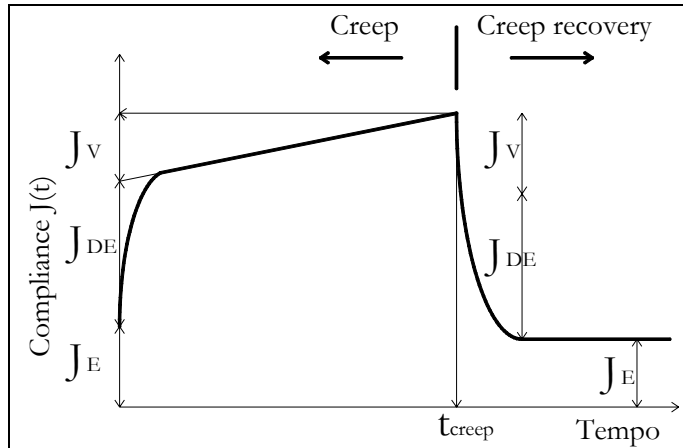
Sostituendo nella (4-5) si ricava:

$$\left|G^*(\omega)\right|_{90} = G_g \left(1 - \frac{1}{w}\right)^{\frac{w}{v}} \quad (5-10)$$

che consente di calcolare la *Zero Shear Viscosity* come

$$\eta_0 = \frac{\left|G^*\right|_{90}}{\omega_{90}} = \frac{G_g}{\omega_c} \left[ \frac{(w-1)^{w-1}}{w^w} \right]^{\frac{1}{v}} \quad (5-11)$$

Un secondo metodo è stato proposto da Phillips et al. [5-9], e prevede l'esecuzione di prove di creep-recovery, noto che la deformabilità  $J(t)$ , come visto, può essere scomposta nelle tre componenti elastica  $J_E$ , elastica ritardata  $J_{DE}$  e permanente  $J_V$  (vedi Figura 5-28).



**Figura 5-28 - Tipico andamento della deformabilità nel tempo in una prova di creep-recovery**

Si può ricavare il valor di  $\eta_0$  sia durante la fase di *creep*, come inverso della pendenza della curva della deformabilità nelle condizioni di flusso stazionario:

$$\eta_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\left[ \frac{J(t)}{t} \right]} \quad (5-12)$$

sia misurando la deformabilità residua al termine della fase di recovery come

$$\eta_0 = \lim_{t_{recovery} \rightarrow \infty} \frac{t_{creep}}{J_{creep}(t_{recovery})} = \frac{t_{creep}}{J_{DE}} \quad (5-13)$$

Il principale limite di questo metodo consiste nell'impossibilità di raggiungere condizioni di stazionarietà a temperature medio-alte per i bitumi contenenti elastomeri ad alto grado di modifica, riducendo l'attendibilità dei risultati.

### 4.3.3 Rottura di origine termica

Il criterio SHRP per la qualificazione dei bitumi relativamente alla rottura di origine termica (*low-temperature cracking*), basata esclusivamente sulla rigidità flessionale, risulta attualmente superato.

Al fine di valutare le effettive proprietà dei leganti nei confronti della fessurazione occorre, infatti, conoscere la reale risposta in termini di tensioni o deformazioni di rottura, anche al fine di poter meglio valutare l'eventuale contributo di un modificante.



Seguendo questo criterio, la recente norma AASHTO MP1a, basata su un modello termo-viscoelastico proposto da Bouldin et al [5-10] e sul concetto di temperatura critica  $T_{CR}$ , consente di calcolare le tensioni di coazione nella pavimentazione dovute ad un gradiente termico a partire da prove eseguite mediante BBR.

Partendo dai dati sperimentali delle prove BBR a due diverse temperature, si ricava la curva maestra del modulo di rigidità  $S$ , attraverso il modello analitico C-A-M per l'interpolazione dei punti sperimentali:

$$S(\xi) = S_g \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\lambda} \right)^\beta \right]^{-\frac{\kappa}{\beta}} \quad (5-14)$$

dove  $\xi$ , definito come tempo ridotto, è pari al rapporto tra il tempo di misura e uno shift factor ( $t/\alpha_T$ ), mentre  $\lambda$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  sono costanti di regressione.

Applicando il metodo di Hopkins e Hamming [5-11], si ricava il modulo di rilassamento del bitume tramite integrazione numerica dell'equazione:

$$\int_0^t E(\xi) \cdot D(t - \xi) d\xi = t \quad (5-15)$$

dove

$E(\xi)$  = modulo di rilassamento al tempo ridotto  $\xi$ ,

$D(\xi) = 1/S(\xi)$  = deformabilità flessionale,

$t$  = tempo di misura.

La tensione termica generata in una struttura monodimensionale di materiale dal comportamento visco-elastico lineare, termo-reologicamente semplice e per una distribuzione omogenea della temperatura, può essere ricavata tramite integrazione numerica dell'espressione:

$$\sigma(\xi) = \int_0^\xi E(\xi - \xi') \frac{\partial(\varepsilon - \varepsilon^{th})}{\partial \xi} d\xi' \quad (5-16)$$

dove

$\sigma(\xi)$  = tensione termica al tempo ridotto  $\xi$ ,

$\xi'$  = variabile di integrazione,

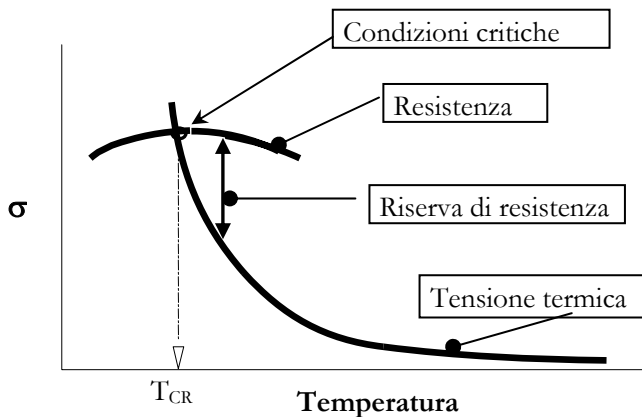
$\varepsilon$  = deformazione meccanica virtuale

$\varepsilon^{th}$  = deformazione termica virtuale

Una volta calcolata la tensione termica nel bitume, si ricava l'effettiva tensione termica che si origina nella pavimentazione mediante un fattore empirico di trasferimento del danno, denominato Pavement Constant (PC), come segue:

$$\sigma_{th}(miscela) = PC \cdot \sigma_{th}(bitume) \quad (5-17)$$

Dal confronto delle tensioni termiche calcolate con la resistenza a trazione del materiale misurata mediante prove DTT, si ottiene la condizione di rottura quando lo stato di coazione indotto dalla variazione di temperatura supera la resistenza. In corrispondenza di tale punto di rottura si definisce la temperatura critica  $T_{CR}$ , come schematizzato nella Figura 5-29.



**Figura 5-29 – Determinazione della temperatura critica.**

Alcune limitazioni di questo metodo consistono nell'assunzione, non realistica, di un coefficiente di dilatazione termico uguale per tutti i bitumi, oltre al fatto di non tenere in debita considerazione parametri quali la duttilità o l'indurimento fisico alle basse temperature.

Nell'ambito dell'NCHRP 9-10 è stata sviluppata una procedura in grado di superare tali difetti, nonostante necessiti ancora di una debita validazione sperimentale. Il metodo prevede una serie di passaggi per la determinazione delle varie grandezze fisiche del legante.

La deformabilità viene determinata come inverso della rigidezza flessionale misurata tramite il BBR, eseguendo prove ad almeno tre diverse temperature, prossime a quella minima di progetto, in modo da acquisire i dati necessari per la costruzione della curva

maestra e la determinazione degli shift factors. Per la regressione dei dati sperimentali si usa un modello desunto dal C-A-M, espresso come:

$$D(t) = G_g \left[ 1 + \left( \frac{t}{t_0} \right)^k \right]^{\frac{me}{k}} \quad (5-18)$$

Per ricavare il modulo di rigidità  $S_m$  della miscela bituminosa, note le caratteristiche volumetriche di quest'ultima e la rigidità  $S_b$  del bitume si impiega il modello di Heukelom e Klomp [5-12]:

$$\frac{S_m}{S_b} = \left[ 1 + \frac{2.5C_v}{n(1 - C_v)} \right]^n \quad (5-19)$$

dove con  $C_v$  si indica la concentrazione volumica della miscela, mentre  $n$  è un parametro sperimentale.

Al fine del calcolo del modulo di rilassamento  $E(t)$  del conglomerato bituminoso si adotta la relazione sperimentale:

$$E(t) = \frac{\sin(m\pi)}{m\pi \cdot D(t)} \quad (5-20)$$

dove  $m$  rappresenta la pendenza della retta tangente alla curva  $D(t)$  e viene definito come

$$m = \frac{d(\log D)}{d(\log t)} = m_e \frac{\left( \frac{t}{t_0} \right)^k}{\left[ 1 + \left( \frac{t}{t_0} \right)^k \right]} \quad (5-21)$$

Per determinare le tensioni termiche indotte nella pavimentazione, viene previamente misurata la variazione del volume specifico del bitume mediante un dilatometro.

Tale prova consente anche di determinare la temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  del materiale. L'andamento del volume specifico  $v$ , espresso in ml/g, in funzione della temperatura segue una legge del tipo:

$$v = c_v + \alpha_g (T - T_g) + R(\alpha_1 - \alpha_g) \ln \left[ 1 + \exp \left( \frac{T - T_g}{R} \right) \right] \quad (5-22)$$

in cui  $c_v$  è una costante numerica,  $\alpha_1$  la pendenza dell'asintoto superiore,  $\alpha_g$  la pendenza dell'asintoto inferiore e  $R$  un fattore di forma.

Tramite una relazione sperimentale sviluppata nell'ambito del sistema SUPERPAVE® [5-13], che lega la deformazione volumetrica della miscela con quella dei costituenti, si ottiene la deformazione di origine termica che si crea nella pavimentazione:

$$B_m = \frac{V_{ma} B_b + V_{ag} B_{ag}}{V_{tot}} \quad (5-23)$$

dove  $B_m$  rappresenta la deformazione volumetrica della miscela,  $B_b$  e  $B_{ag}$  rispettivamente quella del bitume e dell'aggregato,  $V_{ma}$  il contenuto di vuoti nella miscela degli aggregati e  $V_{ag}$  la percentuale in volume degli aggregati presenti.

La valutazione delle deformazioni e delle tensioni termiche indotte, una volta stimate le proprietà fisico-meccaniche dei materiali, avviene mediante un programma di calcolo basato sulle leggi fondamentali della teoria della visco-elasticità lineare.

Il comportamento a rottura dei leganti (tensione e deformazione) viene determinato mediante prove DTT eseguite a diversi valori di temperatura, nell'intorno della minima di progetto, imponendo diversi gradienti di deformazione, in modo da ricavare le curve maestre della tensione e della deformazione a rottura in funzione del tempo ridotto.

Infine, la temperatura critica, raggiunta quando la tensione termica eguaglia la resistenza a trazione o la deformazione termica eguaglia la deformazione a rottura, viene assunta come valore massimo che emerge applicando i diversi criteri considerati (tensione termica del solo bitume, tensione termica della miscela, deformazione), al variare del gradiente di raffreddamento. Per la qualificazione del legante, la temperatura critica non deve eccedere la temperatura minima di progetto della pavimentazione.

---

## 5.2 Recente evoluzione della Normativa Europea

L'orientamento normativo e di standardizzazione dei metodi applicati su bitumi e conglomerati bituminosi, che emerge dal lavoro degli ultimi anni del CEN (Comitato Europeo di Normalizzazione), si dirige verso il concetto di prestazione dei materiali.

A partire dal 1990, in linea con le politiche CE relative al libero mercato, il comitato CEN TC 19/SCI (Sotto Comitato sui bitumi nel Comitato Tecnico per la normazione sui Prodotti Petroliferi. TC 19), sta lavorando al fine di raggiungere una standardizzazione dei metodi EN relativi alle procedure di prova in ambito europeo, creare specifiche che uniscano ed armonizzino quelle già esistenti nei vari paesi, oltre a stabilire precisi canoni qualitativi per i prodotti commercializzati, rendendo in tal modo possibile liberi scambi commerciali fra i paesi membri.

Per tenere in considerazione le singole realtà nazionali, sono stati creati dei gruppi di lavoro nazionali (*mirror group*), tuttora attivi, che lavorano parallelamente al comitato europeo discutendo le proposte di specifica e gli standard sui metodi, riportando le proprie esperienze interne, ecc. Il gruppo di lavoro italiano è il “Gruppo Operativo Bitumi” della “Commissione Prodotti Petroliferi” UNICHIM.

Le diversità esistenti tra i vari paesi, sia dal punto di vista climatico e territoriale che delle politiche e degli approcci propri di ogni singolo contesto, oltre che il confronto tra metodi diversi ma ugualmente consolidati, hanno comportato un periodo di lavoro decennale prima della definizione di uno strumento capace di raccogliere ed uniformare le diverse esperienze.

Nel 1999 il CEN ha definitivamente approvato la specifica europea, relativa ai bitumi stradali convenzionali, EN 12951, recepita subito dopo a livello nazionale dai diversi paesi. In Italia la rispettiva normativa è stata emanata dall'UNI nel Febbraio 2001.

Proprio per tenere in debita considerazione le diversità climatiche e di traffico nei vari paesi, nonché delle diverse tipologie di bitume modificato in uso, sono state definite sei tabelle, suddivise a loro volta in due parti relative, rispettivamente, alle proprietà obbligatorie ed alle condizioni speciali.

Le caratterizzazioni obbligatorie riportano le analisi di penetrazione a 25°C, il punto di rammollimento palla-anello, la forza di trazione tramite duttilità, l'infiammabilità in caso aperto e la resistenza all'invecchiamento RTFOT.

Le condizioni speciali, invece, includono il recupero elastico, il punto di rottura Fraass, l'intervallo di elastoplasticità, la stabilità dopo stoccaggio, la coesione Vialit e il recupero elastico dopo RTFOT.

In attesa della specifica europea, in Italia l'ente appaltante riveste un ruolo di rilevante importanza circa le tipologie e la qualità dei bitumi modificati attualmente sul mercato, emanando norme relative ai materiali ed alle tecniche di costruzione stradale. Ne è un esempio la Società Autostrade, principale utilizzatore di bitume modificato sul territorio nazionale, che da diversi anni possiede un proprio capitolato.

Negli ultimi anni, anche in conseguenza di un crescente interesse all'argomento da parte delle Amministrazioni Pubbliche, il SITEB ha elaborato una tabella di riferimento proprio a partire dalla tabella della prEN 14023.

Nel contempo, il già citato programma di ricerca statunitense SHRP ha fornito un notevole impulso, su scala mondiale, verso una visione prettamente prestazionale dei leganti stradali. A livello europeo, l'influenza del programma SHRP si ritrova in numerosi studi per lo sviluppo di nuove prove prestazionali e di metodologie di analisi nei centri di ricerca stradale.

Al fine di analizzare i vari aspetti tecnologici dei materiali bituminosi, il programma SHRP ha identificato i fattori determinanti la qualità della pavimentazione ultimata, sviluppando quindi nuove metodologie per la classificazione dei leganti bituminosi a seconda della prestazione degli stessi per diverse condizioni di esercizio (climatiche e di traffico). Ha il merito di aver spostato la concezione del bitume da quella di prodotto petrolifero a quella di componente di un materiale da costruzione.

Diversamente da quanto previsto dall'attuale sistema normativo europeo, secondo il quale tutti i test sono effettuati nelle medesime condizioni operative e i livelli prestazionali variano secondo le gradazioni, nel sistema SHRP variano le condizioni operative, in funzione delle zone climatiche, mentre rimangono costanti i livelli prestazionali. Inoltre, le specifiche del sistema SHRP sono uniche sia per i bitumi puri che per quelli modificati.

In questa fase di lavoro il CEN sta valutando i metodi di prova sviluppati, considerando eventuali aspetti della metodologia SHRP che possono essere integrati nella normativa europea.

Il mandato *Road Construction Products* (Prodotti da Costruzione Stradale), conferito dalla Commissione Europea nell'ambito della direttiva Prodotti da Costruzione, costituisce un'ulteriore impulso al lavoro di revisione delle specifiche. Il TC 336 ha, infatti, configurato il proprio programma di lavoro seguendo proprio questo mandato (così come il TC 227 per i conglomerati).

La citata direttiva indica i requisiti che devono essere soddisfatti dal materiale stradale per poter circolare sul mercato europeo; tali requisiti riguardano la resistenza meccanica e la stabilità, la sicurezza in caso di incendio, l'igiene, la salute l'ambiente, la sicurezza nell'impiego, la protezione contro il rumore e, infine, il risparmio energetico.

---

Il mandato M/124 stabilisce le caratteristiche prestazionali che vanno tenute in considerazione durante l'armonizzazione delle norme europee; indica come, per alcuni requisiti essenziali, debba essere valutata anche la durata delle relative caratteristiche prestazionali. Tale mandato introduce, inoltre, il concetto di bitume come materiale da costruzione.

I vari gruppi di lavoro operanti sulle proprietà del legante, dopo aver considerato le metodologie maggiormente utilizzate in Europa relativamente alle prestazioni richieste al bitume, hanno identificato quali di esse devono essere standardizzate, quali debbano essere approfondite con dati sul campo e quali debbano essere escluse. Sono in fase di definizione le bozze dei metodi EN per i protocolli di prova riguardanti:

- il modulo complesso tramite DSR, per le proprietà alle alte temperature;
- il metodo BBR per la determinazione delle fessurazione a freddo, per le proprietà alle basse temperature;
- il metodo PAV per l'invecchiamento.

La pubblicazione dei nuovi standard europei rappresenta, comunque, solamente la prima fase verso la definizione di una seconda generazione di specifiche. È necessario, al fine di confermare la relazione con le prestazioni, eseguire un lavoro di validazione e di raccolta di dati sul campo che coinvolga i diversi paesi.

Lo step successivo sarà, quindi, l'individuazione dei metodi da considerare nella specifica contemporaneamente alla definizione della struttura di quest'ultima. Il sottogruppo TG5 lavora alla fase di definizione dell'approccio generale alla nuova norma, fase in cui è molto importante considerare l'intero settore, dai produttori di conglomerato ai laboratori stradali, tramite un processo di consultazione a cura del CEN TC 336 WG1 (vedi, ad esempio, i workshop nazionali in collaborazione con Eurobitume e EAPA).

La definizione delle specifiche europee comporterà, quindi, una prima fase di implementazione delle prove (introduzione, raccolta dati e validazione sul campo), seguiti da una fase di analisi della suscettibilità del legante l'invecchiamento, concludendosi con considerazione sui limiti delle nuove specifiche. Potrebbe essere mantenuto un sistema di gradazione in base alla penetrazione, integrato però con un indicatore di prestazioni, relativamente alle alte e alle basse temperature e alla durabilità. Si dovrà tener conto delle proprietà del bitume prima e dopo l'invecchiamento, in relazione anche all'applicazione finale e alle condizioni climatiche previste.

Sia l'emanazione in ambito europeo della nuova norma CEN sui leganti stradali, sia la definizione in ambito nordamericano della metodologia SHRP, hanno dato un decisivo impulso per la realizzazione di nuovi studi e nuove attività.

Dopo una prima fase di ricerca e di normazione, è infatti immediatamente seguito, relativamente ai leganti bituminosi, l'avvio di una serie di attività di standardizzazione. Questa nuova fase comporterà, a livello europeo, l'individuazione di un sistema di caratterizzazione finalizzato ad una miglior rappresentazione del comportamento in opera dei materiali bituminosi [5-14].



## Capitolo 6

# Ricerca Sperimentale

L'esperienza dell'utilizzo di Asphalt Rubber ha dimostrato come tali leganti consentano di ottenere conglomerati flessibili, con una grande capacità di assorbire la riflessione delle fessure, resistenti a una grande varietà di condizioni strutturali, caratterizzati da un'ottima durabilità e con buone capacità fonoassorbenti, oltre a presentare il vantaggio ambientale di includere nella propria formulazione una percentuale considerevole di materiale riciclato [6-1]. Gli studi citati mostrano come questi presentino una performance superiore rispetto ai conglomerati convenzionali, che si traduce soprattutto in una maggior durabilità.

Gli studi dei ricercatori SHRP [6-2] hanno evidenziato come gli ammaloramenti più ricorrenti nelle pavimentazioni dipendano essenzialmente dalle caratteristiche reologiche della fase legante, funzione della temperatura e della frequenza di carico, e come queste, a loro volta, siano fortemente condizionate dalla struttura e dalla natura chimica dei bitumi.

La bibliografia relativa all'Asphalt Rubber riporta diversi studi delle prestazioni dei conglomerati HMRA per quanto riguarda l'ormaiamento, la fessurazione da fatica e la fessurazione termica, oltre alla loro capacità strutturale, ma lo studio della reologia del legante Asphalt Rubber, in sé, è stato poco approfondito.

Con l'approfondimento dello studio di tali conglomerati è emerso che la loro performance dipende dalla percentuale di legante utilizzata e della quantità di polverino di gomma addizionata al bitume base, e la formulazione delle miscele in Asphalt Rubber ha subito cambiamenti, il più delle volte basati su osservazioni empiriche.

Il programma sperimentale del presente lavoro di ricerca ha l'obiettivo di comprendere il comportamento del legante Asphalt Rubber sotto differenti tipi e frequenze di carico e in diversi domini di temperatura e di quantificare l'influenza della percentuale di polverino di gomma incorporata e del tipo di base utilizzata, comparando la reologia dei bitumi CRM con quella di altri bitumi modificati.

## 6.1 Finalità ed Organizzazione della Ricerca

Lo studio della reologia dei bitumi CRM si è basato sulla valutazione dei parametri meccanici del materiale sottoposto a prove di duttilità, a sollecitazioni di *creep* statico e ad una quantificazione della risposta alle sollecitazioni di carattere dinamico (modulo complesso, angolo di fase), che ne evidenziano le caratteristiche viscoelastiche principali.

A queste si sono affiancate prove convenzionali, realizzate durante il controllo della qualità dei leganti modificati con polverino, per la determinazione di viscosità, penetrazione, resilienza e punto di rammollimento palla-anello, oltre che prove di tuben test, Fraass, di duttilità e di recupero elastico.

Le prove convenzionali sono state interpretate utilizzando il modello dell'Università del Maryland, che consente la costruzione di curve di viscosità, molto utili nella valutazione della sensibilità termica dei bitumi.

Per capire l'effetto dell'invecchiamento nel comportamento prestazionale del legante, i bitumi sono stati sottoposti ad invecchiamento RTFOT, MRTFOT (*Modified Rolling Thin Film Oven Test*) e PAV. In seguito è stato effettuato un confronto in termini di suscettibilità all'invecchiamento RTFOT e di resistenza agli stress termici a cui i bitumi sono sottoposti nelle varie fasi, dalla produzione alla messa in opera, valutando il comportamento di bitumi modificati con SBS, EVA e CRM dopo cicli ripetuti di riscaldamento.

In particolare, in ambito SHRP, sono state eseguite prove reometriche in regime oscillatorio (di *stress sweep* e *frequency sweep*) per la classificazione dei leganti mediante la determinazione dei relativi valori di *Performance Grade*, espresso come intervallo di temperatura di impiego in opera all'interno del quale è possibile ritenere le pavimentazioni stradali esenti da ammaloramenti attribuiti specificamente alla sola componente legante (deformazioni plastiche e rotture fragili).

Prendendo poi spunto da esperienze condotte negli Stati Uniti nell'ambito del progetto NCHRP 9-10 [6-3], si è passati ad indagare il comportamento dei bitumi nella zona di viscoelasticità non lineare, individuando l'intervallo di viscoelasticità lineare a partire dal valore del modulo di immagazzinamento  $G'$ . Volendo studiare il comportamento dei leganti per varie deformazioni, sono state effettuate prove di *frequency sweep* in modalità di controllo di deformazione (*autostrain*), a frequenza costante per ogni temperatura. In questa fase, le differenze di comportamento emerse tra i bitumi studiati sono state attentamente valutate e relazionate a quei fattori (tipo di modifica, temperatura, percentuale di deformazione, frequenza di applicazione dei carichi) che influenzano la risposta dei leganti sotto l'azione del traffico e degli agenti ambientali.

---

---

Sono state, inoltre, eseguite prove di *creep recovery* in un'applicazione in condizioni statiche, con controllo dello sforzo di taglio costante  $\tau$  applicato con misura in continuo della deformazione di scorrimento ( $\gamma$ ).

A completamento dell'analisi sui leganti Asphalt Rubber sono state effettuate misure di *zero shear viscosity*, tramite l'esecuzione di prove in condizioni di flusso a *zero shear* nella modalità di prova *creep mode*, in modo da evidenziare lo specifico comportamento dei bitumi nei confronti delle deformazioni permanenti alle diverse temperature di esercizio.

I dati raccolti sono stati, inoltre, rappresentati in forma di *Master Curve*, per il completamento delle quali si è eseguita anche la determinazione della temperatura inferiore di *Performance Grade* tramite prove BBR. Pur impiegando un'altra configurazione ed un altro modo, la prova BBR è una prova di *creep*. Queste prove hanno consentito di estendere l'analisi a condizioni di temperatura non riproducibili mediante il DSR.

Dal momento che alcuni capitolati presentano fusi di accettazione, sono stati elaborate per i bitumi modificati le curve di caratterizzazione *Modulo Complesso  $G^*$  - Angolo di Fase  $\delta$* , raffrontando i risultati ottenuti con il fuso specifico secondo le voci di capitolato della Società Autostrade.

L'ultima fase della ricerca ha preso in considerazione leganti bituminosi *terminal blend*, ottenuti con il cosiddetto metodo texano, i quali prevedono una modifica con quantità di polverino di gomma inferiori rispetto all'Asphalt Rubber e normalmente l'aggiunta di additivi a base di acido polifosforico o oli estensivi. Tali materiali, di recente messa a punto, risultano utilizzati soprattutto in Texas e, a livello europeo, in Spagna.

Di seguito viene presentato uno schema del programma sperimentale della presente ricerca (vedi Figura 6-1).

---

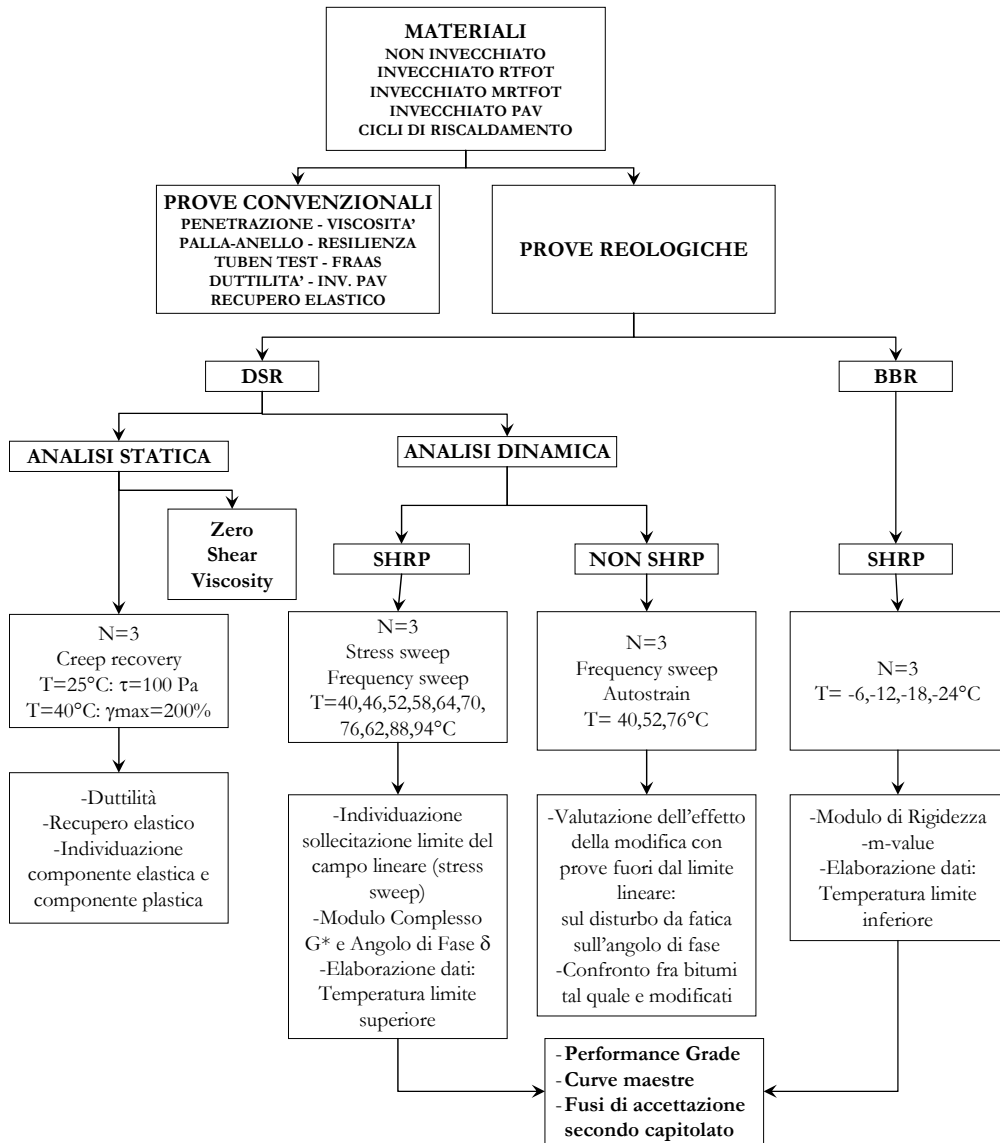


Figura 6-1: Schema delle prove convenzionali e reologiche realizzate

Le Tabelle 6-1 e 6-2 riportano le condizioni delle diverse prove eseguite.

Tabella 6-1: Condizioni delle prove convenzionali realizzate

Prova	Normativa	Condizioni di Prova
Penetrazione di bitume	ASTM D5	15, 25, 35 °C; 100g
Punto di rammollimento	CNR BU 35	Temperatura misurata
Viscosità	AASHTO TP48	60,80,100,121,135,176 °C
Resilienza	ASTM D5329	25 °C
Punto di rottura Fraass	CNR BU 43	Temperatura misurata
Tuben Test	ASTM D5892	Temperature misurate
Duttilità di bitume	CNR BU 44	25 °C
Recupero elastico	DIN 52013	25 °C

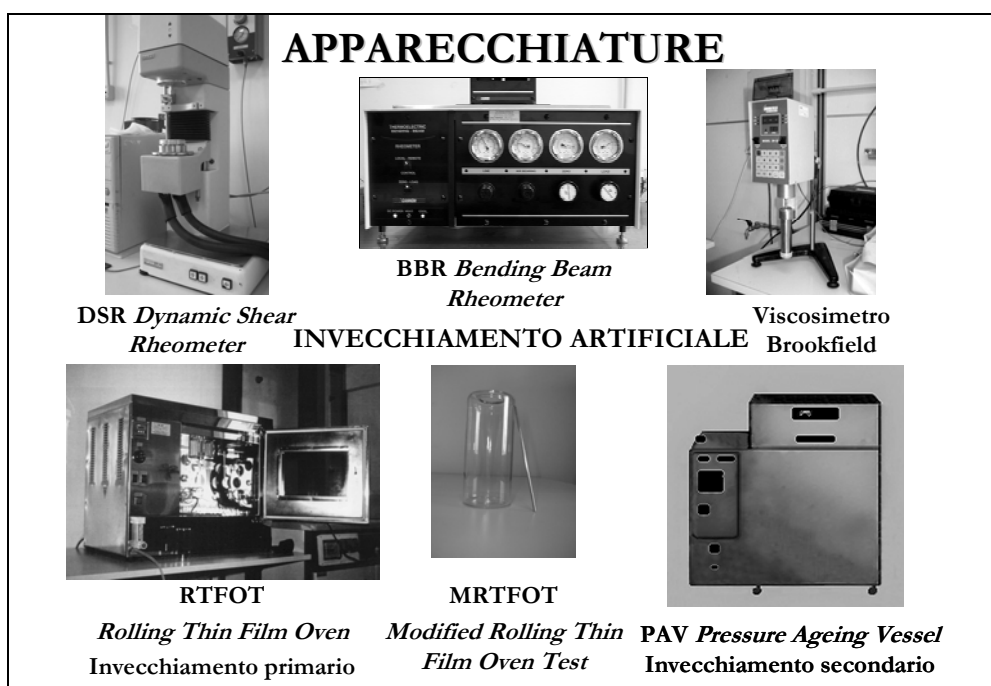


Figura 6-2: Principali apparecchiature utilizzate nelle prove reologiche

Tabella 6-2: Condizioni delle prove reologiche realizzate

Prova	Norma di riferimento	Condizioni di Prova
DSR	SHRP B-003	Temperature ogni 6 °C
BBR	SHRP B-002	Temperature ogni 6 °C
RTFOT	SHRP AASHTO T240	163 °C; 85 min
PAV	SHRP B-005	100 °C; 20h; 2.10MPa

## 6.2 Materiali di Prova

Sono stati studiati 46 tipi di leganti: 8 provenienti dal mercato italiano e uno dal mercato portoghese, da cui sono state ricavate in laboratorio 37 miscele.

I leganti bituminosi semisolidi di base per usi diretti o per modifiche successive con polimeri o altri trattamenti, sono quei leganti per uso stradale costituiti da bitumi prodotti in raffineria mediante distillazione primaria (topping e vacuum) o conversione (cracking termico, visbreaking).

Così in una prima fase sono stati presi 6 bitumi non modificati con diverse classi di penetrazione: un 40/50 (dal mercato portoghese), due 50/70 e due 70/100, ricavati da due tipi di greggio differenti, e un 160/220 (tutti provenienti dal mercato italiano); sono stati, inoltre, considerati 3 bitumi modificati con polimeri: un bitume modificato con EVA soft, un SBS soft e un SBS hard. Questi bitumi rappresentano le classi più richieste per la realizzazione di pavimentazioni stradali.

**Tabella 6-3: Caratteristiche principali dei bitumi studiati**

<b>Tipo di bitume</b>	<b>SBS Hard</b>	<b>SBS Soft</b>	<b>EVA Soft</b>	<b>160/220</b>	<b>70/100 A</b>	<b>70/100 B</b>	<b>50/70 A</b>	<b>50/70 B</b>	<b>40/50</b>
Penetrazione @25°C [dmm]	48	50	53	168	81	72	63	61	45
Punto di Rammollimento [°C]	84	62	57	49	47	52	48	50	66
Punto di rottura Fraass [°C]	-12	-11	-11	-11	-10	-10	-9	-10	-4
Viscosità @160°C [cP]	560	3.3	180	60	128	180	88	163	-
Duttilità @25°C [cm]	>100	>100	>100	-	-	-	-	-	-
Ritorno elastico @25°C [%]	90	77	77	-	-	-	-	-	-

In un secondo momento, si è proceduto alla modifica in laboratorio dei bitumi base con diverse percentuali di polverino di gomma di pneumatico riciclata. Il legante 40/50 modificato con 18% di CRM è stato preso sia dal mercato portoghese già modificato che modificato in laboratorio, in modo da assicurare che le caratteristiche ottenute in laboratorio fossero del tutto simili a quelle raggiunte in fabbrica.

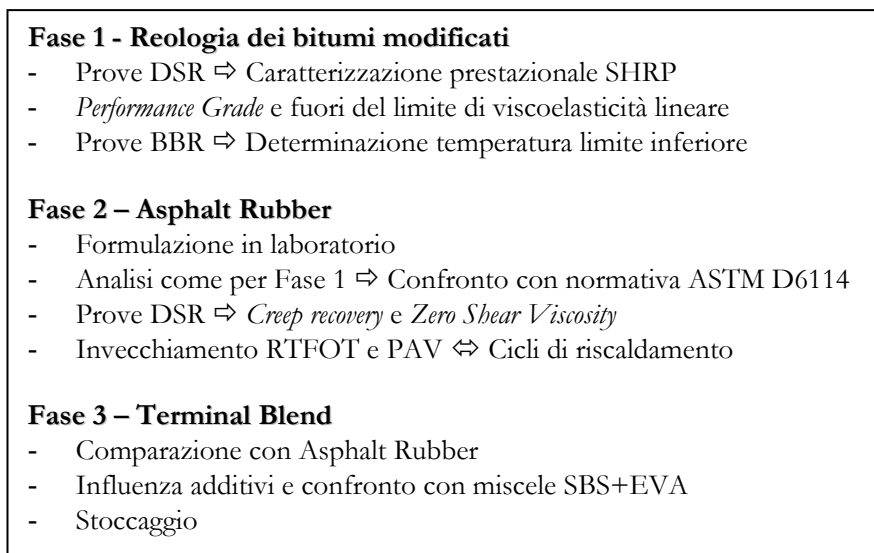
Si è scelto di modificare due bitumi base per le classi di penetrazione 50/70 e 70/100, per studiare l'influenza della natura chimica dei bitumi (differenti greggi di origine), ad esempio il bitume 50/70 A è da visbreaking mentre il 50/70 B è stato ottenuto mediante distillazione primaria vacuum. Il bitume 160/220, poco utilizzato nella modifica di bitumi per la costruzione di pavimentazioni, è stato modificato con 20% di CRM in modo da potere capire l'influenza della consistenza del bitume base sulla viscosità del bitume modificato CRM.

In un'ultima fase sono stati presi in considerazione bitumi modificati con percentuali di CRM inferiori al 15%, ossia non considerati Asphalt Rubber. Questi bitumi iniziano a diffondersi sul mercato, dal momento che non hanno bisogno di apparecchiature specializzate. Nella loro formulazione prevedono l'aggiunta di additivi a base di acido polifosforico (AP). Questo tipo di additivi viene utilizzato in due modi, sia per la modifica chimica del bitume tal quale che per l'aggiunta ai bitumi modificati con polimeri o CRM.

In primo luogo è stato effettuato uno studio comparativo tra questi materiali e i leganti modificati con polimero SBS, facendo variare per entrambi nello stesso modo la percentuale di additivi a base di acido polifosforico, valutando gli effetti su viscosità, penetrazione, punto di rammollimento e stabilità allo stoccaggio. In particolare, con un bitume 70/100 sono state prodotte miscele campione di bitume SBS, in cui la percentuale di polimero varia da 1 a 4%. La scelta delle concentrazioni di polimero è stata dettata principalmente dalla necessità di caratterizzare il comportamento del bitume modificato prima e dopo l'inversione di fase, che in questo tipo di miscele si verifica con una concentrazione di polimero tra il 3 e il 4%.

Per completare il quadro sperimentale, sono state eseguite analoghe prove comparative sostituendo l'additivo nei leganti con SBS con una percentuale di EVA pari all'1%, anch'esso in grado di migliorare l'interazione del bitume con il polimero, favorendo la sua dispersione.

Lo schema della Figura 6-3 illustra le tre fasi per la selezione delle formulazioni dei materiali di studio.



**Figura 6-3: Schema della scelta dei materiali di studio**

Nella Tabella 6-4 sono rappresentati i materiali prodotti in laboratorio nelle varie fasi dell'indagine sperimentale.



Tabella 6-4: Materiali oggetto di studio nella presente ricerca

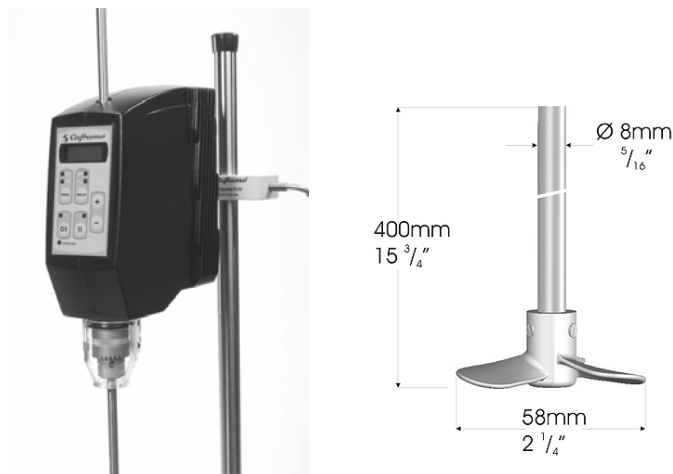
FASE 1		FASE 2		FASE 3		"FASE 4"	
Reologia Modificati - SHRP		Studio dell'Asphalt Rubber		Terminal Blend e Studio Comparativo Materiali		Mappa PG	
Mercato (Italiano/Portoghese)		CRM		Adit. Acido Polifosforico		EVA	
SBS Hard (I)							20/30 (I)
SBS Soft (I)							40/50 (I)
EVA Soft (I)							60/70 (I)
160/220 (I)	160/220+20% <b>CRM</b>	160/220+4% <b>SBS</b> +0,5% <b>AP</b> 160/220+4,5% <b>SBS</b> +0,5% <b>AP</b> 160/220+5% <b>SBS</b> +0,5% <b>AP</b>					
70/100A (I)	70/100A+15% <b>CRM</b> 70/100A+16% <b>CRM</b> 70/100A+18% <b>CRM</b> 70/100A+20% <b>CRM</b> 70/100A+22% <b>CRM</b>	70/100A+3% <b>SBS</b> +1% <b>AP</b> 70/100A+3% <b>SBS</b> +0,5% <b>AP</b> 70/100A+4,5% <b>SBS</b> +0,5% <b>AP</b>	70/100A+1% <b>SBS</b> 70/100A+2% <b>SBS</b> 70/100A+3% <b>SBS</b> 70/100A+4% <b>SBS</b> 70/100A+8% <b>SBS</b>	70/100A+3% <b>EVA</b> 70/100A+4% <b>EVA</b> 70/100A+5% <b>EVA</b> 70/100A+6% <b>EVA</b>			
70/100B (I)	70/100B+20% <b>CRM</b>						
50/70A (I)	50/70A+18% <b>CRM</b> 50/70A+20% <b>CRM</b>						
50/70B (I)	50/70B+15% <b>CRM</b> 50/70B+16% <b>CRM</b> 50/70B+18% <b>CRM</b> 50/70B+20% <b>CRM</b>	50/70B+5% <b>CRM</b> +1% <b>AP</b> 50/70B+8% <b>CRM</b> +0,5% <b>AP</b> 50/70B+8% <b>CRM</b> +1% <b>AP</b> 50/70B+8% <b>CRM</b> +1,5% <b>AP</b> 50/70B+10% <b>CRM</b> +1% <b>AP</b>					
40/50 (I)	40/50+18% <b>CRM (P e Lab)*</b>						

\* Sono stati studiati sia il bitume 40/50 + 18% CRM prodotto in laboratorio che lo stesso bitume prodotto in fabbrica. Per coerenza i risultati presentati riguardano la miscela ottenuta in laboratorio.

## 6.2.1 Modifica di Bitumi in Laboratorio

### 6.2.1.1 BITUMI MODIFICATI CON POLVERINO DI GOMMA DI PNEUMATICO RICICLATA

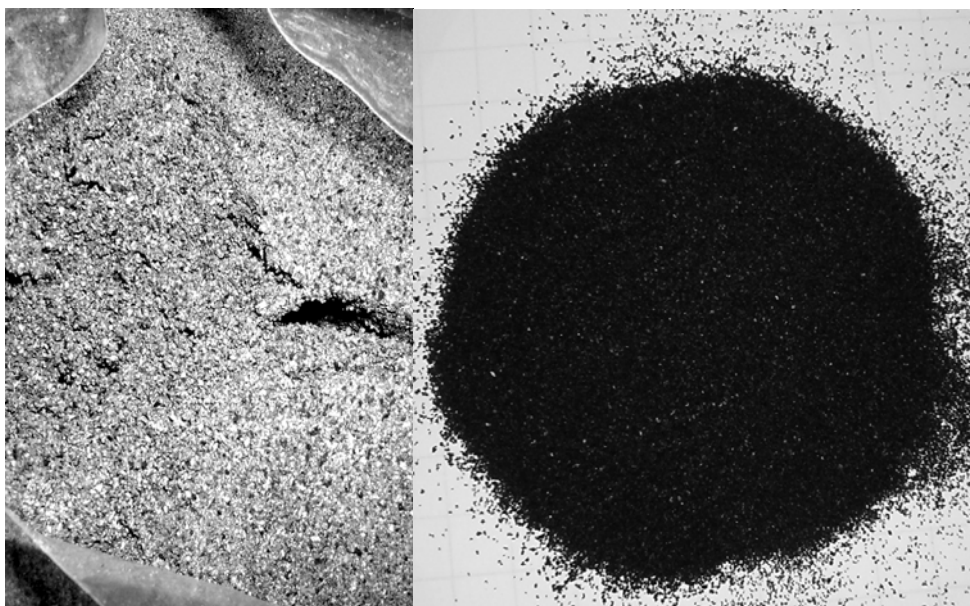
I leganti modificati con polverino sono stati ottenuti miscelando il bitume di base con un certo quantitativo di polverino di gomma opportunamente determinato, per mezzo di un miscelatore del tipo rappresentato nella Figura 6-4, con una girante del tipo *Stirrer A160*.



**Figura 6-4: Miscelatore “Caframo” impiegato per la preparazione dell’Asphalt Rubber in laboratorio e schema della aste di acciaio per l’agitazione della miscela bitume-polverino**

In laboratorio vengono simulate le condizioni di cantiere in modo da trovare la miscela ottimale da aggiungere agli inerti per ottenere il conglomerato. Generalmente per la fabbricazione di un bitume con polverino sono utilizzate percentuali comprese tra il 15 e il 22%. Così, ai diversi bitumi base sono state incorporate diverse percentuali di polverino: 15, 16, 18, 20 e 22%.

Si è scelto di utilizzare un polverino di Tipo 1, ossia contenente CRM ricavato soltanto da gomma di pneumatico, messo a disposizione dal principale fornitore del mercato portoghese e spagnolo (vedi Figura 6-5). Questo polverino è costituito da una miscela di gomma di pneumatico di camion e di automobile, che è ottenuto tramite processo criogenico al quale segue un macinaggio finale *cracker mill*.



**Figura 6-5: Aspetto del polverino utilizzato nell'indagine**

Nel processo criogenico (vedi Capitolo 2), la macinazione dei pneumatici avviene una volta raggiunta la temperatura di fragilizzazione della gomma; per portarsi in queste condizioni, solitamente si effettua il raffreddamento mediante l'utilizzo di azoto liquido. Il risultato di questo processo è un granulato di gomma con superfici praticamente lisce. Particolari studi hanno dimostrato che proprio la morfologia della gomma triturata risulta essere il fattore maggiormente in grado di condizionare le proprietà elastiche. È stato dimostrato, infatti, che diverse caratteristiche del granulato di gomma determinano le proprietà elastiche conferite alla miscela finale [6-4].

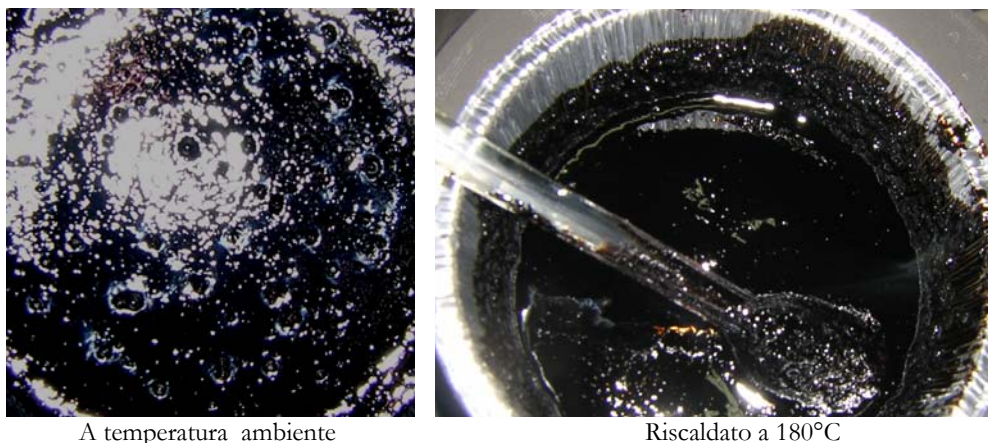
Per incorporare la gomma nel bitume questo deve essere collocato nel recipiente del miscelatore e sottoposto ad una temperatura di 180°C, a bassa velocità di rotazione, durante un'ora (Figura 6-6). Dopo di che, aumentando la velocità di rotazione a 1200 rpm, si aggiunge durante 5 minuti la gomma, secondo le proporzioni precedentemente stabilite.

L'operazione di miscelazione dura un'ora, al termine della quale viene ritirato un campione per determinare la penetrazione, la resilienza e il punto di rammollimento palla-anello. Tale tempo di reazione ha due obiettivi, il primo è di dare il tempo sufficiente affinché il polverino possa reagire con il legante e il secondo è di simulare il tempo di fabbricazione nella centrale.



**Figura 6-6: Fasi di produzione in laboratorio di un bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata**

La viscosità, a sua volta, viene calcolata ogni 15 minuti. Dopo 45 minuti la viscosità misurata deve avere un valore compreso tra 1500 e 5000 cP, per assicurare le condizioni di posa in opera.



**Figura 6-7: Aumento di volume del legante AR conseguente al riscaldamento, dovuto al rigonfiamento della gomma con creazione di aria al suo interno**

L'osservazione del comportamento dell'Asphalt Rubber durante le fasi di laboratorio, ha condotto a formulare alcune considerazioni circa la lavorabilità di tale legante.

Si è constatato che, per rendere le prove più agevoli, l'AR ha bisogno di un tempo di riscaldamento maggiore (20-30 minuti in più rispetto ad un altro bitume modificato) per ottenere una fluidità che permetta un facile trattamento, mescolamento e versamento. Inoltre, nella realizzazione delle prove, in generale, è necessario utilizzare una maggior quantità di bitume CRM rispetto a un bitume convenzionale.

---

Tale accorgimento è dovuto alle proprietà dello stesso legante AR, caratterizzato da una marcata diminuzione di volume durante la fase di raffreddamento conseguente alla fabbricazione. Durante un successivo riscaldamento (vedi Figura 6-7 e Figura 6-9), il bitume torna a “gonfiarsi” per via dell’aumento di volume della frazione di gomma.

#### 6.2.1.2 BITUMI MODIFICATI CON SBS E EVA

Nella produzione in laboratorio dei bitumi modificati con polimeri si è ricorsi ad un miscelatore *Silverson*, simile a quello utilizzato per la confezione dei bitumi modificati CRM, ma con una girante diversa (vedi Figura 6-8).



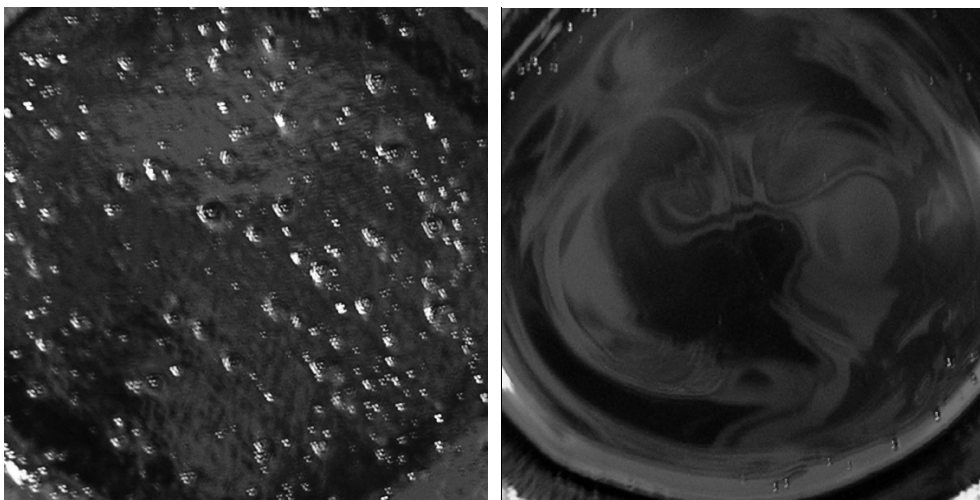
**Figura 6-8: Strumento utilizzato per l’agitazione della miscela bitume-polimero**

Prima di procedere alla fase di miscelazione vera e propria è necessario preparare l’agente modificante. Occorre precisare che il quantitativo di polimero viene calcolato rispetto al peso complessivo della miscela e non rispetto al quantitativo di bitume.

Il legante deve raggiungere una temperatura di 180°C, prima di poter procedere all’aggiunta del polimero. La miscelazione avviene attraverso due fasi. Nella prima fase, della durata di un’ora, si utilizza l’asta metallica *Silverson*, che deve essere montata sul motorino in maniera tale da trovarsi perfettamente al centro della latta, così da non permettere l’accumulo di polimero ai bordi. In questa fase si regola la velocità di rotazione a circa 800 giri al minuto, per favorire la frantumazione del polimero e permettere una buona dispersione dello stesso all’interno della matrice bituminosa.

Trascorsa la prima ora e verificato che il polimero sia ben omogeneizzato con il bitume, si dà inizio alla fase di maturazione, nella quale si impiega la seconda asta metallica che viene mantenuta in funzione per altre tre ore ad una velocità di rotazione di 80 giri al minuto.

Durante l'intera durata (4 ore) delle operazioni di miscelazione occorre controllare periodicamente la temperatura della miscela, in modo che non superi mai i 180°C.



**Figura 6-9: Differenza di aspetto dei bitumi modificati con polverino di gomma (rugosi a sinistra) e modificati con SBS (aspetto liscio a destra) alla temperatura di 20°C**

#### 6.2.1.3 MODIFICA CHIMICA

Come anticipato, gli additivi a base di acido polifosforico (o acido tetrafosforico) per i bitumi stradali vengono utilizzati in due tipi di applicazione:

- modifica chimica del bitume, particolarmente utilizzata negli Stati Uniti, dal 1997;
- additivazione dei bitumi modificati con polverino di gomma, sia mediante metodo dry che wet, in quest'ultimo caso al fine di ottenere i cosiddetti Terminal Blend. Tale tipo di impiego ha avuto inizio a livello europeo nel 2002.

Con particolare riferimento ai leganti CRM ottenuti con metodo wet, l'additivazione con acido polifosforico si propone di correggerne alcune caratteristiche quali l'elevata viscosità, la ridotta stabilità allo stoccaggio, tanto più marcata all'aumentare della percentuale di polverino, oltre a sostituire gli oli utilizzati per facilitare il processo di reazione tra bitume e gomma.

---

L'obiettivo di tale additivazione è quello di consentire il mantenimento di elevate prestazioni anche con percentuali di polverino inferiori rispetto all'Asphalt Rubber, oltre che facilitare il processo di miscelazione, possibile a temperature inferiori grazie alla riduzione della viscosità.

Secondo i risultati sinora pubblicati [6-5], questi leganti presentano analoghi valori di penetrazione e Grado PG dei bitumi AR ottenuti mediante la modifica con percentuali superiori di polverino. Altre caratteristiche dichiarate dai produttori di tali additivi sono un miglioramento della stabilità allo stoccaggio delle miscele ottenute, oltre che una riduzione dei costi di produzione [6-5].

I terminal blend sono ottenuti mediante la reazione del bitume con una percentuale di additivo compresa tra 0.5 e 1.75%, mentre la percentuale di polverino di gomma non deve essere superiore all'8% e la modifica deve essere ottenuta con metodo wet.

L'additivo scelto per la presente indagine è un'additivo chimico specifico per i bitumi modificati con polverino di gomma, che viene qui chiamato "AP". La prima applicazione pratica a livello europeo di conglomerati realizzati con bitumi modificati con CRM e l'additivo AP è stata effettuata nell'Aprile del 2004 sulla VA-20 in Spagna. Sono state costruite sei sezioni di prova di cui tre realizzate con legante CRM non addittivato e le rimanenti tre con lo stesso legante CRM addittivato con acido polifosforico. Le prove in situ ad oggi disponibili hanno mostrato buoni risultati su pavimentazioni in esercizio da un anno [6-5].

Gli additivi a base di acido polifosforico -  $H_n + 2(P_nO_{3n+1})$ , con  $0 \leq n \leq 4$  - si presentano sotto forma di liquido viscoso da incolore a paglierino che può cristallizzare anche a temperatura ambiente. Valori tipici di viscosità a 21°C sono compresi tra 825 e 6000 cP, mentre il peso molecolare minimo è dell'ordine di 260 g/mol. Le altre caratteristiche sono sintetizzate nella Tabella 6-5.

**Tabella 6-5: Proprietà dell'additivo a base di acido polifosforico utilizzato nella presente indagine**

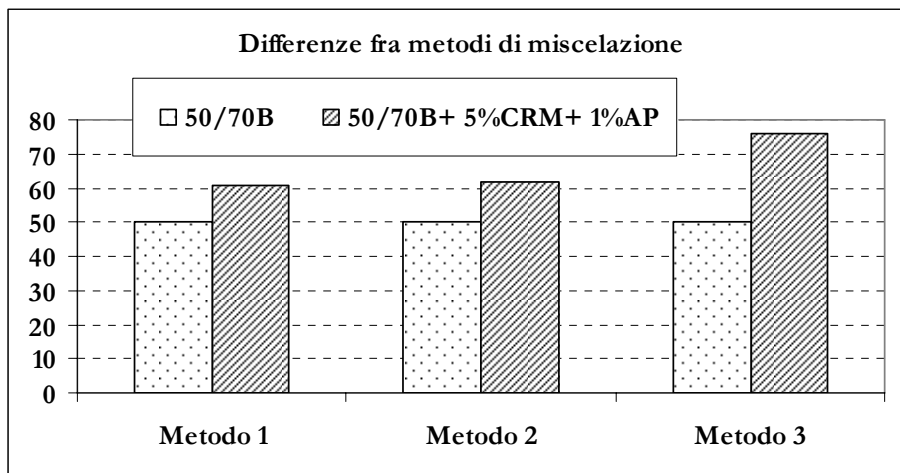
<b>Proprietà</b>	
pH:	<2 (1g/100ml in acqua)
Punto di fusione:	16-30°C
Punto di ebollizione:	310°C
Idrosolubilità:	Miscibile

A parità di additivo a base di acido polifosforico, il processo impiegato per l'aggiunta dello stesso risulta importante, dal momento che il ricorso a metodologie differenti porta a variazioni nei risultati delle prove prestazionali. Le principali metodologie per l'additivazione indicate dai produttori dell'additivo stesso possono distinguersi in[6-5]:

- Metodo 1 - miscelazione diretta, ad una temperatura di 170°C per un tempo di 2 ore;
- Metodo 2 - modifica con polverino di gomma, ad una temperatura di 170°C per 90 minuti, e successivamente additivazione a base di acido polifosforico, sempre alla temperatura di 170°C per un tempo di 30 minuti;
- Metodo 3 - miscelazione diretta, ad una temperatura di 170°C per un tempo minimo di 6 ore, che può arrivare a 20 ore di miscelazione.

Anche nel caso dei terminal blend, si può notare un comportamento simile all'Asphalt Rubber, ovvero aumentando il tempo di miscelazione aumentano il punto di rammollimento e la temperatura critica.

I tre metodi sono stati sperimentati in laboratorio come si può vedere dalla Figura 6-10. Dei tre metodi proposti sopra, i primi due, caratterizzati da un uguale tempo di miscelazione totale, risultano equivalenti.



**Figura 6-10: Temperatura di rammollimento per i tre metodi di produzione di bitumi modificati chimicamente con additivo a base di acido polifosforico**

Dal momento in cui è stato quello che ha permesso di raggiungere i risultati migliori, si è scelto di utilizzare il terzo metodo per la produzione in laboratorio delle miscele CRM+AP, anche se un tempo di miscelazione pari a 6 ore è impraticabile nella produzione di leganti in fabbrica.



Come già introdotto, si è valutato l'effetto dell'aggiunta di AP anche per i bitumi modificati con SBS. L'additivo utilizzato in questo caso è stato fornito dalla stessa ditta e presenta proprietà simili a quello utilizzato per il Terminal Blend (vedi Tabella 6-5).

In questo caso, l'aggiunta di acido polifosforico al bitume deve precedere la modifica con il polimero. Così, al bitume a 180°C si aggiunge la percentuale di acido polifosforico liquido desiderata. Questa miscela deve reagire almeno mezz'ora ad una velocità di rotazione attorno agli 800 giri, dopo di che si procede alla modifica con polimero come spiegato al punto 6.2.1.2, lasciando però la miscela sotto agitazione almeno per 6 ore, per coerenza con il metodo utilizzato sopra.

### 6.3 Prove Convenzionali

Le prove da realizzare durante il controllo della qualità dei bitumi modificati con polverino, secondo la norma ASTM D 6114 (*Standard Specification for Asphalt Rubber Binder*), sono la viscosità, penetrazione, resilienza, punto di rammollimento palla-anello e duttilità. Oltre a queste prove, riferite nell'ambito di questa tesi come “prove convenzionali”, sono state eseguite prove di Tuben Test, Fraass e ritorno elastico.

Di seguito di riferiscono le condizioni di prova impostate per ogni singolo test.

#### PENETRAZIONE

La penetrazione caratterizza la consistenza di un bitume solido o semisolido, mediante la misura della profondità, raggiunta da un ago normalizzato che penetra verticalmente nel provino del bitume in esame, ad una determinata temperatura (Figura 6-11). La norma a cui si fa riferimento è CNR BU 24/71. Le prove sono state eseguite a 25°C.



Figura 6-11: Penetrometro

#### *PUNTO DI RAMMOLLIMENTO*

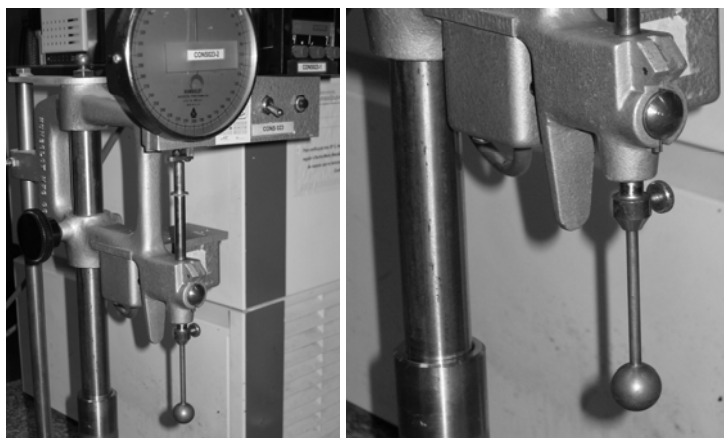
Questa prova consente di determinare il punto di rammollimento di un bitume utilizzando l'apparecchiatura di palla-anello. Due dischi orizzontali di bitume, fusi in anellini di ottone, sono riscaldati ad aliquote controllate in un bagno liquido mentre ciascuna sostiene una sfera di metallo. Il punto di rammollimento è riportato come la temperatura alla quale i due dischi abbastanza ammorbiditi permettono alla sfera, avvolte dal bitume, di cadere da una distanza verticale di 25 mm. Il punto di rammollimento è indicativo della tendenza del bitume a fluire incontrando alte temperature in fase di esercizio.

#### *VISCOSITÀ BROOKFIELD*

Questa prova permette di determinare le caratteristiche di viscosità di un bitume ad una temperatura determinata, sotto condizioni newtoniane e non-newtoniane. La viscosità rotazionale viene calcolata automaticamente misurando il momento torcente richiesto per mantenere costante la velocità rotazionale di una girante cilindrica immersa nel bitume, ad una determinata temperatura anch'essa costante.

#### *RESILIENZA*

La prova di resilienza viene eseguita con la stessa apparecchiatura utilizzata per la prova di penetrazione, con la differenza che, al posto dell'ago normalizzato viene posizionata una sfera di penetrazione (vedi Figura 6-12). I provini vengono condizionati durante due ore alla temperatura di 25°C, come stabilito dalla norma ASTM D5329.



**Figura 6-12:** Apparecchiatura per la prova di resilienza

---

### *TUBEN TEST*

La prova Tuben Test, o di stoccaggio a caldo, è un indicatore della compatibilità bitume/polimero. Tale compatibilità può essere ulteriormente analizzata attraverso l'uso di sofisticate apparecchiature quali spettrofotometri e cromatografi.

La stabilità allo stoccaggio è stata valutata tramite il metodo del Tuben Test definito nella normativa ASTM D5892 e tramite una modifica a questo. I campioni sono stati lasciati in forno a 130° per 5 giorni, dopo di che parte di questi sono stati analizzati subito e l'altra metà è stata riscaldata a 180°C e agitata per 45 minuti.

### *PUNTO DI ROTTURA FRAASS*

Il punto di rottura Fraass indica la temperatura alla quale il bitume solido o semisolido, raffreddato progressivamente, raggiunge un determinato grado di fragilità mediante un'apposita apparecchiatura. Si pone un film di bitume liscio e uniforme su una piastrina di acciaio inossidabile e si registra come punto di rottura la temperatura alla quale compaiono una o più fessure nel film. La norma a cui si fa riferimento è CNR BU 43/74.

### *DUTTILITÀ*

La prova di duttilità (Bollettino del Consiglio Nazionale delle Ricerche n. 44/1974) misura convenzionalmente l'allungamento massimo riscontrabile su un bitume sottoposto a pura trazione con velocità di allungamento di 50 mm/min ed alla temperatura costante di 25°C.

### *RITORNO ELASTICO*

La prova serve a valutare la capacità di recupero del bitume rispetto ad un allungamento di 20 cm imposto nella stessa configurazione della prova di duttilità del bitume (capacità di tornare alla configurazione originale dopo essere stato sottoposto a uno sforzo di trazione inferiore al limite elastico) mediante misure dirette effettuate su provini posti nell'apparecchio duttilometro (vedi Figura 6-13). Più esattamente il ritorno elastico (RE%) consiste nella stima della percentuale di allungamento che il provino di bitume riesce a recuperare come viene definito nella normativa (DIN 52013).



**Figura 6-13: Duttillometro e cassero per ritorno elastico**

### **6.3.1 Effetto della Modifica con CRM**

La norma ASTM D 6114 impone una serie di requisiti, facendo distinzione fra le caratteristiche che deve possedere il bitume dopo 45 minuti (limiti che devono essere verificati nella fase di produzione, Tabella 6-6) e le caratteristiche che deve avere il prodotto finale, ossia prima della miscelazione con l'aggregato (vedi Tabella 6-7).

È con base in questi limiti stabiliti dalla norma e con i risultati ottenuti per ciascuna percentuale di polverino di gomma incorporato al bitume base che si determina la percentuale detta “ottima” di CRM. Questa ovviamente dipende dal bitume base utilizzato e dalle specifiche tecniche che devono essere rispettare.

Di solito si considera che la % di CRM ottima è quella che conduce ad un maggior valore di temperatura di rammollimento, resilienza e duttilità, rispettando la penetrazione minima e la viscosità massima stabiliti dalla norma; ma il progettista può anche scegliere una percentuale inferiore di CRM che rispetti il capitolato e la norma, ad esempio per avere un grado di penetrazione simile ad un bitume modificato SBS o una viscosità inferiore per ragioni di lavorabilità.

Le tabelle seguenti riportano i requisiti minimi per i bitumi CRM con riferimento a Clima tipo II, ossia climi moderati, come è il caso della maggior parte delle regioni in Italia.

---

Tabella 6-6: Requisiti minimi per bitumi CRM dopo 45 min, Clima Tipo II

Prove	Requisiti	
<b>Viscosità Brookfield @175°C: cP</b>	<b>min.</b>	<b>1500</b>
(AASHTO TP48)	<b>max.</b>	<b>5000</b>
<b>Penetrazione @25°C 100g, 5s: 1/10 mm</b>	<b>min.</b>	<b>25</b>
(ASTM D5)		
<b>Resilienza @25°C: %</b>	<b>min.</b>	<b>20</b>
(ASTM D 5329)		
<b>Punto di Rammollimento, Palla-Anello: °C</b>	<b>min.</b>	<b>54,5</b>
(CNR BU 35)		

Tabella 6-7: Requisiti minimi per bitumi CRM, Prodotto finale, Clima Tipo II

Prove	Requisiti	
<b>Viscosità Brookfield @175°C: cP</b>	<b>min.</b>	<b>1500</b>
(AASHTO TP48)	<b>max.</b>	<b>4000</b>
<b>Penetrazione @25°C 100g, 5s: 1/10 mm</b>	<b>min.</b>	<b>20</b>
(ASTM D5)		
<b>Resilienza @25°C: %</b>	<b>min.</b>	<b>15</b>
(ASTM D 5329)		
<b>Punto di Rammollimento, Palla-Anello: °C</b>	<b>min.</b>	<b>60</b>
(CNR BU 35)		
<b>Duttilità di bitume@25°C, cm</b>	<b>min.</b>	<b>15</b>
(CNR BU 44)		

Nel caso delle miscele prodotte in laboratorio, l'accertamento di tali requisiti deve avvenire dopo 45 minuti di incorporazione del polverino nel bitume di origine al fine di dare tempo sufficiente affinché il polverino possa reagire con il legante e, secondariamente, per simulare i tempi di produzione in centrale.

Le caratteristiche principali dei bitumi modificati con polverino di gomma ottenute in laboratorio sono riportate nelle tabelle seguenti (vedi Tabelle 6-8 a 6-13).

**Tabella 6-8: Modifica del bitume 160/220 con 20% di CRM**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
160/220	168	49	60	ND*	-
160/220 + 20% CRM	55	57	ND	1550	29

\* ND = Non determinato

**Tabella 6-9: Modifica del bitume 70/100 A con diverse % di CRM**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
70/100 A	81	47	128	80	-
70/100 A + 15% CRM	40	57	840	775	18
70/100 A + 16% CRM	38	60	1170	1000	31
70/100 A + 18% CRM	20	65	2025	1788	41
<b>70/100 A + 20% CRM</b>	<b>17</b>	<b>66</b>	<b>3100</b>	<b>2638</b>	<b>45</b>
70/100 A + 22% CRM	15	73	ND	4525	52

NB: Si denota come la formulazione del bitume CRM con il 22% di polverino risulti non conforme ai requisiti di norma; tuttavia, ai soli fini sperimentali verrà commentato il risultato delle diverse prove anche per questo.

Tabella 6-10: Modifica del bitume 70/100 B con 20% di CRM

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
70/100 B	72	52	180	ND	-
<b>70/100 B + 20% CRM</b>	<b>20</b>	<b>69</b>	<b>ND</b>	<b>3425</b>	<b>54</b>

Tabella 6-11: Modifica del bitume 50/70 A con 18% di CRM

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
50/70 A	63	48	88	63	-
<b>50/70 A + 18% CRM</b>	<b>25</b>	<b>71</b>	<b>ND</b>	<b>1688</b>	<b>53</b>

Tabella 6-12: Modifica del bitume 50/70 B con diverse % di CRM

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
50/70 B	61	50	163	100	-
50/70 B + 15% CRM	30	64	1523	1188	29
50/70 B + 16% CRM	26	65	2163	1213	46
<b>50/70 B + 18% CRM</b>	<b>23</b>	<b>70</b>	<b>2520</b>	<b>2013</b>	<b>49</b>
50/70 B + 20% CRM	22	71	4175	2613	56

**Tabella 6-13: Modifica del bitume 40/50 con 18% di CRM**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
40/50	45	66	ND	-
40/50 + 18% CRM	20	79	3800	45

Dai risultati, in generale, si evince un notevole aumento di consistenza dei bitumi dopo la modifica con CRM, un abbassamento della penetrazione ed un significativo incremento del punto di rammollimento, che configura un grado di modifica elevato e riserva gli stessi bitumi ad ambiti di impiego specifici, pavimentazioni sottoposte ad elevate temperature di esercizio ed a notevoli carichi concentrati.

Confrontando le differenze fra le modifiche del bitume 70/100 A e B e 50/70 A e B (Tabelle da 6-9 a 6-11), si può affermare che è la viscosità del bitume base a controllare l'assorbimento della gomma, quindi ci si aspetta un maggior assorbimento (reazione chimica) se il bitume base è più soft. Una viscosità più bassa aumenta la reazione bitume gomma rispetto ad un bitume della stessa natura ma con viscosità più elevata.

Per quanto riguarda l'origine del bitume base si può osservare, confrontando le righe evidenziate nelle tabelle da 6-9 a 6-12, che per la stessa % e tipo di polverino utilizzati, i risultati possono cambiare significativamente, il che rafforza la necessità di eseguire uno studio approfondito della formulazione del legante prima di passare alla fase di produzione in impianto.

### 6.3.1.1 EVOLUZIONE LUNGO IL TEMPO DI REAZIONE

La Tabella 6-14 mostra i dati ottenuti dai test convenzionali per il bitume 70/100 modificato con le percentuali 18%, 20% e 22% di polverino di gomma.

È interessante capire l'evoluzione della viscosità nel tempo, che denota una sensibilità del bitume e della stessa reazione del polverino in fase di miscelazione rispetto al dosaggio di gomma. La viscosità aumenta quando il polverino di gomma viene addizionato al bitume, a causa della frazione aromatica degli oli che favorisce l'assorbimento del polverino. I dati mostrano che la variabile limitativa nel processo di digestione è proprio la viscosità Brookfield.

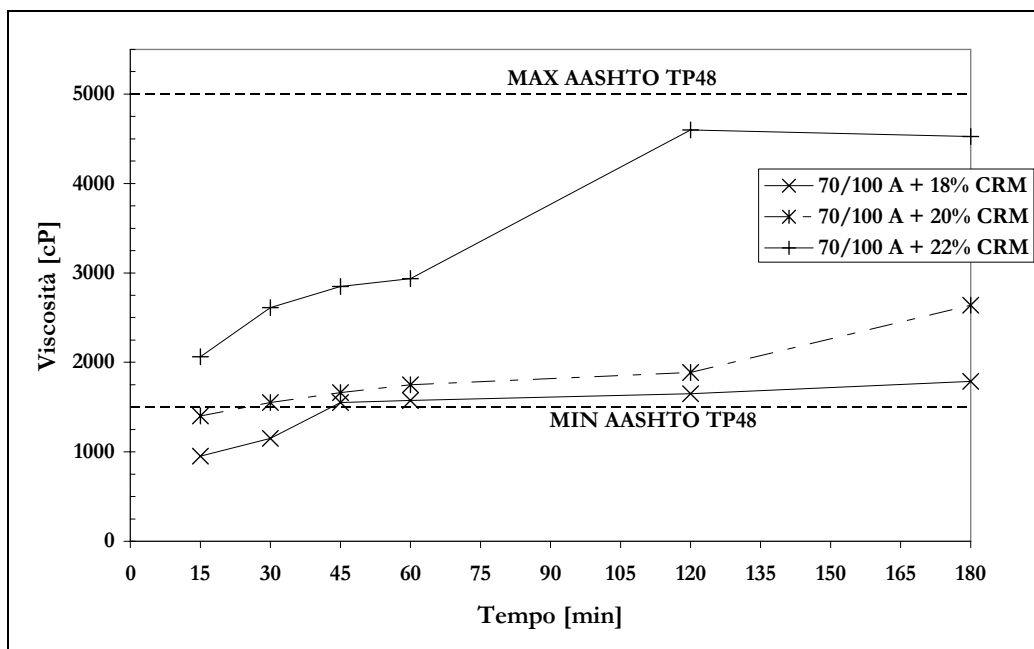


I risultati, dimostrano, inoltre che la penetrazione e il punto di rammollimento non sono particolarmente sensibili ai tempi di digestione per gli intervalli di tempo di digestione considerati.

**Tabella 6-14: Risultati delle prove convenzionali per il bitume 70/100A con diverse percentuali di CRM**

Bitume	70/100A + 18% CRM						70/100A + 20% CRM					
	15	30	45	60	120	180	15	30	45	60	120	180
Tempo di Reazione												
Viscosità @175°C [cP]	950	1150	1550	1575	1650	1788	1400	1550	1663	1750	1888	2638
Penetrazione @25°C [dmm]	31	29	28	26	24	20	30	27	25	20	17	17
Resilienza @25°C [%]	29	31	37	35	38	41	33	35	39	42	41	45
Punto di Rammollimento [°C]	60	61	63	62	63	65	62	63	63	64	64	66

Bitume	70/100 A + 22% CRM					
Tempo di Reazione	15	30	45	60	120	180
Viscosità @175°C [cP]	2063	2613	2850	2938	4600	4525
Penetrazione @25°C [dmm]	22	20	20	18	11	10
Resilienza @25°C [%]	41	47	47	49	59	52
Punto di Rammollimento [°C]	65	66	68	68	73	73



**Figura 6-14: Evoluzione della viscosità lungo il tempo di reazione per bitumi Asphalt Rubber**

L'evoluzione della viscosità denota una sensibilità del bitume e della stessa reazione del polverino in fase di miscelazione con il dosaggio di gomma. In particolare, il passaggio dal 20% al 22% in peso del polverino inglobato nel bitume base comporta un maggiore tempo di omogeneizzazione ed un consistente incremento della viscosità finale. Questo era già stato osservato nella Figura 6-14. Difficilmente si riesce ad ottenere una formulazione con il 22% di polverino che risulti conforme ai requisiti di norma per quanto riguarda la viscosità, a meno che il bitume base non abbia una viscosità molto bassa, ad esempio un grado di penetrazione superiore ad un 160/220; tuttavia, le miscele ottenute con il 22% di CRM presentano valori eccellenti di punto di rammollimento e resilienza.

Per quanto riguarda l'effetto del tempo di reazione della miscela bitume-gomma, per un contenuto di CRM superiore al 18%, si nota un incremento della viscosità per tempi di digestione superiori a 60 minuti. Per elevati contenuti di gomma, comunque, si nota un tendenziale aumento iniziale della viscosità, seguito da una perdita di viscosità dopo un periodo di digestione intorno a 120 minuti, con tendenza a stabilizzarsi intorno ad un valore costante.

L'incremento della viscosità è molto pronunciato per i primi 60 minuti di digestione. Per un contenuto di gomma superiore al 20% in peso, questo aumento di viscosità rimane evidente per tutto il tempo di digestione. Per elevati contenuti di polverino di gomma, la viscosità inizialmente aumenta, seguita da una riduzione del gradiente della viscosità stessa, fino alla stabilizzazione. Questo può essere determinato dall'interazione tra le particelle di gomma e i componenti del bitume, i quali producono un gel coesivo instabile.

Il modello di interazione tra le particelle di gomma e il bitume offre maggiori indicazioni per capire il comportamento della viscosità: la frazione di bitume non modificato e le particelle di gomma interagiscono per formare un gel coesivo di struttura particolare. Le particelle di gomma rigonfiano in un processo simile a ciò che avviene per il sistema di polimeri nel bitume. Il marcato incremento della viscosità oltre il primo momento di digestione è dovuto a questo continuo processo di dissoluzione. Questo sistema non è termodinamicamente stabile e conduce a cambiamenti significativi delle proprietà al variare delle condizioni al contorno.

È stato osservato che per tutte le percentuali di polverino di gomma studiate c'è stato un aumento della massa della gomma il che significa l'assorbimento del bitume da parte della gomma tramite l'assorbimento delle frazioni leggere del bitume durante una fase di cura. Tuttavia, quest'aumento dell'assorbimento della gomma non è uniforme col tasso di assorbimento che diminuisce con il tempo di cura.

---

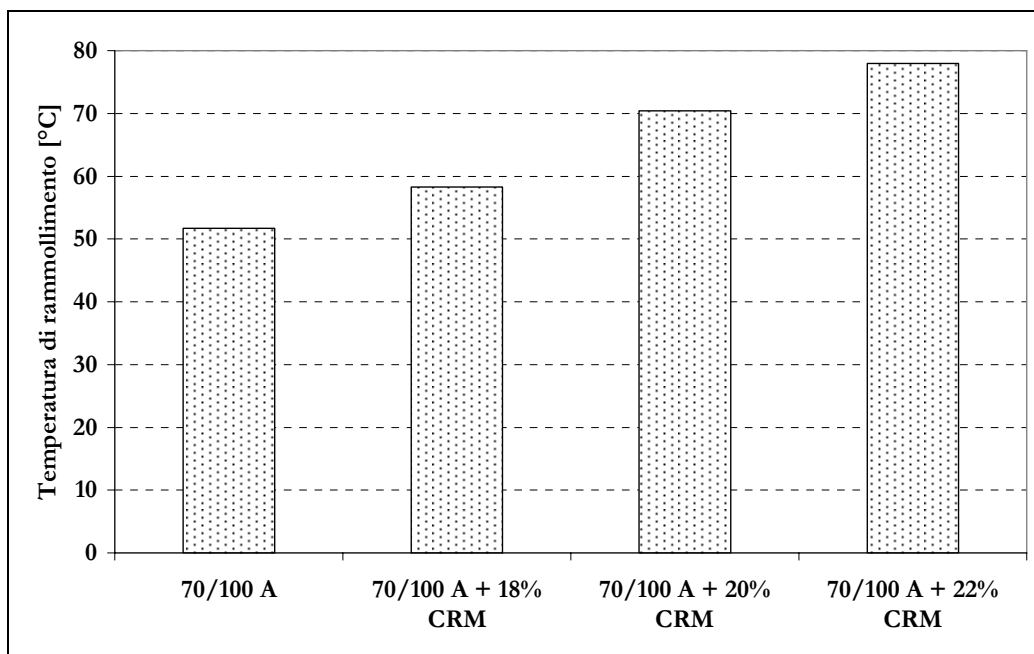


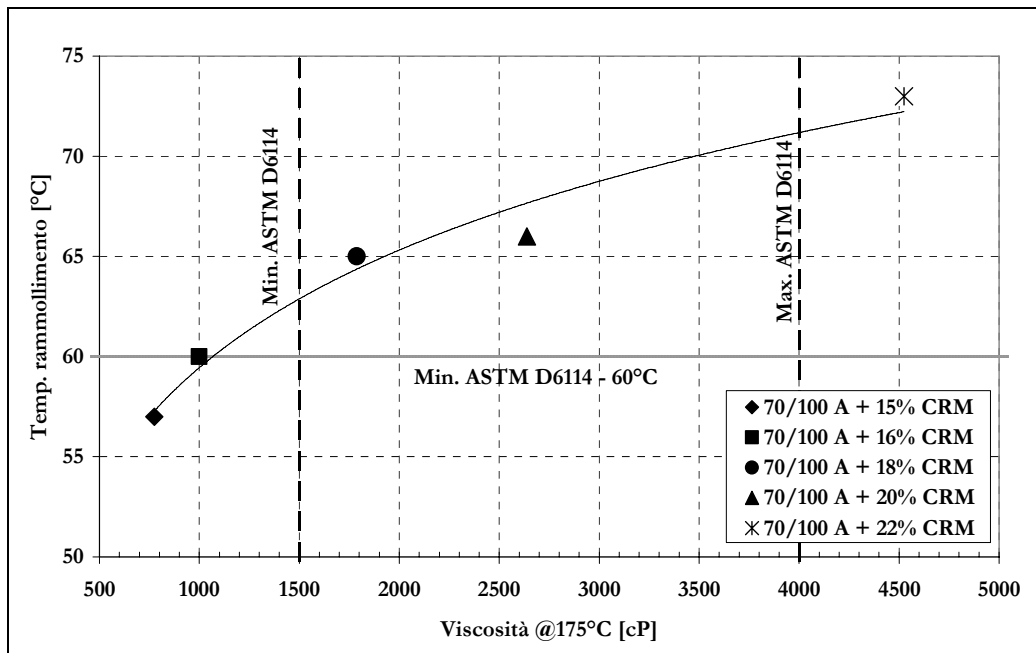
Figura 6-15: Evoluzione della Temperatura di Rammollimento all'aumentare della percentuale di polverino per il legante 70/100 A

I risultati relativi al punto di rammollimento, illustrati graficamente nella Figura 6-15, mostrano un significativo incremento del rammollimento all'aumentare del contenuto di gomma. Questo processo di incremento del punto di rammollimento è influenzato anche dal tempo di digestione. Si verifica un graduale incremento del punto di rammollimento nel primo periodo della digestione sopra i 60 minuti. Questo aumento si riduce per tempi superiori. Il processo di digestione e l'interazione tra le particelle di gomma creano una struttura tridimensionale molto resistente alle forze esterne a temperatura fissata. La struttura, inizialmente formata dal bitume e da particelle di gomma individuali, diventa molto più stabile. La stessa struttura dei grani del polverino di gomma facilita la formazione di questi legami.

#### 6.3.1.2 INFLUENZA DELLA BASE E DELLA PERCENTUALE DI POLVERINO DI GOMMA

Dal grafico di Figura 6-16 si nota come per il legante 70/100 A il punto di rammollimento aumenti all'aumentare della percentuale di polverino di gomma.

Il bitume modificato con il 15% di CRM risulta al di sotto del limite stabilito dalla norma ASTM, mentre la temperatura di rammollimento aumenta notevolmente nel passaggio dal 16 al 18%. Un altro salto importante avviene con il passaggio da 20 a 22% di polverino di gomma per il quale si verifica un aumento di quasi 10 °C di temperatura di palla anello e di 2000 cP di viscosità.



**Figura 6-16: Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A con diversa % di CRM**

La Figura 6-17 mostra, per il bitume 50/70 B, una relazione simile a quella verificata per il 70/100 A: temperatura di rammollimento e viscosità aumentano con l'aumentare della percentuale di CRM. Di nuovo si verifica un notevole incremento della temperatura di rammollimento e della viscosità nel passaggio dal 16 al 18% di CRM.

La relazione per il bitume 50/70 fra palla anello e viscosità è molto più lineare rispetto alla curva accentuata verificata per la base 70/100, questo indica una maggior compatibilità nel processo reattivo bitume - gomma per il bitume 50/70. È interessante notare che le due basi avevano una temperatura di palla anello attorno ai 50°C e che con l'aggiunta del 20% di CRM si ottiene per il 70/100 un incremento di 17°C, mentre per il 50/70 questo aumento è di 21°C, per lo stesso valore di viscosità (2638 cP per il 70/100 e 2613 cP per il 50/70 a 25°C).

Da questi dati appare che l'aumento di viscosità è più pronunciato con l'aggiunta di piccole quantità di polverino di gomma (1%) a miscele contenenti molto CRM.

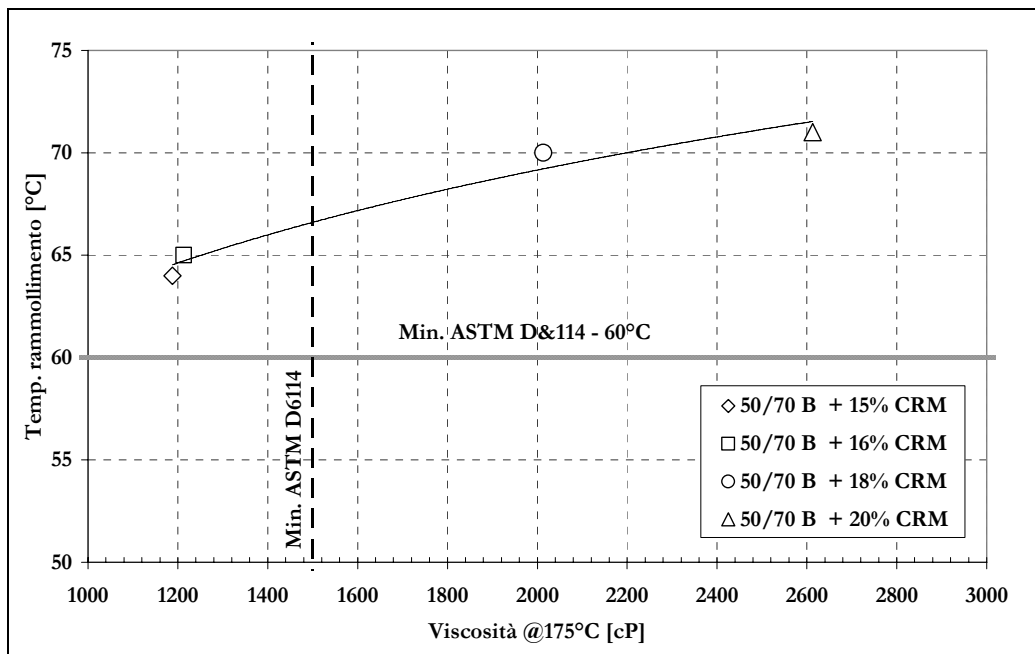


Figura 6-17: Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diversa % di CRM

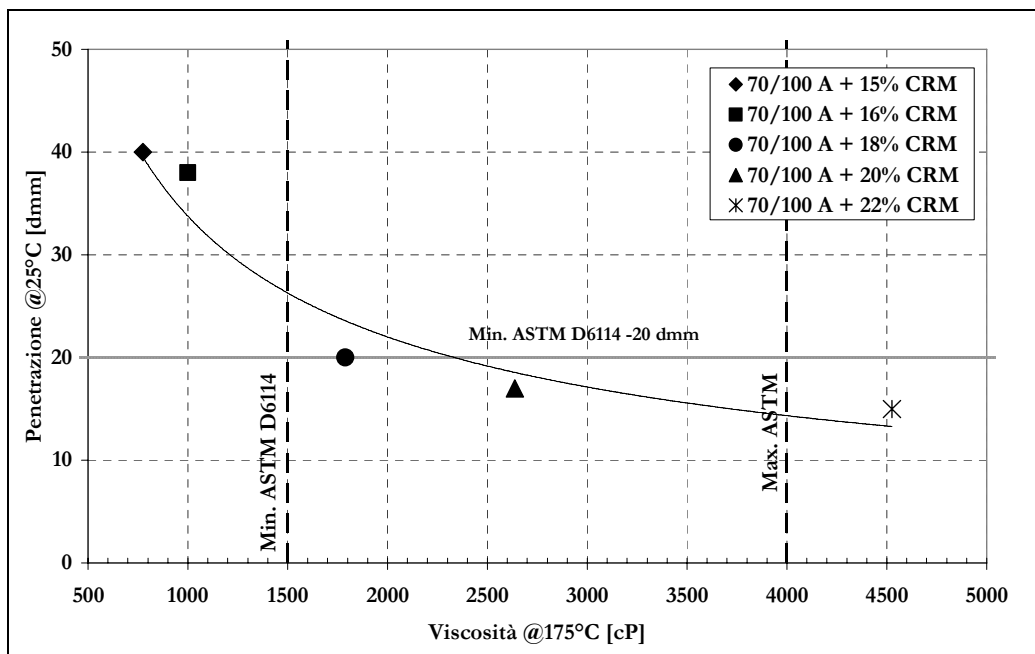
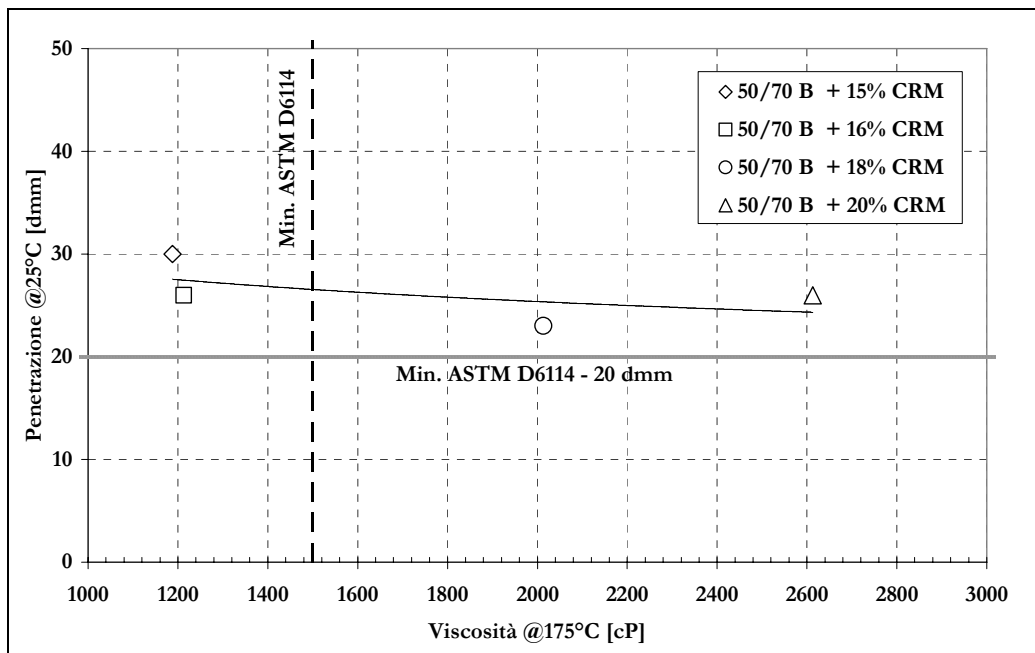


Figura 6-18: Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 70/100 A con diversa % di CRM

Il grafico di Figura 6-18 evidenzia come il bitume 70/100 A si indurisca con l'aumento della percentuale di CRM, questa tendenza però tende a stabilizzarsi per percentuali di polverino superiori al 20%, che coincide con il limite stabilito dalla norma (20 dmm). Questo indica che al di sopra di questo valore il bitume base non riesce ad adsorbire completamente il polverino di gomma. Infatti, un'eccessiva quantità di polverino, come nel caso del 22% di CRM, rischia di comportare una classe di penetrazione troppo bassa.



**Figura 6-19: Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diversa % di CRM**

Il grafico di Figura 6-19 mostra una relazione per il bitume 50/70 B quasi lineare tra la viscosità e la penetrazione al variare della percentuale di polverino. Questa relazione è poco accentuata e l'effetto di diminuzione della penetrazione è immediato con l'aggiunta del 15% di polverino di gomma, stabilizzandosi subito dopo con l'aggiunta di 18% di CRM, non arrivando mai al limite della norma (20 dmm).

Un'altra osservazione interessante è il fatto che la viscosità differisca molto poco per il 15 e il 16% di CRM, analogamente a quanto succedeva per il bitume 70/100 A.

Anche in presenza di un bitume base più duro, la modifica non riduce tanto la viscosità come per il 70/100 A, indicatore di una maggior compatibilità fra bitume e gomma.

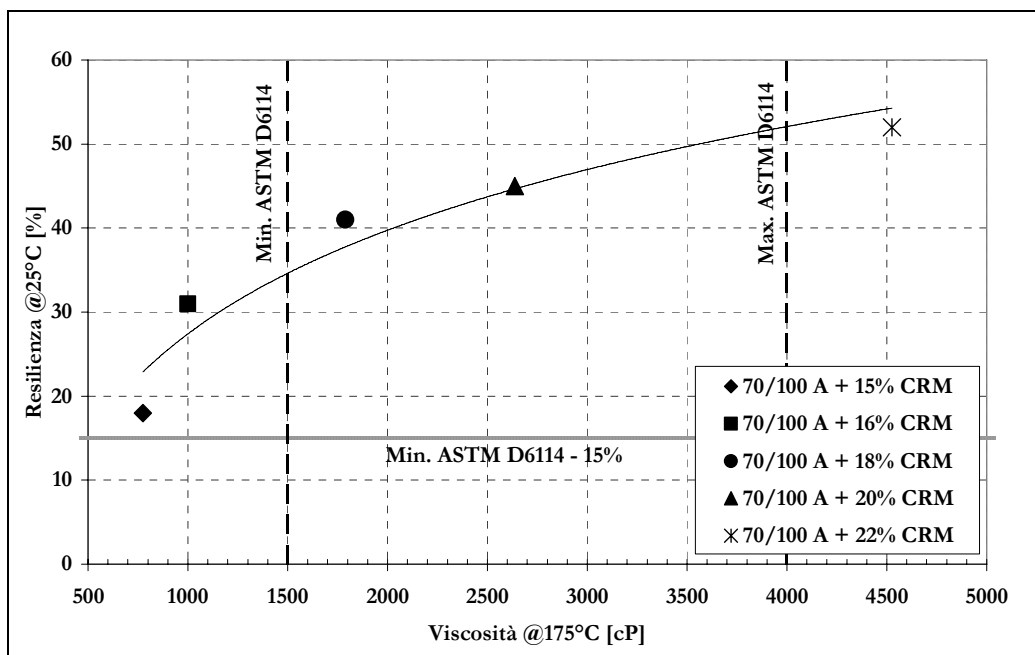


Figura 6-20: Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 70/100 A con diversa % di CRM

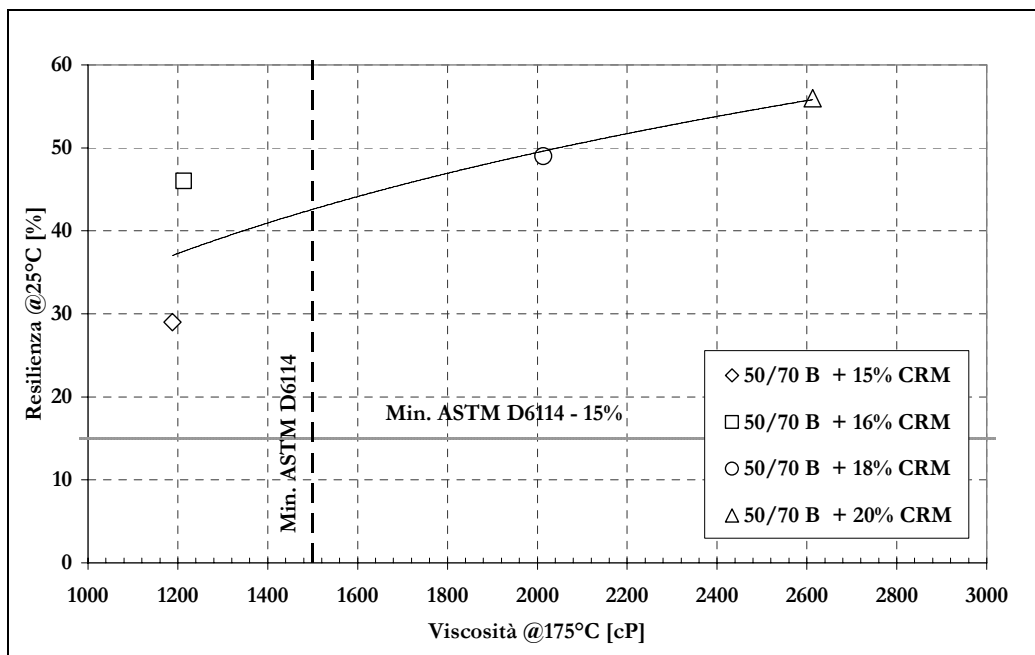
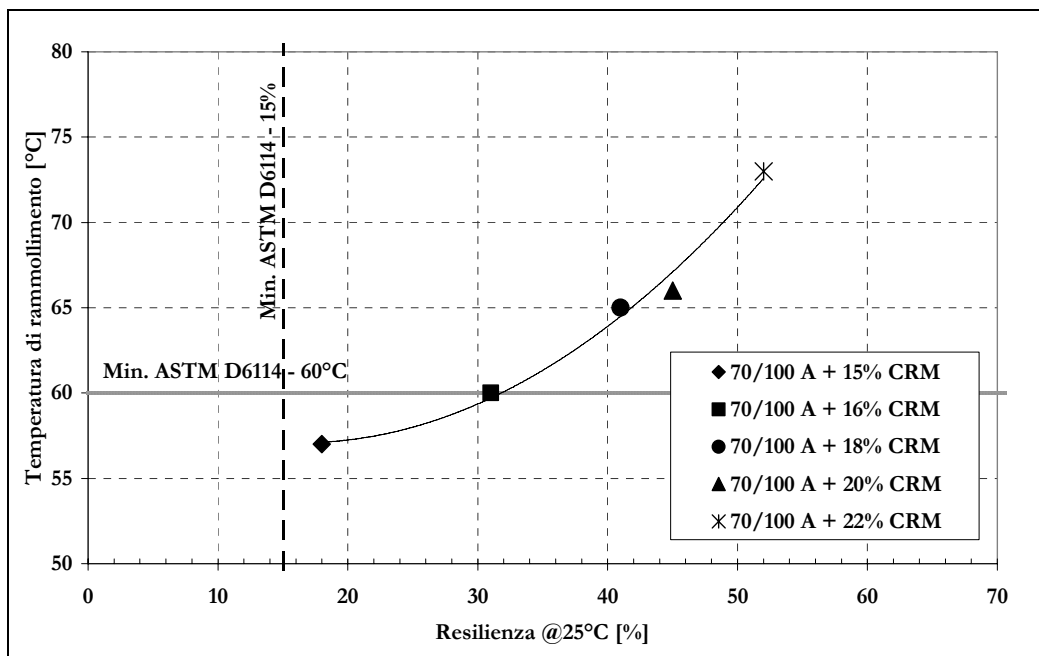


Figura 6-21: Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 50/70 B con diversa % di CRM

I risultati di resilienza, mostrati nella Figura 6-20 e Figura 6-21, mostrano un incremento di elasticità all'aumentare del contenuto di polverino di gomma. Questo aumento è notevole per i primi 60 minuti del processo di digestione e rimane praticamente costante da quel momento in poi (vedi Tabella 6-14).

I risultati di resilienza, come quelli del punto di rammollimento, aiutano a corroborare l'idea che il bitume modificato con gomma abbia una migliore struttura tridimensionale che fornisce elevata elasticità.

La resilienza accompagna l'andamento della temperatura di rammollimento, però contrariamente a quello che si verifica per la viscosità in entrambi i casi (base 50/70 e 70/100), oltre il 16% di CRM, non si verificano salti con l'incremento della percentuale di polverino di gomma addizionato.



**Figura 6-22: Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A con diversa % di CRM**

Nel grafico di Figura 6-22 si denota una buona correlazione esistente tra la resilienza e la temperatura di rammollimento per il legante 70/100 A. La modifica con il 15% di CRM fornisce al bitume 70/100 un valore esterno alla zona consentita dalla normativa ASTM.

La stessa analisi per il bitume 50/70 B (vedi Figura 6-23) denota una correlazione meno marcata, ma fornisce risultati migliori rispetto a quelli verificati per il 70/100.



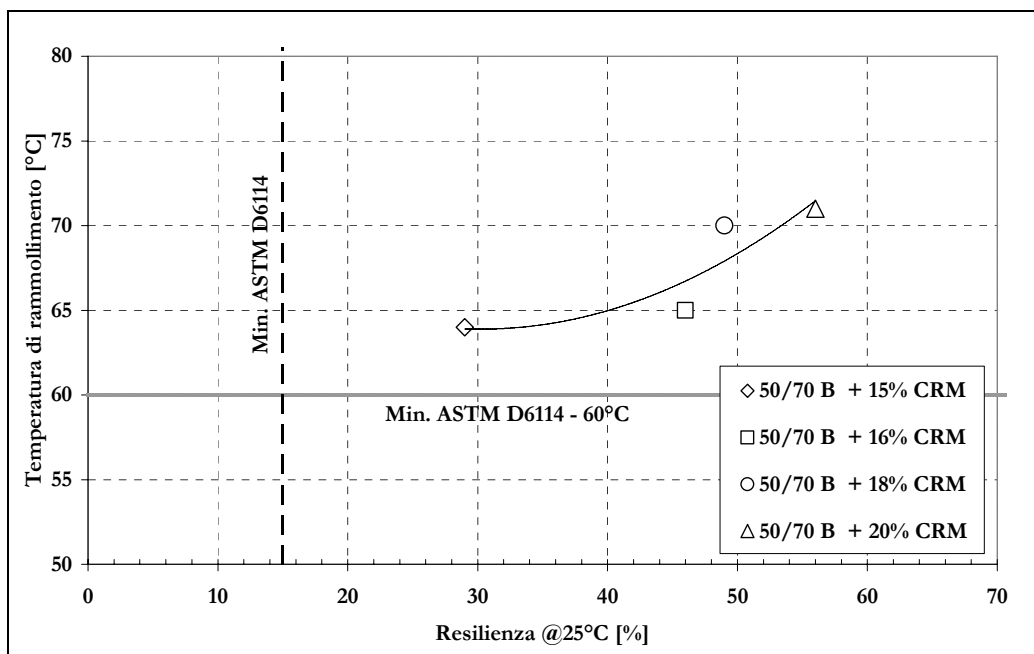


Figura 6-23: Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diversa % di CRM

Relazionando la penetrazione con la resilienza dei bitumi Asphalt Rubber si ottengono correlazioni praticamente lineari (vedi Figura 6-24 e Figura 6-25). Si denota come all'aumentare della percentuale di CRM aumenti la resilienza e diminuisca la penetrazione per il bitume 70/100 A; questo conferma le osservazioni fatte precedentemente (vedi Figura 6-19) e denota una interessante risposta del bitume 50/70 B il quale, con l'aggiunta di elevate percentuali di polverino (sopra i 18% di CRM), aumenta la propria elasticità anziché indurirsi.

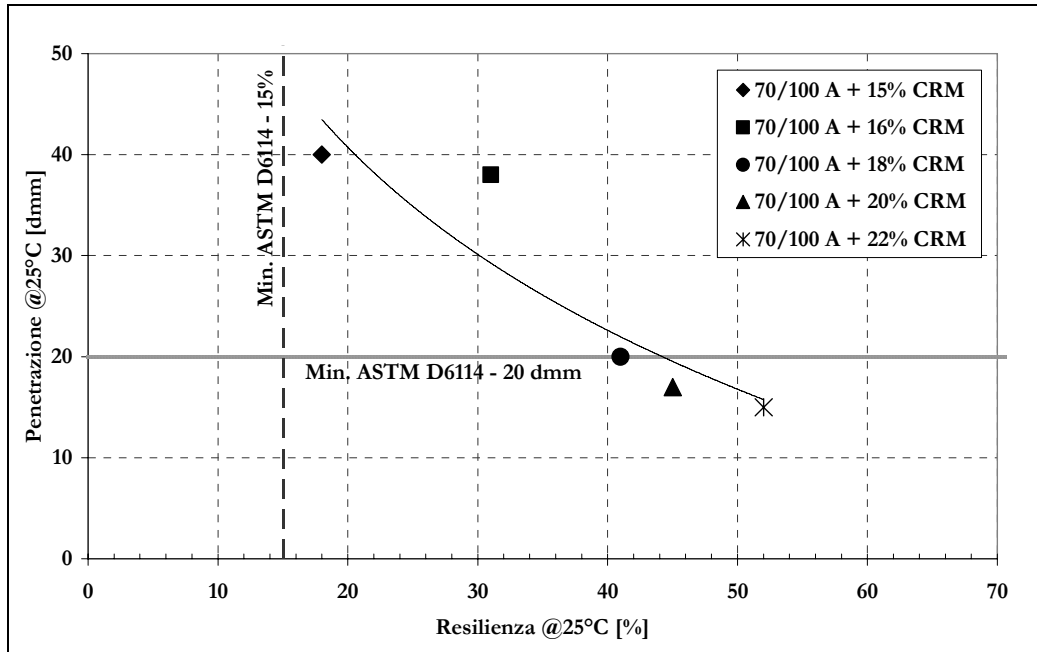


Figura 6-24: Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 70/100 A con diversa % di CRM

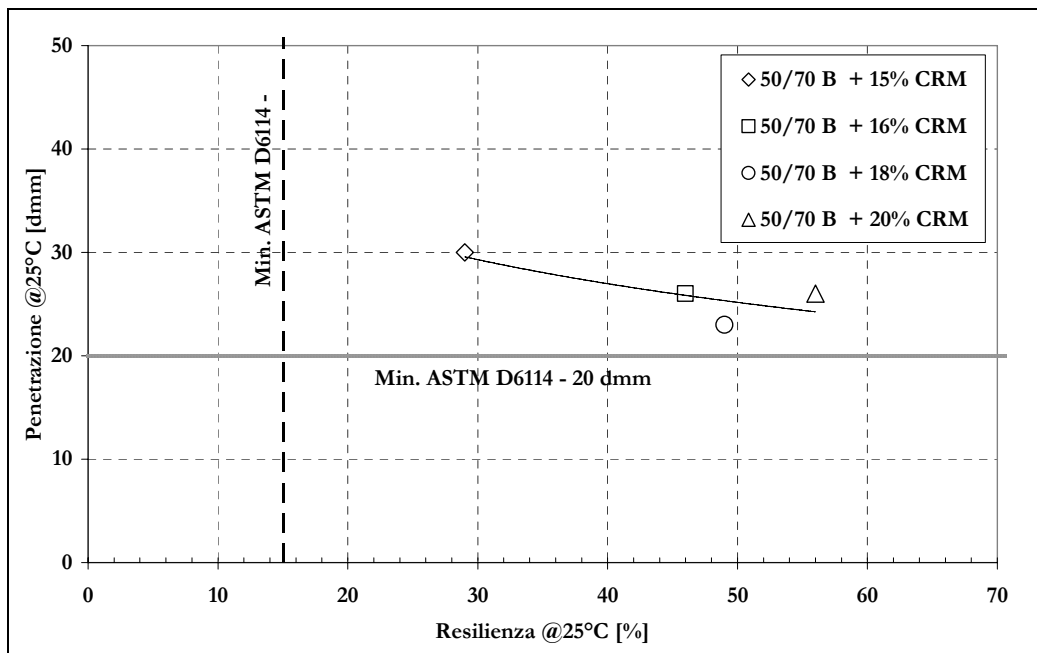


Figura 6-25: Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diversa % di CRM

Di seguito si studia l'influenza del bitume base utilizzato nei risultati delle prove convenzionali, per le stesse percentuali e tipo di polverino di gomma addizionato.

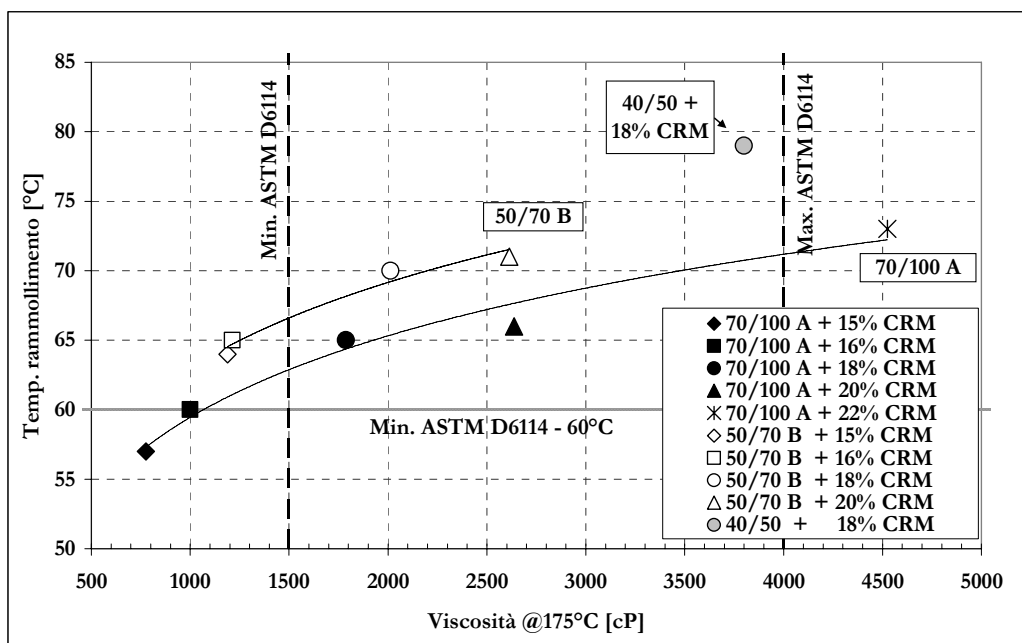
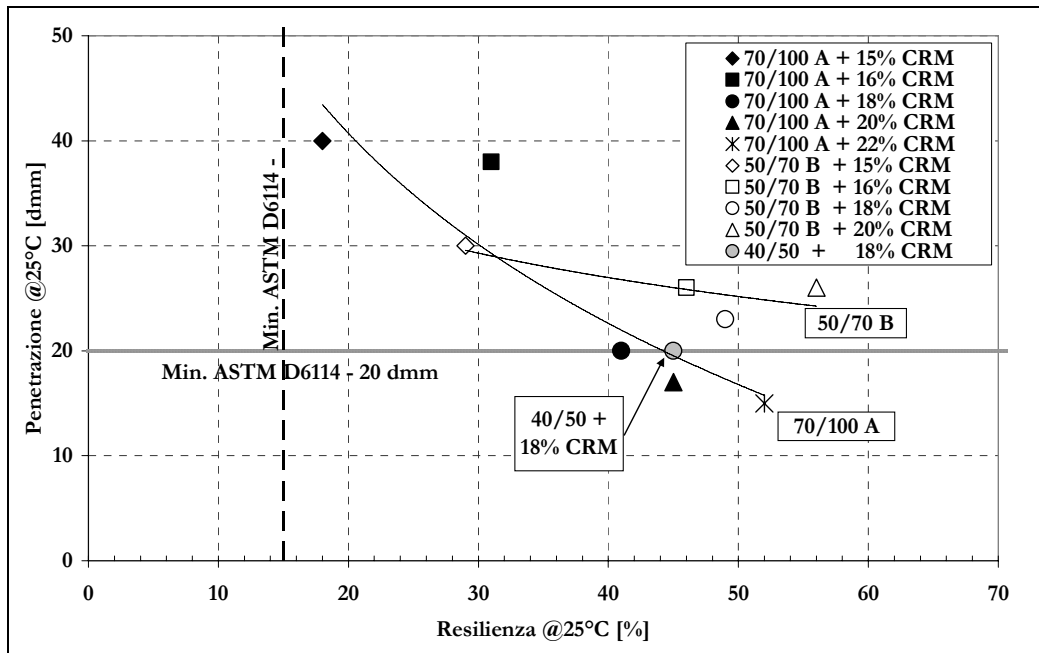


Figura 6-26: Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per leganti AR con diversa % di CRM

Si può concludere che aumentando la percentuale di polverino migliora la risposta in termini di temperatura di rammollimento e aumenta la consistenza del bitume. La correlazione tra queste due grandezze risulta abbastanza ben definita per entrambi i bitumi, per i quali vengono descritte due curve pressoché parallele (Figura 6-26).

Quanto più soft è la base, tanto minori sono i valori di viscosità e punto di rammollimento.

Per la temperatura di rammollimento, in particolare, si verifica che il miglioramento con l'aggiunta di CRM è maggiore per le basi più dure: per il bitume 50/70 B non modificato la temperatura di palla anello passa da 50°C a 70°C, mentre per il 70/100 A sale da 47°C a 65°C, sempre con l'aggiunta di 18% CRM. Abbiamo così, rispettivamente, un aumento di 20°C e di 18°C, per valori di viscosità dello stesso ordine di grandezza. Il 40/50 base aveva già una temperatura di rammollimento elevata (66°C) e con l'aggiunta del 18% di CRM tale valore è arrivato a 79°C.



**Figura 6-27: Variazione della resilienza con la penetrazione per leganti AR con diversa % di CRM**

L'aumento della percentuale di polverino, come già sottolineato, aumenta la resilienza e diminuisce la penetrazione. È curioso notare, dalla Figura 6-27, come ad esempio per il 18% di CRM i bitumi 40/50 e 70/100 A abbiano lo stesso valore di penetrazione. Ovviamente ad una base più dura corrisponde un minore valore di resilienza.

Dal grafico di Figura 6-28 si nota come la temperatura di rammollimento e la resilienza aumentino in maniera analoga all'aumentare della percentuale di CRM.

La correlazione tra le due grandezze è meno marcata, e le curve di tendenza non risultano più parallele, come avveniva nel grafico viscosità-temperatura di rammollimento.

Una base più dura in genere è meno elastica e quindi ci si aspetterebbe che la curva del bitume 50/70 fosse al di sotto di quella del 70/100. In realtà non è così, a parità di % di CRM il bitume 50/70 presenta un valore di resilienza maggiore, sin dall'aggiunta del 15% di CRM, a conferma di una maggiore compatibilità tra polverino e bitume base 50/70 rispetto al 70/100.

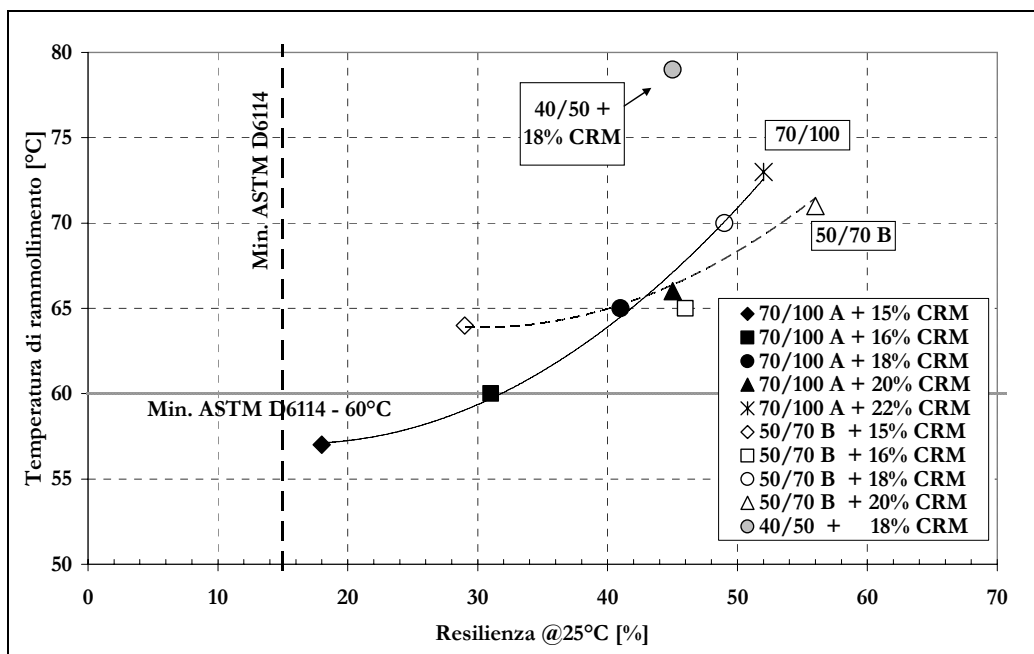


Figura 6-28: Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per leganti AR con diversa % di CRM

### 6.3.1.3 PERCENTUALE OTTIMA DI POLVERINO DI GOMMA

Con base nell'analisi dei risultati discussi sopra, si può indicare per ciascuna base una percentuale di polverino cosiddetta "ottima": per il bitume 50/70 B la % consigliata è il 20%, mentre per il 70/100 A, è il 18% di CRM.

Mentre per il bitume 50/70 B appare abbastanza ovvia la scelta del 20% di CRM, per il 70/100 A, la scelta del 18% è stata condizionata dal limite imposto dalla norma per la penetrazione. Infatti, con l'aggiunta di 20% di CRM alla base 70/100 si ottengono risultati migliori ma la penetrazione è troppo bassa (vedi Tabelle 6-15 e 6-16).

In questo caso il progettista potrebbe scegliere di consigliare lo stesso 20% di CRM, principalmente tenendo conto che la viscosità è relativamente bassa (per i limiti della ASTM D 6114). C'è anche da considerare il fatto che i risultati dei test sulla penetrazione, per tutti i bitumi studiati, mostrano un decremento molto accentuato del grado di penetrazione con l'aggiunta di polverino di gomma, ma a volte sono stati poco significativi.

La prova di penetrazione non risulta indicata per il bitume modificato con la gomma. L'esperienza di laboratorio porta a ritenere che i risultati di questi test dipendano dalla distribuzione superficiale dei granuli di gomma nei campioni. Sono più attendibili, come misura dell'aumento di consistenza del bitume con l'aggiunta di CRM, i risultati ottenuti con il viscosimetro di Brookfield.

**Tabella 6-15: Percentuale “ottima” di CRM per il bitume 50/70 B**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
50/70 B + 20% CRM	22	71	4175	2613	56

**Tabella 6-16: Percentuale “ottima” di CRM per il bitume 70/100 A**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
70/100 A + 18% CRM	20	65	2025	1788	41

#### 6.3.1.4 DUTTILITÀ E RITORNO ELASTICO

L'incremento di consistenza dei bitumi con l'aggiunta di polverino di gomma è particolarmente evidente nello studio della duttilità e delle capacità di recupero delle grandi deformazioni.

Proprio i test di duttilità e di recupero elastico mostrano una notevole riduzione della capacità di allungamento del bitume base modificato con diverse percentuali di polverino. Il campo di duttilità appare limitato, così come risulta sostanzialmente ridotto il ritorno elastico (vedi Figura 6-29).

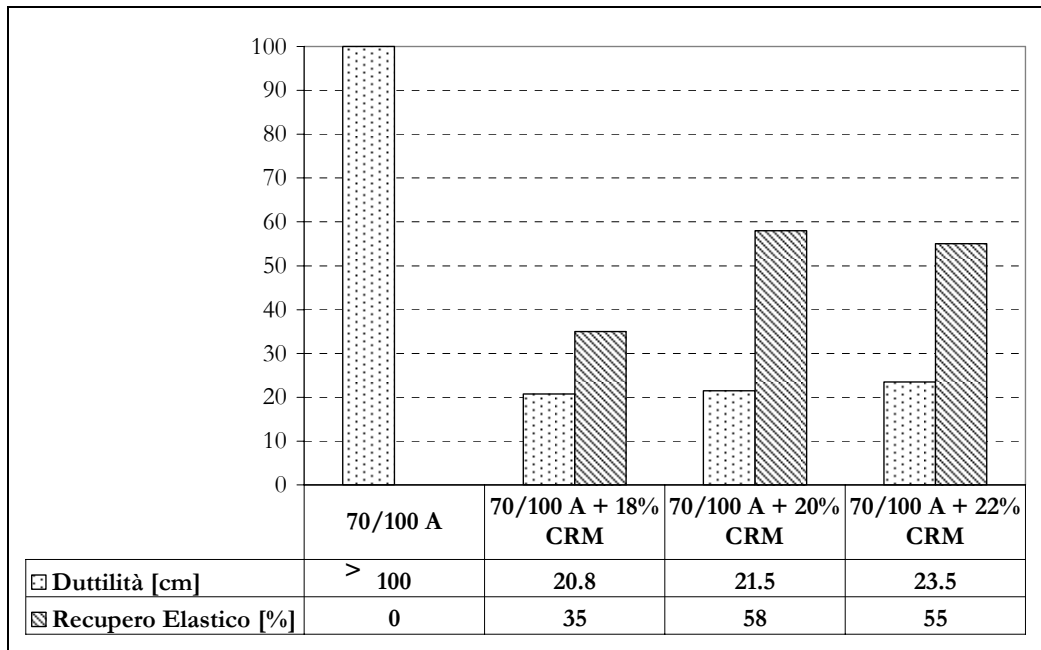


Figura 6-29: Duttività e recupero elastico di bitumi CRM

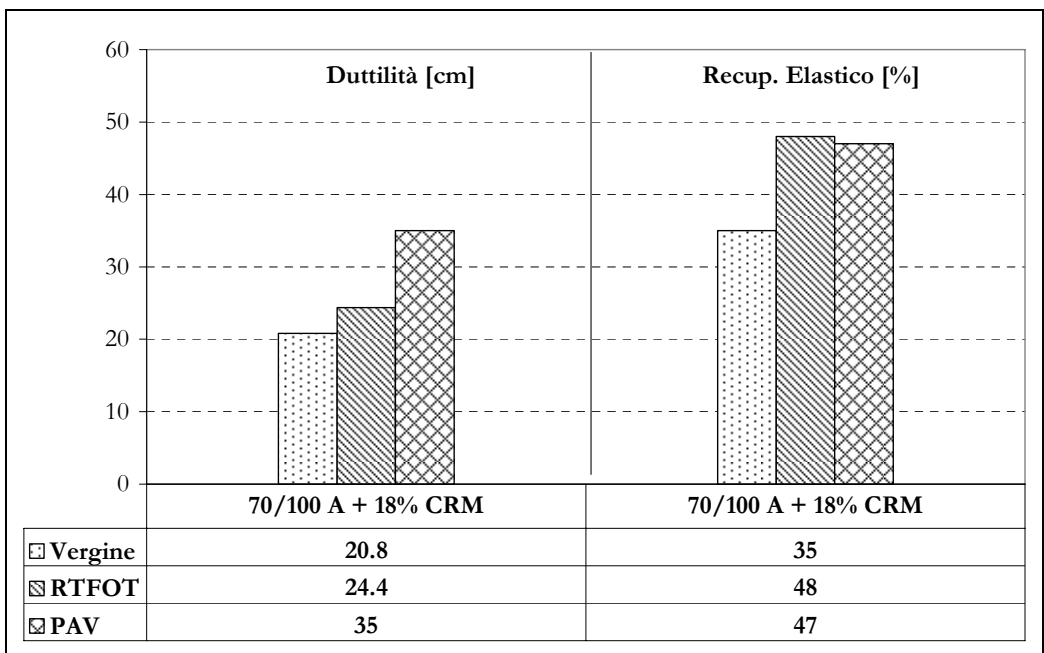


Figura 6-30: Duttività e recupero elastico di bitumi CRM dopo invecchiamento

Appare interessante l'analisi dell'evoluzione della duttilità e del ritorno elastico del bitume CRM sottoposto ad azione di invecchiamento. Si osserva, infatti, come tale azione di invecchiamento comporti un aumento significativo della duttilità e della percentuale di recupero elastico (vedi Figura 6-30).

Anche in considerazione delle specifiche procedure di invecchiamento accelerato, è più che lecito pensare che l'azione di ossidazione su film sottile (RTFO) e di ossidazione ad alta pressione (PAV) possa, di fatto, comportare un miglioramento dell'omogeneità fra bitume base e polverino ed una maggiore compartecipazione delle due fasi.

### 6.3.2 Confronto fra modifica con CRM e con Polimeri

Stando a quella che è l'attuale normativa europea per la classificazione dei bitumi, si è deciso di confrontare bitumi con la stessa classe di penetrazione.

I bitumi scelti sono 70/100 A base, il modificato SBS hard, il modificato EVA soft e quello ottenuto tramite modifica del 70/100 A con 15% CRM. I bitumi modificati hanno tutti una classe di penetrazione 40/50.

Le tabelle 6-17 e 6-18 riportano le caratteristiche dei bitumi prima e dopo invecchiamento RTFOT:

**Tabella 6-17: Caratteristica dei bitumi non invecchiati**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità [cP]			
			@100°C	@135°C	@160°C	@175°C
<b>70/100 A tal quale</b>	74	45	2690	350	120	60
<b>Mod. SBS hard</b>	48	84	19840	2240	560	240
<b>70/100 + 15% CRM</b>	45	56	10400	2180	840	580
<b>Mod. EVA soft</b>	53	57	3420	500	180	100



Tabella 6-18: Caratteristica dei bitumi invecchiati RTFOT

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità [cP]			
			@100°C	@135°C	@160°C	@175°C
70/100 A tal quale	45	50	4350	520	170	100
Mod. SBS hard	37	79	12350	5420	1030	560
Mod. CRM 15%	41	63	5650	3660	1360	840
Mod. EVA soft	34	55	5960	670	240	120

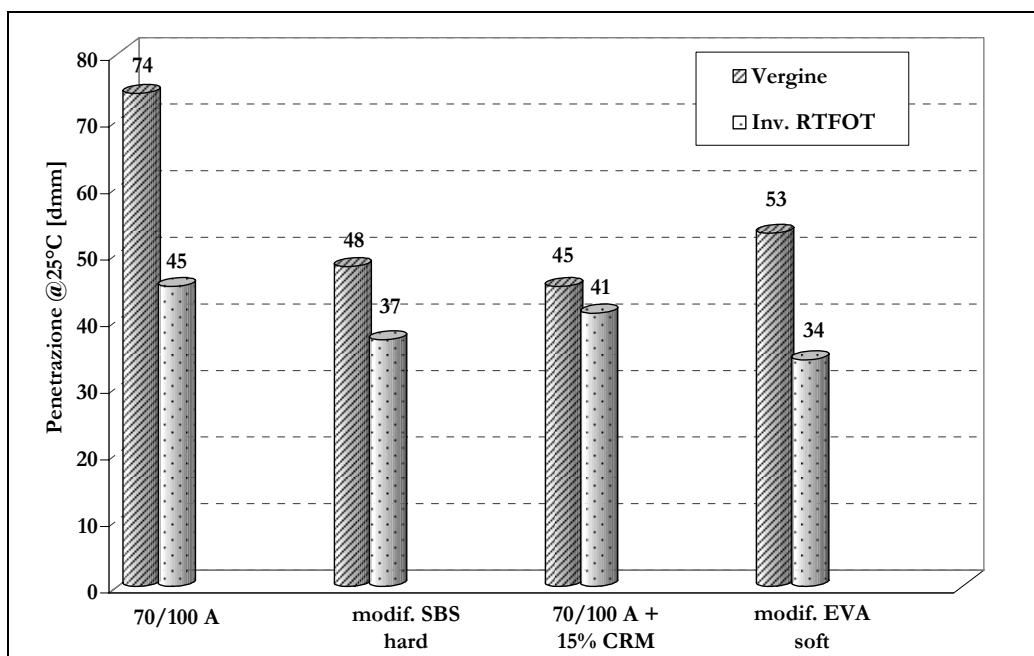
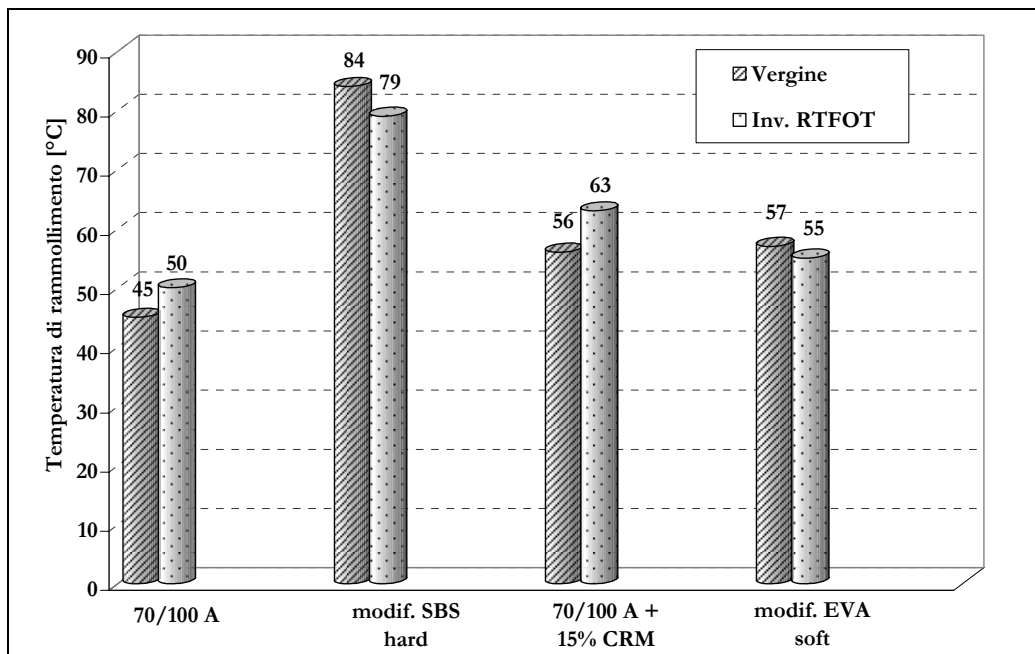


Figura 6-31: Valori di penetrazione prima e dopo invecchiamento RTFOT



**Figura 6-32: Temperatura di rammollimento per i bitumi considerati, vergini e dopo RTFOT**

Nel grafico della Figura 6-31 si denota un indurimento di tutti i bitumi dopo invecchiamento RTFOT, più accentuato per il bitume non modificato e per il modificato EVA. Si può notare anche come il grado di penetrazione dei bitumi modificati vergini considerati in questo programma sia approssimativamente dello stesso ordine di grandezza.

I bitumi modificati con polimeri presentano un punto di rammollimento superiore rispetto ai bitumi non modificati (Figura 6-32). Il bitume modificato con SBS è caratterizzato da un punto di rammollimento maggiore rispetto agli altri bitumi in esame, compreso quello CRM.

Riguardo all'effetto dell'invecchiamento sulla temperatura di rammollimento si verifica che i bitumi modificati CRM migliorano le loro prestazioni, mentre i bitumi modificati SBS e EVA si induriscono e hanno un decadimento del punto di rammollimento, rispettivamente, di 5°C e 2°C (vedi Figura 6-32).

## 6.3.2.1 CICLI DI RISCALDAMENTO

I cicli di riscaldamento e raffreddamento sono stati eseguiti per studiare il cambiamento del comportamento del bitume soggetto a numerosi sbalzi di temperatura, come potrebbe avvenire durante la fase di realizzazione della pavimentazione stradale o durante la fase di servizio.

In primo luogo il bitume è stato riscaldato ad una temperatura pari a 200°C e successivamente versato all'interno di una provetta di acciaio (è la stessa provetta vista per la prova di viscosità). Successivamente il campione di prova è stato inserito all'interno del viscosimetro e la temperatura viene portata a 160°C. A questa temperatura è stata eseguita una lettura della viscosità. Dopo di ch  la temperatura è stata alzata fino a 175°C e analogamente al passaggio precedente, è stata eseguita una misura di viscosità. Per concludere il primo ciclo, è stata eseguita un'ulteriore lettura alla temperatura di 200°C.

A questo punto il campione di prova è stato raffreddato in frigo alla temperatura di 25°C.

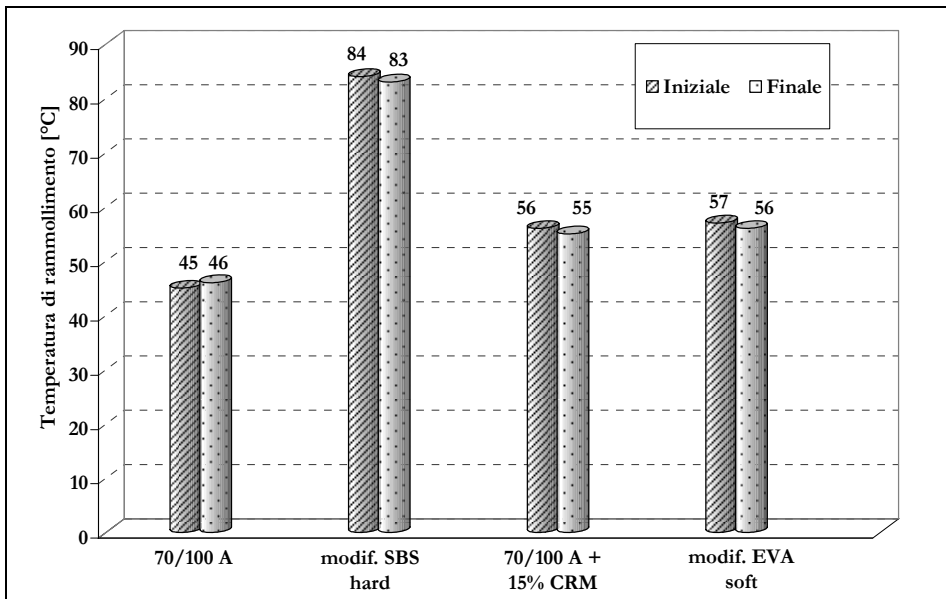
Analogamente ai passaggi svolti per il primo ciclo sono stati eseguiti 4 cicli per ogni bitume testato. I risultati sono descritti nella Tabella 6-19.

Tabella 6-19: Cicli di riscaldamento

Bitume	Viscosità [cP]												Temp. Ramm [°C]
	@ 160° C	@ 175 °C	@ 200 °C	@ 160 °C	@ 175 °C	@ 200 °C	@ 160 °C	@ 175 °C	@ 200 °C	@ 160 °C	@ 175 °C	@ 200 °C	
	1° CICLO			2° CICLO			3° CICLO			4° CICLO			
<b>Tal quale 70/100A</b>	120	60	20	100	40	20	120	60	20	120	60	40	46
<b>70/100A +CRM 15%</b>	520	340	200	600	420	360	800	520	320	800	540	340	55
<b>Mod. SBS hard</b>	1020	580	260	980	340	240	960	540	240	940	480	230	83
<b>Mod. EVA soft</b>	160	90	30	140	70	20	160	100	60	160	80	40	56
	200°C	25°C	200°C	25°C	200°C	25°C	200°C	25°C	200°C	25°C			

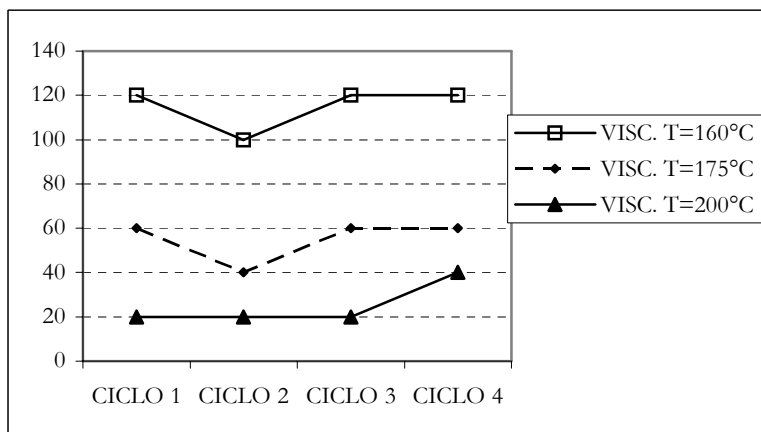
Lo scopo di tale procedura è il confronto in termini di invecchiamento RTFOT e di stress termico a cui i bitumi sono sottoposti nelle varie fasi, dalla produzione alla messa in opera, valutando il comportamento di bitumi modificati SBS, EVA e CRM dopo cicli ripetuti di riscaldamento.

La Figura 6-33 mostra le differenze verificate nelle temperature di rammollimento prima e dopo i cicli.



**Figura 6-33: Confronto fra i valori di palla anello all’inizio e alla fine di 4 cicli di riscaldamento e raffreddamento**

I grafici seguenti (Figura 6-34 a 6-37) mostrano l’andamento della viscosità, espressa in centipoise, per ogni bitume alle diverse temperature dei cicli di riscaldamento.



**Figura 6-34: Andamento della viscosità per il bitume 70/100 A**

Per il bitume 70/100 A (Figura 6-34), a 160°C la viscosità presenta un lieve calo tra il primo e il secondo ciclo di riscaldamento ed un successivo recupero. La viscosità a 175°C presenta un calo in corrispondenza del secondo ciclo e, successivamente, un aumento, recuperando di valore. A 200°C la viscosità presenta un andamento pressoché costante, con un lieve aumento in corrispondenza del quarto ciclo. Complessivamente, confrontando i valori del primo ciclo e dell'ultimo ciclo, la viscosità a 160°C e a 175°C si mantiene pressoché uguale mentre solo la viscosità a 200°C mostra un leggero aumento.

Il bitume dopo i diversi cicli ha mostrato un valore di punto di rammollimento leggermente inferiore al valore caratteristico del bitume originale (i valori si discostano di poche unità). Ossia, i quattro cicli di riscaldamento e raffreddamento non hanno apportato effetti di importanza rilevante su questo tipo di bitume; probabilmente per avere effetti misurabili sarebbe stato necessario affrontare un numero di cicli superiore o una escursione termica maggiore.

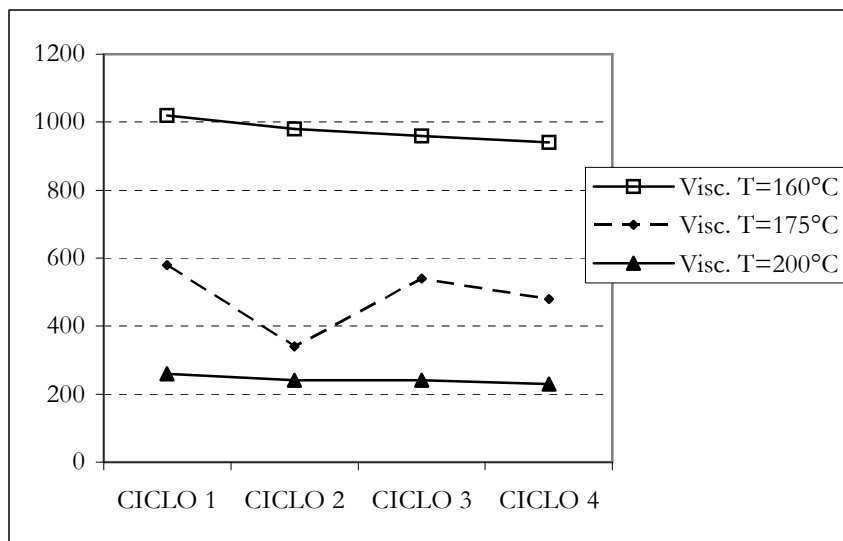
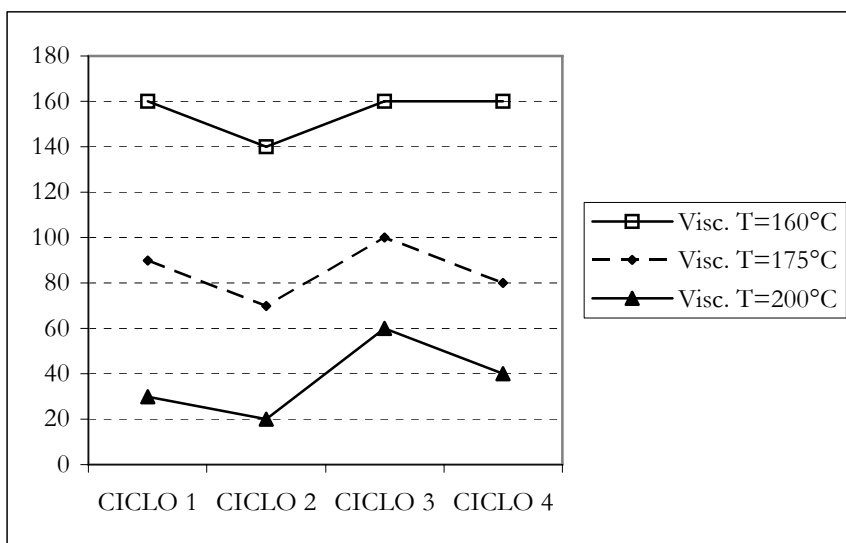


Figura 6-35: Andamento della viscosità per il bitume SBS hard

Per il bitume SBS Hard (Figura 6-35) i valori di viscosità a 160°C presentano un andamento decrescente approssimativamente costante. La viscosità relativa alla temperatura di 175°C presenta un calo tra il primo e il secondo ciclo, per aumentare successivamente. Il valore di viscosità presenta in corrispondenza del quarto ciclo un ennesimo calo. A 200°C, la viscosità ha un andamento approssimativamente costante.

In complesso, confrontando i valori ottenuti dal primo e dall'ultimo ciclo, si può osservare come la viscosità abbia un leggero calo per entrambe le temperature, anche se il percorso seguito non è uguale (a 160°C e a 200°C l'andamento è pressoché omogeneo mentre per i valori a 175°C, l'andamento è molto irregolare).

I valori di viscosità presentano un aumento cospicuo dopo il primo riscaldamento a 200°C e successivamente un andamento variabile che porta a valori finali comunque maggiori rispetto al prodotto di partenza. Il valore di punto di rammollimento in questo caso risulta approssimativamente uguale al valore originario (diminuisce solo di un paio di unità). Gli effetti dei cicli in questo caso sono più evidenti rispetto al bitume non modificato, producendo un materiale più denso rispetto a quello di partenza.



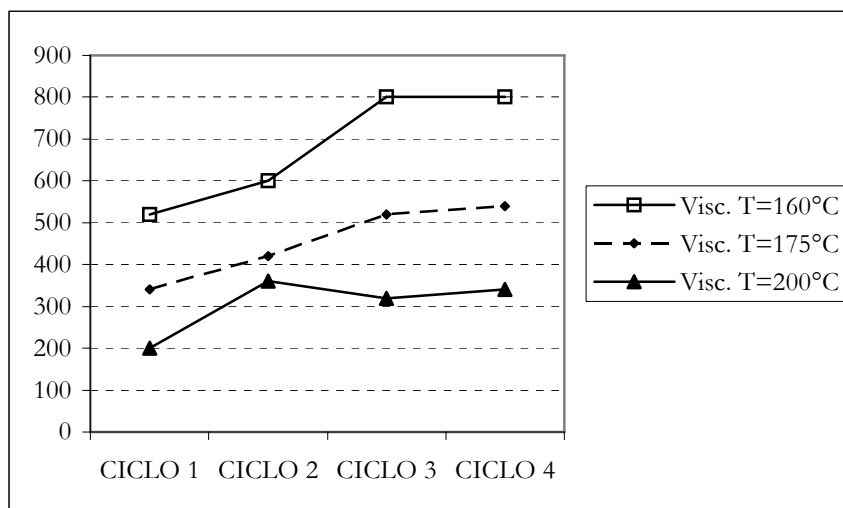
**Figura 6-36: Andamento della viscosità per il bitume modificato con EVA**

Per il bitume EVA Soft (Figura 6-36), a 160°C la viscosità ha un leggero calo in corrispondenza del secondo ciclo, ma recupera di valore subito dopo in corrispondenza del terzo ciclo. Successivamente l'andamento risulta costante. A 175°C il valore di viscosità ha un andamento piuttosto altalenante: presenta dei cali in corrispondenza del secondo e del quarto ciclo, mentre ha un innalzamento nel terzo ciclo. A 200°C la viscosità presenta un andamento pressoché costante durante i primi due cicli, ha un innalzamento in corrispondenza del terzo ciclo e ha un calo successivamente.

Complessivamente, tra il primo e l'ultimo ciclo si verificano valori approssimativamente uguali per la temperatura di 160°C e 175°C, mentre si osserva un leggero aumento di valore alla temperatura di 200°C.

I quattro cicli di riscaldamento e raffreddamento hanno comportato sul bitume modificato EVA un generale abbassamento dei valori di viscosità. Più precisamente, dopo il primo riscaldamento a 200°C, si verifica una lieve diminuzione della viscosità; successivamente l'abbassamento diventa più cospicuo ma in corrispondenza del secondo ciclo i valori tornano a salire fino alla conclusione della prova. La viscosità finale risulta comunque leggermente minore rispetto ai valori iniziali.

Per quanto riguarda il valore del punto di rammollimento, rimane approssimativamente uguale rispetto a quello del materiale originale (si verifica solo un abbassamento di un paio di unità). Dopo i quattro cicli perciò non si riesce a definire un comportamento ben delineato ed occorrerebbe svolgere più cicli di riscaldamento e raffreddamento per trarre conclusioni più certe.



**Figura 6-37: Andamento della viscosità per il bitume modificato con 15% di CRM**

Il bitume modificato CRM (Figura 6-37) mostra un comportamento diverso rispetto ai casi visti in precedenza. Dopo il primo riscaldamento a 200°C si verifica un consistente abbassamento dei valori di viscosità; successivamente si assiste ad un recupero di tali valori durante tutti i cicli. A 160°C, il valore della viscosità ha un andamento dapprima crescente e poi costante tra il terzo e il quarto ciclo di riscaldamento. A 175°C, la viscosità aumenta in modo approssimativamente costante durante tutti i cicli. La viscosità a 200°C presenta un andamento complessivamente crescente, anche se si può notare un lieve calo tra il secondo e il terzo ciclo. Confrontando il primo e l'ultimo ciclo si può constatare un generale aumento dei valori di viscosità a tutte le temperature.

Il valore del punto di rammollimento del bitume, dopo aver subito i cicli di riscaldamento e raffreddamento, risulta approssimativamente uguale a quello caratteristico del bitume di partenza.

### 6.3.2.2 EFFETTO DELL'INVECCHIAMENTO

I grafici rappresentati di seguito (Figura 6-38 e Figura 6-39) mostrano il confronto tra invecchiamento RTFOT e cicli di riscaldamento e raffreddamento in termini di punto di rammollimento.

Si verifica che il legante Asphalt Rubber aumenta la sua temperatura di palla anello dopo RTFOT, il che indica che il processo ossidativo favorisce l'omogeneità della miscela bitume – gomma.

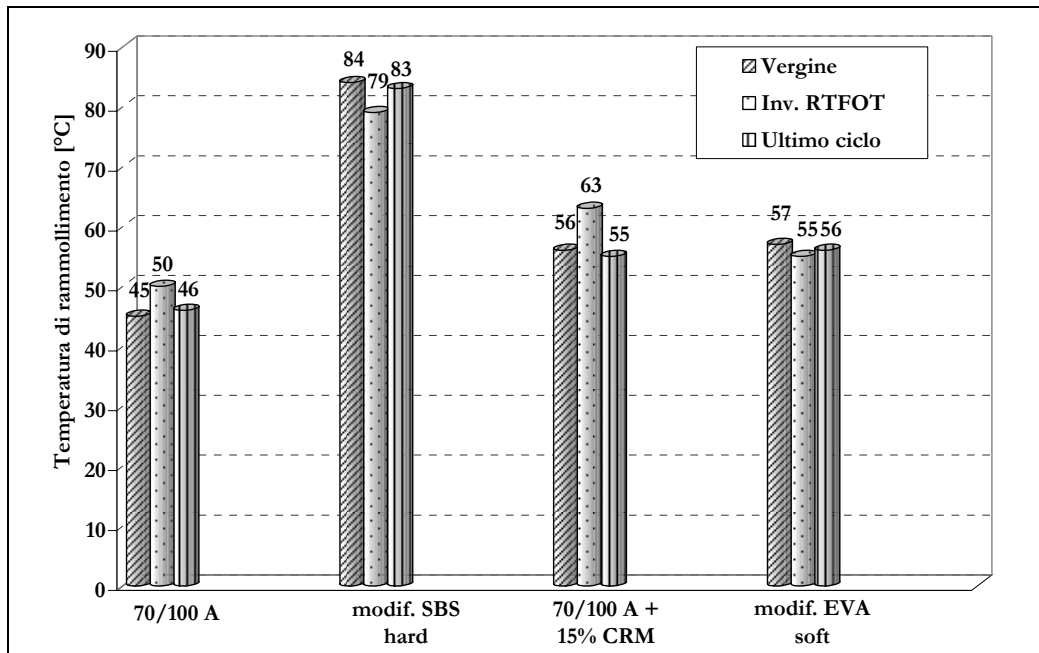


Figura 6-38: Confronto fra valori di temperatura di rammollimento iniziale, dopo RTFOT e dopo 4 cicli di riscaldamento-raffreddamento



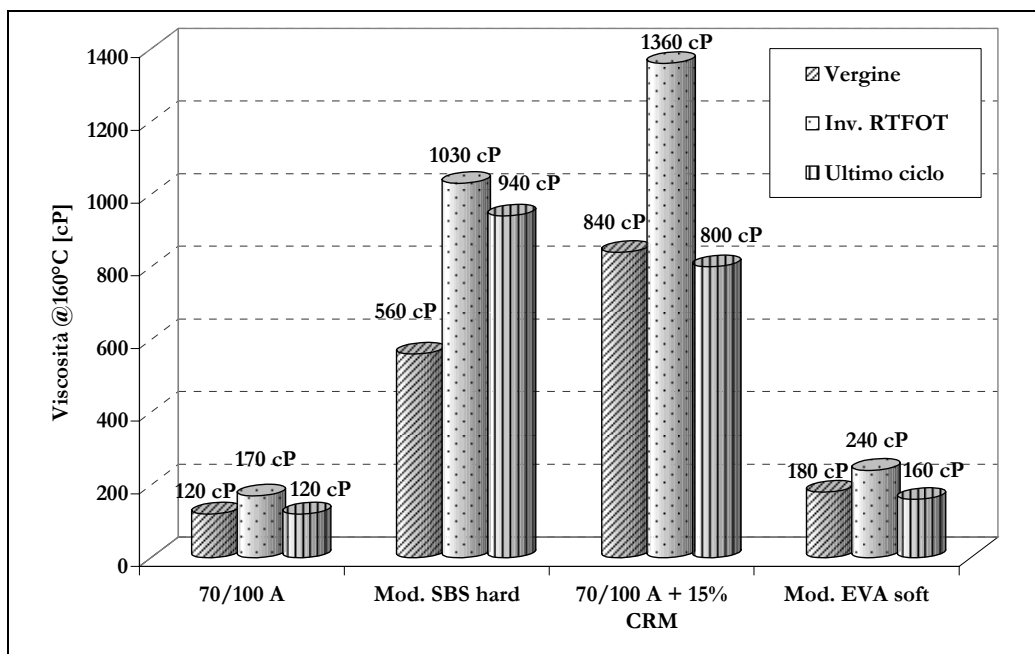


Figura 6-39: Confronto fra i valori di viscosità iniziale, dopo RTFOT e dopo 4 cicli di riscaldamento raffreddamento

Per quanto riguarda la viscosità, si verifica un aumento dei valori di viscosità dopo RTFOT per tutti i bitumi (Figura 6-39). Si può osservare come il bitume base e quello modificato Eva subiscano uno stress termico, sia dovuto all'invecchiamento RTFOT che ai cicli di riscaldamento, inferiore a quello subito dai bitumi modificati SBS e CRM. In particolare il bitume SBS è molto sensibile a cicli di riscaldamento-raffreddamento, mentre il CRM aumenta molto la sua viscosità dopo RTFOT.

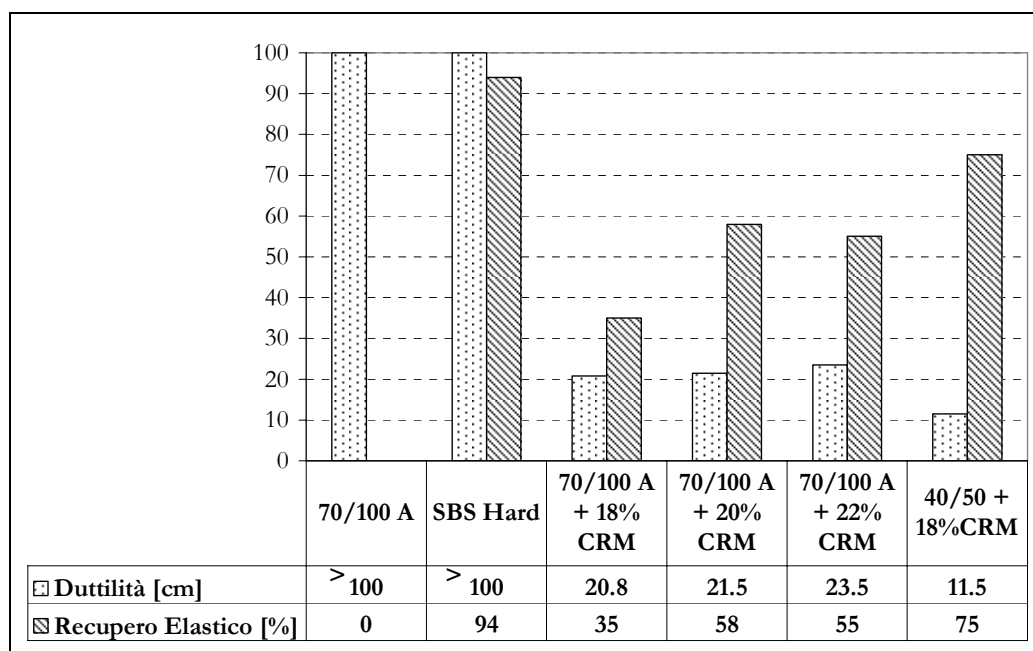
Il bitume 70/100 A non modificato, invecchiato sia attraverso il procedimento RTFOT che attraverso i cicli di riscaldamento e raffreddamento, è caratterizzato da un punto di rammollimento maggiore rispetto al bitume vergine (Figura 6-38).

Per i bitumi modificati SBS hard e EVA soft i risultati sono analoghi, anche se molto meno accentuati per l'EVA. L'effetto dell'invecchiamento RTFOT è quello di far diminuire il valore di palla anello e il bitume, dopo aver subito i cicli di riscaldamento, presenta un punto di rammollimento inferiore all'originale. Inoltre, si osserva un aumento dei valori di viscosità, ma una diminuzione dei valori di punto di rammollimento e penetrazione. Il bitume vergine, quindi, risulta più denso e più duro rispetto al materiale non invecchiato. Il bitume rammollisce a temperature più basse e quindi si verifica una perdita di consistenza veloce nel momento in cui si aumenta la temperatura.

Passando ad analizzare il bitume modificato CRM, si verifica che questo dopo invecchiamento, analogamente ai casi precedenti, è caratterizzato da valori di viscosità superiori al materiale originale, ma si verifica un aumento del punto di rammollimento e una diminuzione del valore di penetrazione.

A completamento della comparazione fra bitumi modificati con polimeri e CRM si è studiato l'effetto dell'invecchiamento RTFOT e PAV sulla duttilità e sul recupero elastico.

La Figura 6-40 presenta i valori di duttilità e ritorno elastico per i diversi bitumi analizzati. Si osserva come l'aggiunta di polverino di gomma comporti una diminuzione della capacità di allungamento iniziale del bitume 70/100 e come i valori di duttilità e ritorno elastico per il bitume SBS siano superiori a quelli CRM.



**Figura 6-40: Confronto fra valori di duttilità e di ritorno elastico per bitumi modificati CRM e SBS hard**

Per quanto riguarda l'effetto dell'invecchiamento sulla duttilità e ritorno elastico (Figura 6-41), si osserva che i bitumi modificati CRM migliorano le loro caratteristiche dopo l'invecchiamento, mentre il bitume modificato SBS diminuisce la sua capacità di ritorno elastico del 50% dopo invecchiamento PAV. Queste differenze sono ancora più marcate nelle prove di duttilità, dove il bitume 70/100 + 18% CRM aumenta la sua capacità di allungamento dopo PAV di 15 cm.

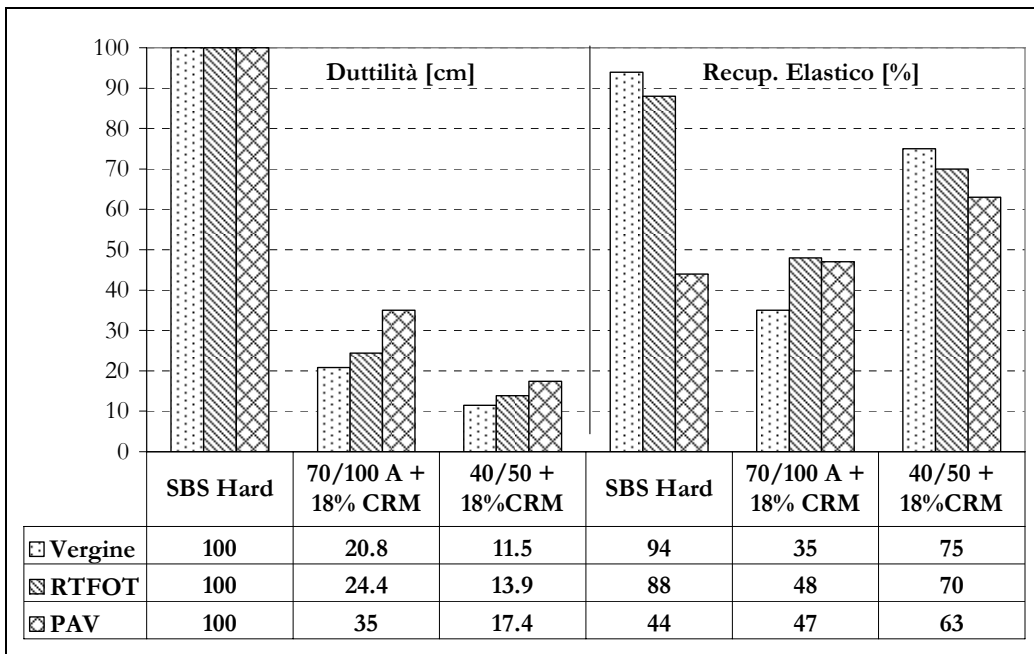


Figura 6-41: Confronto fra valori di duttilità e di Ritorno elastico per bitumi modificati CRM e SBS – effetto dell’invecchiamento

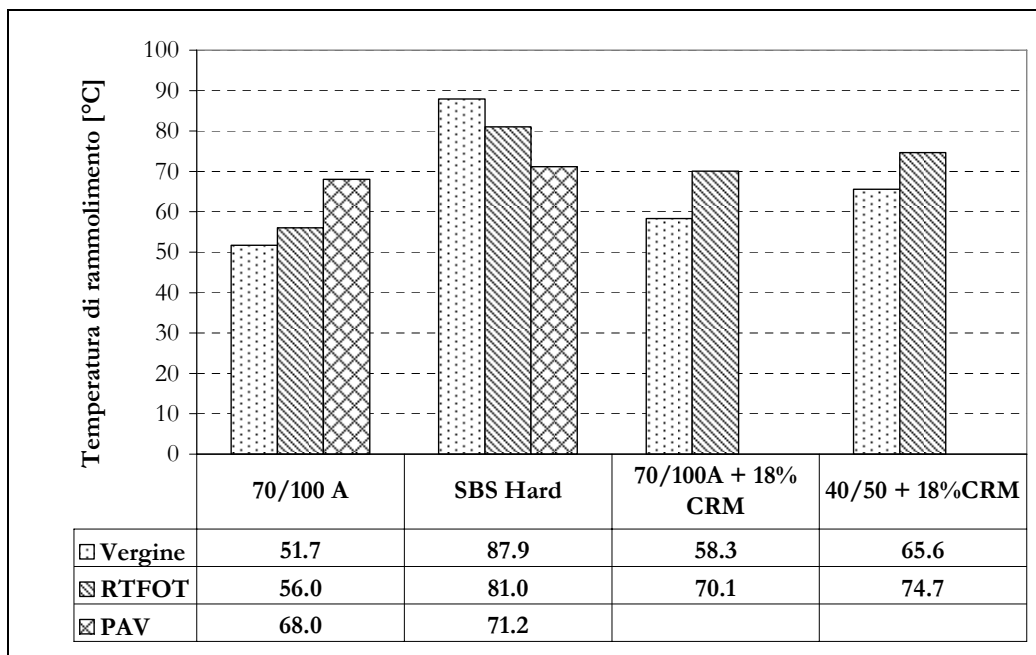


Figura 6-42: Temperatura di Rammollimento per diversi tipi di modifica e invecchiamento

Nella Figura 6-42 si può osservare come l'invecchiamento RTFOT comporti modifiche nelle temperature di rammollimento diverse a seconda del tipo di bitume. Così, il bitume 70/100 non modificato e il 70/100 modificato CRM presentano un aumento della temperatura di rammollimento, mentre i bitumi modificati SBS e EVA peggiorano questo valore dopo RTFOT.

Da quanto osservato si può concludere che mentre per i bitumi tradizionali le azioni di invecchiamento accelerato comportano un'azione ossidante che implica un aumento della frazione asfaltenica e della consistenza dello stesso legante, nel caso del bitume CRM si osserva una parziale amplificazione, nel caso specifico benefica, delle risorse di duttilità.

Ciò denota che la stessa procedura di invecchiamento accelerato (film sottile, alte temperature ed alte pressioni), verosimilmente, rende più omogeneo e compartecipante il legame tra gomma e bitume base. Tuttavia non ci si deve aspettare che nelle condizioni di invecchiamento in opera il bitume CRM possa, allo stesso modo, sopperire ai rischi di una eccessiva rigidità ed esporsi a fenomeni di fragilità, i quali vanno specificamente controllati attraverso il dosaggio di gomma e la natura del bitume base.

### 6.3.2.3 STOCCAGGIO

È stata valutata la stabilità allo stoccaggio sia mediante Tuben Test, eseguito secondo la norma ASTM D5892, sia mediante una variante di questo metodo nella quale i campioni sono stati lasciati in forno a 130°C per 5 giorni e successivamente riscaldati a 180°C ed agitati per 45 minuti (Tabelle 6-20 e 6-21).

**Tabella 6-20: Stabilità allo stoccaggio del bitume 40/50 + 18% CRM determinata mediante Tuben Test**

Proprietà	Legante prodotto in laboratorio: tempo di digestione 1 ora		Legante prodotto in impianto: tempo di digestione sconosciuto	
	Prima dello stoccaggio	Dopo 4gg di stoccaggio	Prima dello stoccaggio	Dopo 4gg di stoccaggio
Viscosità a 175°C [cP]	3800	Sup. 2195 Inf. 5123	3400	Sup. 1944 Inf. 7500
Penetr. a 25°C, 5s [ $10^{-1}$ mm]	20	Sup. 26 Inf. 19	26	Sup. 33 Inf. 24
Punto Ramm. [°C]	79	Sup. 63.0 Inf. 77.3	75	Sup. 64.6 Inf. 78.9
Resilienza a 25°C [%]	45	Sup. 38 Inf. 43	40	Sup. 39 Inf. 43

**Tabella 6-21: Stabilità allo stoccaggio del bitume 40/50 + 18% CRM determinata mediante variante al metodo Tuben Test**

Proprietà	Prima dello stoccaggio	Dopo 1 giorno di stoccaggio		Dopo 5 giorni di stoccaggio
	Legante da lab. - digest. 45 min.	Legante da lab. - digest. 45 min.	Legante da impianto	Legante da impianto
Viscosità a 175°C [cP]	3800	3813	3400	3625
Penetr. a 25°C, 5s [10 <sup>-1</sup> mm]	-	20	26	25
Punto Ramm. [°C]	-	79	75	77.5
Resilienza a 25°C [%]	-	-	40	38

Dai risultati delle prove di Tuben Test si può concludere che lo stoccaggio in condizioni statiche o dinamiche modifica le proprietà dell'Asphalt Rubber. Si è verificata una diminuzione considerevole del punto di rammollimento nella parte superiore del campione, e un aumento nella parte inferiore, causati dalla separazione della gomma che rimane sul fondo. Questo può essere osservato anche visivamente. Lo stoccaggio senza agitazione è stato eseguito per simulare quello che può succedere in campo quando avviene un guasto in un impianto e l'AR non può essere utilizzato immediatamente dopo la produzione.

Nonostante i risultati ottenuti forniscano indicazioni su come mantenere i campioni in laboratorio, non sono sufficienti per capire quali siano le condizioni accettabili di stoccaggio (temperatura, tempo) per questo tipo di materiale.

Al fine di meglio quantificare il processo di degradazione subito dai leganti Asphalt Rubber in fase di stoccaggio, rispetto alla quale denotano un'elevata sensibilità, a distanza di un anno sono stati riesaminati tramite prove convenzionali i leganti studiati durante la seconda fase del programma di ricerca. In tale ambito è stata effettuata una comparazione tra due leganti CRM, ricavati dallo stesso bitume base e con diverse percentuali di polverino di gomma, un legante modificato con polimero SBS ed uno tal quale (vedi Tabella 6-22).

**Tabella 6-22: Grandezze caratteristiche dei bitumi analizzati dopo 1 anno di stoccaggio**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
70/100 A tal quale iniziale	81	47	128	80	-
70/100 A tal quale dopo 1 anno	74	45	120	60	-
70/100 A + 18% CRM iniziale	20	65	-	1788	41
70/100 A + 18% CRM dopo 1 anno	26	53	160	600	22
70/100 A + 20% CRM iniziale	17	66	-	2638	45
70/100 A + 20% CRM dopo 1 anno	23	56	-	550	23
Mod. SBS hard iniziale	56	84	560	240	28
Mod. SBS hard dopo 1 anno	48	78	700	310	26

Relativamente alle analisi sui leganti stoccati durante un anno, in generale, si osserva una leggera diminuzione di tutte le caratteristiche misurate.

Per il bitume 70/100 tal quale si è riscontrata una leggera diminuzione di penetrazione, punto di rammollimento e viscosità (vedi Figura 6-43).

Il bitume modificato SBS hard si è indurito, diminuendo la sua temperatura di rammollimento e resilienza e aumentando la viscosità (vedi Figura 6-44).

I risultati evidenziati dai grafici di Figura 6-45 e Figura 6-46 mostrano un comportamento simile per il bitume 70/100 A modificato sia con il 18 che con il 20% CRM, con una diminuzione della penetrazione, temperatura di rammollimento e resilienza. Si verifica che la viscosità si riduce in maniera evidente, indicando una possibile separazione del bitume dalla gomma.

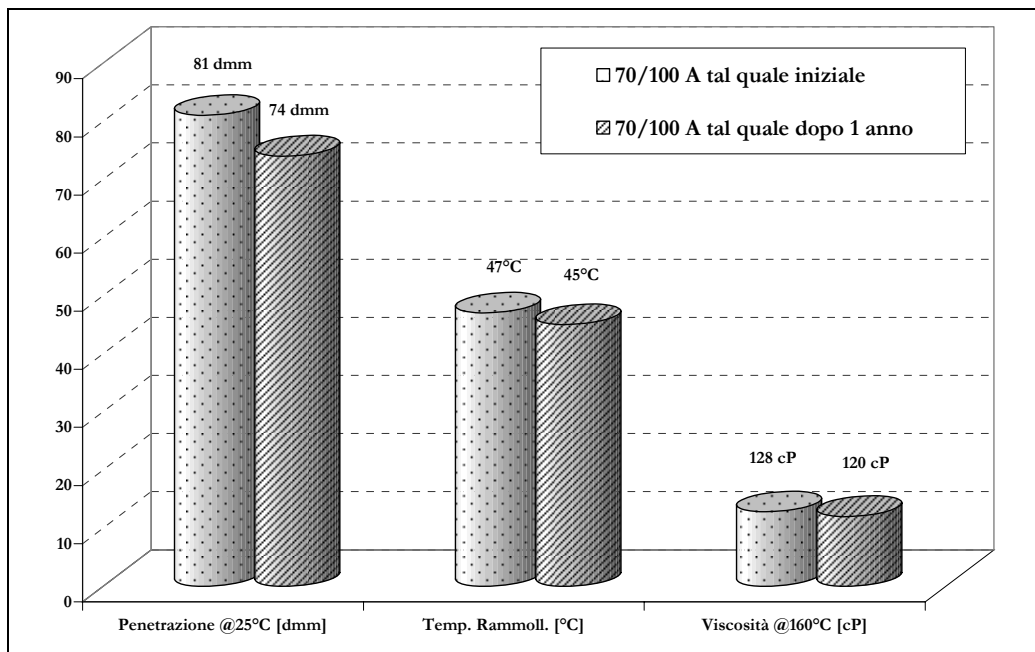


Figura 6-43: Comparazione fra le caratteristiche del bitume non modificato 70/100 A dopo 1 anno di stoccaggio

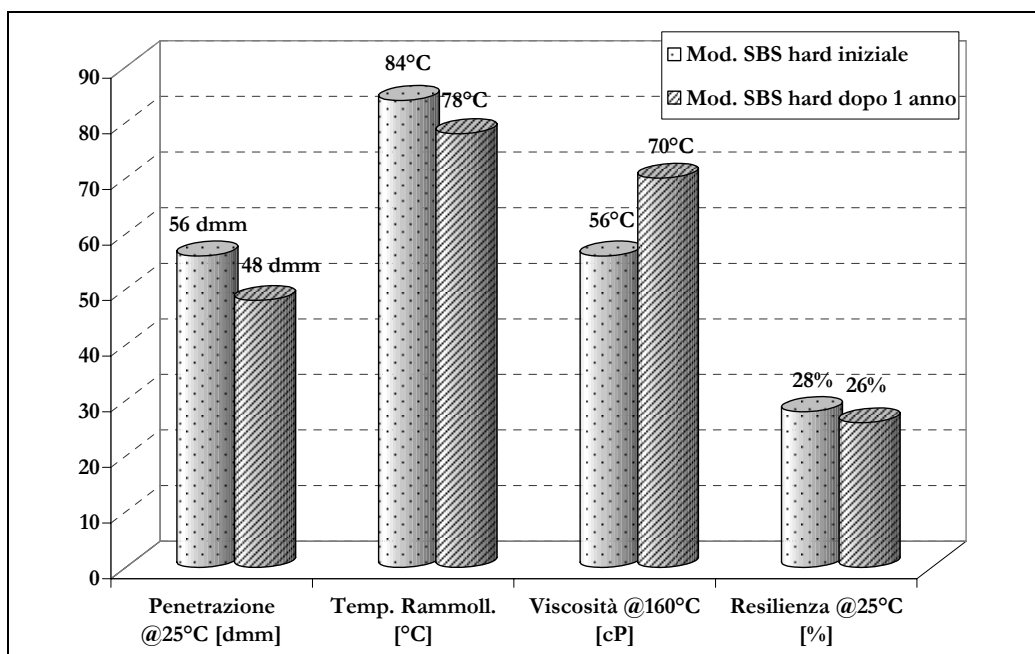


Figura 6-44: Effetti dello stoccaggio sul bitume SBS Hard

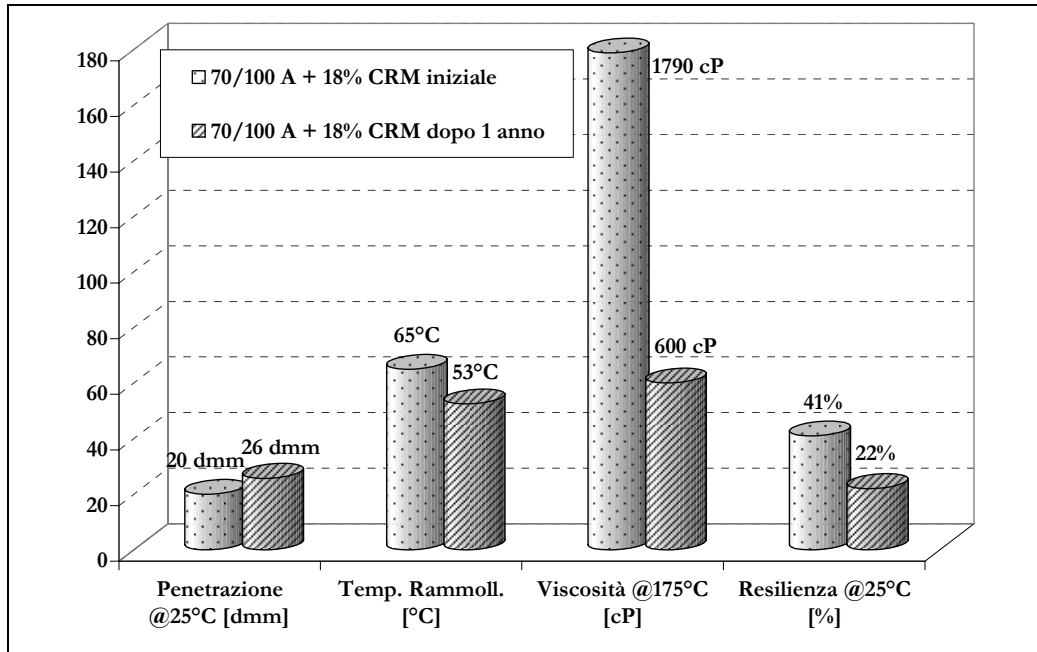


Figura 6-45: Effetti dello stoccaggio per il legante 70/100 A + 18% CRM

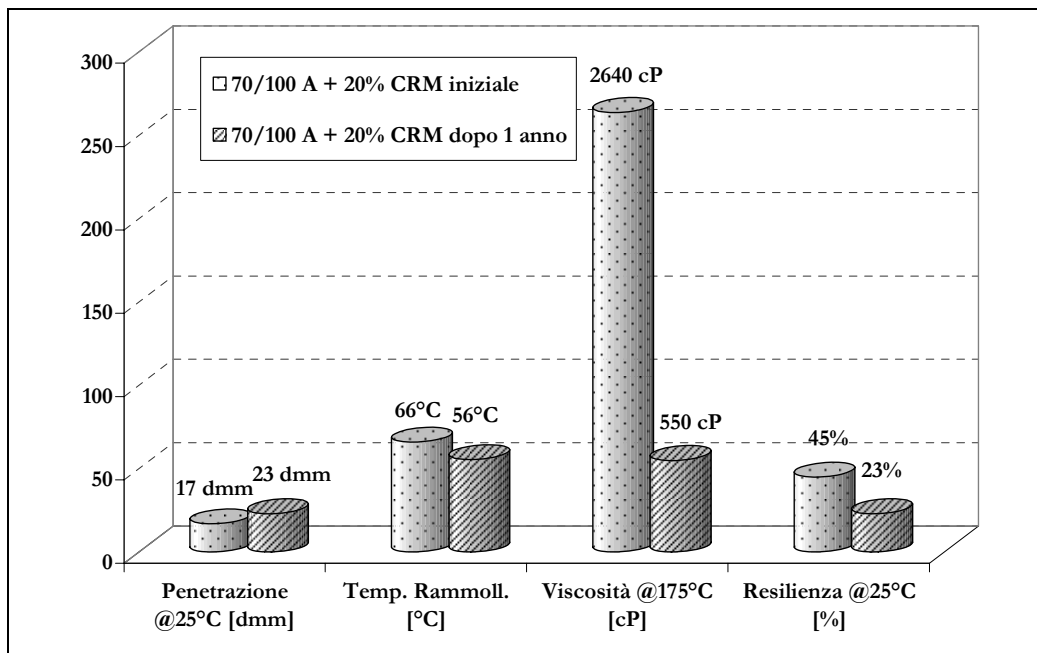


Figura 6-46: Effetti dello stoccaggio per il legante 70/100 A + 20% CRM



Il grafico della Figura 6-47 mostra per il bitume SBS un miglior mantenimento delle proprie caratteristiche dopo 1 anno di stoccaggio, ad eccezione di una forte diminuzione del punto di rammollimento.

I bitumi modificati con CRM presentano un peggioramento generale delle caratteristiche, con una riduzione della viscosità a 175°C quasi del 70% per il bitume con 18% di polverino, e dell'80% per il legante con 20% di polverino di gomma. La resilienza è diminuita del 50% per entrambi, mentre il punto di rammollimento ha avuto un decadimento di 10°C.

Questi risultati sottolineano come tali leganti vadano applicati in tempi brevi dopo la produzione, mentre i bitumi modificati SBS sono in grado di sostenere tempi di stoccaggio più lunghi.

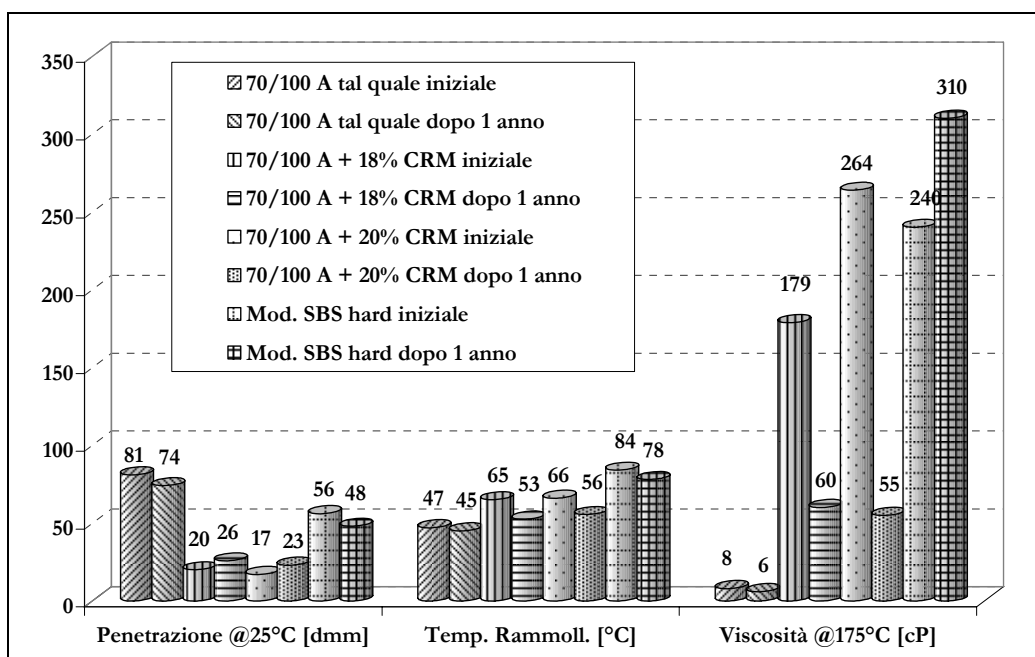


Figura 6-47: Confronto tra i diversi bitumi stoccati durante 1 anno

### 6.3.3 Terminal Blend

Si è valutata la tecnica texana definita *Terminal Blend*, la cui formulazione ha avuto origine dal tentativo di ottenere un materiale caratterizzato da una minor viscosità rispetto all'Asphalt Rubber ed in grado di essere prodotto senza ricorrere ad impianti speciali, come invece nel caso dell'AR.

Negli ultimi anni metodologie simili a questa stanno ricorrendo all'aggiunta di additivi a base di acido polifosforico, i quali hanno lo scopo di aumentare la stabilità allo stoccaggio del bitume modificato con polverino e sostituire gli oli estensivi per permettere la digestione del granulato di gomma.

Per queste formulazioni si è utilizzato l'additivo a base di acido polifosforico precedentemente riferito (vedi § 6.2.1.3).

La figura 6-48 rappresenta la suscettibilità termica di questo additivo in modo da fare capire i vantaggi della sua aggiunta ai bitumi.

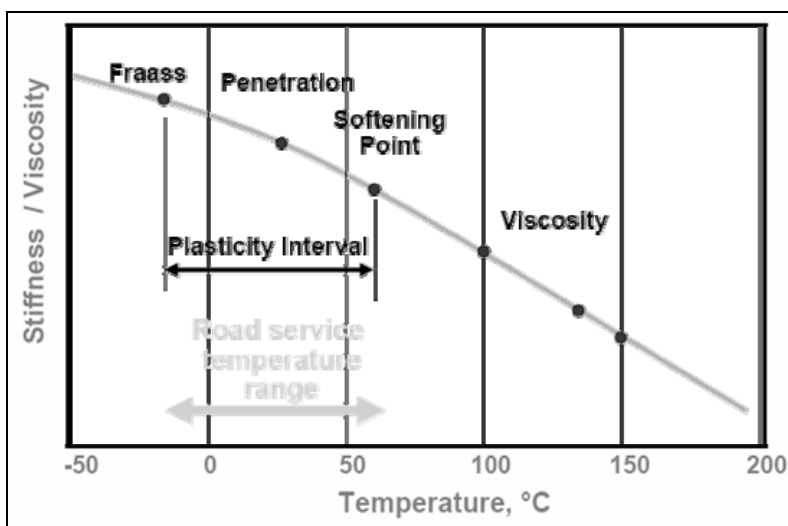


Figura 6-48: Suscettibilità alla temperatura dell'additivo AP [6-5]

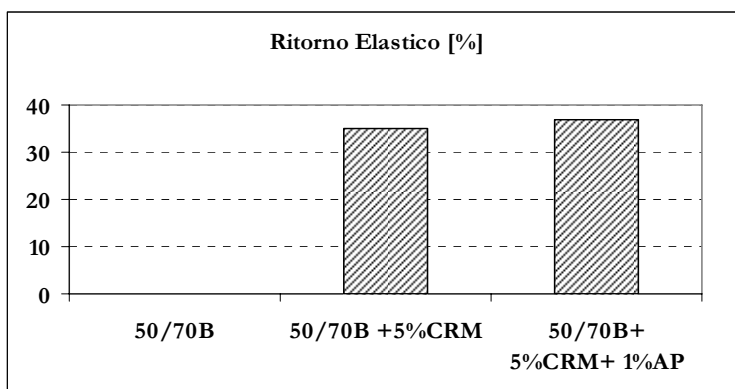
### 6.3.3.1 EFFETTO DELL'AGGIUNTA DI ACIDO POLIFOSFORICO PER FORMULAZIONI TIPO TERMINAL BLEND

La tabella 6-23 riassume le caratteristiche delle miscele ottenute in laboratorio.

**Tabella 6-23: Miscele del tipo Terminal Blend**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
50/70 B	61	50	163	100	-
50/70 B + 10%CRM + 1% acido polif.	21	65	1375	838	41
50/70 B + 8%CRM + 0.5% acido polif.	37	57	563	325	31
50/70 B + 8%CRM + 1% acido polif.	25	64	688	400	34
50/70 B + 8%CRM + 1.5% acido polif.	27	67	690	538	45
50/70 B + 5%CRM + 1% acido polif.	29	62	488	263	25

L'aggiunta di additivi di questo tipo consente, a parità di contenuto di polverino di gomma, di ridurre i valori di penetrazione e di aumentare il valore del recupero elastico e del punto di rammollimento (Figure 6-49 e 6-50).



**Figura 6-49: Effetto dell'additivazione sul valore di ritorno elastico**

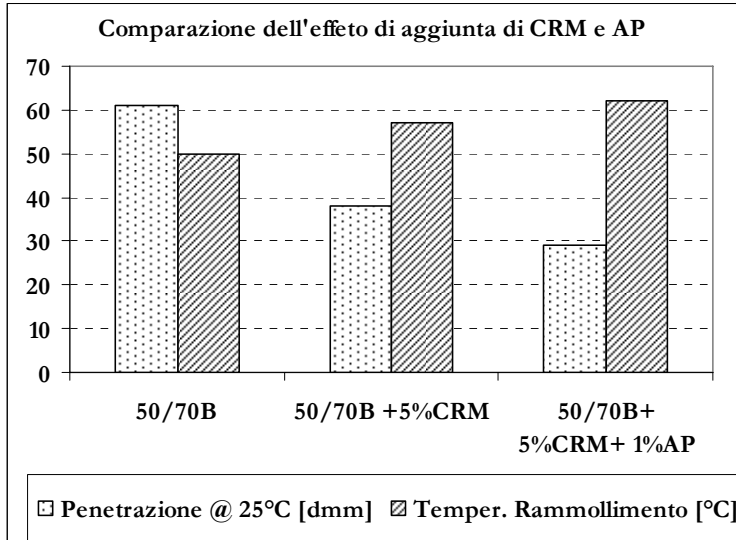


Figura 6-50: Effetto sulla penetrazione e sulla temperatura di rammollimento

In generale si può affermare che l'aumento di viscosità dovuto all'effetto della additivazione a base di acido polifosforico non risulta significativo, in quanto, dal confronto tra un Terminal Blend ed un legante AR standard, a parità di classe di penetrazione il primo risulta avere una viscosità inferiore (vedi Figura 6-52). Nonostante ciò, l'additivazione risulta aumentare, a parità di contenuto di polverino, il valore di viscosità (vedi Figura 6-51).

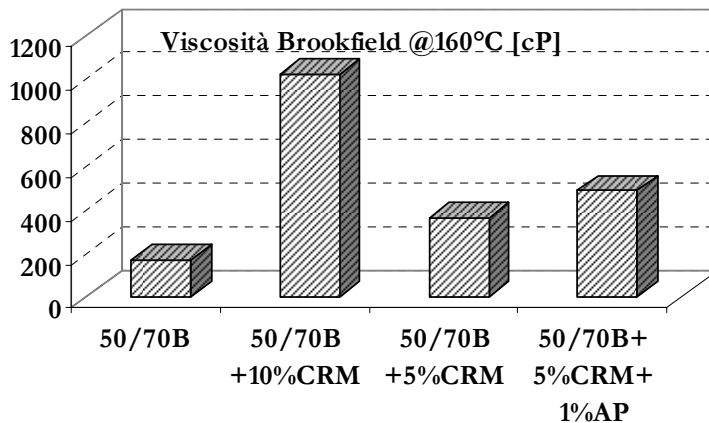


Figura 6-51: Effetto dell'additivazione sulla viscosità

Il grafico della Figura 6-52 indica un marcato aumento della temperatura di rammollimento all'aumentare sia della percentuale di poverino che di additivo, ma l'aumento di palla anello sembra essere più condizionato dalla % di gomma aggiunta.

La penetrazione diminuisce con l'aggiunta di acido polifosforico a parità di percentuale di polverino di gomma (Figura 6-53). In questa relazione si denota come l'aggiunta di 0.5% di AP comporti un abbassamento della penetrazione, ossia indurisce il bitume ancora di più. La viscosità segue l'andamento dell'aggiunta di CRM ma la penetrazione presenta accentuate variazioni irregolari mantenendo costante l'incremento di AP a 0.5% .

La resilienza aumenta significativamente quando si passa dall'1% all'1.5% di additivazione di AP, mantenendo la stessa % di polverino (Figura 6-54).

La relazione resilienza-temperatura di rammollimento è praticamente lineare direttamente proporzionale con l'aumentare della % di AP (Figura 6-55) e inversamente proporzionale per quanto riguarda la relazione resilienza-penetrazione (Figura 6-56).

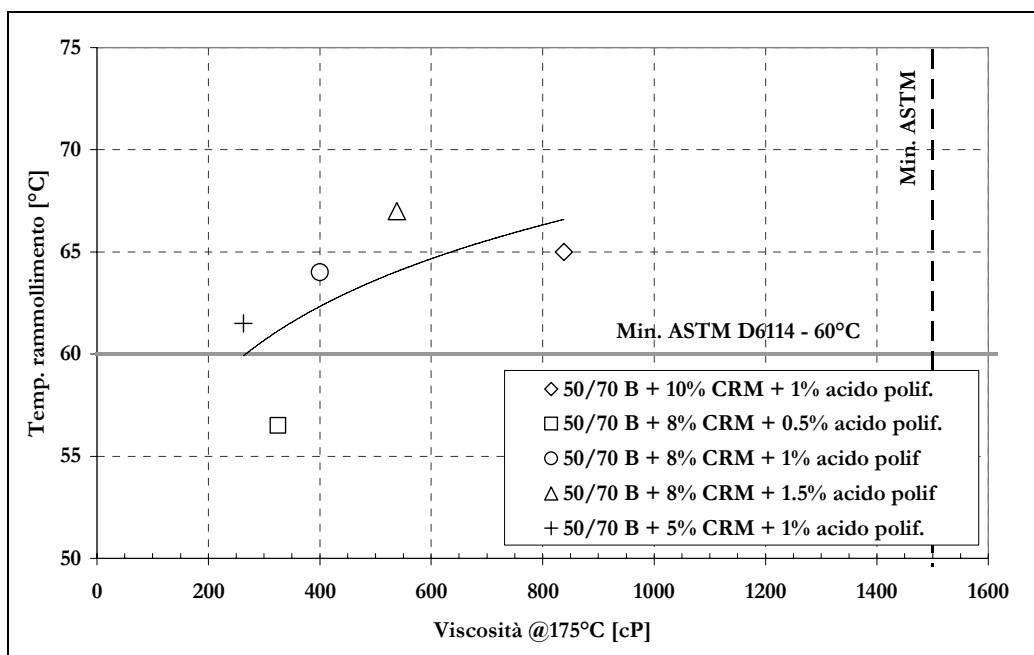


Figura 6-52: Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo

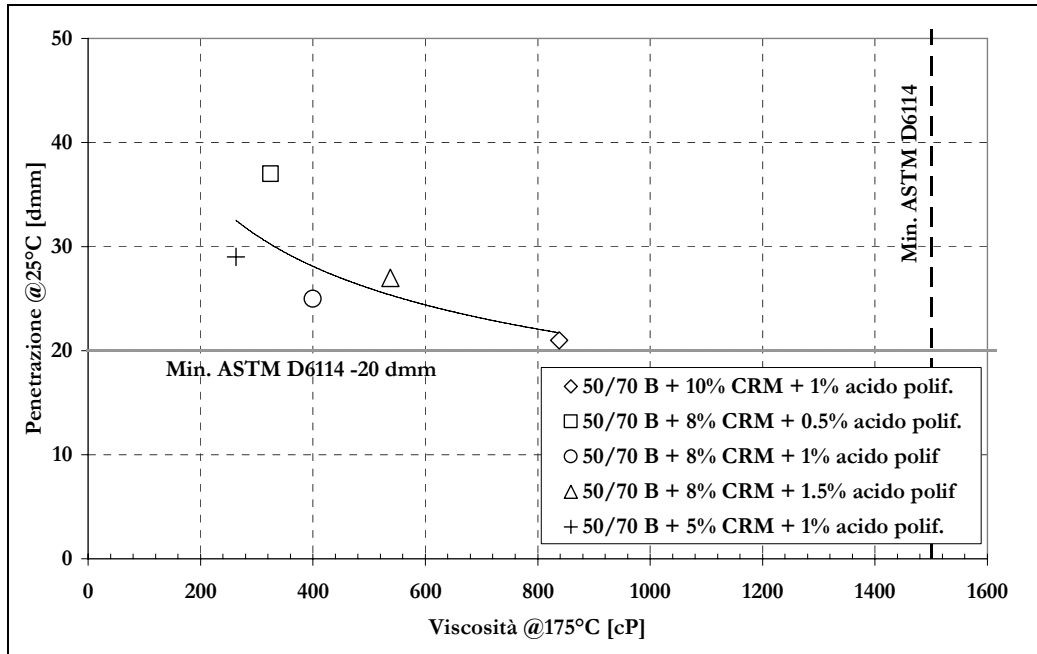


Figura 6-53: Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo

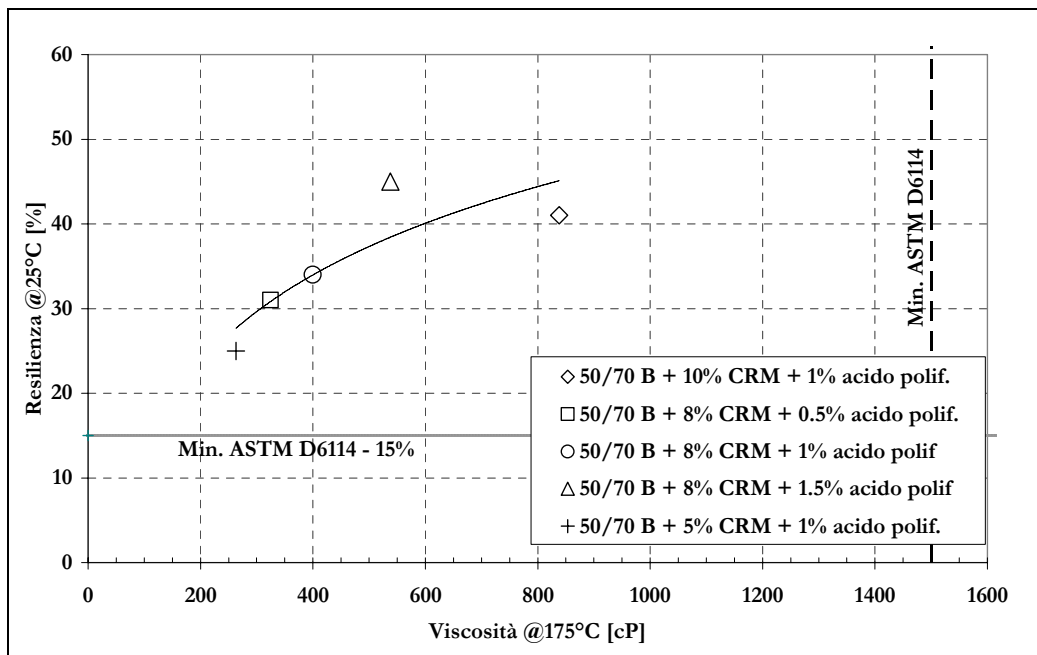


Figura 6-54: Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo

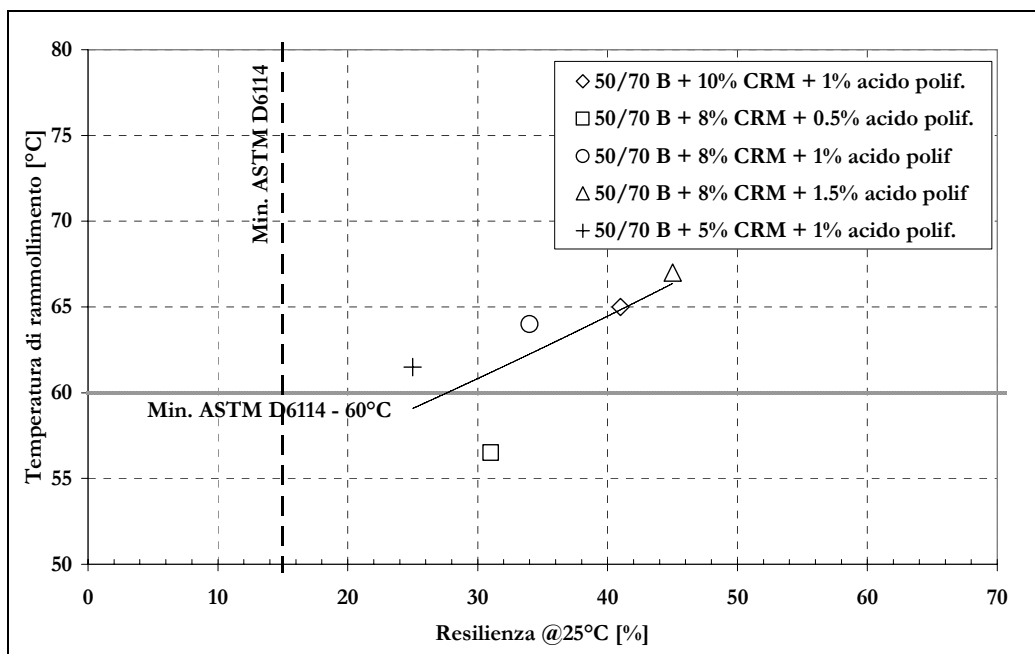


Figura 6-55: Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo

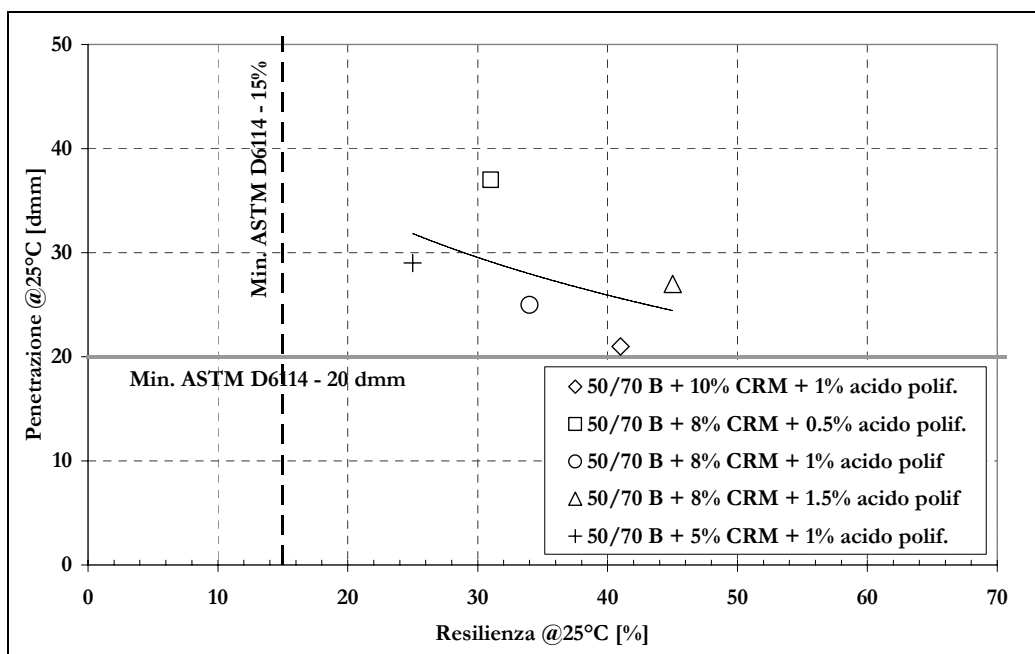


Figura 6-56: Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo

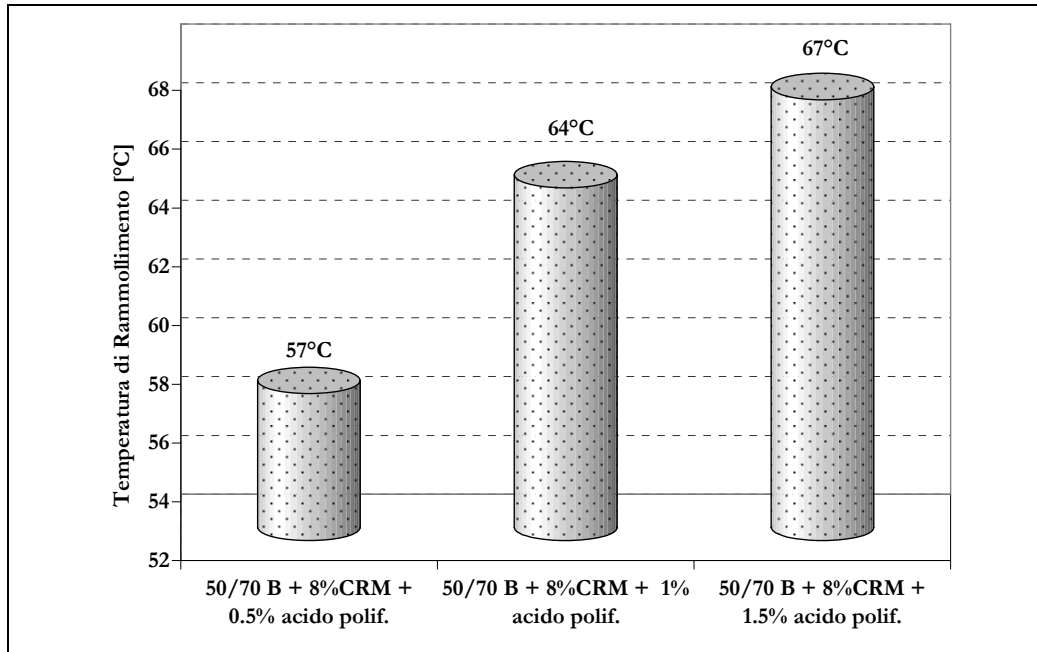


Figura 6-57: Variazione della temperatura di rammollimento con la % di AP

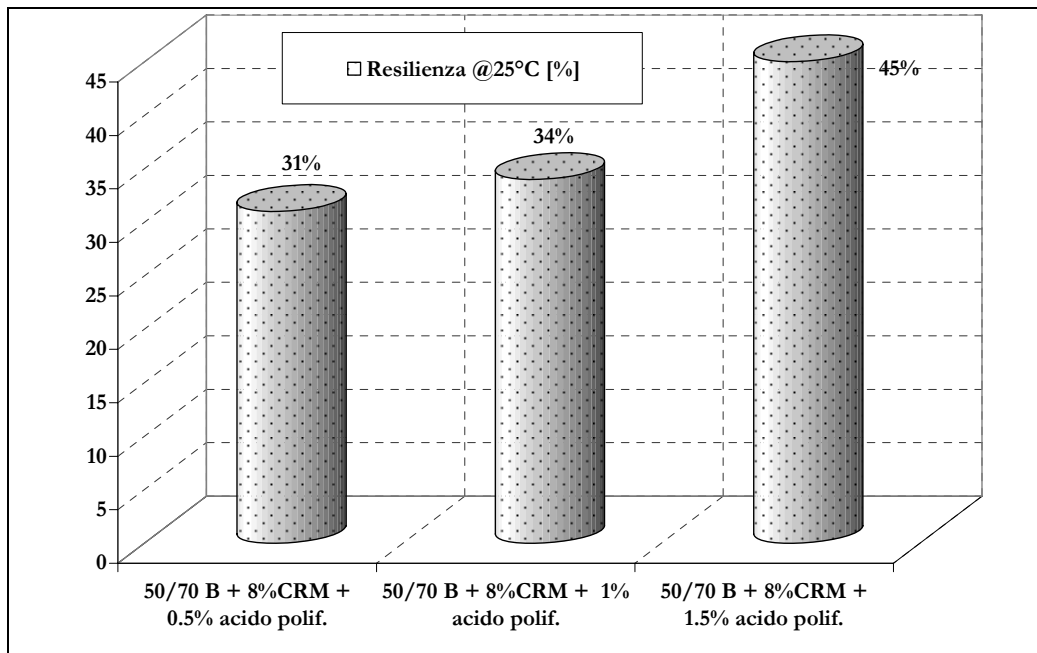
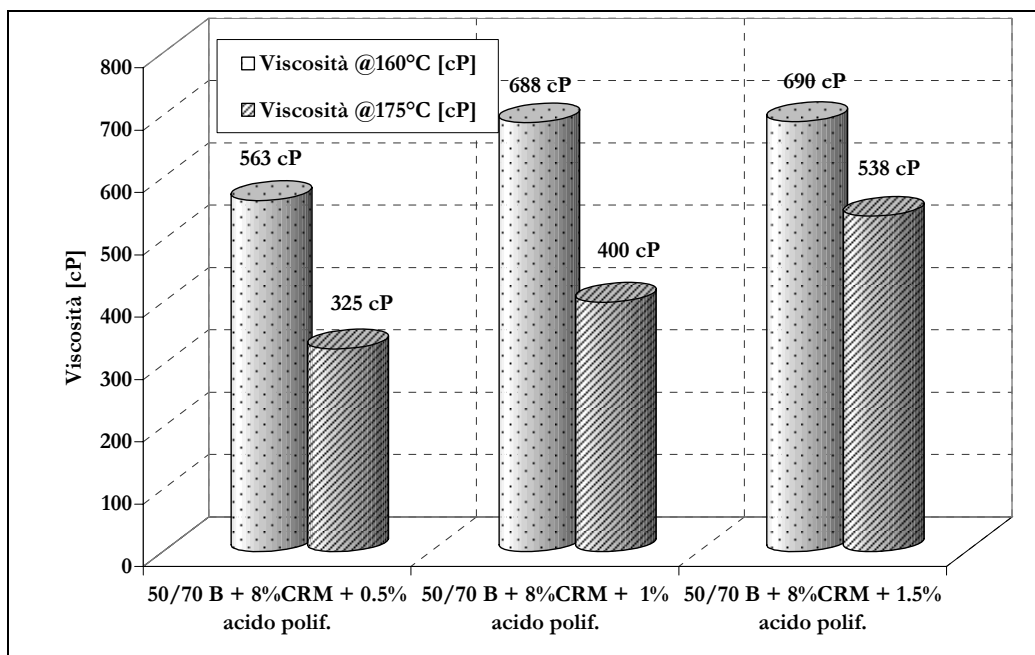


Figura 6-58: Influenza della % di additivo sulla resilienza



Mantenendo la stessa percentuale di polverino si verifica un aumento della temperatura di rammollimento, della resilienza e della viscosità all'aumentare della percentuale di AP (Figure da 6-57a 6-59).

L'effetto sulla penetrazione è inverso, ossia, mantenendo la stessa percentuale di polverino si verifica una diminuzione della penetrazione all'aumentare della percentuale di AP (Figura 6-59).



**Figura 6-59: Variazione della viscosità con la % di AP, stessa % di CRM**

Come ci sarebbe potuto aspettare, l'effetto del mantenimento costante della percentuale di additivo all'1% di acido polifosforico e la variazione della percentuale di polverino di gomma addizionata è simile a quello ottenuto aggiungendo soltanto più polverino di gomma ad un bitume base. I risultati ottenuti sono evidenziati nei grafici delle Figure da 6-60 a 6-64. Si osserva un aumento della resilienza, temperatura di rammollimento e viscosità con l'aumentare della % di CRM, mentre la penetrazione diminuisce.

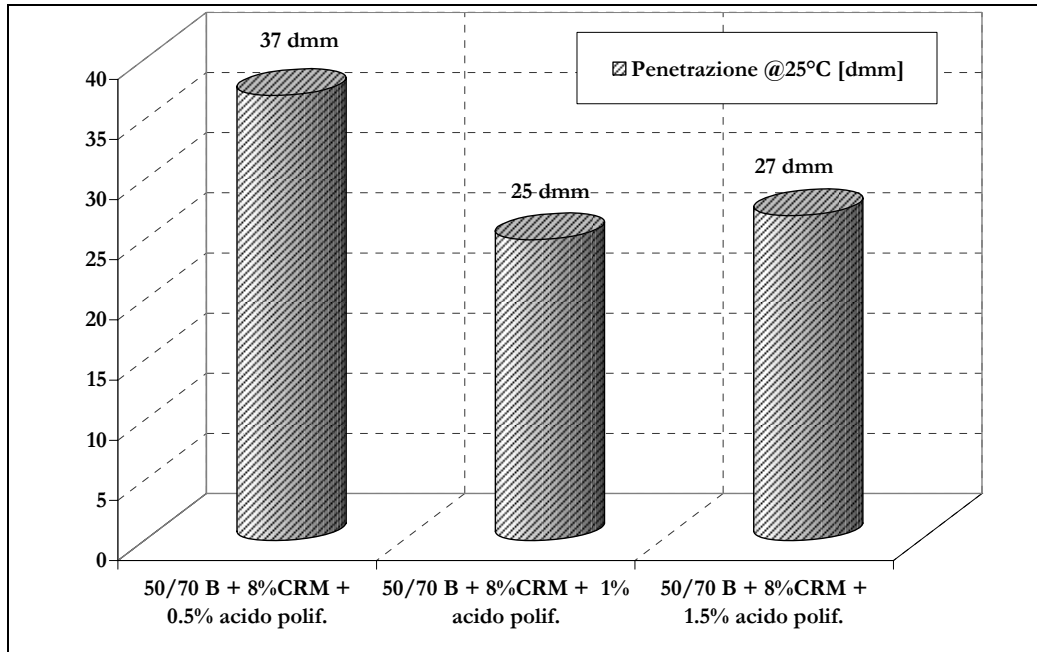


Figura 6-60: Variazione della penetrazione con la % di AP, stessa % di CRM

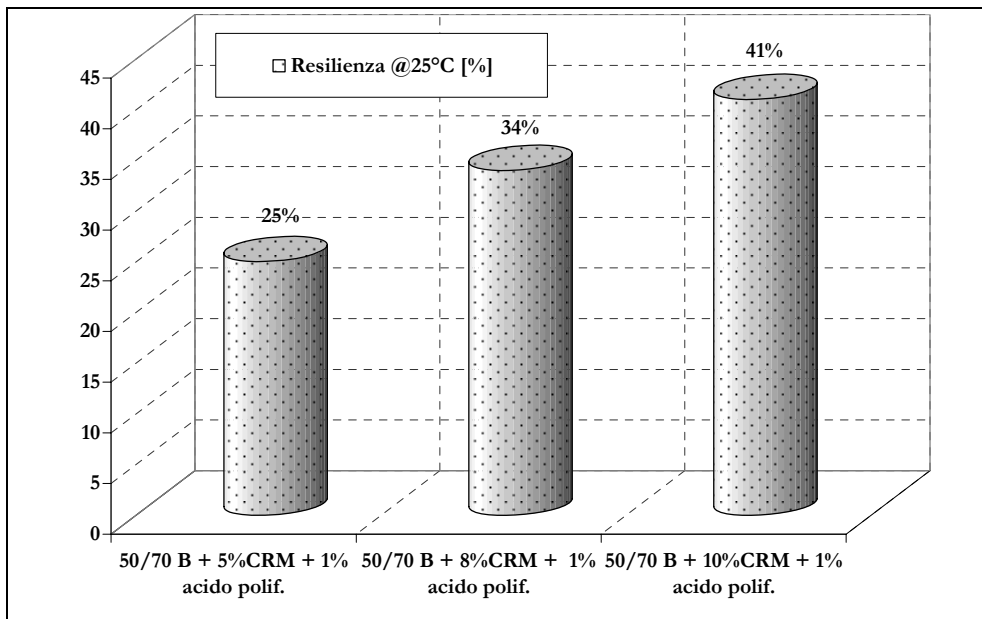


Figura 6-61: Variazione della resilienza con la % di CRM, per l'1% di AP

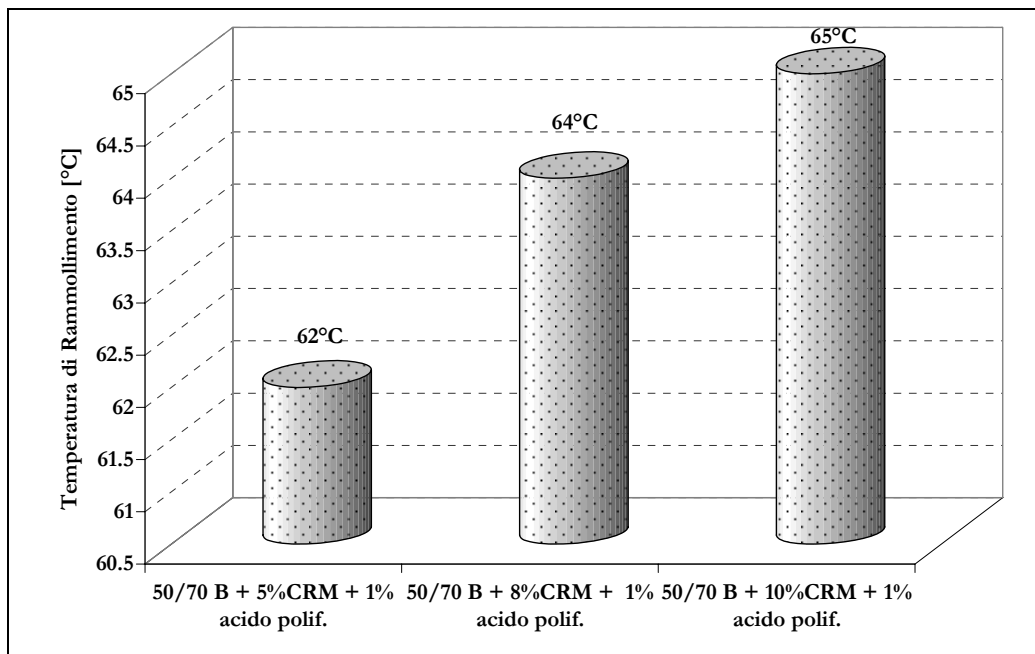


Figura 6-62: Variazione della temperatura di rammollimento con la % di CRM, per l'1% di AP

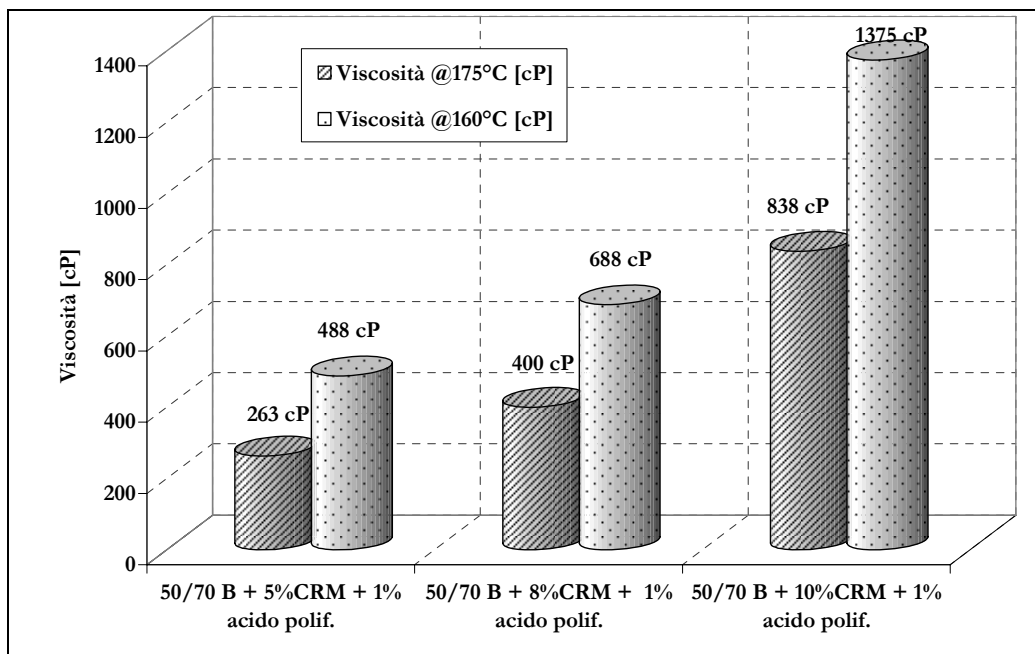
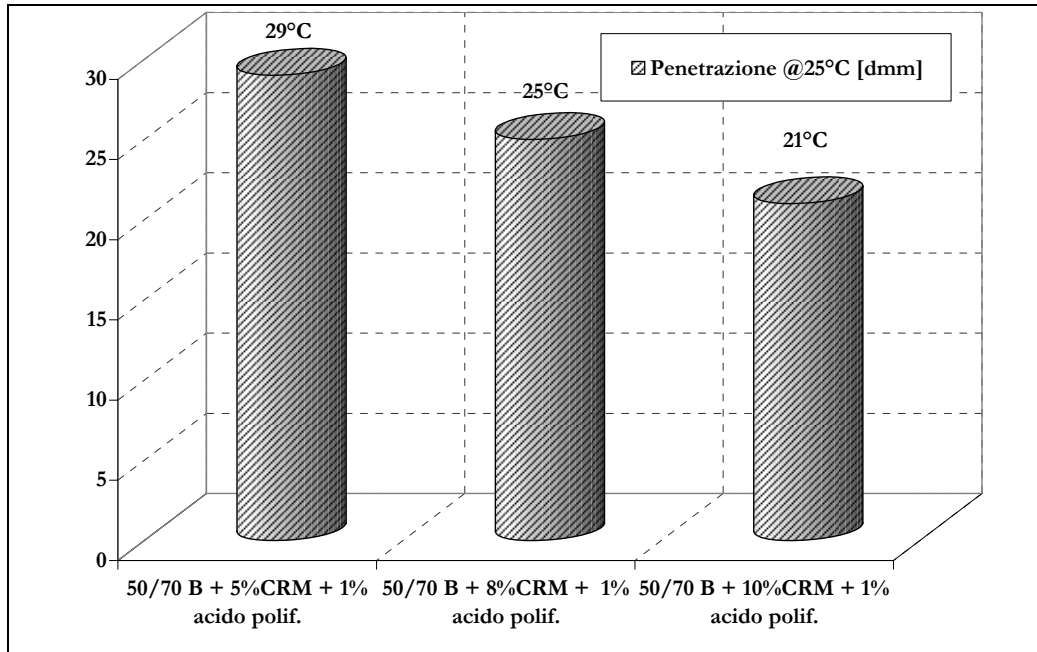


Figura 6-63: Variazione della viscosità con la % di CRM, stessa % di AP



**Figura 6-64: Variazione della penetrazione con la % di CRM, per l'1% di AP**

Confrontando i grafici rappresentati nelle Figure 6-65 e 6-66 si osserva che in termini di temperatura di rammollimento l'aggiunta di 0.5% di AP comporta lo stesso miglioramento dell'aggiunta del 2% di CRM al bitume tal quale, mentre per la resilienza questa percentuale sale al 4%.

Nonostante ciò, questo aumento di 2% di CRM comporta un aumento significativo della viscosità, circa 50% come si può osservare nella Figura 6-67.

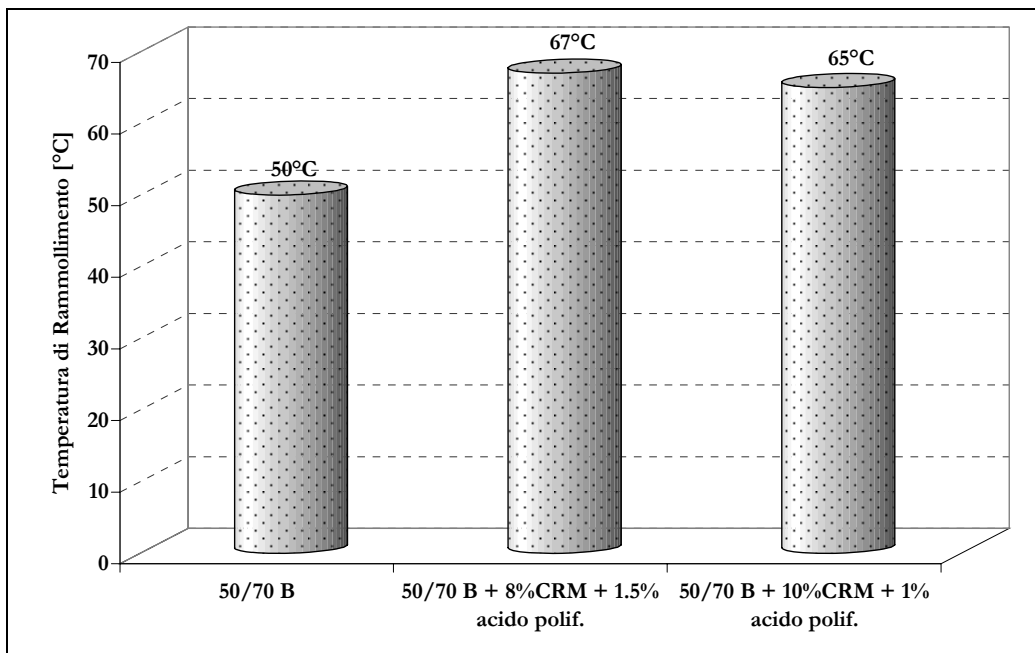


Figura 6-65: Confronto fra i valori di palla anello al variare della % di AP e di CRM

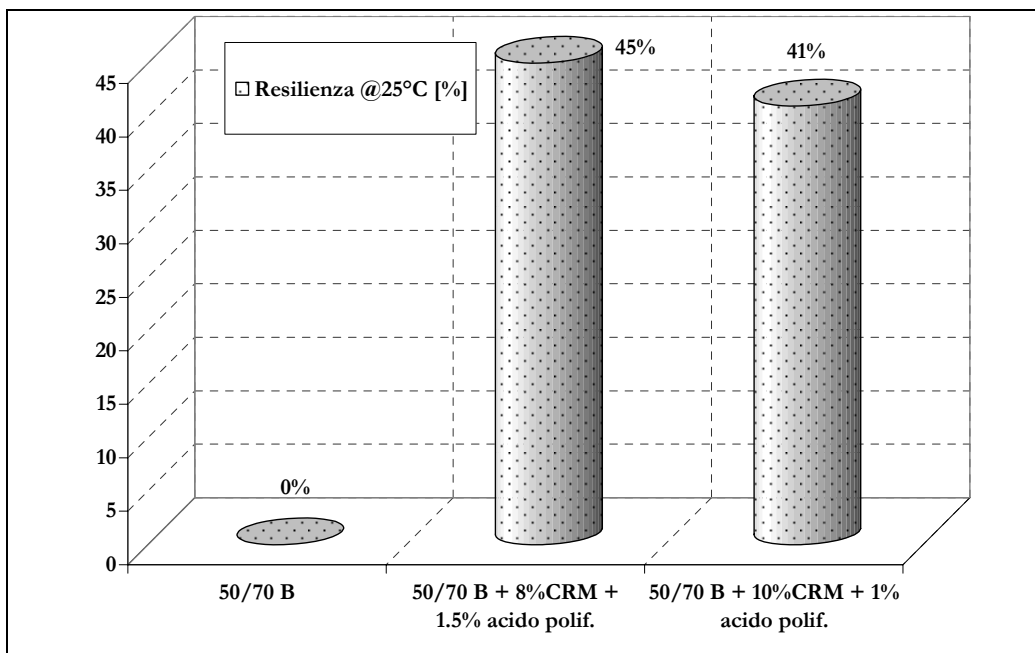
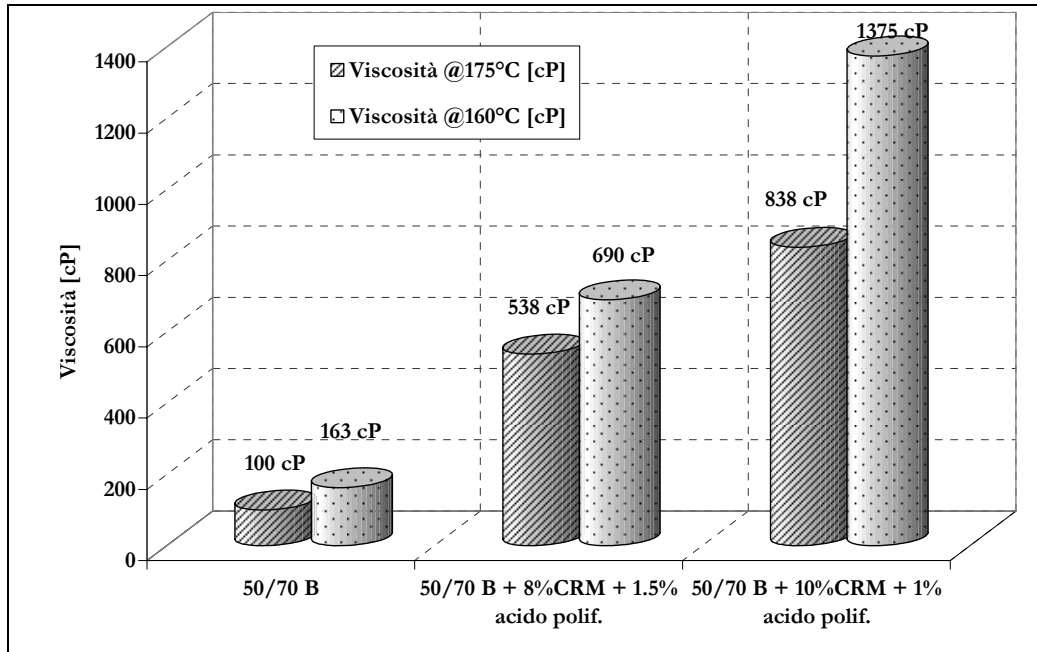


Figura 6-66: Confronto fra i valori di resilienza al variare della % di AP e di CRM



**Figura 6-67: Confronto fra i valori di viscosità al variare della % di AP e di CRM**

In laboratorio i risultati ottenuti mostrano come l'aggiunta di tali additivi abbia aumentato la viscosità di tutte le miscele, anche se meno rispetto ad una additivazione di CRM. Si è verificato un aumento della resilienza e del punto di rammollimento, che sarebbe comunque stato possibile ottenere semplicemente aumentando la percentuale di polverino di gomma, senza ricorso ad additivi. Come illustrato, l'aggiunta dello 0.5% di acido polifosforico fornisce lo stesso effetto, in termini in punto di rammollimento, dell'incremento della quantità di polverino pari al 2%, mentre relativamente alla resilienza questa percentuale è leggermente superiore (circa 4%).

Si è verificato che a parità di valori di resilienza e del punto di rammollimento, i citati incrementi delle percentuali di polverino comportano una viscosità doppia rispetto a quella ottenuta con l'additivazione con acido polifosforico. Tale aspetto va considerato come un vantaggio dei leganti Asphalt Rubber, dal momento che l'elevata viscosità di questi leganti è proprio la caratteristica che risulta conferire performance superiori ai conglomerati ottenuti, permettendo di incorporare elevate percentuali di legante, sino al 9-10%.

## 6.3.3.2 AGGIUNTA DI ACIDO POLIFISFORICO ALL' ASPHALT RUBBER

Si è provato ad aggiungere lo stesso additivo a base di acido polifosforico anche ad un bitume Asphalt Rubber, come evidenziato nella Tabella 6-24.

**Tabella 6-24: Aggiunta dell' 1% di Additivo a base di Acido Polifosforico**

Bitume	Penetraz. @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]
50/70 B + 20%CRM	22	71	4175	2613	56
50/70 B + 20%CRM + 1% acido polif.	19	79	5250	3050	65
50/70 B + 10%CRM + 1% acido polif.	21	65	1375	838	41
50/70 B + 8%CRM + 1% acido polif.	25	64	688	400	34
50/70 B + 5%CRM + 1% acido polif.	29	62	488	263	25

Si osserva dalla Figura 6-68 come l'aggiunta di AP al legante Asphalt Rubber vada ad aumentare ulteriormente la viscosità e ad abbassare la penetrazione al di sotto del limite della normativa (Figura 6-69).

Un vantaggio che si è verificato consiste nell'aumento della resilienza e della temperatura di rammollimento (Figura 6-70), ma considerando già i risultati notevoli del miglioramento di queste caratteristiche con l'aggiunta soltanto di CRM si ritiene, in questo caso, poco vantaggioso aggiungere ulteriormente l'additivo, diminuendo la lavorabilità della miscela (alta viscosità e bassa penetrazione).

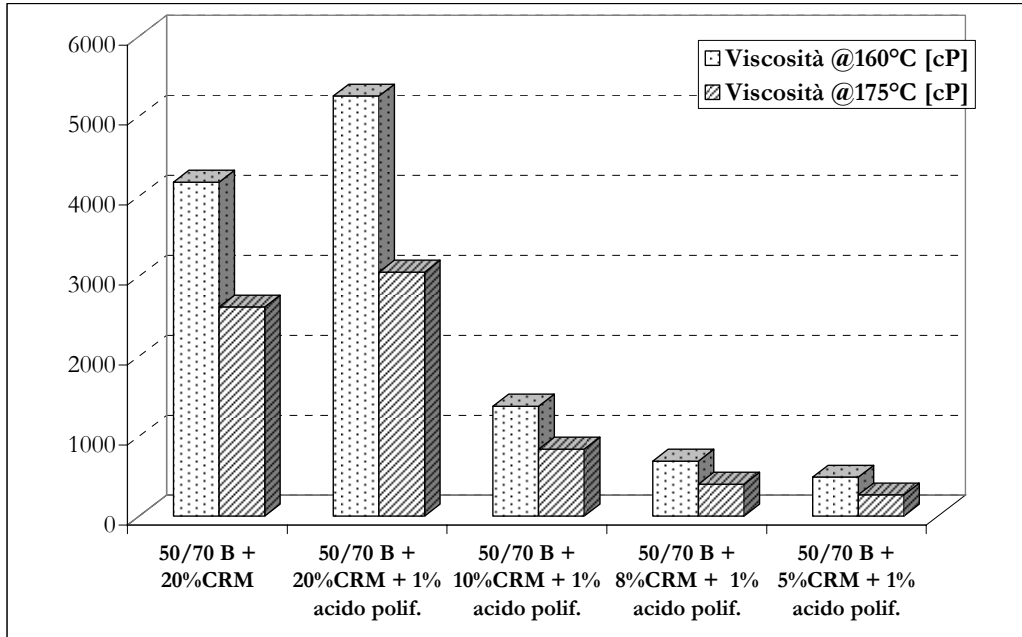


Figura 6-68: Viscosità a confronto per diverse percentuali di CRM e AP

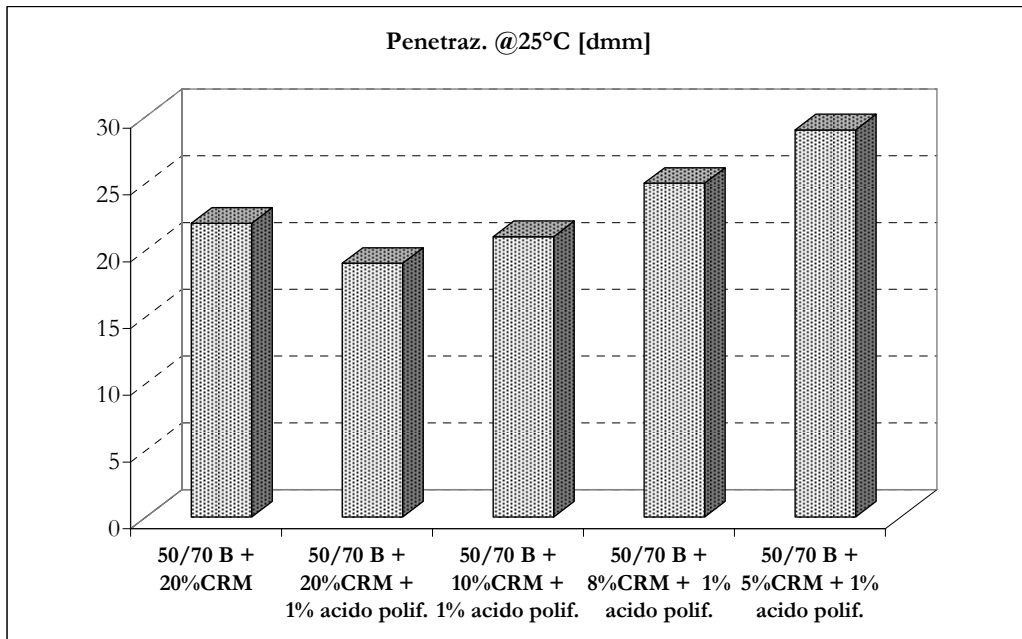


Figura 6-69: Penetrazione a confronto per diverse percentuali di CRM e AP



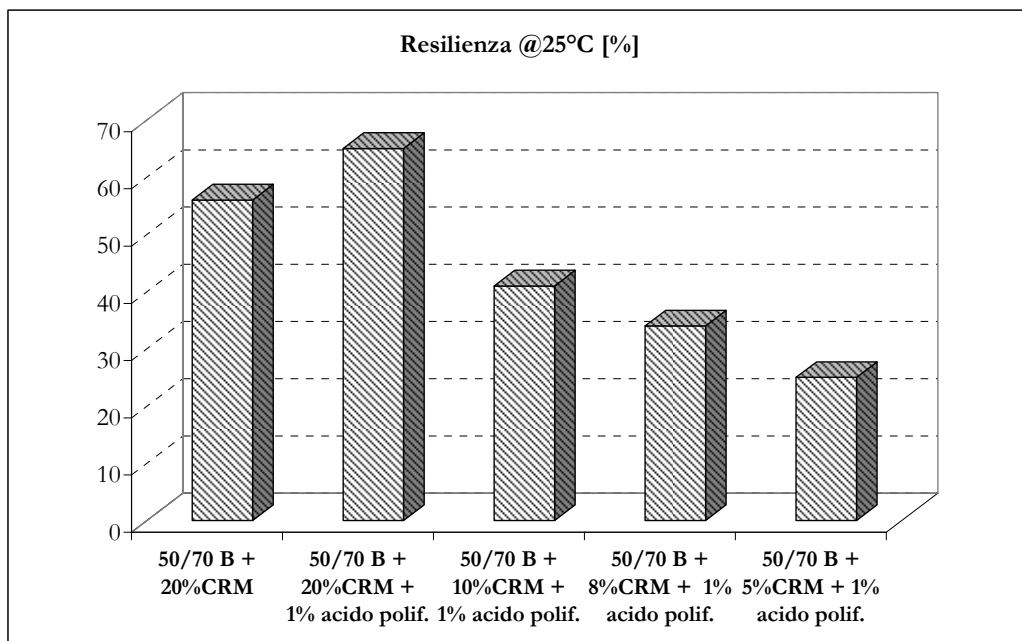


Figura 6-70: Resilienza a confronto per diverse percentuali di CRM e AP

### 6.3.3.3 MISCELE SBS E ACIDO POLIFISFORICO

La stessa additivazione a base di acido polifosforico è stata utilizzata anche per leganti modificati con SBS, per i quali l'aggiunta di additivo comporta un aumento dei valori di palla anello e viscosità e ne diminuisce la penetrazione.

In primo luogo si è andato a studiare l'effetto del processo di produzione nelle proprietà delle miscele, considerando periodi di "reazione", fino a 20 ore, sotto agitazione o statico.

Di seguito si presentano gli effetti dell'agitazione nel processo di produzione di una miscela SBS + AP sulle diverse grandezze proprietà della stessa (Tabella 6-25).

**Tabella 6-25: Effetto dell'agitazione dei leganti sulle grandezze principali di miscele SBS e AP**

Bitume	Grandezza	Tempo [ore]						
		Sotto agitazione				Statico		
		0	3	6	20	3	6	20
70/100 A + 3% SBS + 0.5% acido polif.	Temperatura di rammollimento [°C]	85	78	86	83	94	82	60
	Penetrazione @25°C [dmm]	53	45	46	44	49	46	49
	Viscosità @160°C [cP]	430	380	370	460	350	340	400
	Tuben Test (72h a 180°C) [°C]	105- 52	114- 54	109- 55	70-68	103- 55	101- 55	73- 65
70/100 A + 3% SBS + 1% acido polif.	Temperatura di rammollimento [°C]	91	94	97	103	ND	ND	ND
	Penetrazione @25°C [dmm]	35	41	37	36	ND	ND	ND
	Viscosità @160°C [cP]	1140	916	932	1680	ND	ND	ND
	Tuben Test (72h a 180°C) [°C]	108- 75	102- 78	101- 83	103- 100	ND	ND	ND

Per la miscela 70/100 A + 3% di SBS + 0.5% di AP, si osserva come il processo di produzione in laboratorio condizioni significativamente i risultati, particolarmente per quanto riguarda la stabilità allo stoccaggio, misurata tramite il metodo di prova Tuben Test.

In agitazione la viscosità (Figura 6-71) aumenta durante il periodo di rigonfiamento del polimero SBS (30 minuti) dopo di che, bitume e polimero diventano un fluido omogeneo e si riduce il valore della viscosità (diminuisce con l'omogeneizzazione del fluido), trovando dopo 20 ore di agitazione il suo valore stabile.

Con il processo chiamato "statico" la viscosità aumenta sin dall'inizio ma non raggiunge mai il valore del processo di agitazione, indicando che la reazione fra polimero e bitume non è avvenuta completamente.

Lo stesso ragionamento può essere seguito per i risultati evidenziati nelle Figure da 6-72 a 6-74, dove si evidenziano differenze significative fra i due metodi di produzione. Tenendo presente queste conclusioni, la miscela 70/100 A + 3% SBS + 1% acido polifosforico è stata prodotta mantenendo la miscela sotto agitazione per un periodo di 20 ore. Ovviamente in fabbrica questi tempi non sarebbero possibili ma gli impianti di modifica di bitume sono equipaggiati con mulini con elevata capacità di taglio, portando subito ad una omogeneizzazione che non è raggiungibile a 800 rpm.

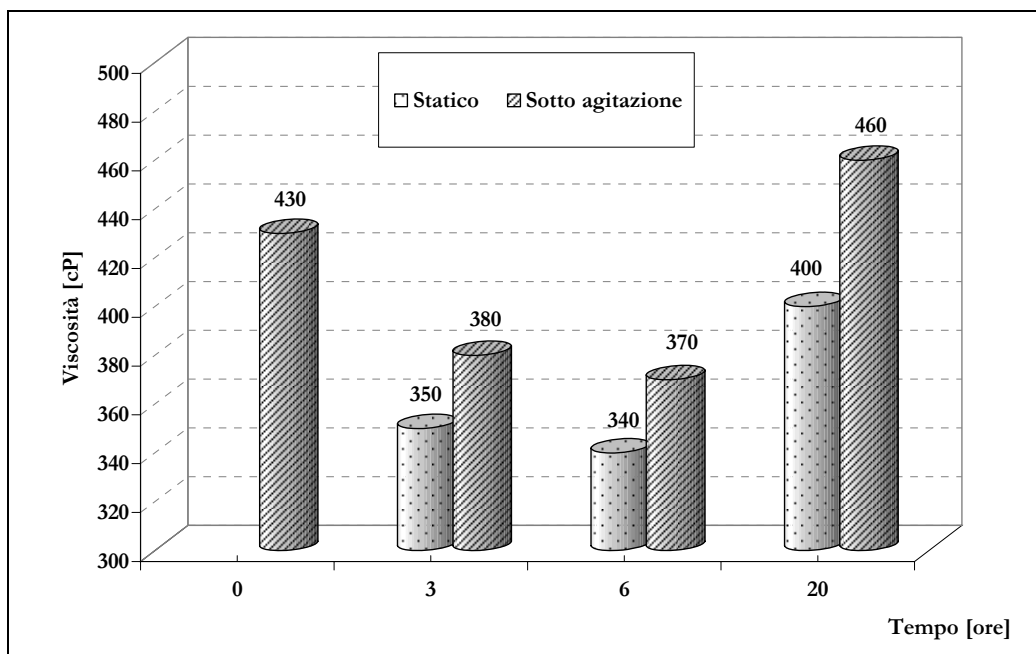


Figura 6-71: Andamento nel tempo della viscosità a 160°C per il bitume 70/100 A + 3% di SBS + 0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione

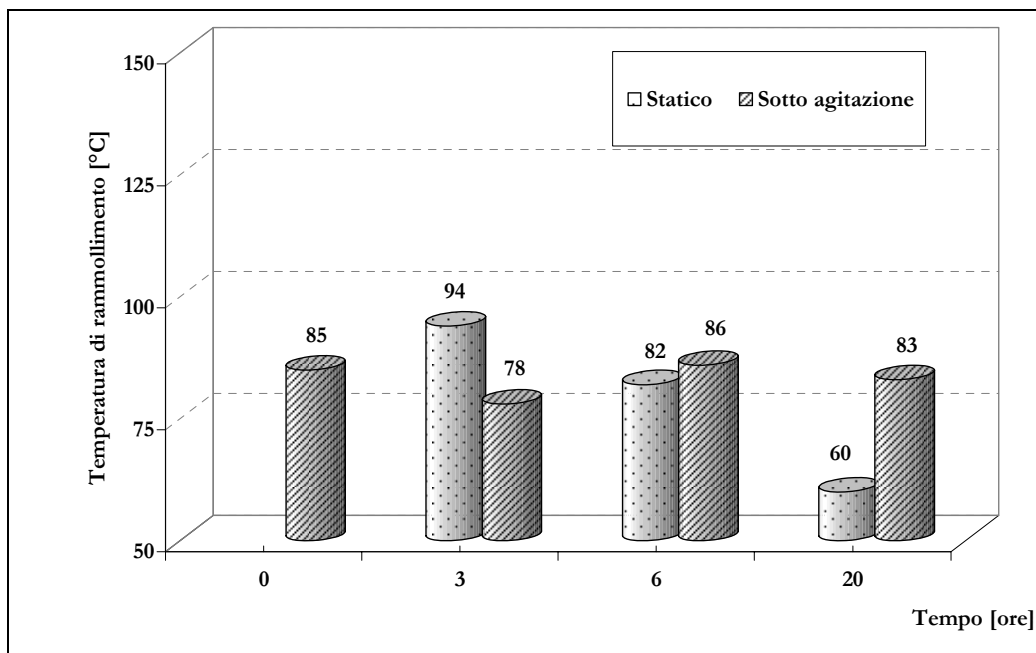


Figura 6-72: Andamento nel tempo della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A + 3% di SBS + 0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione

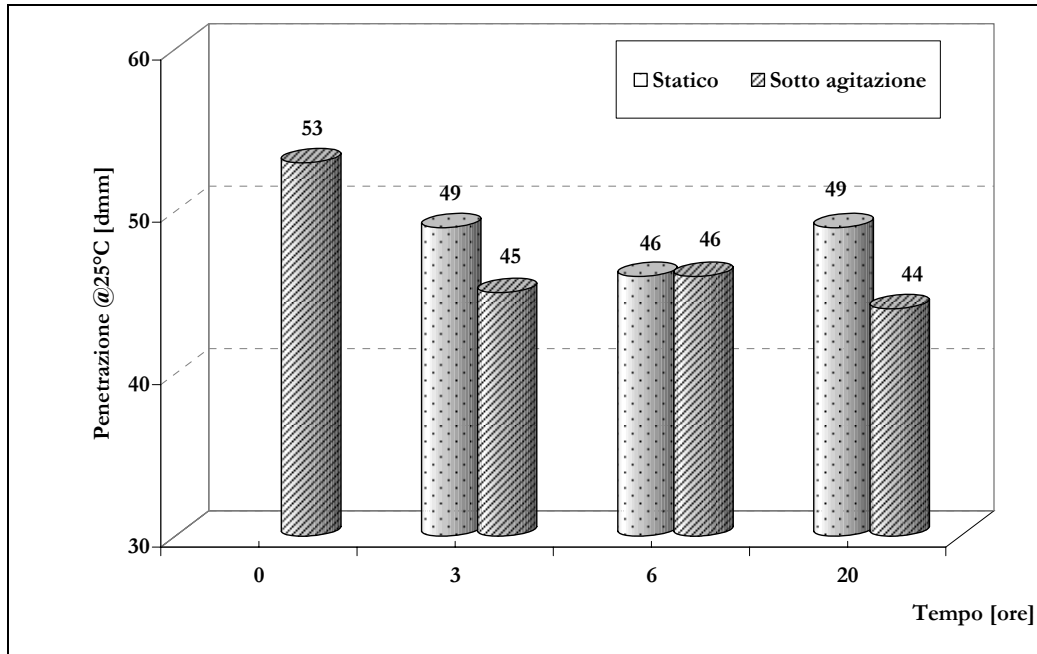


Figura 6-73: Andamento nel tempo della penetrazione per il bitume 70/100 A + 3% di SBS + 0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione

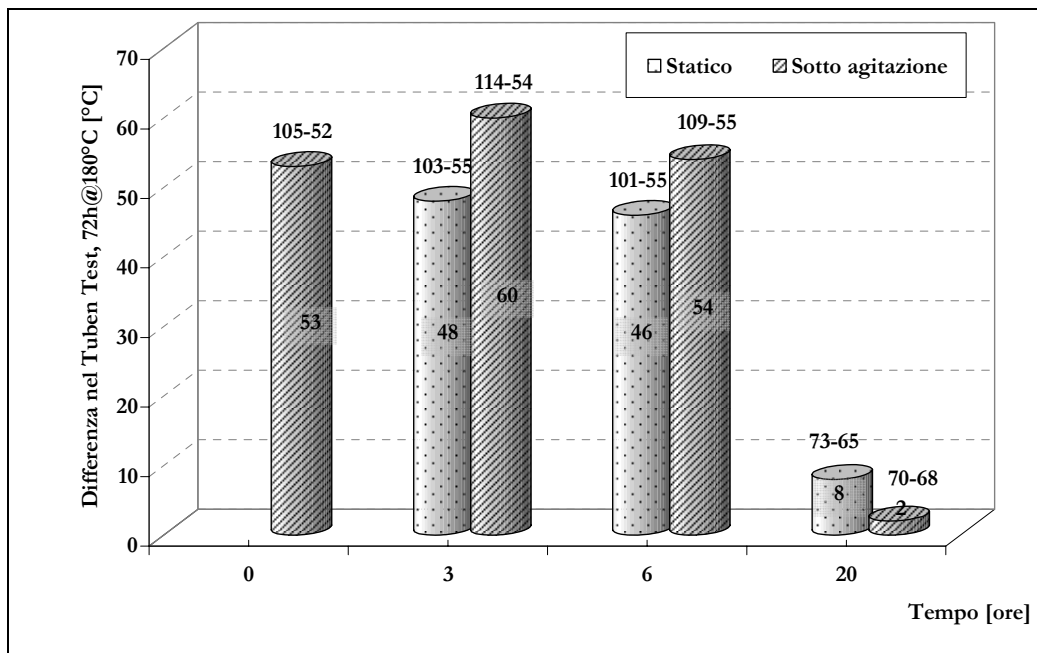


Figura 6-74: Andamento nel tempo della differenza di Tuben Test per il bitume 70/100 A + 3% di SBS + 0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione

Nelle figure da 6-75 a 6-77 si evidenzia come i risultati della additivazione dei bitumi modificati con SBS siano gli stessi osservati per la miscela con CRM e AP. Si nota come l'aumento del contenuto di AP comporti un marcato aumento della temperatura di rammollimento ed un aumento della viscosità a parità di temperatura.

In particolare si verifica un forte incremento della penetrazione a 25 °C con un aumento dello 0.5% di acido polifosforico.

Nella Figura 6-76 si evidenzia come la miscela diventi omogenea solo dopo le 20 ore. Infatti, per entrambi i materiali il Tuben Test mostra dei valori molto diversi per le due estremità fino alle 20 ore.

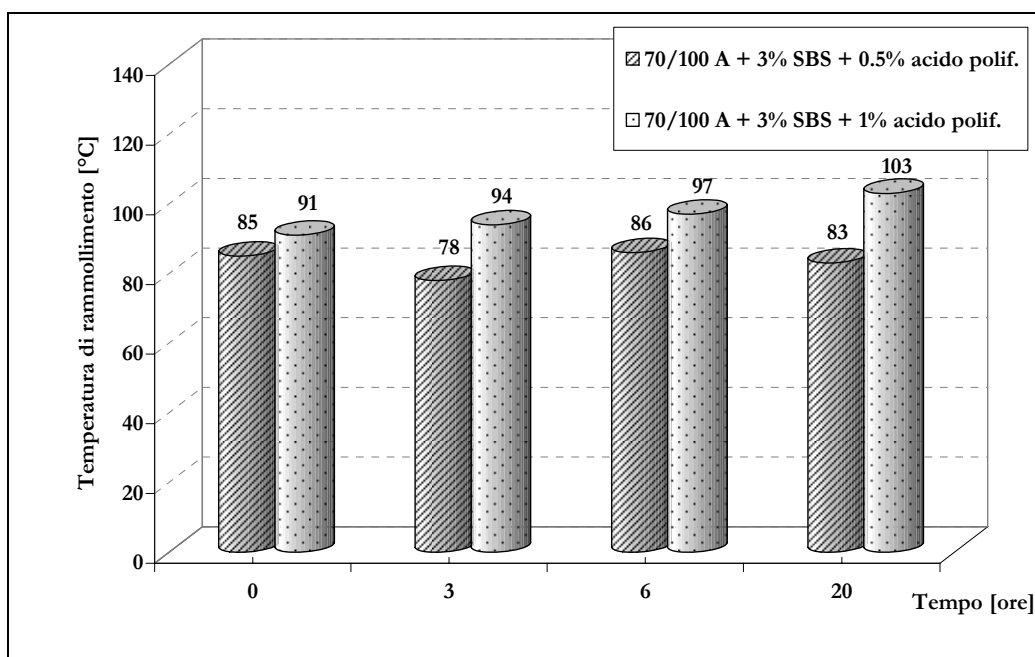


Figura 6-75: Confronto tra l'andamento sotto agitazione della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo

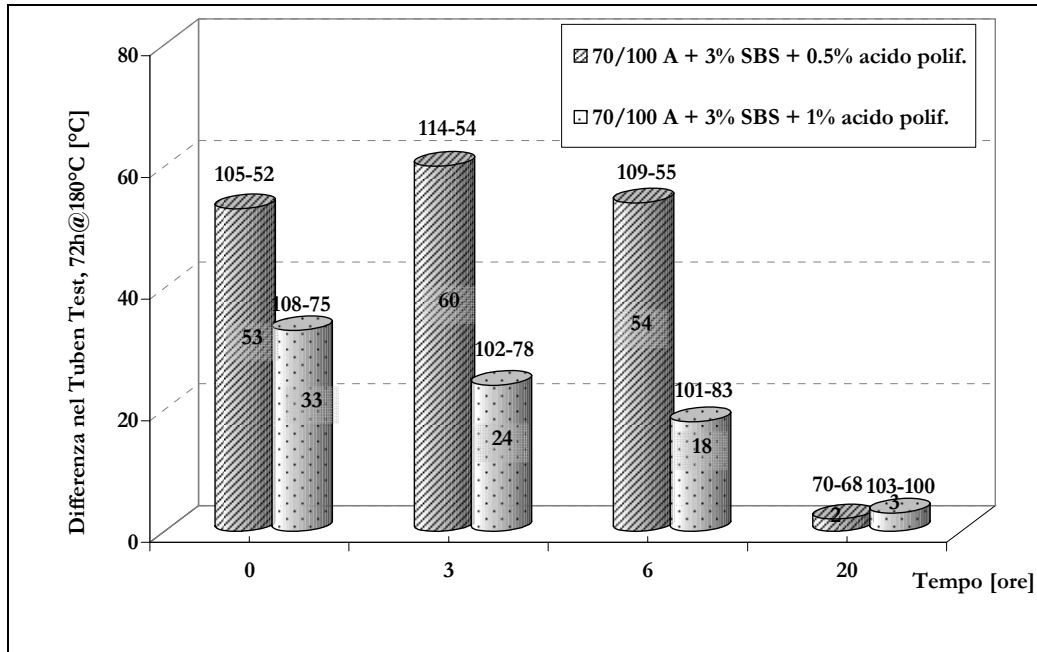


Figura 6-76: Confronto tra l'andamento sotto agitazione della differenza di Tuben Test per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo

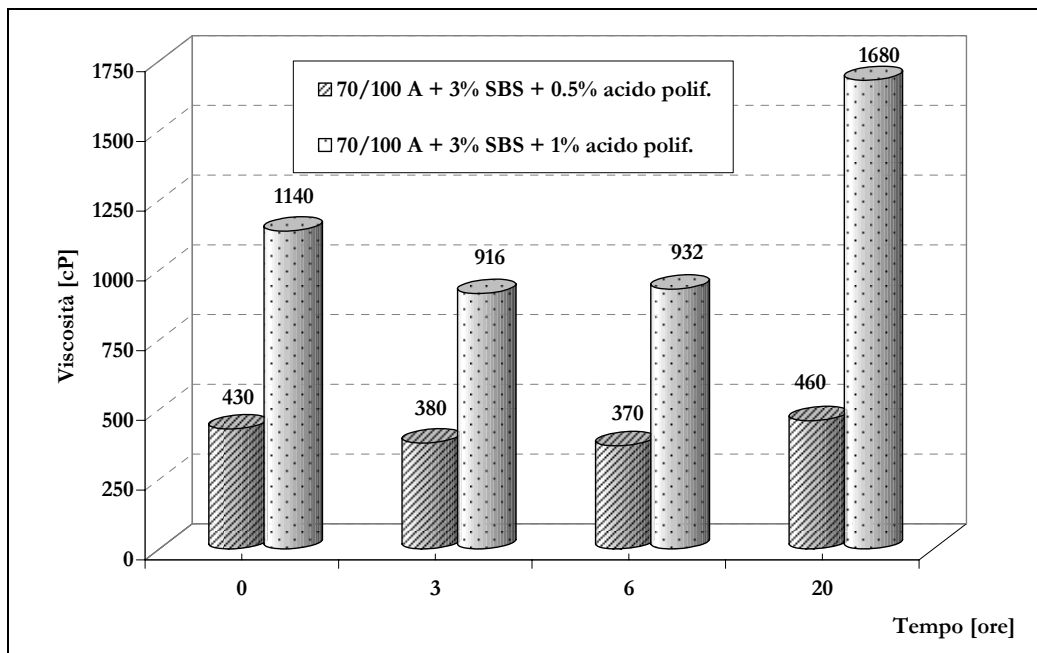
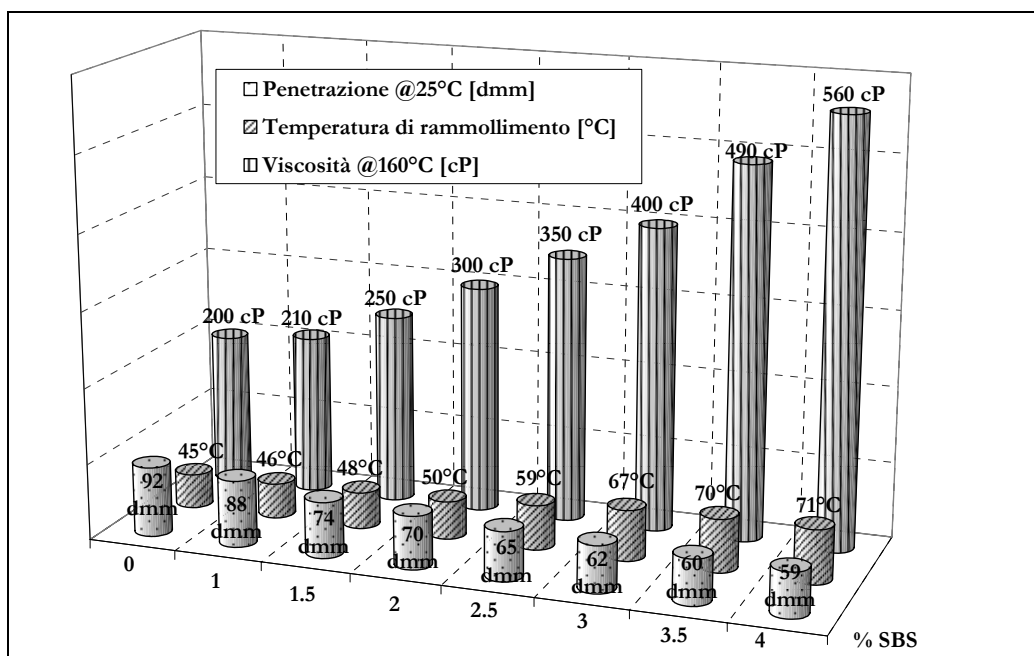


Figura 6-77: Confronto tra l'andamento sotto agitazione della viscosità per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo

Confrontando invece l'effetto della percentuale di SBS (Tabella 6-26) si capisce quale sia la quota di miglioramento dovuta alla aggiunta del polimero e quale sia dovuta all'acido polifosforico.

**Tabella 6-26: Effetto dell'addizione di diverse percentuali di SBS al bitume 70/100 A**

70/100 A + %SBS lineare	Penetrazione @25°C [dmm]	Temperatura di rammollimento [°C]	Viscosità @160°C [cP]
0.0	92	45	200
1.0	88	46	210
2.0	70	50	300
<b>3.0</b>	<b>62</b>	<b>67</b>	<b>400</b>
4.0	59	71	560



**Figura 6-78: Andamento dei valori di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS**

Confrontando i dati della tabella 6-25 con la riga evidenziata nella Tabella 6-26 si verifica che il bitume 70/100 A modificato con il 3% di SBS ha una penetrazione a 25°C di 62 dmm, che diminuisce a 44 dmm con l'aggiunta di 0.5% di AP e a 36 dmm con l'1% di AP, mostrando il significativo effetto dell'additivazione sulla penetrazione.

Per quanto riguarda la palla anello il bitume 70/100 A + 3% di SBS presenta un valore di 67°C, che sale a 83°C e 103°C con l'additivazione, rispettivamente, con 0.5 e 1% di AP, evidenziando un accentuato vantaggio nell'utilizzo di AP.

Curiosa è la risposta della viscosità, che aumenta soltanto di 60 cP a 160°C con l'aggiunta di 0.5% di AP, mentre con l'1% questo valore diventa 1680 cP.

Questi dati sono correlabili con quelli rappresentati nella Figura 6-78. Infatti per riuscire ad ottenere le caratteristiche raggiunte con l'additivazione con acido polifosforico, è necessario aumentare parecchio la percentuale di SBS. Per avere un abbassamento della penetrazione corrispondente all'aggiunta dello 0.5% di AP, sarebbe necessario utilizzare una % di SBS superiore al 4%. Per un aumento della temperatura di rammollimento a 83°C questa percentuale dovrebbe salire quasi al 10%.

Di seguito, mantenendo la stessa percentuale di additivo (0.5%) si è scelto di variare la % di SBS, come illustrato nella Tabella 6-27.

**Tabella 6-27: Effetto della percentuale di SBS sulle caratteristiche delle miscele**

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temperatura di rammollimento [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Tuben Test [°C]
160/220 + 5% SBS + 0.5% acido polifosforico	49	88	1200	78-88
160/220 + 4% SBS + 0.5% acido polifosforico	62	78	560	76-77



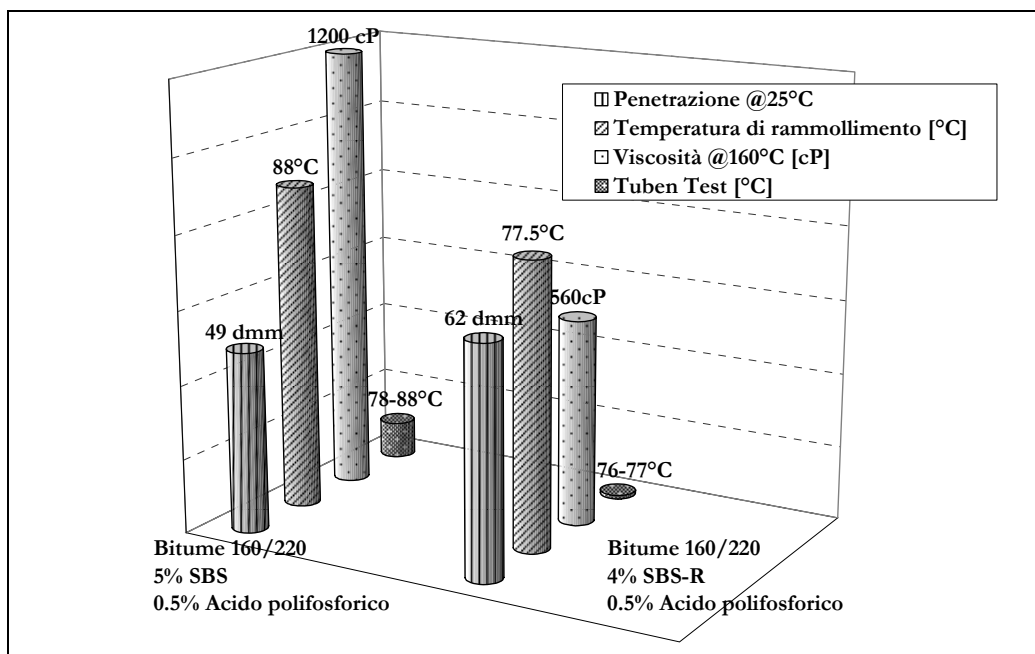


Figura 6-79: Effetto della percentuale di SBS sulle caratteristiche delle miscele

L'aggiunta dell'1% di SBS in più ha condotto ad una diminuzione significativa della penetrazione e ad un forte aumento della viscosità (raddoppiata) e del punto di rammollimento (10°C). Si è verificato uno svantaggio soltanto per la prova di Tuben test che non ha condotto a risultati accettabili (differenza fra le temperature di rammollimento delle due estremità inferiore a 2°C) per il 5% di SBS.

Un altro aspetto considerato è la base utilizzata. Utilizzando lo stesso processo di produzione, si è modificato un bitume 70/100 e un 160/220 con le stesse percentuali di SBS (4,5%) e di additivo a base di acido polifosforico (0.5%). I dati ottenuti sono rappresentati nella Tabella 6-28.

Tabella 6-28: Effetto della Base utilizzata sulle caratteristiche delle miscele

Bitume	Penetrazione @25°C [dmm]	Temperatura di rammollimento [°C]	Viscosità @160°C [cP]	Tuben Test [°C]
70/100 A + 4.5% SBS + 0.5% Acido polifosforico	43	78	860	63-83
160/220 + 4,5% SBS + 0.5% Acido polifosforico	49	88	1200	78-88

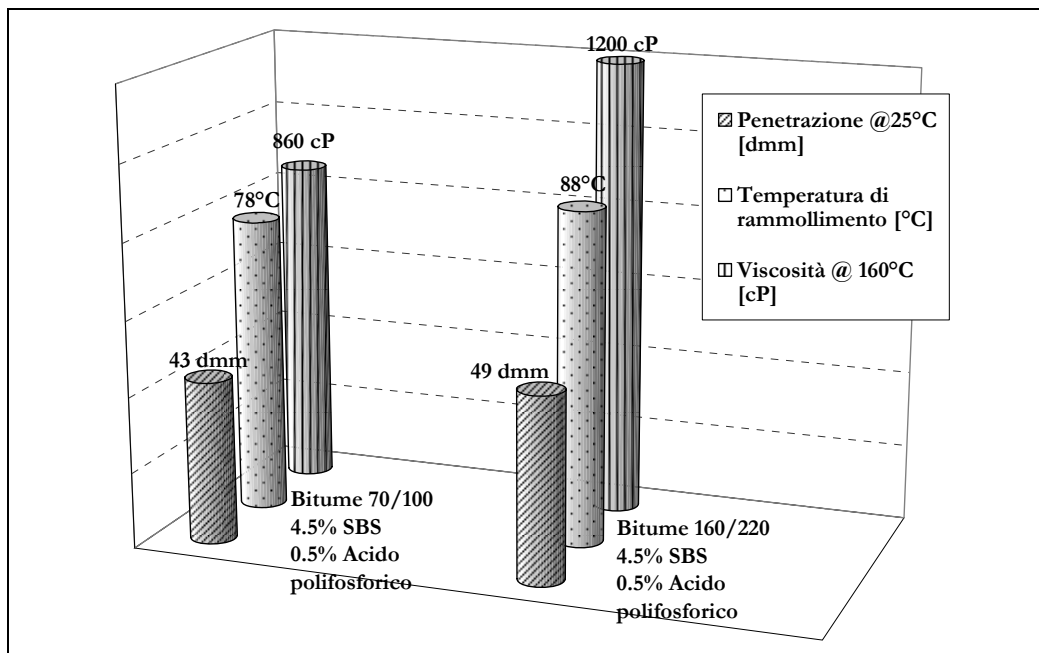


Figura 6-80: Effetto del bitume base utilizzato sulle caratteristiche delle miscele

Il bitume 70/100, che in origine aveva una temperatura di rammollimento di 47°C, ha avuto un aumento di 31°C, mentre per il bitume 160/220 il punto di rammollimento è passato da 49°C a 88°C. Per quanto riguarda la viscosità, l'aumento per il bitume 160/220 è stato dell'ordine di dieci volte, mentre la penetrazione si è abbassata da 168°C a 49°C. Si conclude, quindi, che la base più soft è più sensibile alla modifica SBS+AP.

## 6.3.3.4 MISCELE SBS E EVA

In seguito si è deciso di valutare l'aggiunta di una piccola percentuale di EVA a bitumi modificati con SBS. L'aggiunta di EVA al SBS di solito ha lo scopo di contrastare il fenomeno di decadimento del punto di rammollimento.

Si denota un abbassamento, anche se non molto significativo, dei valori di penetrazione (vedi Tabella 6-29 e Figura 6-81), mentre la temperatura di rammollimento (vedi Tabella 6-30 e Figura 6-82) aumenta notevolmente. L'effetto diventa più significativo con l'aumentare del grado di modifica del bitume: ad esempio per il 2% di SBS l'aumento è soltanto di 4°C, mentre per il 4% di SBS la temperatura di rammollimento sale da 71°C a 82°C, quindi siamo ai livelli di una additivazione con AP.

La viscosità aumenta leggermente come si può vedere nella Tabella 6-31 e nella Figura 6-83. Questo incremento di viscosità è molto inferiore rispetto a quello verificato con l'additivazione con acido polifosforico.

**Tabella 6-29: Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla penetrazione**

70/100 +%SBS	Penetrazione @25°C [dmm]	
	0% EVA	1% EVA
2	70	66
3	62	59
4	59	52

**Tabella 6-30: Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla temperatura di rammollimento**

70/100 +%SBS	Temperatura di rammollimento [°C]	
	0% EVA	1% EVA
2	50	54
3	67	75
4	71	82

**Tabella 6-31: Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla viscosità**

70/100 +%SBS	Viscosità @160°C [cP]	
	0% EVA	1% EVA
2	300	250
3	400	480
4	560	700

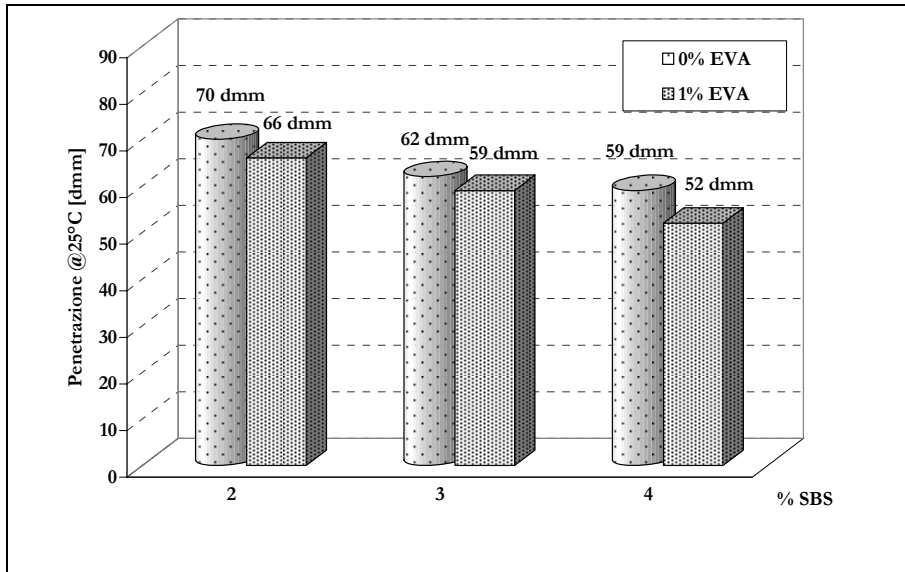


Figura 6-81: Andamento della penetrazione per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di 1% di EVA

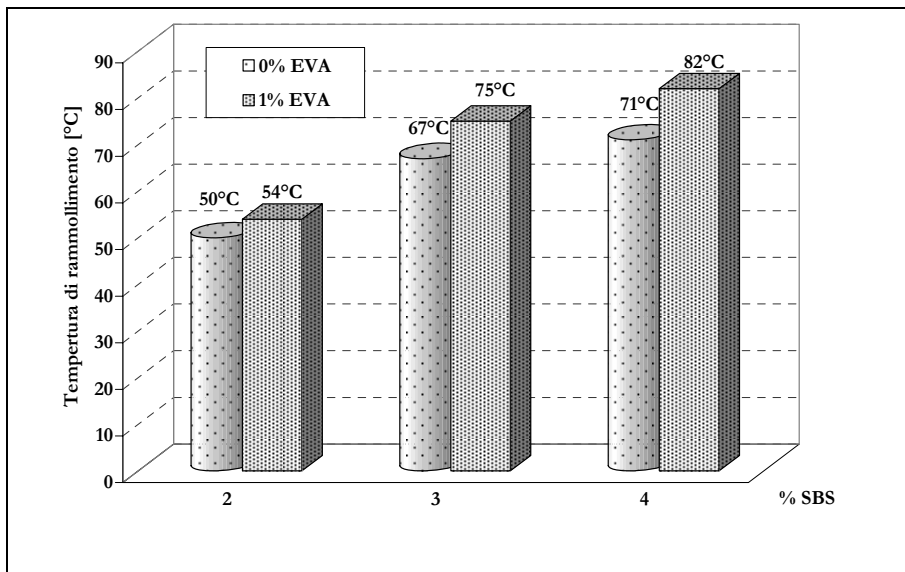


Figura 6-82: Andamento della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di 1% di EVA

Mettendo a confronto i risultati (Figure 6-84 e 6-85) diventa evidente come l'aggiunta di 1% di EVA migliori significativamente le proprietà dei bitumi modificati SBS.

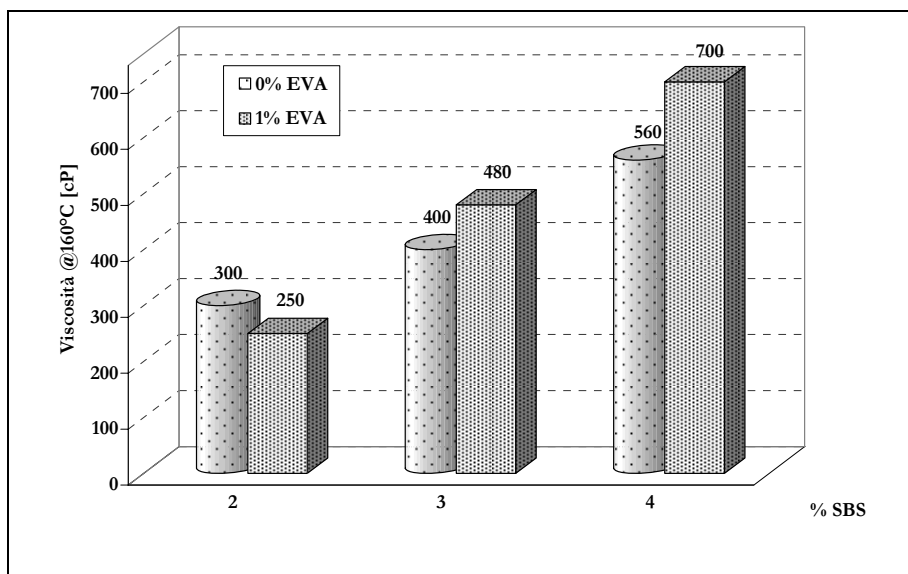


Figura 6-83: Andamento della viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di 1% di EVA

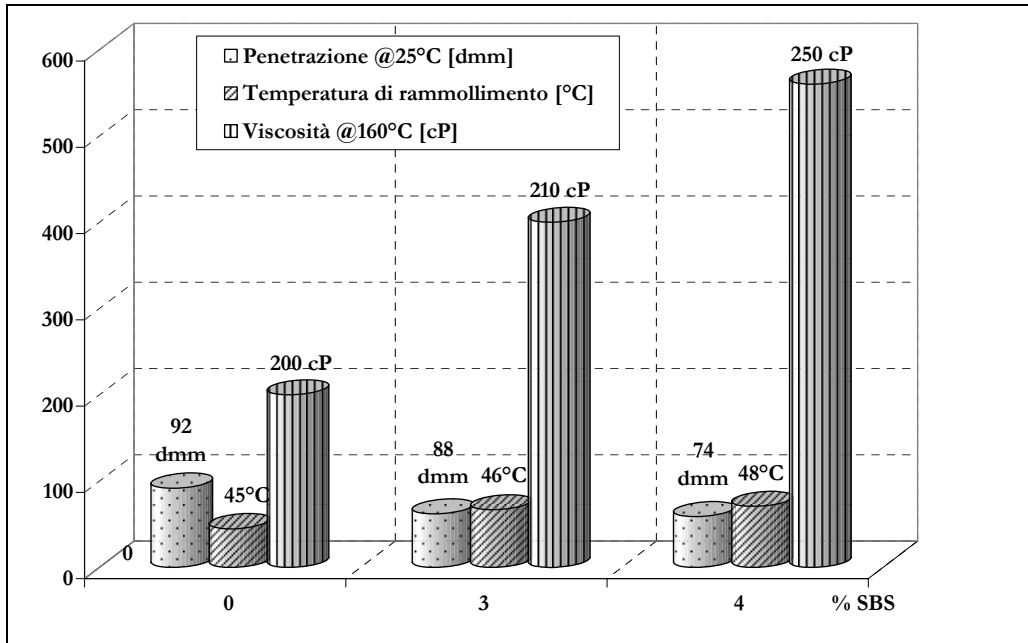
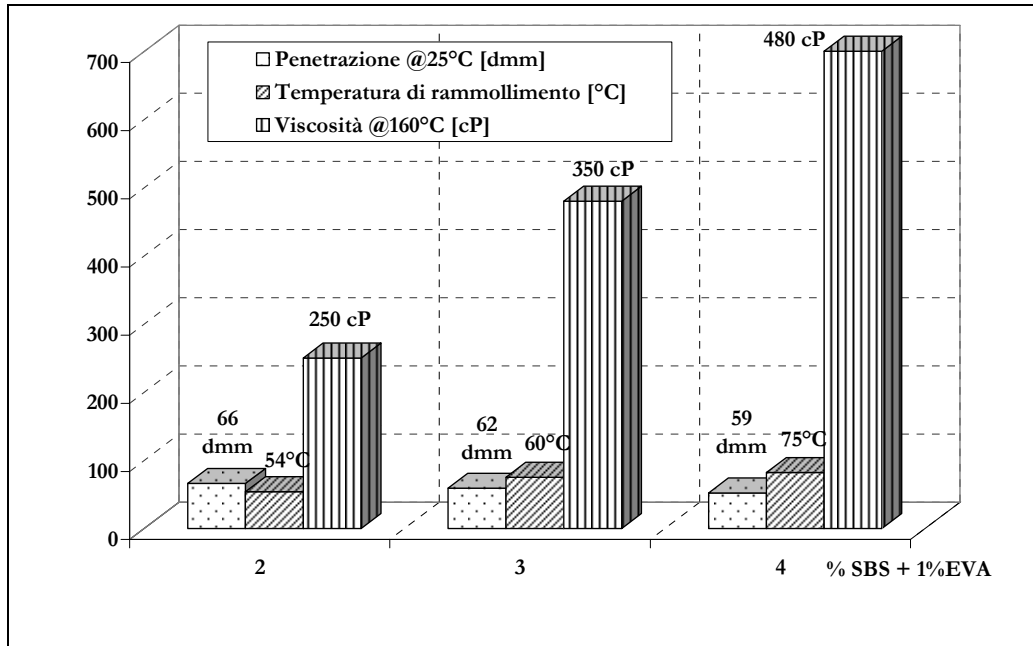


Figura 6-84: Andamento dei valori di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A tal quale e modificato con 3 e 4% di SBS



**Figura 6-85: Andamento di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS e con 1% di EVA**

Relativamente a quanto visto per l'additivazione con acido polifosforico nel precedente paragrafo, si può affermare che lo stesso miglioramento è stato riscontrato anche con l'aggiunta dell'1% di EVA ai medesimi bitumi modificati SBS.

Per quanto riguarda le formulazioni del tipo Terminal Blend, i migliori valori di resilienza e recupero elastico mostrati da questi materiali rispetto al bitume base sono da attribuirsi soprattutto alla modifica con polverino piuttosto che all'additivazione con acido polifosforico. Comparando un terminal blend con un legante Asphalt Rubber standard, ovvero avente un contenuto di polverino superiore al 15%, il primo presenta una riduzione della viscosità.

I risultati riscontrati sinora permettono di concludere che i miglioramenti nelle prestazioni ottenuti con l'aggiunta di additivi a base di acido polifosforico consentono di rendere tali materiali competitivi rispetto a leganti modificati con SBS, ma non consentono di raggiungere performance a livello di un legante Asphalt Rubber standard (vedi Tabella 6-32), anche alle basse temperature (temperatura Fraass).

Tabella 6-32: Confronto fra la % ottima di CRM e il miglior risultato da additivazione

Bitume	Penetraz. @25°C [dmm]	Temp. Rammoll. [°C]	Viscosità @175°C [cP]	Resilienza @25°C [%]	Temp. Fraass [°C]
50/70 B + 18%CRM	23	70	2013	49	-11
50/70 B + 10%CRM + 1% acido polif.	21	65	838	41	-9

La bibliografia riferisce inoltre che confrontando la risposta all'invecchiamento, l'additivazione a base di acido polifosforico e ridotte quantità di polverino consentono un miglioramento delle prestazioni rispetto al bitume base, anche se in misura meno consistente rispetto ad un legante Asphalt Rubber ottenuto a partire dalla stessa base.

Da un punto di vista pratico c'è da tener conto che questo tipo di additivo è corrosivo per i metalli più comuni come l'acciaio, bronzo e rame e la loro reazione può generare un gas infiammabile. C'è anche la possibilità di idrolisi alla temperatura ambiente a contatto con umidità. Inoltre i serbatoi di stoccaggio, tubazioni e pompe devono essere equipaggiati con riscaldamento esterno e isolamento per mantenere e raggiungere la temperatura di stoccaggio dell'additivo.

### 6.3.4 Curve di Viscosità

La caratterizzazione reologica dell'Asphalt Rubber può essere utilizzata come input diretto per determinare il modulo complesso di un conglomerato bituminoso. Diverse indagini dimostrano che la caratterizzazione di un bitume utilizzando le prove convenzionali è comunque importante dal momento che permette di evidenziare un parametro molto importante: la suscettibilità termica.

La maggior parte dei bitumi, ad eccezione di quelli soffiati, esibisce una relazione lineare tra il doppio logaritmo della viscosità e il logaritmo della temperatura.

L'approccio utilizzato usa soltanto l'unità di misura di viscosità per definire la relazione viscosità-temperatura. Al fine di usare tutti i test di consistenza in un ampio intervallo di temperature, è stato necessario convertire tutti i valori di penetrazione e punto di rammollimento in unità di misura di viscosità.

I dati di penetrazione (pen) sono stati convertiti in unità di viscosità seguendo il modello sviluppato dall'università del Maryland [6-5] come parte del programma di studio SHRP, tramite la seguente equazione, applicabile ad un ampio intervallo di penetrazione tra 3 e 300 dmm:

$$\text{Log } \eta = 10,5012 - 2,2601 \times \log(\text{pen}) + 0,00389 \times (\log(\text{pen}))^2 \quad (6-1)$$

La viscosità ottenuta è in Poise. La palla anello può essere convertita in unità di viscosità tramite l'approccio suggerito dalla Shell Oil, ossia si parte dal presupposto che tutti i bitumi alla sua temperatura di rammollimento abbiano una penetrazione prossima agli 800 dmm e una viscosità prossima a 13 000 poise.

Così, tutti i risultati di penetrazione e punto di rammollimento possono essere convertiti in unità di viscosità e i risultati del test Brookfield si possono usare come misure di viscosità dirette per ottenere la relazione viscosità ( $\eta$ )- temperatura ( $T_R$ ) dalla seguente equazione regressiva:

$$\log \log \eta \text{ (centipoise)} = A_i + VTS \times \log T_R \quad (6-2)$$

Nell'equazione precedente, A e VTS rappresentano i coefficienti di regressione, che descrivono l'unica relazione consistenza-viscosità di alcune miscele.

Il termine VTS in questa equazione rappresenta l'inclinazione dell'equazione regressiva, ed è il parametro di suscettibilità alla temperatura. Per esempio, un elevato valore di inclinazione definisce una alta suscettibilità alla temperatura del legante.

Questa relazione ha dimostrato, anche, di descrivere bene quanto osservato sul campo.

La Figura 6-86 presenta l'algoritmo di calcolo per ricavare le curve di viscosità.

---



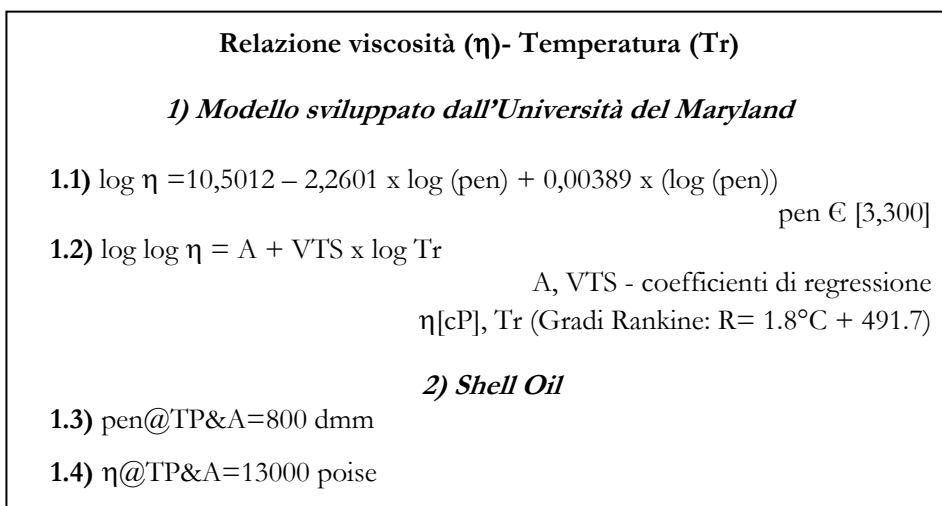


Figura 6-86: Schema di calcolo per le curve di viscosità

La Figura 6-87 mostra un esempio di applicazione di questo modello con la rispettiva tabella di calcolo (Tabella 6-33).

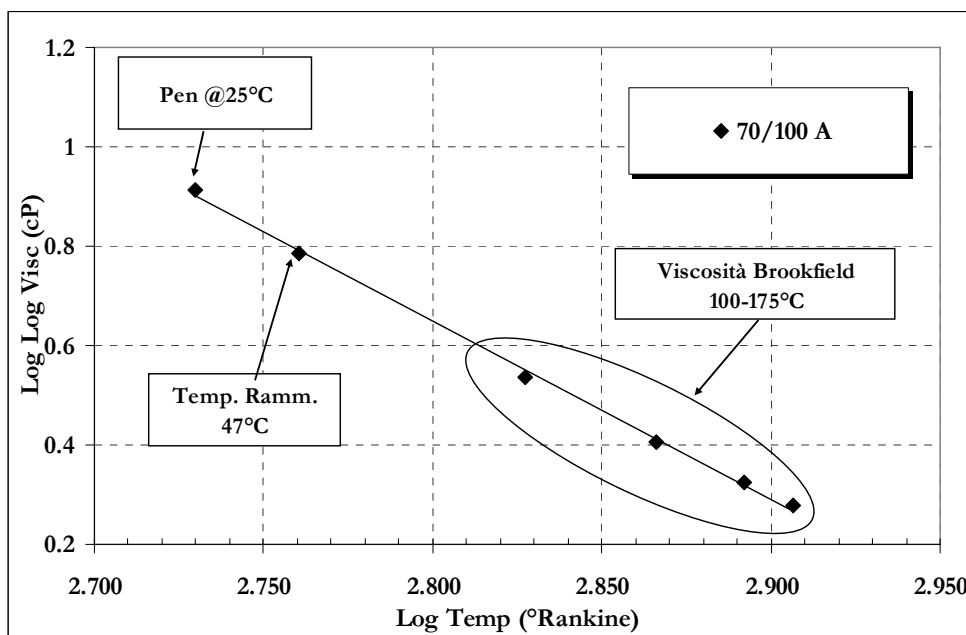


Figura 6-87: Modello di Maryland per le curve di sensibilità viscosità-temperatura per il bitume 70/100 A non modificato

Tabella 6-33: Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A

Temp [°C]	Temp [°F]	Log Temp [°Rankine]	Penetraz [dmm]	Viscosità [Poise]	Viscosità [cP]	Log Log Visc [cP]	Prova
25	77	2.730	81	1.59E+06	1.59E+08	0.914	Penetraz.
47	116.6	2.761		1.30E+04	1.30E+06	0.786	Palla Anello
100	212	2.827			2.69E+03	0.535	Brookfield
135	275	2.866			3.50E+02	0.406	Brookfield
160	320	2.892			1.28E+02	0.324	Brookfield
175	347	2.907			8.00E+01	0.279	Brookfield

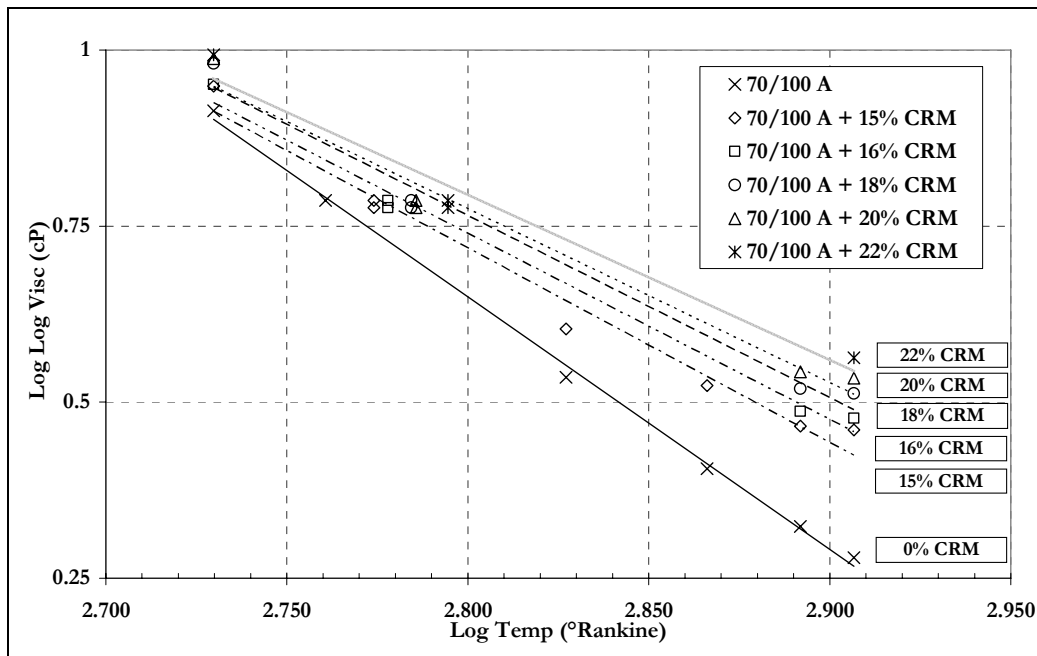


Figura 6-88: Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di CRM

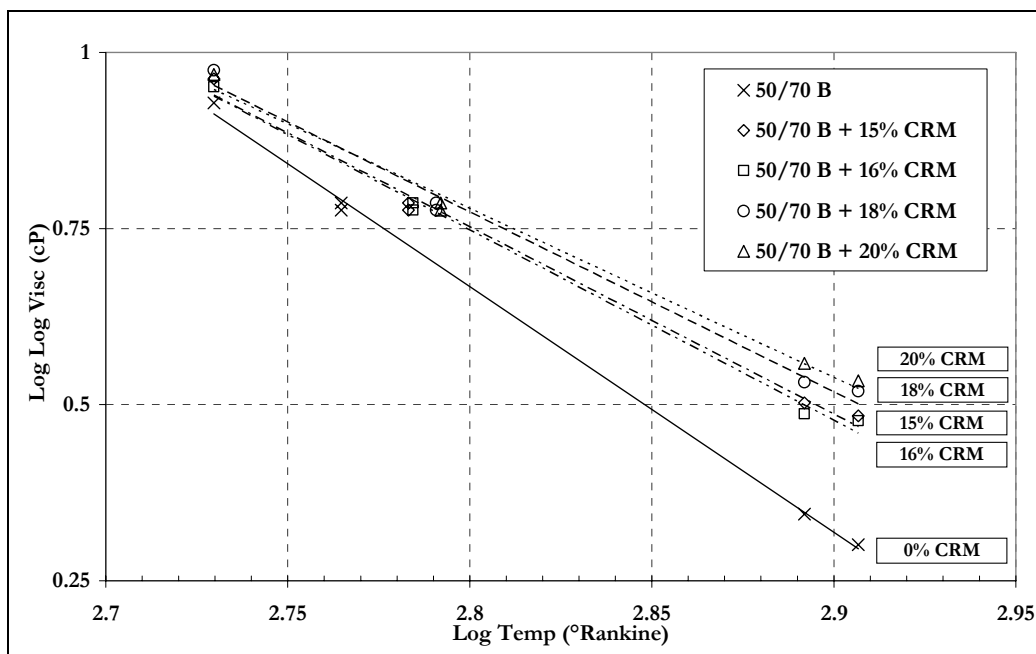


Figura 6-89: Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di CRM

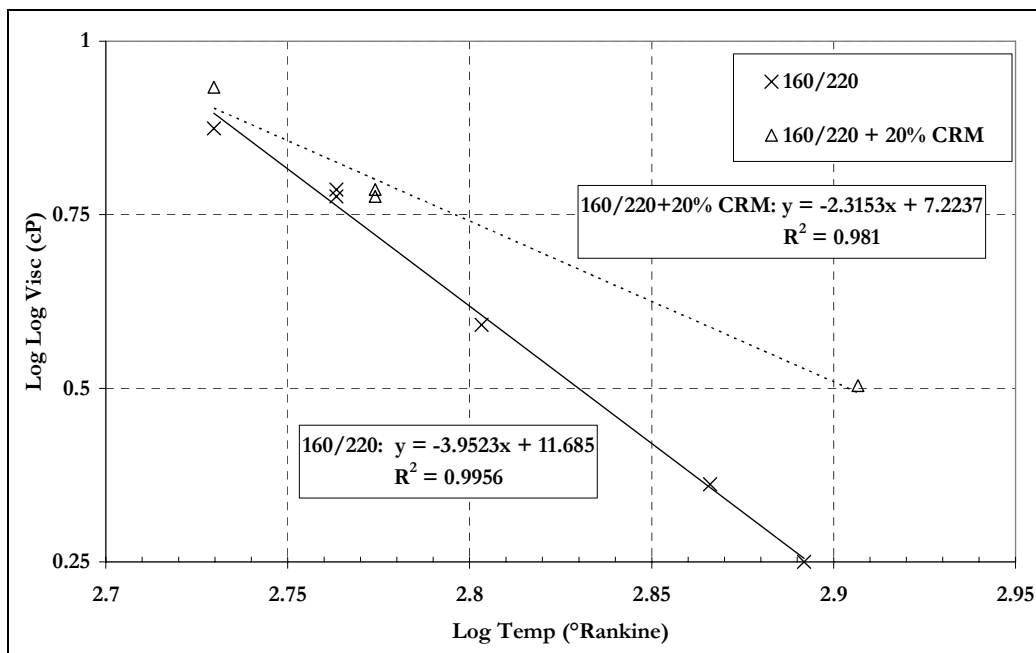


Figura 6-90: Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 160/220

Nelle Figure 6-88, 6-89 e 6-90 risulta evidente che l'incremento della % di CRM addizionata al bitume base riduce la suscettibilità della viscosità alle variazioni di temperatura.

Dalle curve rappresentate nella Figura 6-91, per la stessa percentuale di 20% di CRM, si desume che il bitume 50/70 A è quello con minor sensibilità termica, mentre i bitumi 70/100 e 160/220 hanno condotto a risultati simili. Questo supporta quanto illustrato precedentemente (vedi § 6.3.1).

La Figura 6-92 conferma questa tendenza di maggior resistenza alle variazioni termiche anche per una percentuale inferiore al 15% di modifica CRM.

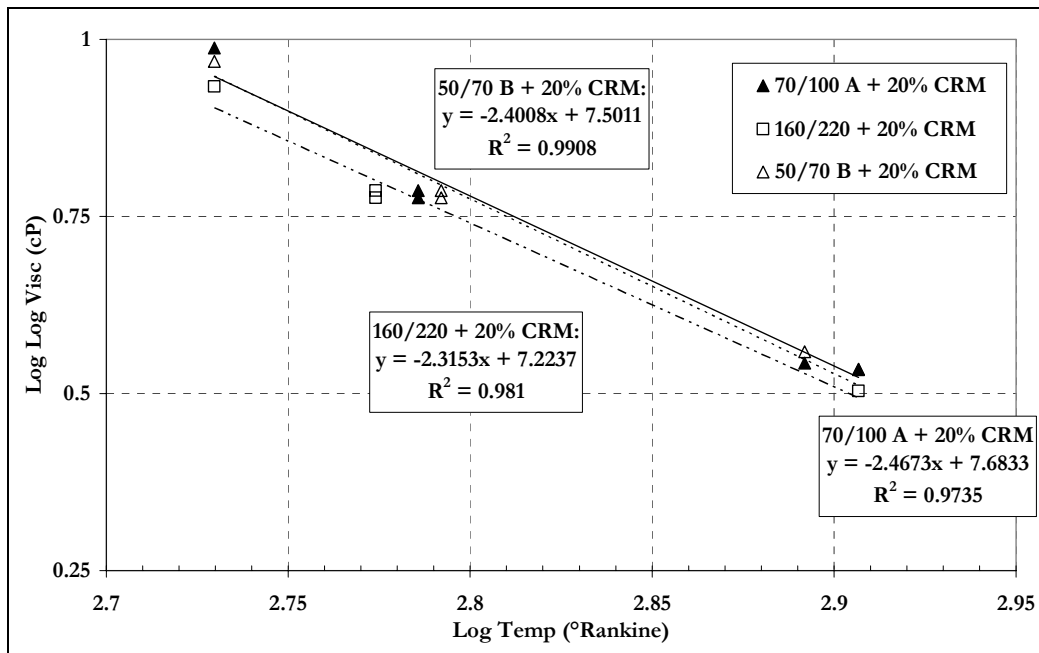


Figura 6-91: Curve di viscosità per diversi bitumi base modificati con 20% di CRM

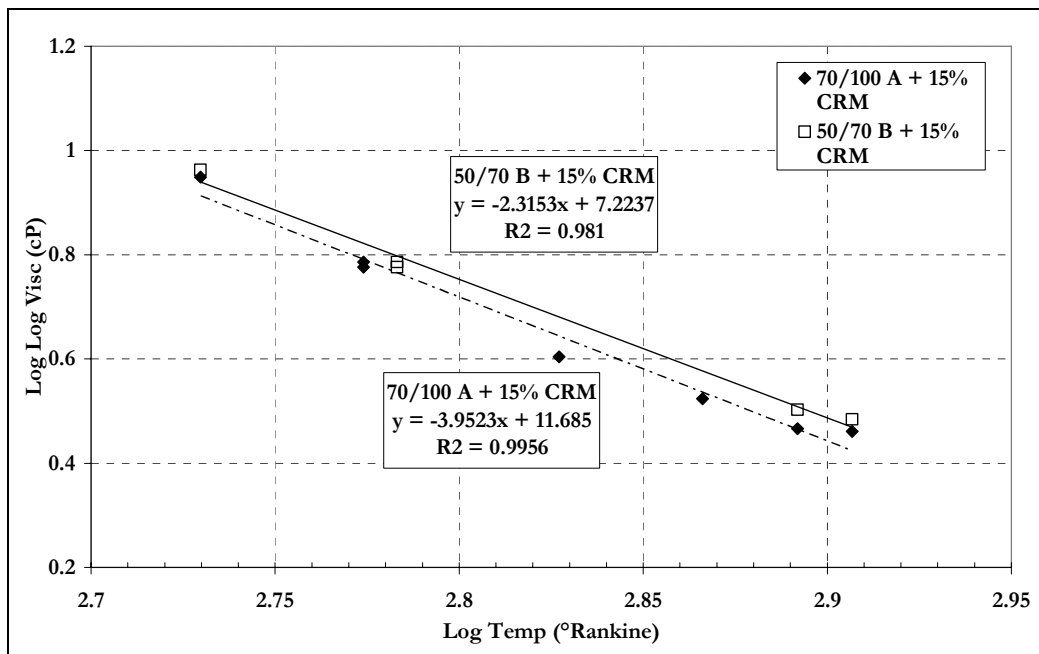


Figura 6-92: Curve di viscosità per diversi bitumi base modificati con 15% di CRM

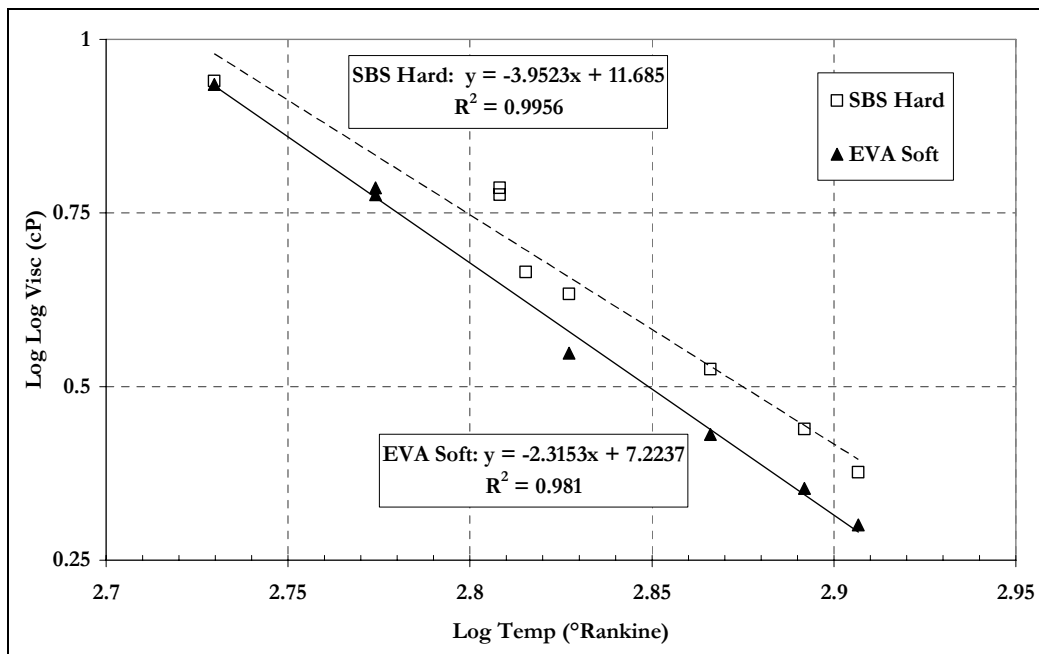


Figura 6-93: Sensibilità della viscosità alla temperatura per bitumi modificati SBS e EVA

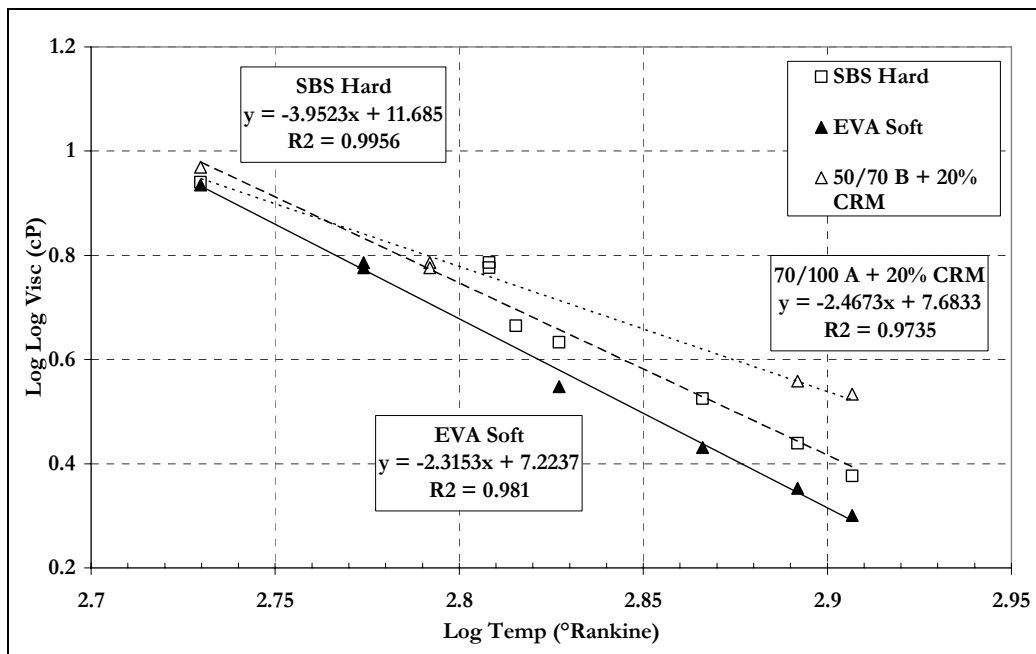


Figura 6-94: Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, SBS e EVA

La figura 6-93 dimostra che la modifica SBS conferisce, per i bitumi studiati, una minor sensibilità termica. Aggiungendo la curva del bitume modificato CRM si verifica che questo ha una performance superiore (Figura 6-94).

Prendendo in considerazione anche la formulazione del tipo Terminal Blend, risulta evidente l'elevata superiorità di performance del bitume Asphalt Rubber che presenta una inclinazione molto meno marcata rispetto a tutti gli altri, come si può osservare nella figura 6-95.

Nella Figura 6-96 si presenta una comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, SBS e EVA dopo invecchiamento RTFOT. È interessante notare come i bitumi diventino meno sensibili alla temperatura dopo invecchiamento, in particolare quelli CRM e SBS.

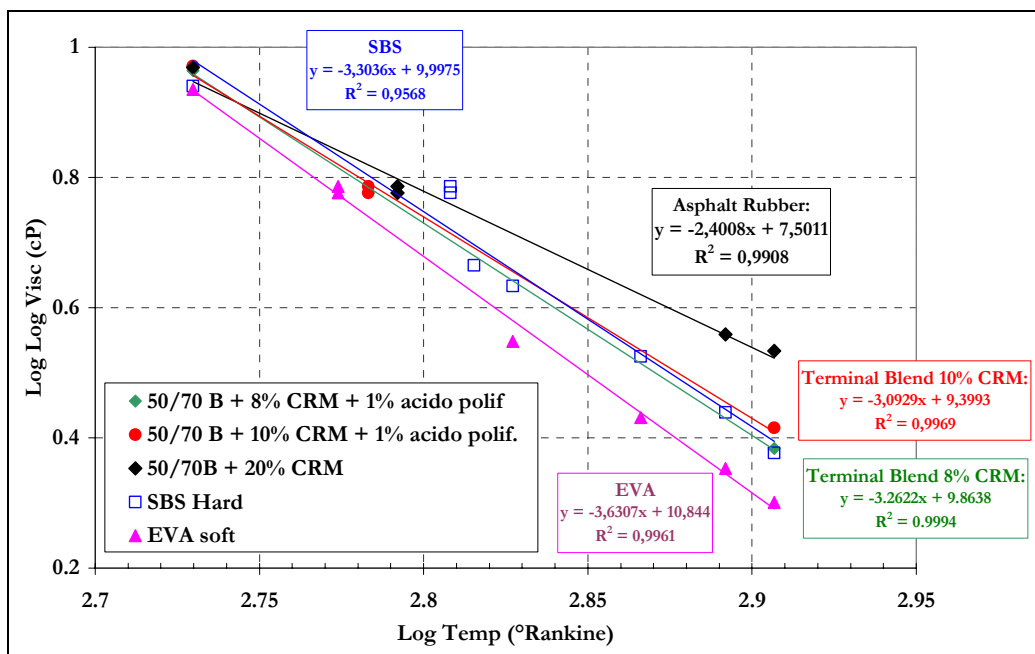


Figura 6-95: Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, terminal blend, SBS e EVA

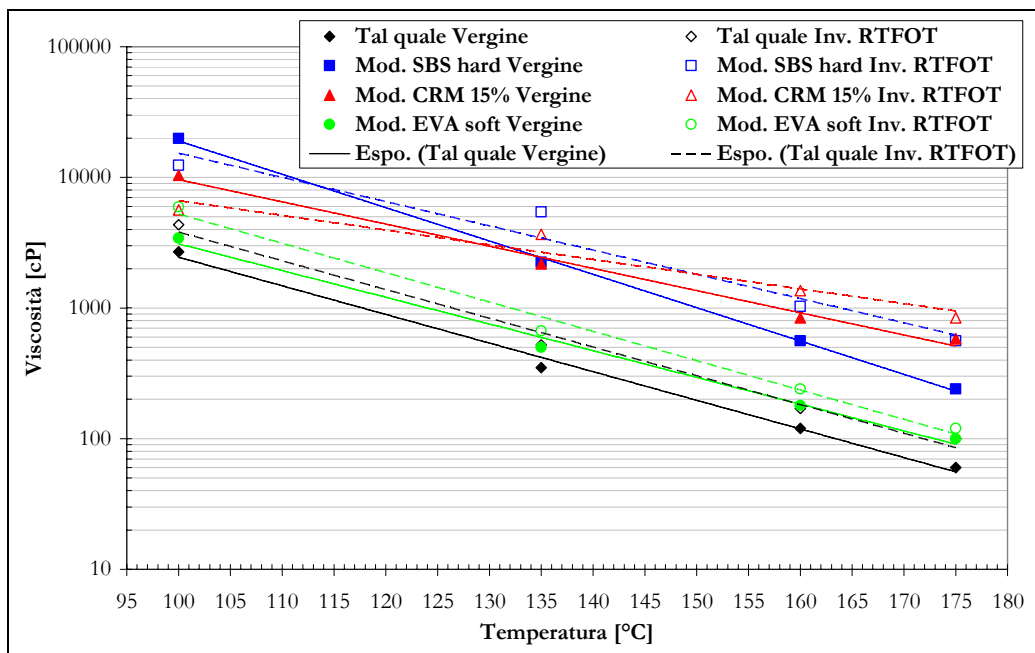


Figura 6-96: Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, SBS e EVA dopo invecchiamento RTFOT

Nell'Appendice 1.1 "Curve di viscosità" si riportano i risultati di questa analisi per tutti i bitumi studiati.

## 6.4 Prove reologiche con DSR

Per l'esecuzione di prove reologiche, il Dynamic Shear Rheometer (DSR) è lo strumento più adatto per determinare i parametri viscoelastici del bitume, controllando perfettamente la cinematica del flusso del legante, sottoposto a condizioni di carico e di temperatura esattamente determinate. Il campione di bitume, in forma solida, semisolida e liquida può essere testato in tutte le temperature di impiego, dalla fase di confezionamento del conglomerato, fino alle temperature proprie della pavimentazione stradale in esercizio.

L'utilizzo della configurazione di piatti paralleli per valutare le proprietà reologiche dei bitumi modificati richiede alcune considerazioni per quanto riguarda la dimensione del piatto, il gap utilizzato, e la percentuale di *strain* utilizzata nel test. Le indicazioni SHRP suggeriscono in proposito l'adozione dei sistemi di misura a piatti paralleli, distinguendo i vari tipi adatti, tra cui vi è quello utilizzato, cioè il PP25, con 25 mm di diametro.

### 6.4.1 Analisi Dinamica

In una applicazione in condizioni dinamiche con controllo degli sforzi applicati, vengono eseguite prove di Modulo Complesso a taglio ( $G^*$ ) del bitume e dell'Angolo di Fase ( $\delta$ ).  $G^*$  è una misura delle resistenze totali del materiale alle sollecitazioni di taglio ripetute, funzioni della frequenza di carico e della temperatura. La componente elastica del modulo complesso ( $G^*\cos\delta$ ) e la componente viscosa ( $G^*\sin\delta$ ) sono strettamente correlate con la suscettibilità delle miscele bituminose ad ammaloramenti per fessurazione a fatica e d'ormaiamento.

Per capire l'effetto dell'invecchiamento nel comportamento prestazionale del legante, i bitumi sono stati sottoposti ad invecchiamento RTFOT e MRTFO (*Modified Rolling Thin Film Oven adapted for PMB*, sviluppato negli USA nell'ambito del NCHRP Project), prendendo spunto dall'indagine condotta dal FHWA 90-02 [6-7], con l'obiettivo di valutare le modifiche introdotte nel RTFO (come raccomandato nel NCHRP 9-10 Project).

---



Per la sperimentazione sono state eseguite:

- Prove di Stress Sweep per individuare la sollecitazione limite “ $\tau$ ” in corrispondenza del 95% del valore di modulo complesso massimo ( $G^*_{max}$ );
- Prove di Frequency Sweep, imponendo una sollecitazione pari a “ $\tau/2$ ” al fine di garantire una sollecitazione rientrante nel campo lineare, con misura del modulo complesso  $G^*$  e dell'angolo di fase  $\delta$  relativo ad una frequenza  $\omega=10$  rad/s.

Il dominio lineare e non lineare del materiale è ottenuto confrontando il modulo complesso e lo sforzo applicato. In questa forma la non linearità è osservata al decrescere del modulo complesso dopo un valore iniziale pressoché costante.

Il controllo dei dati ottenuti con la batteria di stress sweep e frequency sweep è garantito dalle tre determinazioni effettuate con un medesimo valore della sollecitazione.

#### 6.4.1.1 DEFINIZIONE DEI LIMITI DEL CAMPO LINEARE IN RELAZIONE A $G'$ E PROVE IN REGIME OSCILLATORIO

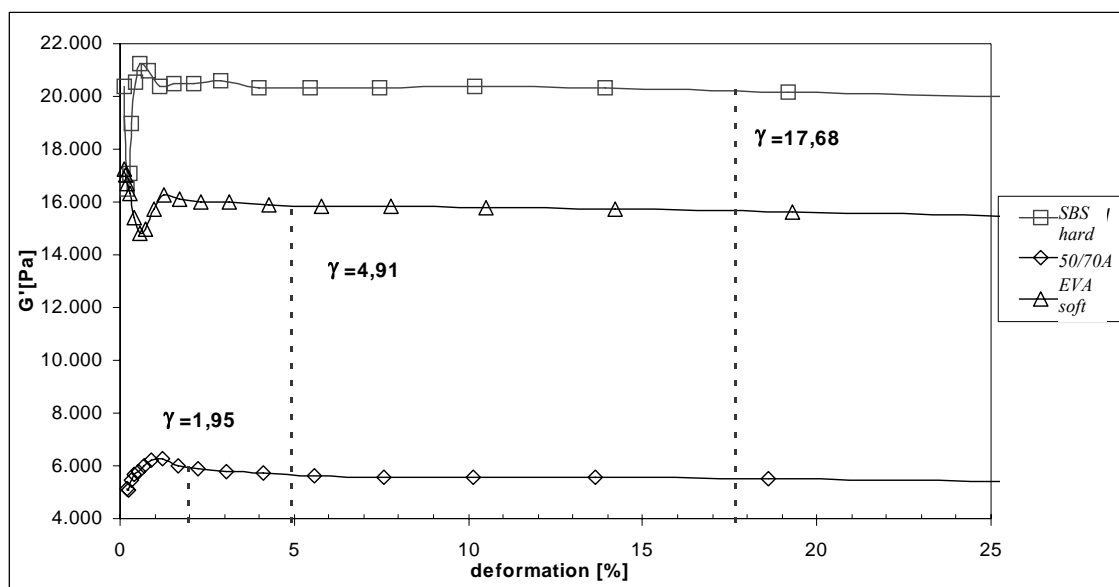
Il primo importante passo nell'ambito dell'indagine reologica dei materiali è certamente costituito dalla ricerca del campo di linearità, e conseguentemente del suo limite, al fine di incentrare in esso tutte le analisi. Prendendo spunto da alcune indicazioni presenti all'interno di pubblicazioni SHRP, si è deciso di considerare come limite lineare quello corrispondente al 95% del modulo di immagazzinamento ( $G' = G^* \cos \delta$ ).

Concettualmente non sembra affatto errato riferirsi ad un parametro che tenga conto anche dell'angolo di fase, visto che alcuni studi hanno messo in relazione l'incremento di  $\delta$  osservato all'aumentare della deformazione con un danneggiamento della struttura molecolare, fatto, questo, importantissimo per i bitumi modificati nei quali l'organizzazione della materia è, come si è visto, piuttosto complessa.

A tale proposito la ricerca SHRP, punto di riferimento nell'indagine reologica dei leganti bituminosi stradali, suggerisce la definizione del limite lineare attraverso la realizzazione delle seguenti fasi:

- Definizione di prove di *stress sweep* ad una frequenza di 10 rad/s, in corrispondenza di ciascuna delle temperature di prova previste; non essendo prevista esplicitamente nel software un frequenza di 10 rad/s = 1.59Hz, si è utilizzata la frequenza disponibile più vicina a questa, pari a 9.23rad/s = 1.47Hz;

- Visualizzazione della curva  $G' - \tau_0$  nel caso di prova eseguita in *control stress*, ed individuazione del punto in cui il modulo complesso  $G'$  raggiunge un valore pari al 95% di quello registrato [6-6];
- Individuazione del limite lineare nella tensione corrispondente al decremento del 5% del modulo  $G'_{max}$  (Figura 6-97);
- Definizione della prova di *frequency sweep* adottando valori compresi tra il 50 e il 75% della tensione limite registrata per quel materiale alla specifica temperatura analizzata.



**Figura 6-97: Definizione dei limiti del campo lineare in relazione a  $G'$  per i bitume studiati SBS Hard, 50/70 A da visbraking e EVA Soft**

Per non introdurre un elemento arbitrario nell'eseguire le prove si è deciso di adottare, nelle *frequency sweeps* successive alle *stress sweeps*, un valore della tensione pari ad un mezzo della tensione limite registrata per quel materiale e a quella temperatura.

Inoltre la prova di *frequency sweep* è stata effettuata solo nei casi in cui il rapporto  $M_0/\varphi_0$  (relativo alla prova di *stress sweep*) risultava minore di  $10N \cdot m$ .

Infatti con l'incremento della rigidità del materiale (che si ha al diminuire della temperatura) possono manifestarsi inconvenienti legati alla deformabilità di alcune componenti dell'apparecchiatura, la cosiddetta *machine compliance*, che può essere erroneamente imputata al campione di materiale preso in esame. Importanti risultati sperimentali hanno già dimostrato che la *machine compliance*, indipendentemente dal sistema di misura utilizzato, risulta pari a circa  $10\text{N}^*\text{m}$ .

Quindi per ottenere valori misurati con errori derivanti dal sistema inferiori al 5% la rigidità del campione deve risultare sempre inferiore a  $10\text{N}^*\text{m}$ . È consigliabile quindi che i risultati ottenuti in qualsiasi prova reometrica vengano controllati facendo riferimento a questo valore di soglia.

Per ogni temperatura di prova (40, 46, 52, 58, 64, 70, 76, 82,  $88^\circ\text{C}$ ) è stata effettuata una *stress sweep*, quindi, individuata la sollecitazione limite relativa al campo di viscoelasticità lineare, si è passati alla *frequency sweep*, imponendo una sollecitazione pari alla metà di quella limite lineare (Tabella 6-34).

**Tabella 6-34: Prova di *Frequency Sweep* per il bitume 50/70B+18%CRM a  $76^\circ\text{C}$**

Seg/Nr	$\omega$	$\delta$	$\tau$	$G^*$	$\gamma$	T
[-]	[rad/s]	[°]	[Pa]	[Pa]	[%]	[°C]
1	2,91	82,04	499,90	794,30	62,93	75,95
2	4,28	82,40	499,90	993,60	50,31	76,01
3	6,28	81,59	499,90	1330,00	37,59	76,06
4	9,23	80,09	499,90	1833,00	27,27	75,97
5	13,50	78,34	499,90	2489,00	20,08	76,02
6	19,84	75,97	499,90	3409,00	14,67	76,05
7	29,14	73,86	499,90	4658,00	10,73	76,04
8	42,77	70,94	499,90	6398,00	7,813	76,02
9	62,80	68,05	499,90	8703,00	5,744	76,00
<b><math>G^*_i(10\text{rad/s})</math></b>				<b>1949,76</b>		
<b><math>\delta_i(10\text{rad/s})</math></b>				<b>79,78</b>		
<b><math>G^*/\text{sen}(\delta)</math></b>				<b>1,981 kPa</b>		

In generale, si verifica che l'aggiunta di gomma comporta un incremento sistematico dei valori di modulo complesso (alla frequenza di  $10\text{ rad/s}$ ) al variare della temperatura di prova, riscontrando un significativo incremento nel passaggio dal 20 al 22% di polverino (Figura 6-98).

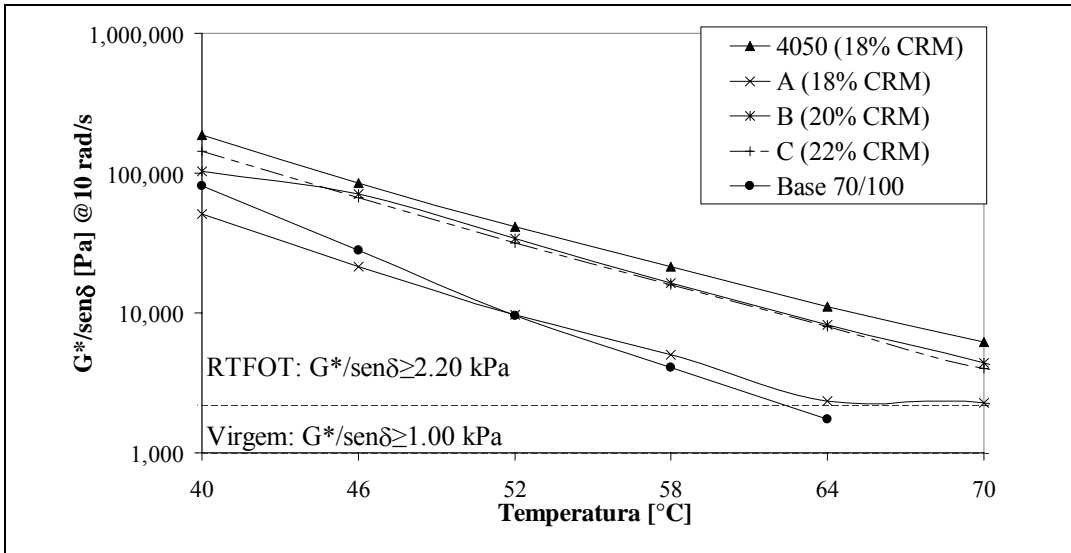


Figura 6-98: Modulo complesso per bitumi CRM

D'altra parte l'angolo di fase si ridimensiona verso valori più bassi che consentono una minore deformabilità del bitume ed una migliore resistenza all'ormaiamento (Figura 6-99).

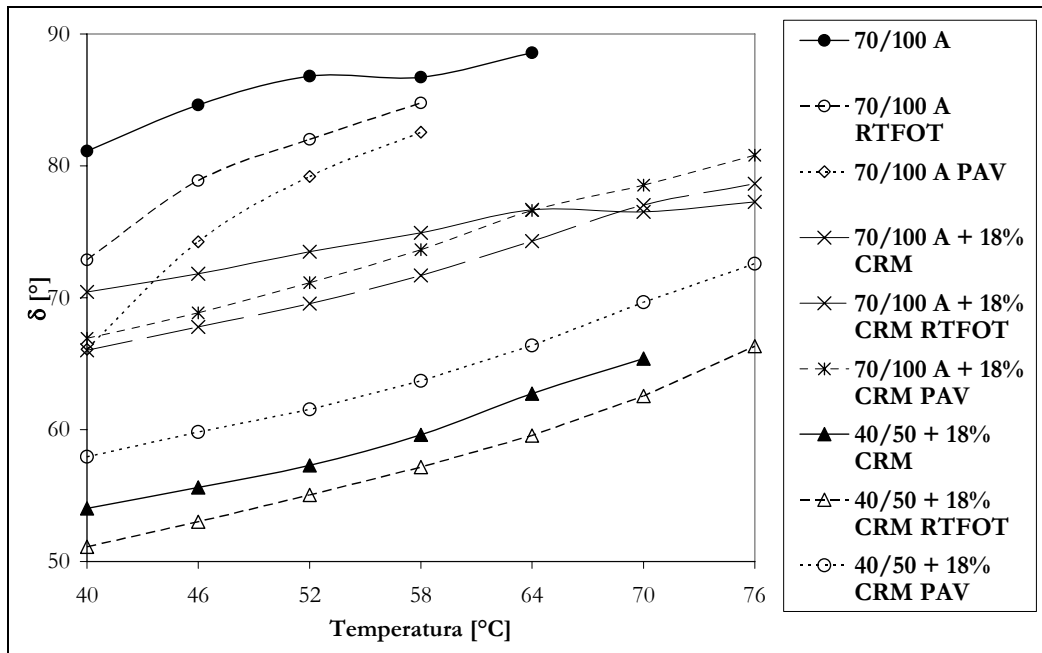


Figura 6-99: Effetto dell'invecchiamento RTFOT e PAV sull'angolo di fase dei bitumi CRM

Come già osservato nel caso delle prove convenzionali, il processo di invecchiamento ad alta pressione PAV conferisce al legante finale delle proprietà di maggiore duttilità (angolo di fase maggiore) rispetto al bitume invecchiato con RTFOT e aumenta in genere il valore di  $G^*$  (vedi Figura 6-100).

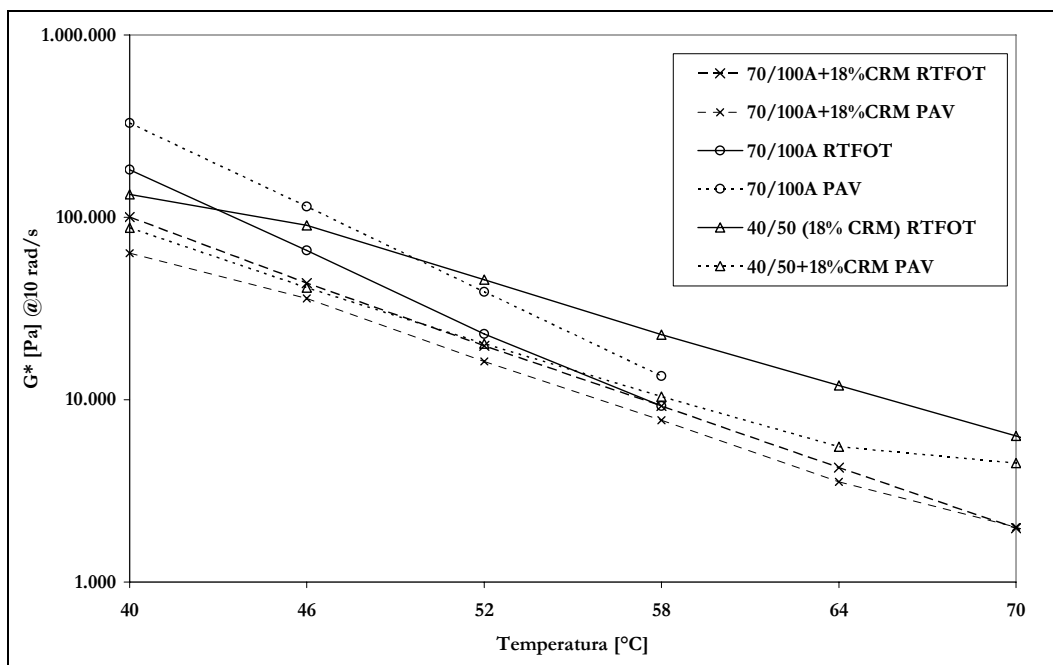


Figura 6-100: Effetto dell'invecchiamento RTFOT e PAV sul modulo complesso per bitumi CRM

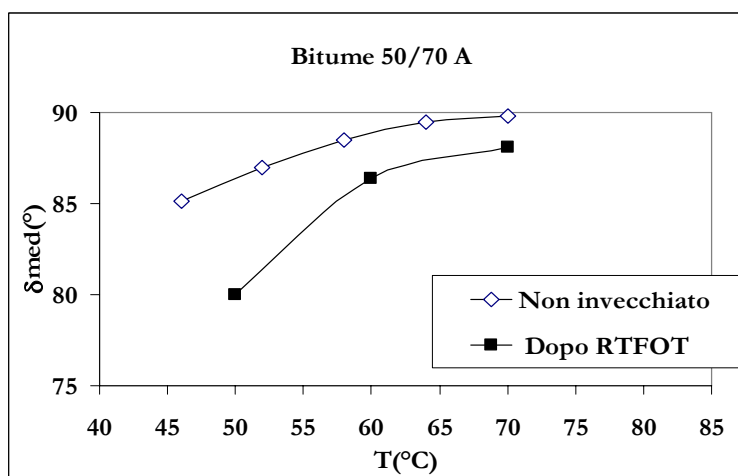


Figura 6-101: Angolo di fase medio per il bitume 50/70 A

Nei bitumi tal quali sottoposti ad invecchiamento RTFOT l'angolo di fase si riduce e pertanto aumenta l'aliquota elastica del modulo complesso detto anche modulo di restituzione (Figura 6-101).

Nei bitumi fortemente modificati, invece, in seguito ad invecchiamento RTFOT si assiste ad un incremento dell'angolo di fase (Figura 6-102).

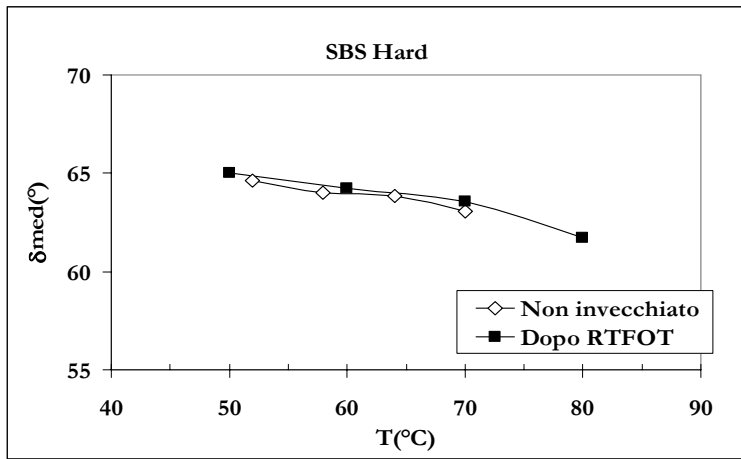


Figura 6-102: Angolo di fase medio per il bitume hard

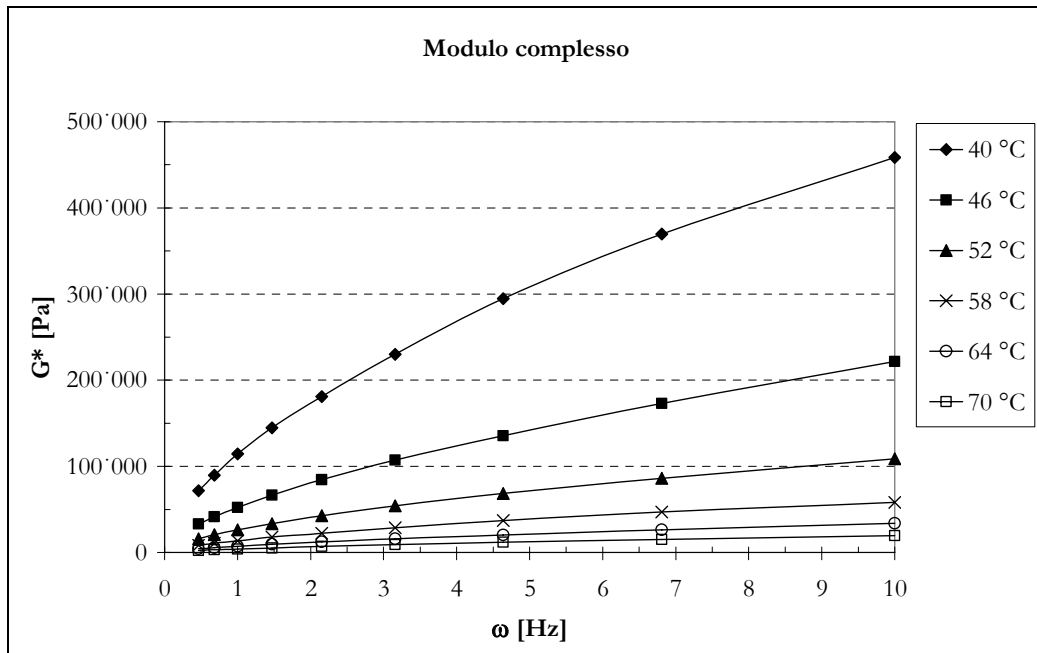


Figura 6-103: Evoluzione del modulo complesso con la temperatura per il bitume 40/50 + 18% CRM vergine

La modifica con polverino di gomma produce un aumento significativo del modulo complesso (vedi Figura 6-103), legata ad un miglioramento delle caratteristiche viscoelastiche ed alla maggior viscosità rispetto agli altri bitumi. Conseguentemente si verifica un aumento della resistenza alle deformazioni permanenti o ormaiamento. Il comportamento non-newtoniano del bitume modificato CRM è più pronunciato con l'aumento della percentuale di polverino di gomma.

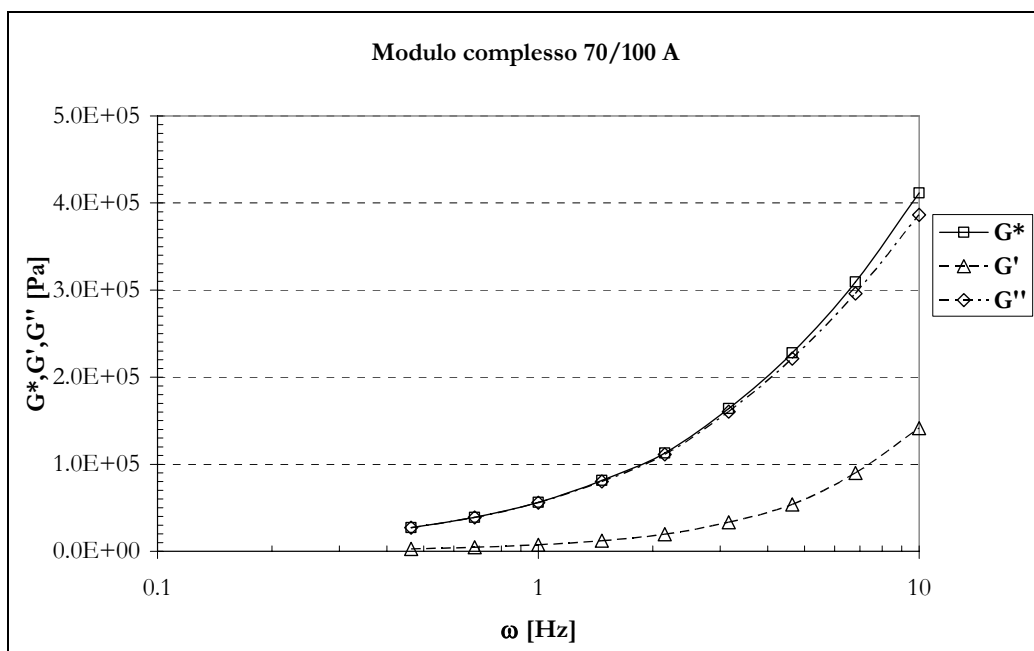


Figura 6-104: Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume non modificato 70/100 A vergine

Nella Figura 6-104 si osserva come il bitume non modificato debba il suo valore di modulo complesso predominantemente alla componente elastica  $G'$ .

Tutti i bitumi non modificati studiati hanno dimostrato una transizione continua dalla regione elastica (*glassy*) vetrosa alla regione di newton, che si verifica al diminuire della frequenza a basse temperature.

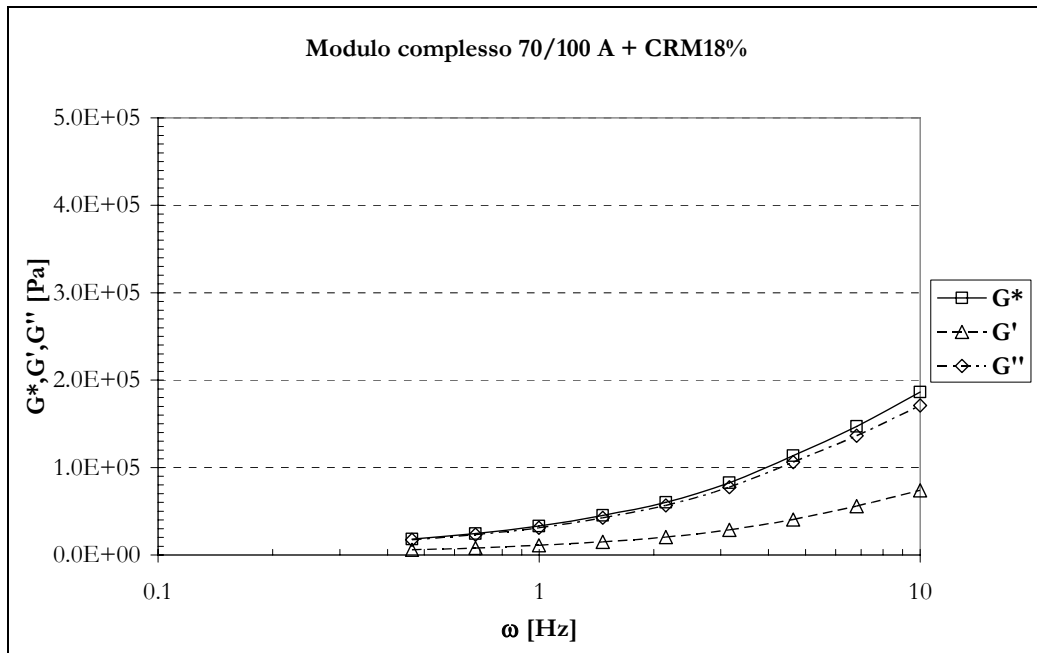


Figura 6-105: Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume 70/100 A + 18% CRM vergine

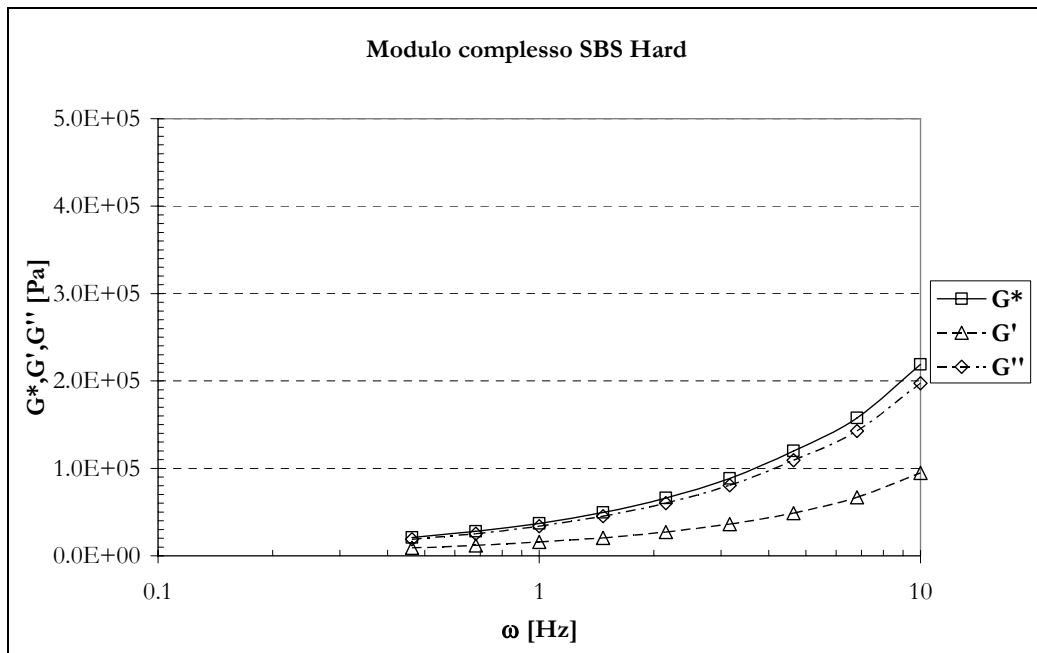


Figura 6-106: Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume SBS Hard vergine



La componente viscosa ( $G''$ ) del modulo complesso dell'Asphalt Rubber è molto più piccola ad alte temperature/basse frequenze rispetto ai leganti tradizionali (Figura 6-105). Questo è dovuto al minor angolo di fase dei bitumi CRM rispetto ai leganti tradizionali. L'angolo di fase per i valori bassi di modulo complesso per i leganti convenzionali è prossimo ai  $90^\circ$  (flusso newtoniano), mentre nei bitumi modificati CRM questo valore scende a  $60^\circ$ . Questo spiega l'esperienza pratica dell'alta resistenza alle deformazioni permanenti (basso valore del modulo complesso a cui corrisponde un basso carico ad alte temperature) dei leganti modificati con polverino di gomma.

L'Asphalt Rubber dimostra una inusuale (ma interessante) risposta al carico con valori inferiori di angolo di fase misurato ad alte temperature/basse frequenze ed alti valori di angolo di fase misurati a basse temperature/basse frequenze.

Per il bitume modificato SBS si evince un'aumento nelle funzioni di viscoelasticità alle temperature elevate, maggiormente nel range delle basse frequenze, ed una leggera diminuzione della suscettibilità termica, dovuta al fatto che  $G'$  e  $G''$  diminuiscono alle basse temperature (Figura 6-106).

#### 6.4.1.2 INDAGINE NEL CAMPO DELLA VISCOELASTICITÀ NON LINEARE

Secondo la normativa SHRP i bitumi possono essere considerati materiali visco-elastici lineari sotto le condizioni di carico che verosimilmente si incontrano in una pavimentazione stradale [6-8]. Questo principio fondamentale della metodologia SHRP non è valido, dal momento che non si può limitare la caratterizzazione al solo campo lineare.

In particolare, nelle ricerche svolte dal *Western Research Institute* (WRI) è stato osservato che piccole deformazioni nel conglomerato bituminoso possono dar luogo a grandi deformazioni nel legante e che la caratterizzazione SHRP non è stata in grado di evidenziare in maniera adeguata le differenze tra bitumi modificati e non. Un'altra conclusione importante di questo studio riguarda proprio i leganti Asphalt Rubber: a seconda del tipo di bitumi, contenuto e dimensioni del polverino di gomma, il piatto, il gap e la percentuale di *strain* applicata possono essere significativamente differenti dagli standard raccomandati dal sistema Superpave.

Inoltre le indagini eseguite per relazionare le proprietà di viscoelasticità lineare dei leganti bituminosi, aventi stesso PG-Grade, con le proprietà reologiche di conglomerati aventi stessa tipologia di inerti, gradazione e proporzioni volumetriche, con unica variabile il tipo di bitume modificato, hanno mostrato che le proprietà lineari non sono buoni indicatori della risposta del conglomerato.

I risultati raccolti indicano che tra bitumi modificati e non modificati c'è un cambiamento significativo nel comportamento non lineare.

Così, una volta caratterizzati i bitumi in conformità alla normativa SHRP, e in particolare in relazione al fenomeno dell'ormaiamento, si è passati a studiare alcuni aspetti del comportamento dei bitumi nel campo non lineare, quindi al di fuori della zona di indagine dello *Strategic Highway Research Program*.

Sono state effettuate prove di *frequency sweep*, in modalità *autostrain* (quindi in controllo di deformazione), a frequenza costante per ognuna delle tre temperature (40, 52 e 76°C). Non ci si è spinti oltre deformazioni del 70% perché il reometro non è in grado, a questi livelli, di garantire la tolleranza desiderata (0.05%), ed anche perché sono fisicamente poco significative. I tre bitumi analizzati, 50/70 tal quale, EVA soft e SBS hard, sono stati così sottoposti a 7 livelli di deformazione (tra l'1% e il 70%).

In particolare si è concentrata l'attenzione sull'andamento del modulo complesso e dell'angolo di fase rispetto alla deformazione e sono stati analizzati quei fattori, quali temperatura, frequenza di applicazione dei carichi e tipo di modifica, che senza dubbio esercitano una forte influenza sulla risposta deformativa del bitume.

Per quanto riguarda la frequenza, poiché le *frequency sweep* sono state effettuate per un solo valore della stessa, ci si è riferiti a prove di *stress sweep* condotte fino ad elevati valori di  $\gamma$ .

I grafici presentati sintetizzano l'effetto che temperatura e tipo di modifica hanno sulla dipendenza di  $G^*$  e  $\delta$  dalla percentuale di deformazione, sia nel campo lineare, sia in quello di viscoelasticità non lineare.

La deformazione limite del campo di viscoelasticità lineare mostra un incremento all'aumentare della temperatura sia nei bitumi tal quali sia in quelli modificati; in particolare  $\gamma_{\text{limite}}$  rimane dello stesso ordine di grandezza nei bitumi modificati hard, mentre in quelli tal quali e nei modificati soft si assiste ad una variazione fino ad un ordine di grandezza (Figura 6-107).

---

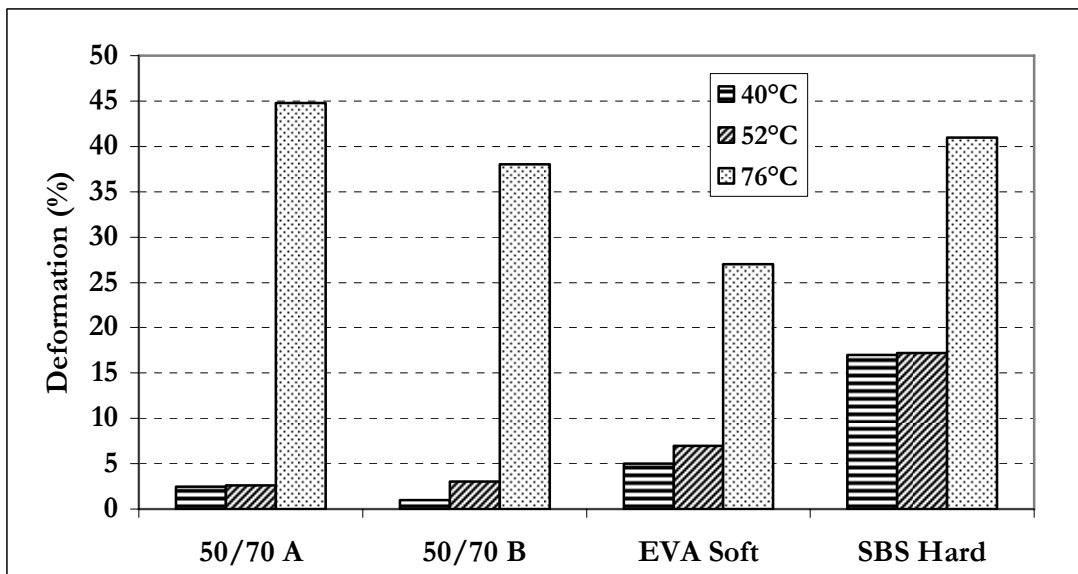


Figura 6-107: Deformazione per le temperature di 40, 52 e 76°C

Bitumi che mostrano comportamenti simili per basse deformazioni possono evidenziare differenze se, sottoposti a deformazioni elevate, si trovano a lavorare nel campo non lineare (Figure 6-108, 6-109, 6-110).

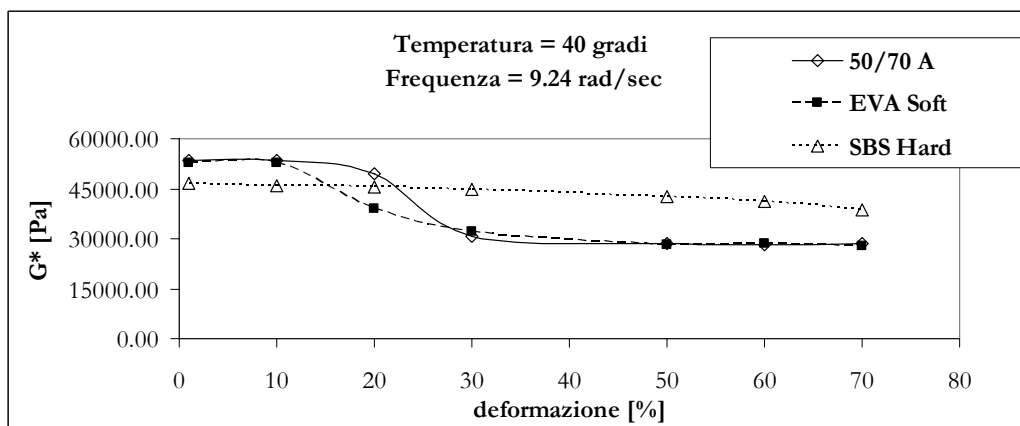


Figura 6-108: Deformazione osservata a 40°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard

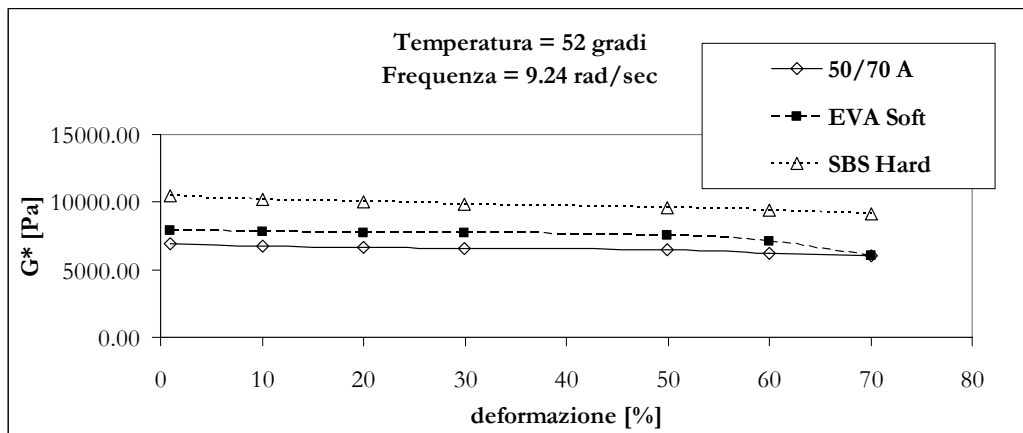


Figura 6-109: Deformazione osservata a 52°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard

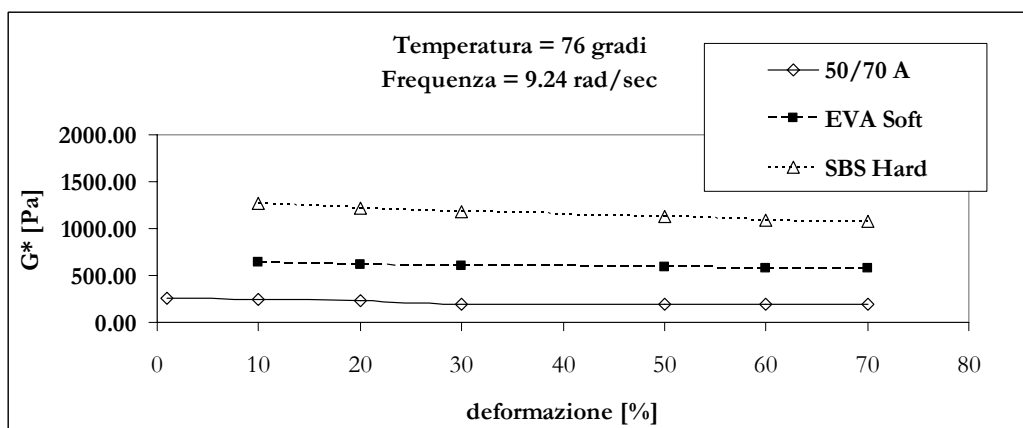


Figura 6-110: Deformazione osservata a 76°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard

Le prove effettuate hanno permesso ancora di fare luce sul “disturbo da fatica, ovvero si verifica una diminuzione di  $G^*$  all’aumentare della deformazione (Figure 6-111).

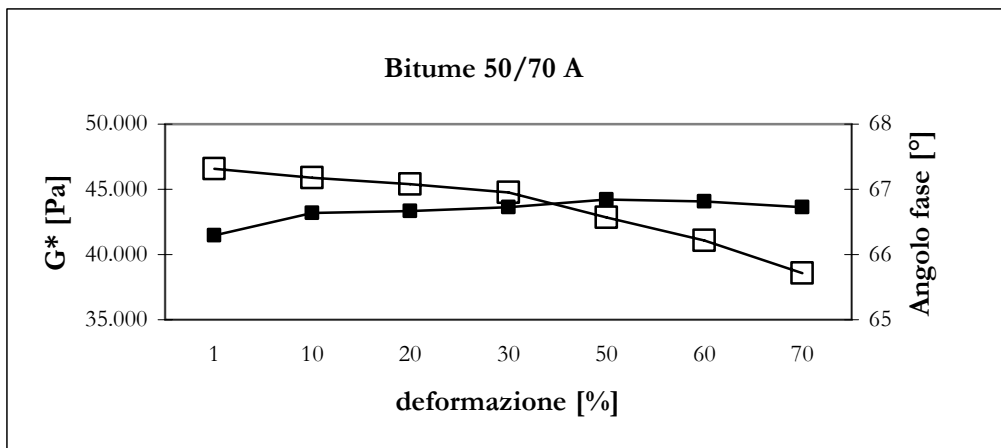


Figura 6-111: Evoluzione di  $G^*$  con l'aumento della deformazione per il bitume 50/70 A

Le prove nel campo di viscoelasticità non-lineare, effettuate imponendo ai bitumi grandi deformazioni, hanno permesso di constatare che il modulo complesso mostra una forte dipendenza dalla deformazione alle basse temperature.

Il valore di  $G^*$  subisce una notevole diminuzione all'aumentare della deformazione; a questo fenomeno, noto come “disturbo da fatica”, si oppongono i modificatori polimerici (Figure 6-112, 6-113 e 6-114).

L'effetto della deformazione sull'angolo di fase non è così significativo come quello su  $G^*$ : si osserva solo un cambiamento di pochi gradi. Questo effetto marginale su  $\delta$  è stato osservato per molti sistemi testati.

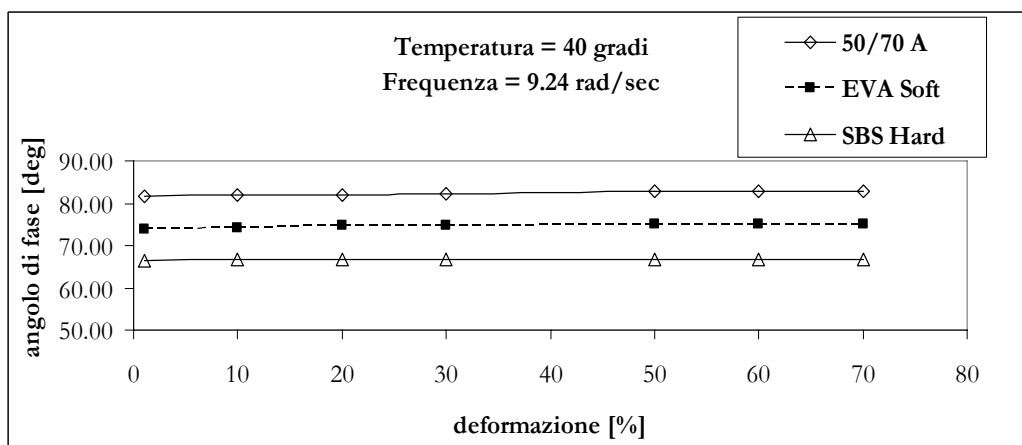


Figura 6-112: Effetto della modifica sull'angolo di fase a 40°C

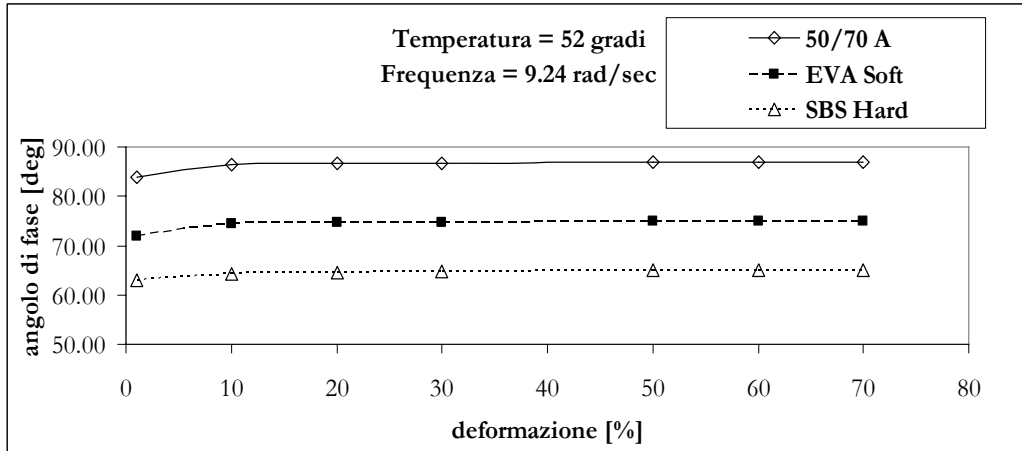


Figura 6-113: Effetto della modifica sull'angolo di fase a 52°C

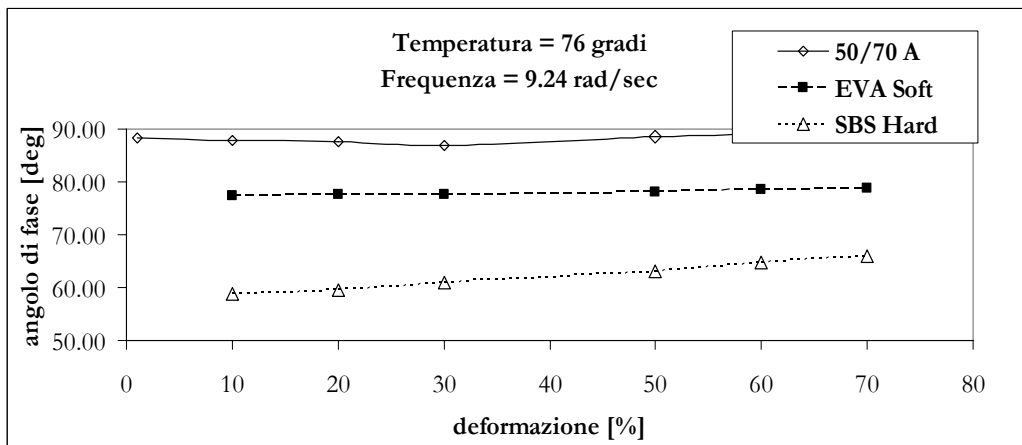


Figura 6-114: Effetto della modifica sull'angolo di fase a 76°C

Nel diagramma ( $G^*-\gamma$ ), specialmente a basse temperature, si individuano tre zone: per piccole deformazioni la curva è sub-orizzontale e il comportamento del legante è probabilmente controllato dalle molecole polari del polimero; segue una zona di transizione, a volte accompagnata da una brusca diminuzione del modulo; infine, allontanandosi ulteriormente dalla zona lineare, la curva torna ad essere quasi parallela all'asse delle deformazioni e il comportamento è influenzato con ogni probabilità dal solo bitume originario.

L'effetto della deformazione sull'angolo di fase è meno evidente rispetto a quello riscontrato sul modulo complesso; l'incremento di  $\delta$  osservato all'aumentare di  $\gamma$  potrebbe essere indice di rottura della struttura molecolare [6-9].

I bitumi appaiono sensibili al tempo di applicazione dei carichi; in particolare, basse frequenze, a parità di sollecitazione, determinano consistenti deformazioni (Figure 6-115).

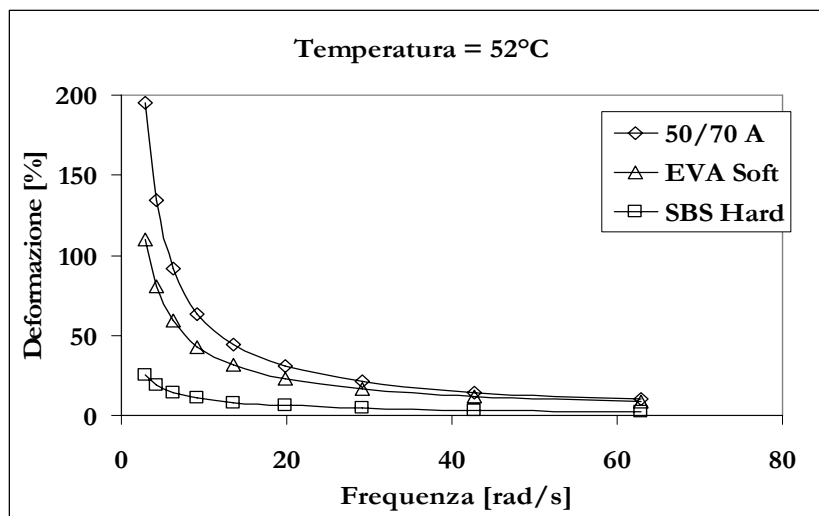


Figura 6-115: Evoluzione della deformazione all'aumentare della frequenza per i bitumi 50/70 A non modificato, modificato EVA soft e SBS hard

I risultati cui si è pervenuti avvalorano senza dubbio le critiche al sistema SHRP ed evidenziano la necessità di proseguire le ricerche per riuscire ad arrivare a un nuovo sistema di classificazione e di nuovi protocolli di prova che tengono conto dei fattori che determinano il comportamento tenso-deformativo del bitume.

Il passo successivo, come è stato proposto in convegni internazionali [6-3], sarà dar vita a un sistema di classificazione che colmi tali lacune, tramite nuovi protocolli di prova, che tengano conto di tutti quei fattori, quali la frequenza ( $\rightarrow$ velocità del traffico), la percentuale di deformazione ( $\rightarrow$ struttura della pavimentazione), il carico ( $\rightarrow$ volume di traffico), la temperatura di esercizio e, non ultimo, il tipo di modifica, che caratterizzano il comportamento tenso-deformativo del legante in opera.

Ulteriori risultati sono riportati nelle Appendici 1.3 “Limite Lineare funzione della temperatura” e 1.4 “Dipendenza dalla deformazione”.

### 6.4.1.3 TEMPERATURA LIMITE SUPERIORE

Come già accennato, la normativa SHRP impone, per la prevenzione del fenomeno dell'ormaiamento delle pavimentazioni flessibili, il rispetto della seguente disuguaglianza:

$$G^*/\text{sen}\delta \geq \text{valore minimo}$$

avendo riconosciuto in tale rapporto un valido parametro in grado di tradurre il comportamento viscoso del materiale. Ricordando infatti che la deformabilità complessa  $J^*$  è l'inverso del modulo complesso e osservando che il problema della limitazione dell'ormaiamento di una pavimentazione stradale può essere affrontato soltanto limitando la componente viscosa della deformabilità complessa del materiale, si capisce come ciò possa essere tradotto in termini di massimizzazione della risposta elastica del materiale (componente di immagazzinamento del modulo complesso  $G' = G^* \cos \delta$ ).

Qualora la risposta del materiale fosse elastica, si avrebbe una deformabilità associata ad uno sfasamento  $\delta = 0$ , quindi ne consegue che la componente immaginaria di  $J^*$  è indicativa della risposta viscosa del materiale ed in quanto tale va limitata per limitare l'insorgere di ormaie.

Riassumendo in simboli quanto detto, si ha:

$$\text{Limitazione ormaiamento} \Leftrightarrow J^* \text{sen}\delta \leq \text{valore limite} \Leftrightarrow G^*/\text{sen}\delta \geq \text{valore minimo}$$

La norma SHRP stabilisce che la frequenza significativa di prova, legata a quelli che sono i carichi veicolari di traffico, è di 10rad/sec. La diminuzione del modulo complesso al crescere della temperatura fa sì che tale condizione equivalga all'individuazione di una temperatura massima di progetto pari a quella in corrispondenza della quale detta condizione decade ( $G^*/\text{sen}\delta \geq 1.00$  kPa).

Come spiegato nel capitolo 5, la prova si effettua anche dopo invecchiamento RTFO; in seguito all'invecchiamento si assiste ad un sostanziale incremento del rapporto  $G^*/\text{sen}\delta$  e la condizione da rispettare muta ( $G^*/\text{sen}\delta \geq 2.20$  kPa).

Le Figure da 6-116 a 6-118 dimostrano l'effetto dell'invecchiamento sul bitume 70/100 non modificato, sul 70/100 + 18% CRM e sul bitume modificato SBS hard.

---



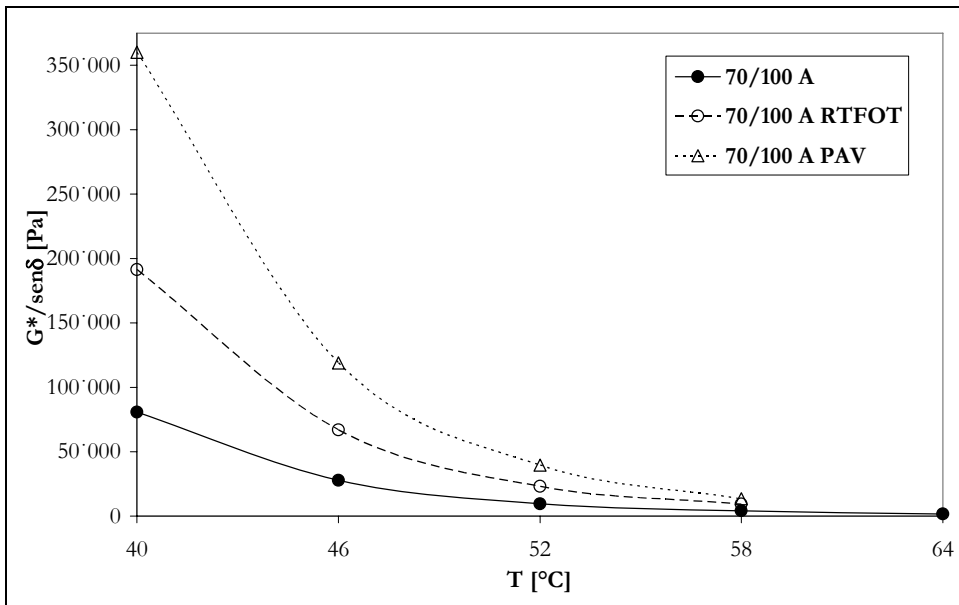


Figura 6-116:  $G^*/\text{sen } \delta$  per il bitume 70/100 A vergine, invecchiato RTFOT e PAV

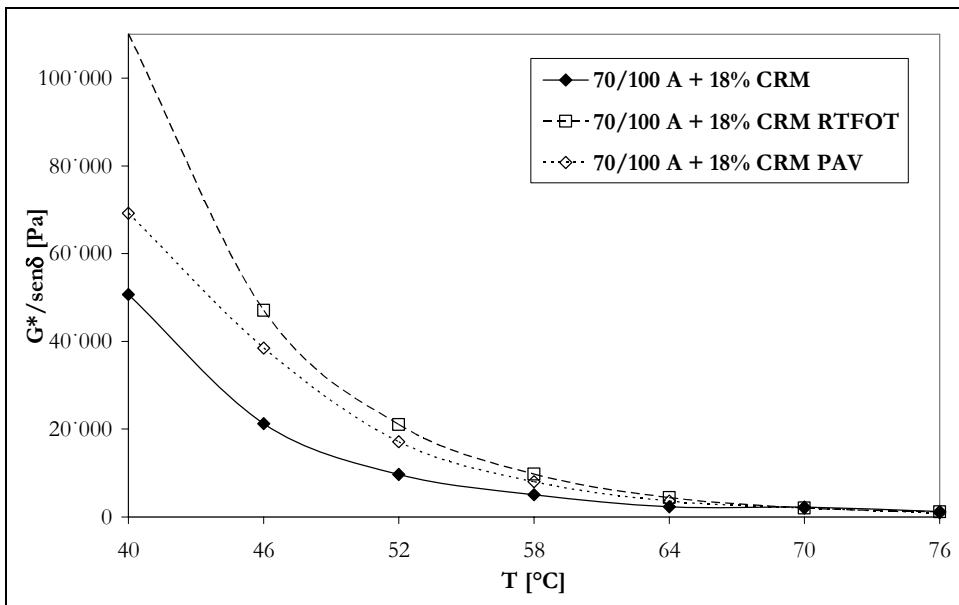


Figura 6-117:  $G^*/\text{sen } \delta$  per il bitume 70/100 A + 18% CRM vergine, invecchiato RTFOT e PAV

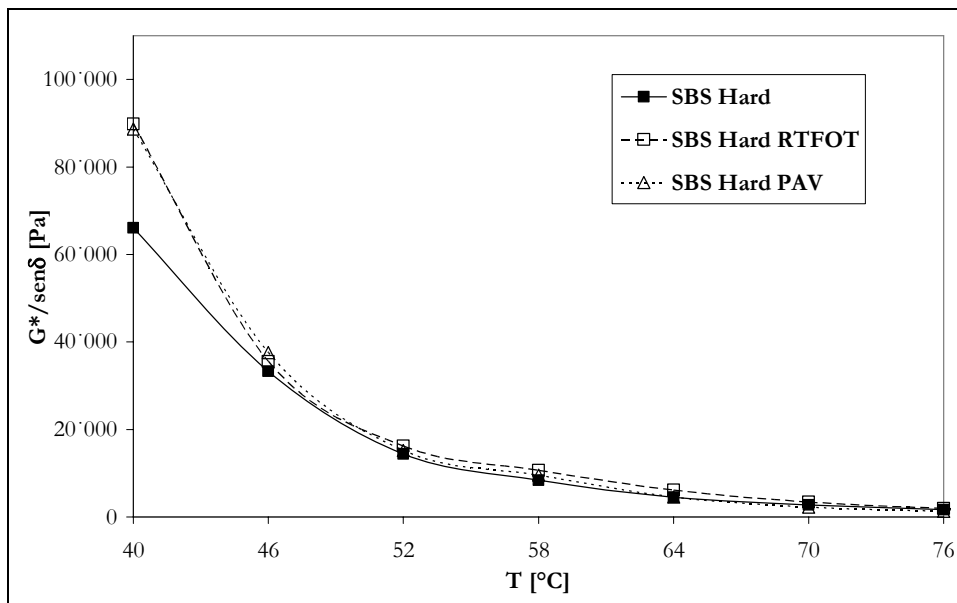


Figura 6-118:  $G^*/\text{sen } \delta$  per il bitume SBS Hard vergine, invecchiato RTFOT e PAV

Si osserva come la modifica renda i bitumi meno sensibili all'invecchiamento e come il bitume Asphalt Rubber abbia una risposta miglior dopo invecchiamento PAV rispetto al RTFOT (Figura 6-117).

Questo risulta ancora più evidente rappresentando gli stessi dati su scala logaritmica (Figure 6-119 e 6-120).

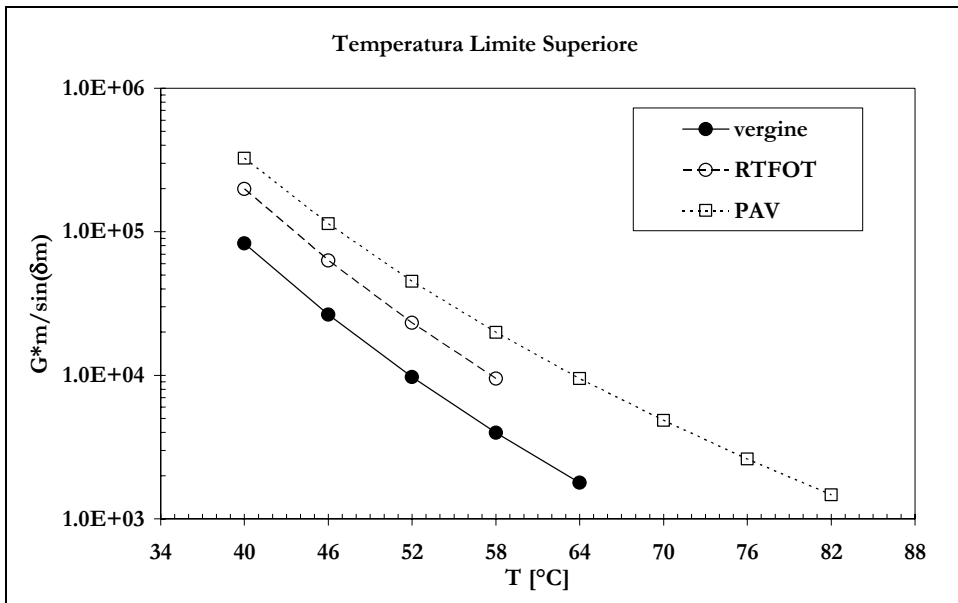


Figura 6-119: Temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A vergine, invecchiato RTFOT e PAV

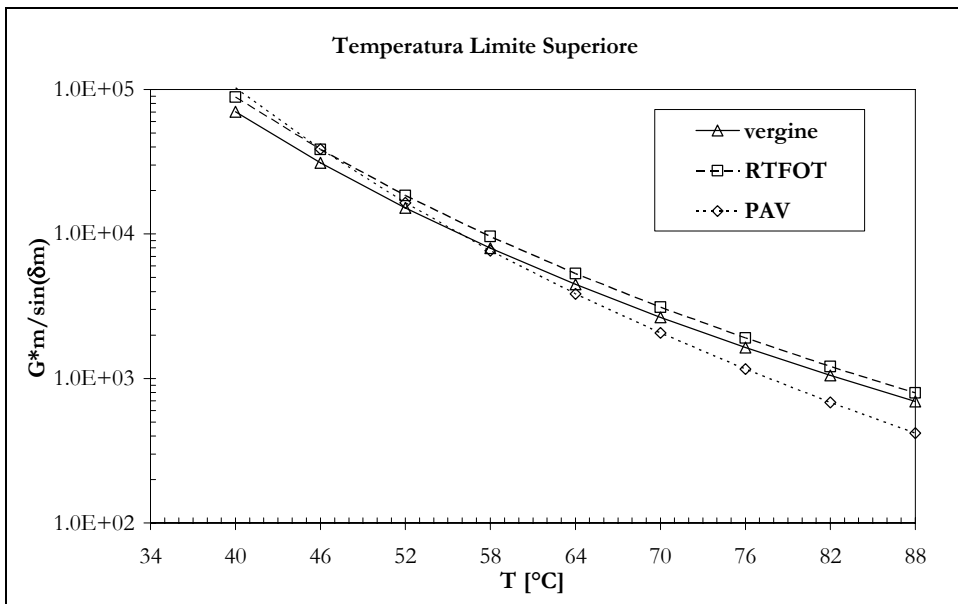


Figura 6-120:  $G^*/\text{sen } \delta$  per il bitume 70/100 A +18% CRM vergine, invecchiato RTFOT e PAV

Passando a considerare le formulazione del tipo Terminal Blend (Figura 6-121) si osserva come l'incremento della percentuale di AP aumenti il valore  $G^*/\sin \delta$ , senza però raggiungere la performance della miscela con 10% di CRM.

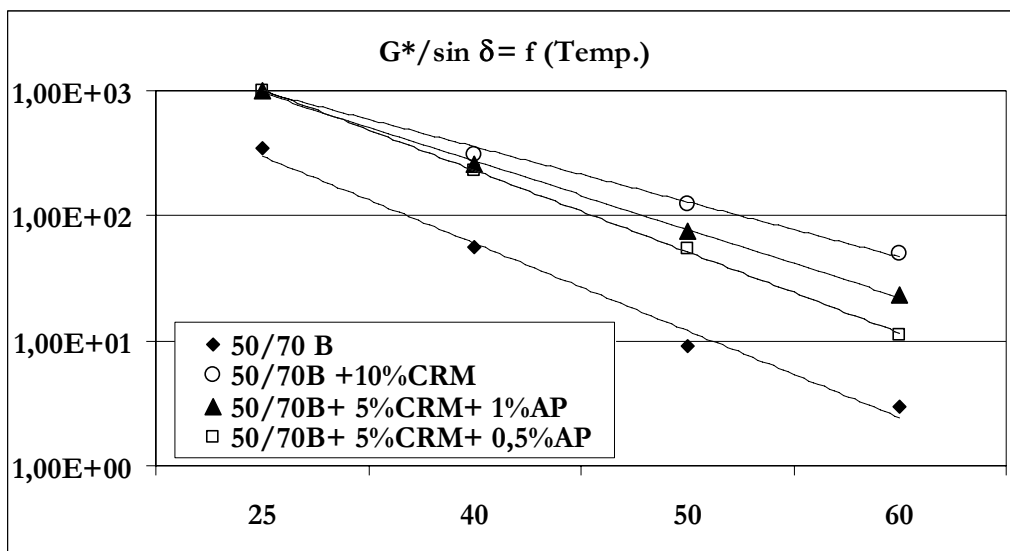


Figura 6-121:  $G^*/\sin \delta$  funzione della temperatura per formulazioni terminal blend

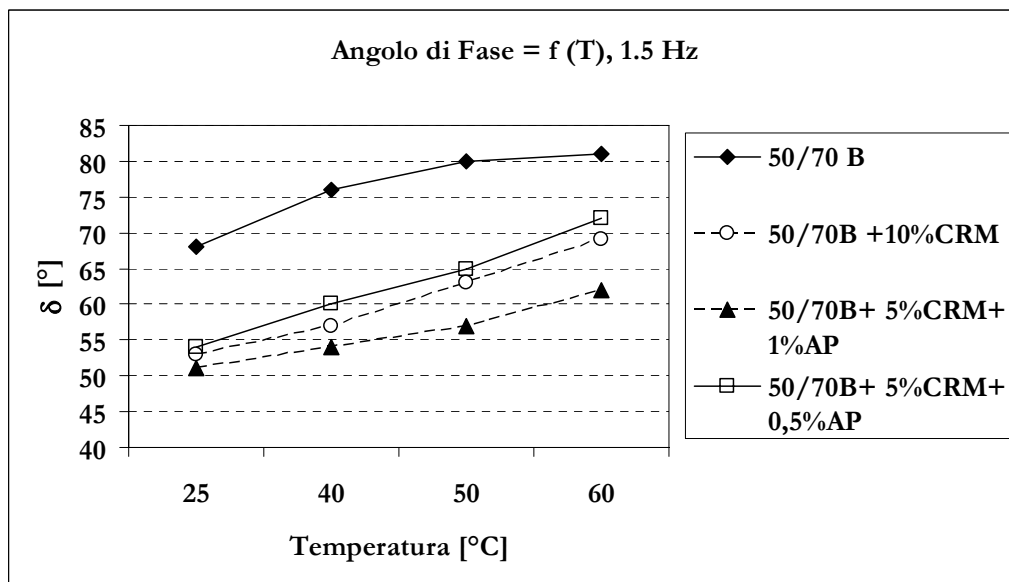


Figura 6-122: Angolo di fase funzione della temperatura per formulazioni terminal blend

Nella Figura 6-122, è interessante notare che l'effetto dell'aggiunta di acido polifosforico sull'angolo di fase è molto accentuato abbassando molto i valori di  $\delta$ . Si nota proprio un salto dallo 0.5% di AP che presenta valori molto simili alla miscela di 10%CRM all'1% di AP che abbassa l'angolo a valori sotto i  $60^\circ$  alle alte temperature. Questo può portare vantaggi sul campo, aumentando la resistenza alle deformazioni permanenti.

Ulteriori risultati sono riportati nell'Appendice 1.2 "Temperatura Limite Superiore".

#### 6.4.1.4 PERFORMANCE GRADE SUPERIORE

In conformità alla normativa SHRP è possibile attribuire ai bitumi di prova un grado di prestazione del bitume, espresso come intervallo di temperatura di impiego in opera (*Performance Grade* PG, AASHTO MP1) all'interno del quale è possibile ritenere le pavimentazioni stradali esenti da ammaloramenti attribuiti specificamente alla sola componente legante (deformazioni plastiche e rotture fragili).

Per i bitumi in esame è stato determinato il PG (Figura 6-121) riportando sullo stesso istogramma il valore della temperatura limite superiore oltre la quale il bitume non è esente da fenomeni di ormaimento.

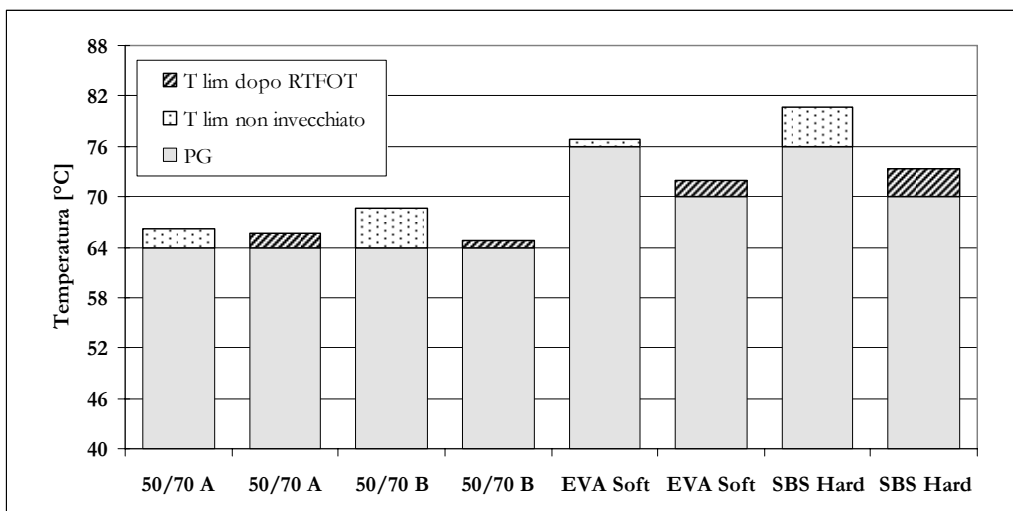
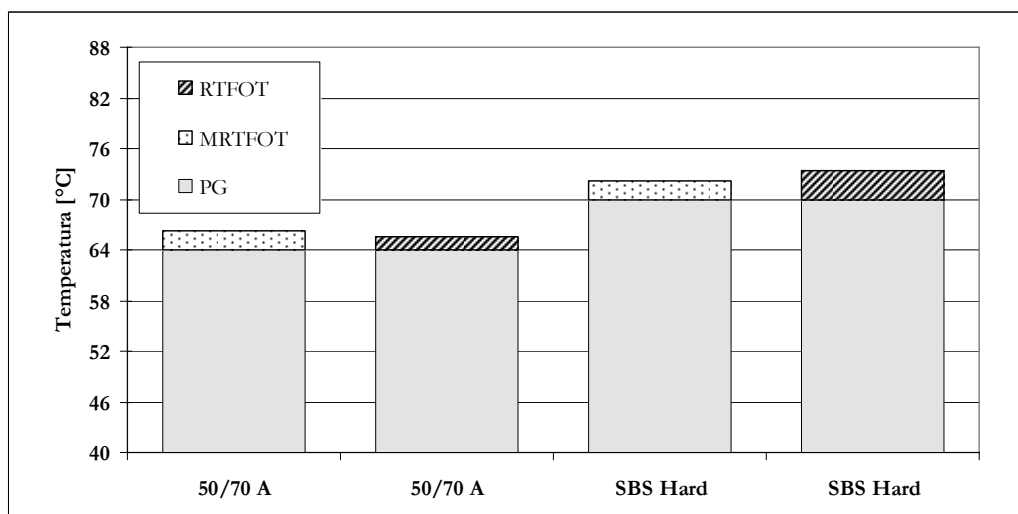


Figura 6-123: Performance Grade e Temperatura Limite per i bitumi studiati

I risultati hanno consentito di evidenziare che i valori di Performance Grade alle alte temperature risultano maggiori nei bitumi modificati (PG 70-) rispetto ai bitumi tal quali (PG 64-), nonostante una comune denominazione commerciale, in termini di penetrazione a  $25^\circ\text{C}$ .

Per ciascun bitume, la differenza fra temperatura limite e PG si mantiene sostanzialmente inalterata, anche dopo l'invecchiamento eseguito mediante RTFOT, ossia, in seguito ad invecchiamento RTFO, i valori di PG restano immutati nei bitumi non modificati, mentre decrescono (tranne in un caso) per i bitumi modificati con polimeri.

L'invecchiamento MRTFOT non ha determinato un cambiamento del Performance Grade, tanto meno una variazione significativa della "temperatura limite" (Figura 6-124), quindi in conformità alle questioni sollevate nell'incontro Eurobitume 1999 [6-7], si è constatato che effettivamente nei bitumi studiati l'uso del MRTFOT piuttosto che dell'RTFOT non ha condotto a risultati importanti.



**Figura 6-124: Performance Grade e Temperatura Limite per i bitumi invecchiati con RTFO e con MRTFOT**

L'effetto della modifica con polverino di gomma sulla temperatura limite superiore PG è stato studiato per i bitumi vergini, invecchiati RTFOT e invecchiati PAV. I risultati sono sintetizzati nelle Tabelle da 6-35 a 6-37.

Tabella 6-35: Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi non invecchiati

Bitumi vergini	70/100 A	SBS Hard	40/50 + 18% CRM	70/100 A + 18% CRM	70/100 A + 20% CRM	70/100 A + 22% CRM
PG	64	82	88	76	88	88
Temp. Limite superiore [°C]	68.7	82.7	88.5	77.6	90.0	92.0

Tabella 6-36: Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi invecchiati RTFOT

Bitumi RTFOT	70/100 A RTFOT	SBS Hard RTFOT	40/50 + 18% CRM RTFOT	70/100 A + 18% CRM RTFOT
PG	64	70	82	70
Temp. Limite superiore [°C]	66.0	74.2	84.9	70.1

Tabella 6-37: Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi invecchiati PAV

Bitumi PAV	70/100 A PAV	SBS Hard PAV	40/50 + 18% CRM PAV	70/100 A + 18% CRM PAV
PG	58	64	70	70
Temp. Limite superiore [°C]	63.0	69.4	74.8	70.5

Si osserva come l'aggiunta di polverino al bitume 70/100 amplifichi il campo di applicazione del bitume di base, estendendo la temperatura di esercizio da 64°C a 70 °C. Utilizzando una base più dura, la temperatura superiore di esercizio per il bitume (stessa % di CRM) diventa 82°C.

Riportando sullo stesso istogramma il valore della temperatura limite superiore oltre la quale il bitume non è esente da fenomeni di ormaiamento (vedi Figura 6-125), si verifica che i bitumi Asphalt Rubber presentano i valori più elevati.

Nella Figura 6-125 si illustrano anche le differenze verificate nel grado PG dei bitumi studiati dopo che questi sono stati sottoposti ad invecchiamento RTFOT e PAV. È interessante notare come i bitumi modificati (CRM e SBS) mantengono costante i valore di PG dopo RTFOT, mentre i bitumi non modificati abbassano il valore di temperatura limite dopo l'invecchiamento ossidativo.

A titolo comparativo, è stata valutata anche la temperatura limite per bitume invecchiato tramite PAV (non contemplato nella norma SHRP) dalla quale si nota una temperatura di equideformabilità inferiore rispetto a quella dei bitumi base e CRM vergini (vedi Figura 6-125 e 6-126). È curioso notare che il bitume 70/100 + 18% CRM aumenta leggermente la temperatura limite dopo PAV rispetto a quella determinata dopo RTFOT.

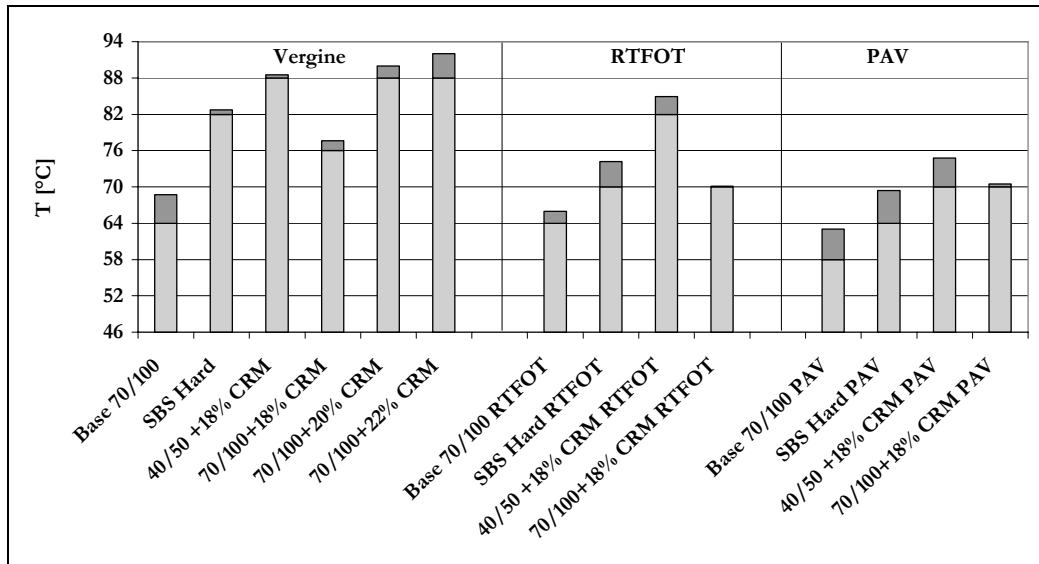


Figura 6-125: Temperature limite superiori

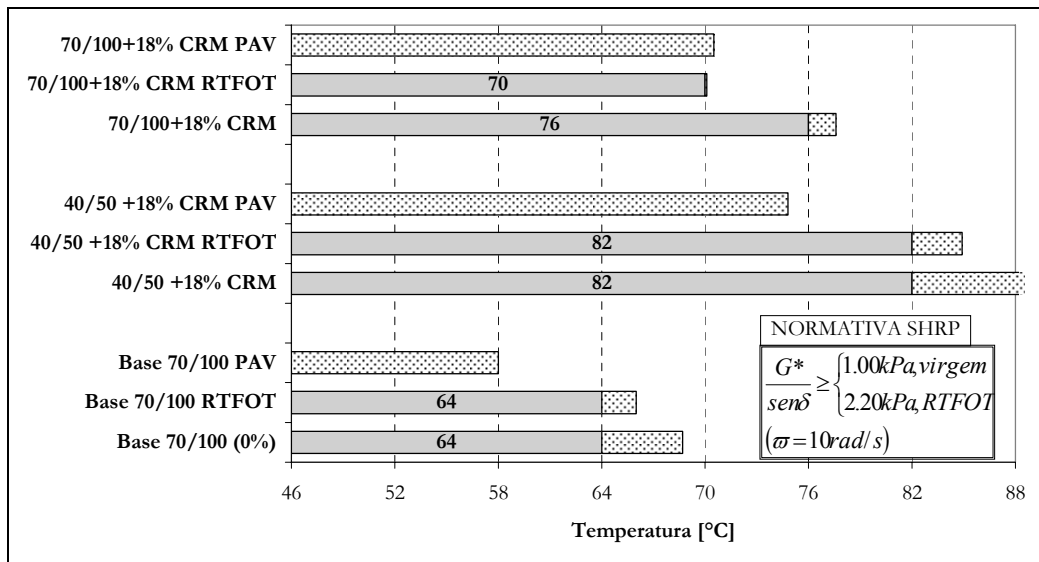


Figura 6-126: Temperature limite superiori



La Tabella 6-38 presenta uno riepilogo dei risultati ottenuti.

**Tabella 6-38: Performance Grade superiore per i bitumi studiati**

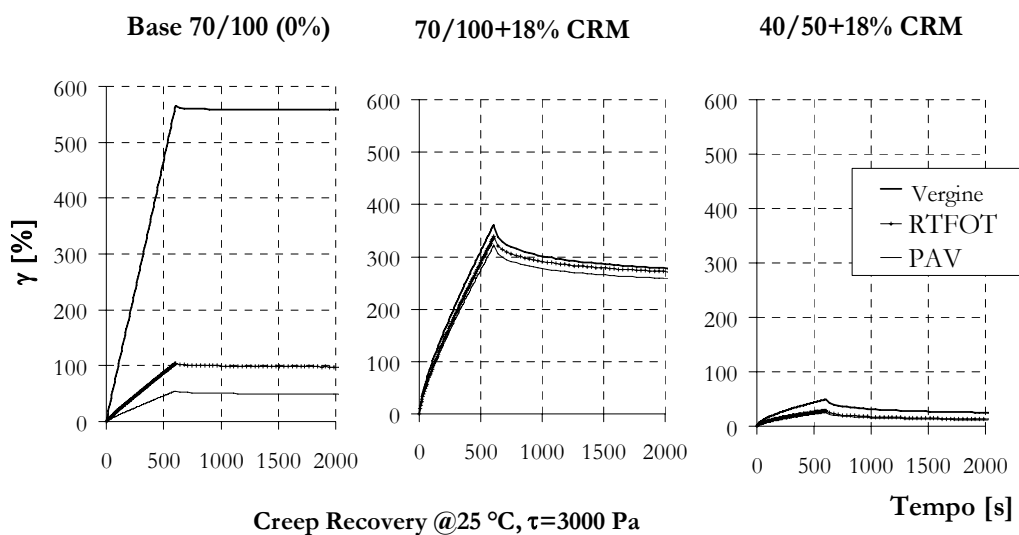
BITUME	Tal quale		RTFOT		PAV/MRTFOT	
	T limite [°C]	P.G. [°C]	T limite [°C]	P.G. [°C]	T limite [°C]	P.G. [°C]
<b>70/100 A</b>	68,7	<b>64</b>	66,0	<b>64</b>	63,1 PAV	<b>58</b>
<b>50/70 A</b>	66,2	<b>64</b>	65,6	<b>64</b>	66,2 MRTFOT	<b>64</b>
<b>50/70 B</b>	68,6	<b>64</b>	64,8	<b>64</b>	-	-
<b>EVA soft</b>	71,3	<b>70</b>	69,0	<b>64</b>	-	-
<b>SBS soft</b>	76,9	<b>76</b>	71,9	<b>70</b>	-	-
<b>SBS hard</b>	80,7	<b>76</b>	73,4	<b>70</b>	72,2 MRTFOT	<b>70</b>
<b>70/100+18% CRM</b>	77,6	<b>76</b>	70,1	<b>70</b>	70,5 PAV	<b>70</b>
<b>70/100+20% CRM</b>	90,1	<b>88</b>	-	-	-	-
<b>70/100+22% CRM</b>	92,0	<b>88</b>	-	-	-	-
<b>40/50+18% CRM</b>	88,5	<b>88</b>	84,9	<b>82</b>	74,8 PAV	<b>70</b>
<b>50/70 B+18% CRM</b>	82,3	<b>82</b>	-	-	-	-
<b>50/70 B+10% CRM</b>	76,1	<b>76</b>	-	-	-	-
<b>50/70B+5% CRM+1%AP</b>	73,2	<b>70</b>	-	-	-	-
<b>50/70B+5% CRM+0,5%AP</b>	71,4	<b>70</b>	-	-	-	-

## 6.4.2 Analisi Statica

In una applicazione in condizioni statiche con controllo dello sforzo di taglio costante applicato ( $\tau = 3000$  Pa) viene eseguita una prova di *creep-recovery*, su tutte le miscele in esame, a 25°C, con misura in continuo della deformazione di scorrimento ( $\gamma$  %) per un tempo di 600 secondi. Alla rimozione dello sforzo di taglio, l'apparecchiatura è in grado di misurare il recupero di deformazione, valutato nel periodo di 3600 secondi.

Le prove di creep-recovery condotte su bitumi CRM alla temperatura di 25°C (Figura 6-127) consentono di quantificare la suscettibilità dello stesso bitume alla deformazione, riconoscendo una componente viscoelastica ed una propriamente viscosa e le capacità di recupero nel tempo delle stesse deformazioni.

La presenza del polverino denota il carattere di bitume modificato che esalta le componenti elastiche richieste per le applicazioni nei conglomerati bituminosi stradali. Il bitume base è caratterizzato già a 25°C da un comportamento proprio di un materiale viscoso. La presenza di gomma aumenta significativamente la componente elastica del bitume.



**Figura 6-127: Prove di creep-recovery di bitumi CRM**

La prova evidenzia come l'invecchiamento comporti una variazione delle entità e dei tempi di recupero dello scorrimento al quale è stato sottoposto il bitume di prova.

In particolare il bitume 70/100 è fortemente sensibile all'invecchiamento, passando a presentare valori di deformazione circa 5 volte più piccoli per lo stesso sforzo di taglio applicato, subito dopo RTFOT.

A 40°C i bitumi modificati con il polverino di gomma presentano risposte molto simili fra di loro, contrariamente a quello che succedeva a 25°C. La Figura 6-123 evidenzia l'avvicinamento delle curve di creep per i bitumi 70/100A + 18% CRM e 40/50 + 18%CRM. Dal momento in cui la base 70/100 è più soft ci si aspettava che, per la stessa percentuale di CRM, il bitume 70/100A + 18% CRM fosse più deformabile.

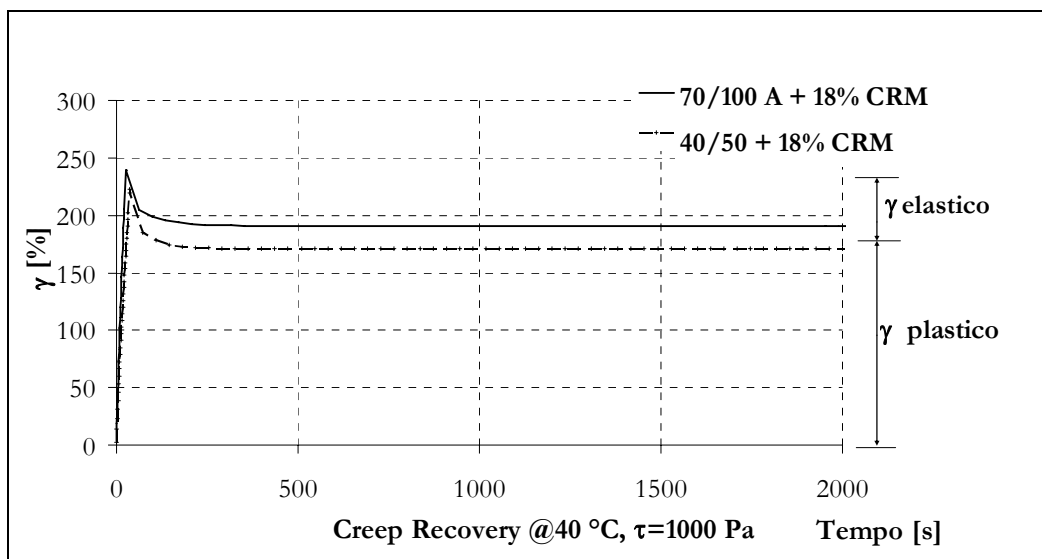


Figura 6-128: Prove di creep-recovery di bitumi CRM.

Questa prova è particolarmente adatta allo studio della reologia dell'Asphalt Rubber dato che il modo continuo di questa tipologia di prova, sottoponendo il materiale ad un lento processo deformativo, accentua i fenomeni di interazione inter-molecolare, dando modo di cogliere con forte evidenza gli effetti correlati alla sua struttura interna.

Inoltre, nella fase di recovery che segue quella di carico, è possibile monitorare la capacità di recupero della deformazione ed in sostanza misurare per via diretta le componenti reversibile ed irreversibile, consentendo di far risaltare le proprietà dei leganti modificati, per i quali le componenti elastiche sono rilevanti grazie alla presenza del polimero o del CRM.

Tutti i risultati sono riportati nell'Appendice 1.5 "Prove di Creep".

### 6.4.3 Zero Shear Viscosity

La Zero Shear Viscosity (ZSV), denominata anche "prima viscosità Newtoniana" o "viscosità assoluta", è un indicatore in grado di quantificare il contributo parziale del bitume nei riguardi della resistenza all'ormaiamento delle pavimentazioni stradali.

Tale grandezza, nota da tempo in campo reologico, ha recentemente assunto una maggiore valenza quale parametro discriminante fra i bitumi stradali ed, in particolare, fra bitumi tal quali e bitumi modificati, sulla scia della nutrita esperienza belga e statunitense.

Da alcuni anni il comitato tecnico TC336-TG1 del CEN riguardante i bitumi stradali ha individuato proprio nella ZSV la caratteristica per qualificare i bitumi nel campo delle temperature di esercizio intermedie ed elevate. Le redigende normative CEN, aggiornate al mese di Agosto 2005, contemplano, fra altri, il seguente documento: “Bitumen and Bituminous binders: Determination of Zero-Shear Viscosity (ZSV) using a shear stress rheometer. Creep mode “ [CEN TC336 WI TG1 068-prEN 15325]. Tuttavia le esperienze preliminari alla definizione della normativa non hanno tenuto esplicitamente conto della applicabilità della prova al caso dei bitumi modificati con polverino di gomma riciclata (CRM).

#### 6.4.3.1 LA NORMA CEN PREN15325 PER LA DETERMINAZIONE DELLA ZSV

Questo documento è preparato dal CEN TC336 WG1-TG1 e si inserisce nell'ambito della caratterizzazione alle alte temperature d'esercizio dei materiali stradali.

Lo scopo è la determinazione della Zero Shear Viscosity (ZSV) di bitumi e leganti bituminosi propriamente nelle condizioni di temperatura in cui  $50 \text{ Pa} \cdot \text{s} < \eta_0 < 50000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  e si avvale del Dynamic Shear Rheometer quale strumento per l'esecuzione della misura. Una volta raggiunto lo stato di flusso stazionario, il rapporto fra tensione applicata e velocità di deformazione definisce la viscosità di stato stazionario SSV (steady-state viscosity). Alle basse tensioni applicate od alle basse velocità di deformazione la SSV tende generalmente ad un valore costante, la zero-shear viscosity ZSV definita dal simbolo  $\eta_0$  ed espressa in Pascal per secondo [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ] o in Poise.

La norma richiede che lo strumento da utilizzare nella determinazione della ZSV sia, dunque, un reometro a sforzo di taglio con possibilità di controllo della temperatura che deve avvenire con una precisione di  $0.1^\circ\text{C}$ . La geometria da assumere è del tipo piatto-piatto (parallel plate) con diametro preferibilmente maggiore o uguale a 20 mm e gap (distanza fra i piatti) pari a 2 mm.

Ciò che di fatto è una prova di creep, manifesta una prima difficoltà nella definizione del valore di tensione corretto da imporre, generalmente inferiore a 5000 Pa per bitumi naturali e compreso fra 10 e 50 Pa per i bitumi modificati. Al fine di rimanere all'interno della regione viscoelastica lineare, è preferibile che la tensione applicata sia comunque la più bassa possibile.

Specialmente per leganti molto viscosi la selezione del valore di tensione dipende dall'esperienza e dalla conoscenza del bitume in esame.

Nel caso di bitumi modificati:

---

1. La tensione deve essere scelta in modo da risultare interna al Newtonian plateau;
2. La velocità di deformazione dovrebbe essere maggiore di  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

Nel caso di bitumi ad alta modifica può, però, essere impossibile soddisfare entrambe le condizioni. Questo perché tali bitumi non raggiungono un regime stazionario al di sopra dei 10 Pa. Per tensioni inferiori però la velocità di deformazione è in genere dell'ordine di  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  per cui risulta inferiore al limite suggerito.

In generale quindi, anche nel caso di bitumi modificati hard, anziché diminuire la tensione applicata, la prova può essere effettuata imponendo una tensione di 50 Pa. Occorre però ricordare sempre che in questo caso la viscosità potrebbe non essere interna al Newtonian plateau.

In alternativa al decremento della tensione applicata si può incrementare la temperatura di prova allo scopo di ridurre il carattere non-Newtoniano del legante. La temperatura di riferimento per questa prova è però pari a  $60^\circ\text{C}$  ed è preferibile confrontare i diversi leganti a questa stessa temperatura.

La normativa prevede che il tempo di creep (cioè la durata della prova) sia di 1 ora per i bitumi naturali e di 4 ore per quelli modificati con polimeri. Queste durate sono basate sull'esperienza e sono in genere sufficientemente lunghe a garantire lo stato di flusso stazionario. Si può quindi provare che per questi tempi la viscosità istantanea tende ad un valore costante.

Raggiunti i tempi di creep previsti, se la viscosità istantanea cresce ancora più del 5% in un tempo di 15 minuti, il tempo di creep dovrebbe essere esteso fino ad un massimo di 8 ore. I valori consigliati dal CEN per eseguire la determinazione della ZSV sono riportati nella seguente tabella:

**Tabella 6-39: Parametri per l'esecuzione della prova di creep**

<b>Tipo di Bitume</b>	<b>Stress s, Pa</b>	<b>Tempo t, ore</b>	<b>Temperatura T, °C</b>
Non modificato	50	1	60
Modificato Polimeri	10-50	4	60

In ogni caso la normativa suggerisce di calcolare la viscosità media durante gli ultimi 15 minuti di prova. Se il modulo di compliance  $J$  è misurato in  $\text{Pa}^{-1}$ , questa viscosità media può essere ottenuta come segue:

$$\eta_i = \frac{\Delta t}{\Delta J} = \frac{900}{(J_{end} - J_{15})} \quad (6-3)$$

#### 6.4.3.2 PROVE DI ZSV PER BITUMI CRM

Per quanto concerne il calcolo della ZSV nel caso del bitume CRM (con il 18% di polverino di gomma), l'approccio metodologico all'esecuzione della prova, dettato dalla normativa, può riscontare le maggiori incertezze. Il comportamento reologico di questo materiale, per il quale la letteratura su indagini ZSV eseguite risulta piuttosto limitata, può essere influenzato da problemi di omogeneità, per l'elevato contenuto di gomma e, dunque, da possibili problemi di ripetibilità.

Sperimentalmente occorrono numerose prove per perfezionare la procedura e per raggiungere la stazionarietà del flusso ai fini del calcolo della viscosità. Più ripetizioni evidenziano difficoltà operative con valori inaccettabili a fini di classificazione. I grafici seguenti evidenziano le criticità osservate.

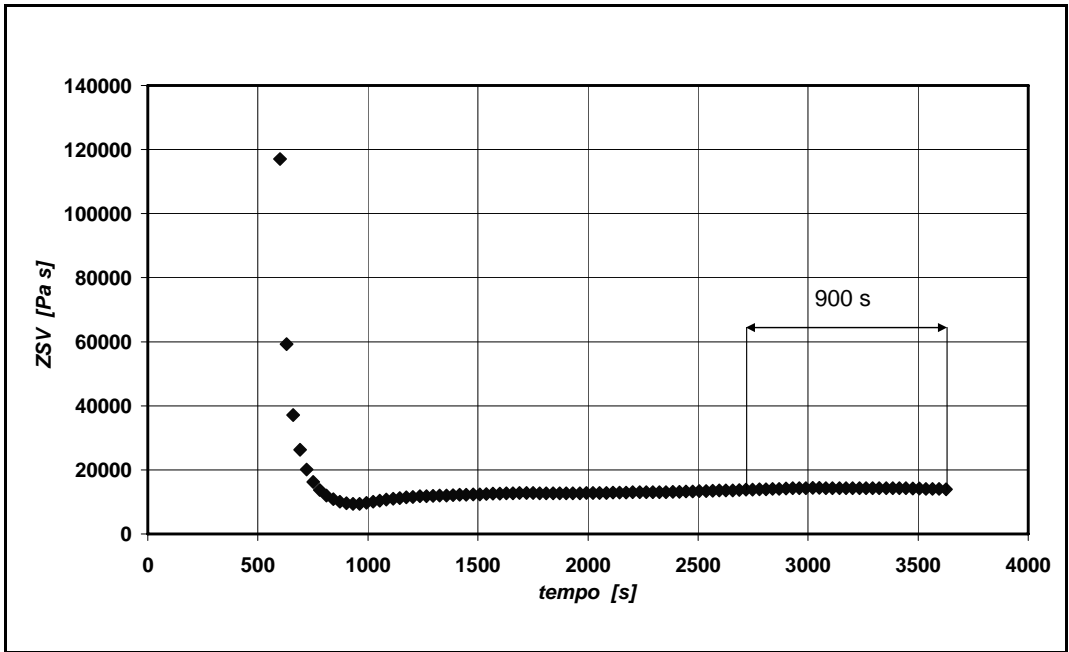


Figura 6-129: Prima ripetizione di una prova di viscosità di bitume 18% CRM

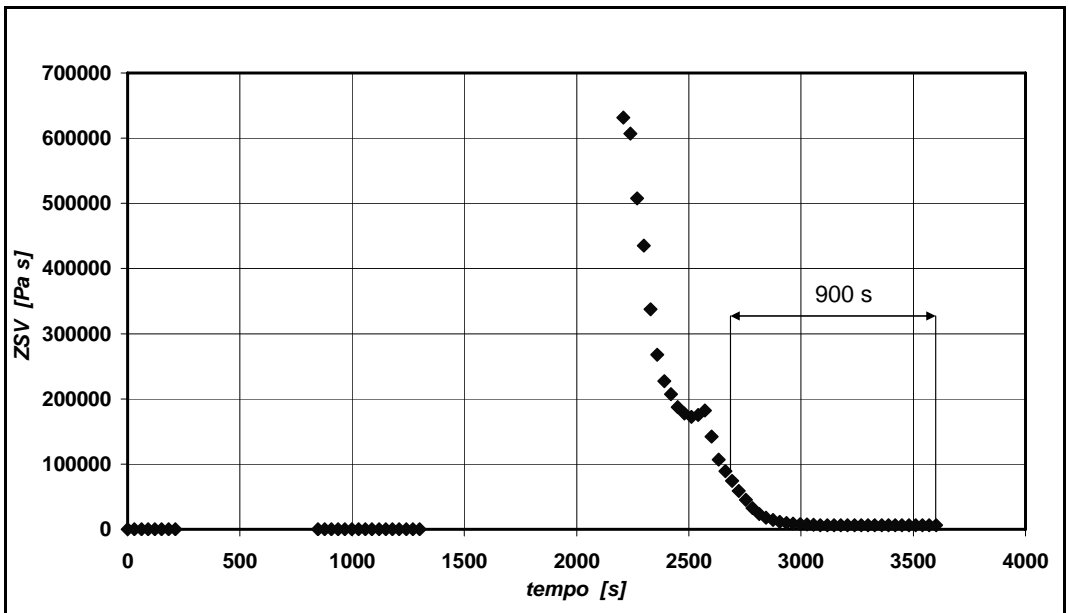


Figura 6-130: Seconda ripetizione di una prova di viscosità di bitume 18% CRM

Nonostante la necessita di approfondire l'approccio di indagine ZSV per bitumi CRM, di per sé il valore di viscosità ZSV fornisce importanti indicazioni relativamente alla resistenza all'ormaiamento delle pavimentazioni stradali.

Le misure condotte su bitumi naturali, modificati con polimeri e CRM di stessa classe di penetrazione evidenziano ordini di grandezza completamente differenti di ZSV, per i quali altrettanto evidenti sono le diverse sensibilità a fenomeni di ormaiamento in opera.

**Tabella 6-40: Confronto fra penetrazione e ZSV dei diversi tipi di bitume**

<b>Tipo di bitume</b>	<b>Naturale</b>	<b>SBS</b>	<b>CRM</b>
Penetrazione standard [dmm]	52	55	50/70
ZSV [Pa s]	130	570889	14037

Si può quindi dedurre che i valori di ZSV sono in grado di classificare i bitumi fornendo una misura della differente velocità di deformazione sotto carichi statici. Questo significa che a parità di carico e di tempo di applicazione, il bitume modificato con polverino si deforma in maniera quasi impercettibile rispetto al bitume naturale.

Come per i PMB, anche per i bitumi CRM la ZSV è fortemente sensibile alla frazione di molecole polimeriche ad alto peso molecolare ed alla concentrazione di polimero presente. Per queste ragioni è importante che la concentrazione di polimero del provino sia uguale alla concentrazione del campione di bitume.

Nella geometria a piatti paralleli il provino è sottoposto ad una deformazione di taglio non uniforme: per un bitume comunque modificato a forte viscosità il valore misurato può risentire della distribuzione non uniforme del polimero all'interno del provino.

In altre parole il valore di ZSV è severamente dipendente dalla concentrazione e dalla distribuzione del polimero all'interno del provino.

Per i bitumi CRM più prove permettono di calcolare un coerente valore di Zero Shear Viscosity, in quanto il materiale raggiunge lo stato stazionario, ma è durante la prova che si rilevano le anomalie più marcate.



Si ritiene quindi che il parametro di ZSV sia un buon indicatore, utile nella caratterizzazione dei bitumi, ma allo stesso tempo, la metodologia indicata nella norma, debba essere adeguata per permettere di ricavare valori più precisi, specificatamente nei confronti dei bitumi CRM.

I risultati delle prove di ZSV sono riportate più dettagliatamente nell' Appendice 1.6 "Prove di Zero Shear Viscosity".

## 6.5 Prove reologiche con BBR

Come già illustrato nel Capitolo 5, le prove effettuate con il BBR sono state ideate nell'ambito delle ricerche SHRP per sottoporre provini prismatici di bitume, sollecitati a flessione, a prove di *creep*, a basse temperature.

Secondo quanto indicato nell'ambito del sistema SHRP la prova BBR viene impiegata come metodo di controllo in laboratorio sui bitumi della fessurazione di origine termica, in quanto l'applicazione di un carico costante consente di simulare le tensioni che gradualmente si generano e crescono nella pavimentazione al diminuire della temperatura.

I criteri per l'accettazione impongono i seguenti limiti:

1. modulo di rigidezza del bitume  $S$ , valutato al tempo  $t = 60$  secondi, inferiore a 300 MPa in corrispondenza della temperatura minima di progetto aumentata di 10°C;
2. grado di elasticità  $m$ , valutato in corrispondenza dello stesso istante e della stessa temperatura, maggiore di 0,3.

A titolo esemplificativo, la Tabella 6-41 riporta i risultati ottenuti per il bitume Asphalt Rubber 70/100 + 18% CRM.

**Tabella 6-41: Risultati della prova BBR per il bitume 70/100 A + 18% CRM**

Temperatura °C	Non Invecchiato			Dopo PAV a 100°C		
	Stiffness MPa	m-value	Risultato	Stiffness MPa	m-value	Risultato
-36	534	0.130	Fail	-	-	-
-30	182	0.230	Fail	-	-	-
-24	132	0.321	Pass	109	0.274	Fail
-18	60	0.463	Pass	96	0.352	Fail
-12	-	-	-	55	0.383	Pass

I dati ottenuti sono stati successivamente elaborati per determinare la temperatura massima negativa a cui i bitumi sono in grado di resistere. Si ricorda che il grado PG inferiore è dato da questa temperatura in intervalli di 6, aggiungendo 10°C.

Specificamente per i bitumi modificati con il polverino di gomma si è verificato che l'effetto del polverino di gomma sul m-value dipende altamente dalle proprietà del bitume base, ossia il polverino di gomma non è particolarmente efficace nell'aumento del m-value dei leganti.

Questo studio ha indicato che il polverino di gomma può essere utilizzato in un ampio intervallo di percentuali, senza cambiare il grado di temperatura inferiore PG del legante. Tuttavia, la bibliografia riporta alcuni studi dove l'uso di determinate combinazioni di granulometria di polverino ha migliorato o compromesso il grado inferiore PG. In generale è altamente consigliabile l'utilizzo di polverino di gomma per migliorare le prestazioni alle basse temperature ma soltanto se progettato e valutato con attenzione.

Nell'Appendice 1.7 “Risultati BBR - Temperatura Limite Inferiore” si presentano tutti i risultati di queste prove.

## 6.5.1.1 PERFORMANCE GRADE INFERIORE

La Tabella 6-38 presenta uno riepilogo dei risultati ottenuti.

**Tabella 6-42: Performance Grade inferiore per i bitumi studiati**

BITUME	Tal quale		PAV	
	T limite	P.G.	T limite	P.G.
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
<b>50/70 A</b>	-13	<b>-22</b>	-12	<b>-22</b>
<b>50/70 B</b>	-14	<b>-22</b>	-13	<b>-22</b>
<b>EVA soft</b>	-17	<b>-22</b>	-11	<b>-16</b>
<b>SBS soft</b>	-15	<b>-22</b>	-6	<b>-16</b>
<b>SBS hard</b>	-17	<b>-22</b>	-14	<b>-22</b>
<b>70/100+18% CRM</b>	-25	<b>-34</b>	-22	<b>-28</b>

## 6.6 Inquadramento dei Bitumi Asphalt Rubber nel mercato italiano

Per poter inquadrare i materiali Asphalt Rubber studiati nella presente tesi si è deciso di confrontarli con quanto definito nell' "Articolo 3 per Leganti Bituminosi - Loro Modificanti ed Additivi" della Società Autostrade del 2004.

Ovviamente i leganti Asphalt Rubber hanno delle proprietà convenzionali molto particolari per le quali difficilmente rientrerebbero nei limiti stabiliti da questo articolo, data l'elevata viscosità e bassa penetrazione. Per questo è nata una norma apposita per questi leganti, la ASTM D 6114.

In questa Tesi si è evidenziato come i bitumi CRM possano essere caratterizzati e comparati con altri bitumi modificati con ricorso a prove reologiche o altrimenti convertendo i risultati delle prove convenzionali in curve di viscosità (vedi § 6.3.4).

A titolo esemplificativo si riportano le Tabelle 6-43 e 6-44 (data la bassa penetrazione di questi leganti), estratti da questo articolo della Società Autostrade. Nelle tabelle si indicano 10 caratteristiche per i bitumi "Hard".

Si deve rientrare nei limiti per almeno 5 caratteristiche su 10 ed è sempre obbligatorio il rispetto dei limiti relativi a: viscosità dinamica a 160°C, penetrazione, punto di rammollimento, ritorno elastico a 25°C e stabilità allo stoccaggio.

**Tabella 6-43: Bitumi con modifica Hard per conglomerati bituminosi ad alta resistenza a fatica per strati di base**

Caratteristiche	Unità	Metodo di prova	Valore
Penetrazione a 25°C	0,1 mm	EN1426 CNR24/71	50-70
Punto di rammollimento	°C	EN1427 CNR35/73	>70
Punto di rottura (Fraass)	°C	EN12593 CNR43/74	<-12
Viscosità dinamica a160°C,gradiente di velocità $\dot{\gamma}=10s^{-1}$	Pa*s	EN 13702-2	>0,1
Ritorno elastico a 25°C, 50mm/min	%	CNR44/74	>80
Stabilità allo stoccaggio, 3gg, 180°C	°C	EN 133399	<3
Resistenza a fatica $G*\sin\delta$	Kpa	SHR B-003	>9
Perdita per riscaldamento(volatilità) a163°C		CNR54/77	<0,8
Penetrazione residua a 25°C	%	EN1426 CNR24/71	>40
Incremento del Punto di rammollimento	°C	EN1427 CNR35/73	<5

**Tabella 6-44: Bitumi con modifica Hard per sigillature e giunti tamponi**

Caratteristiche	Unità	Metodo di prova	Valore
Penetrazione a 25°C	0,1 mm	EN1426 CNR24/71	20-40
Punto di rammollimento	°C	EN1427 CNR35/73	>60
Punto di rottura (Fraass)	°C	EN12593 CNR43/74	<-10
Viscosità dinamica a160°C,gradiente di velocità $\dot{\gamma}=10s^{-1}$	Pa*s	EN 13702-2	>0,7
Ritorno elastico a 25°C, 50mm/min	%	CNR44/74	>80
Stabilità allo stoccaggio, 3gg, 180°C	°C	EN 133399	<4
Perdita per riscaldamento(volatilità) a163°C		CNR54/77	<0,8
Penetrazione residua a 25°C	%	EN1426 CNR24/71	>15
Incremento del Punto di rammollimento	°C	EN1427 CNR35/73	<10

Confrontando queste caratteristiche con i bitumi Asphalt Rubber studiati nell'ambito di questa Tesi si verifica che i leganti non rientrerebbero in nessuna tabella di specifiche, questo nonostante la performance superiore evidenziata nella presente indagine rispetto, ad esempio, al bitume studiato SBS soft che rientrerebbe nelle specifiche della tabella 6-43.

Così si è optato per verificare se i bitumi studiati rientrano nei fusi di accettazione reologici definiti nello stesso articolo.

### 6.6.1 Fusi di Accettazione

Sempre secondo l'articolo 3 della Società Autostrade, i bitumi hard devono inoltre essere sottoposti a prova ReoDin (Metodologia Prova Interna CS-05) mediante reometro dinamico rotazionale (Dynamic Shear Rheometer).

I valori di  $G^*$  (modulo complesso) e di  $\delta$  (angolo di fase) devono essere contenuti nei fusi qui riportati.

**Tabella 6-45: Fuso di accettazione ReoDin**

Temp. (°C)	G Inf (Pa)	G Sup (Pa)	$\delta$ Inf (°)	$\delta$ Sup (°)
5	3000000	7000000	2	10
10	2500000	6000000	6	16
15	1800000	4500000	11	30
20	900000	2800000	19	48
25	330000	1500000	28	61
30	120000	700000	37	66
35	50000	320000	42	68
40	24000	150000	45	69
45	11000	80000	46	70
50	5400	42000	46	70
55	3000	23000	47	71
60	1600	13000	48	72
65	900	8000	50	74
70	500	5000	52	78
75	300	3000	54	83
80	160	1800	58	87

Così, sono stati elaborati, per ogni bitume, le *Curve di Caratterizzazione Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$* , ad una frequenza di sollecitazione prossima a 10 rad/s (le prove sono state effettuate con frequenza di 9.23 rad/s = 1.47 HZ) e raffrontati con i fusi di accettazione della Tabella 6-45.

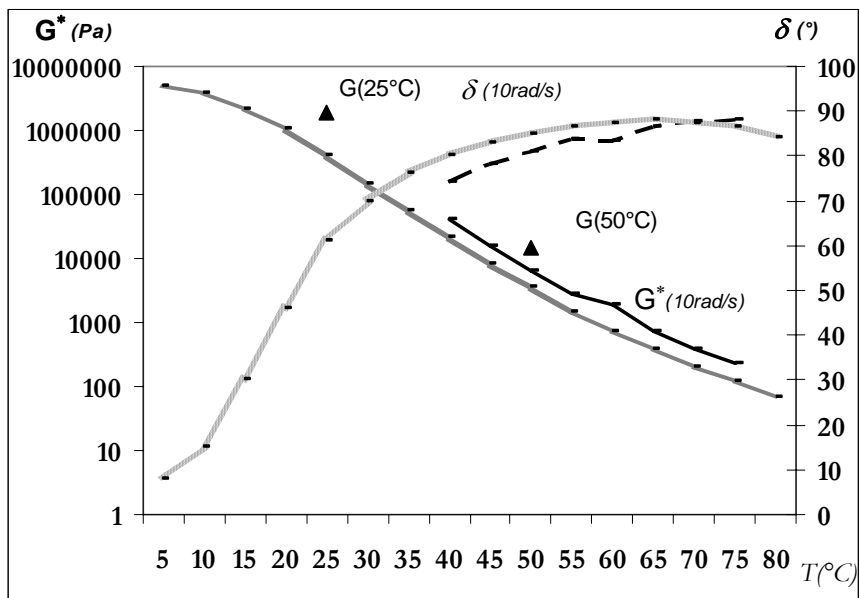


Figura 6-131: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume 50/70 B non modificato (fuso di accettazione bitume base)

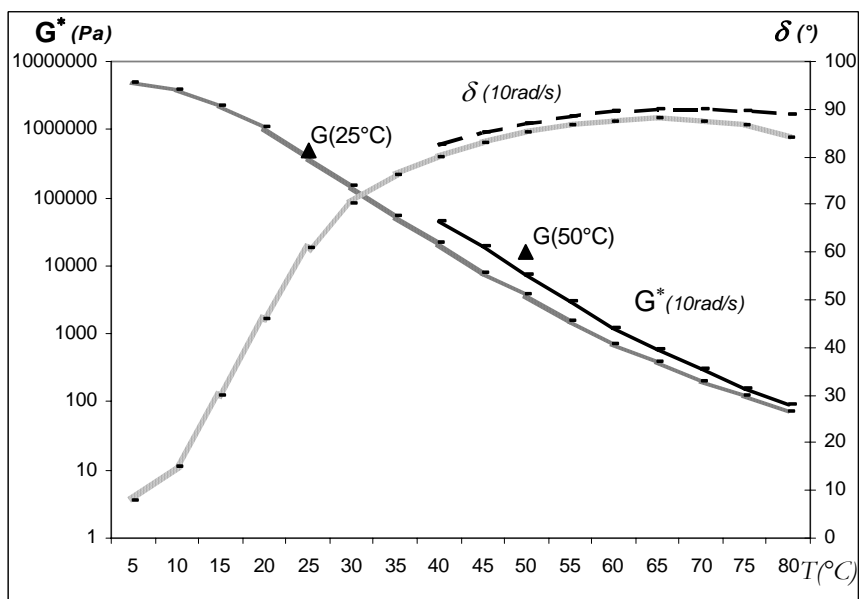


Figura 6-132: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume 50/70 A non modificato (fuso di accettazione bitume base)

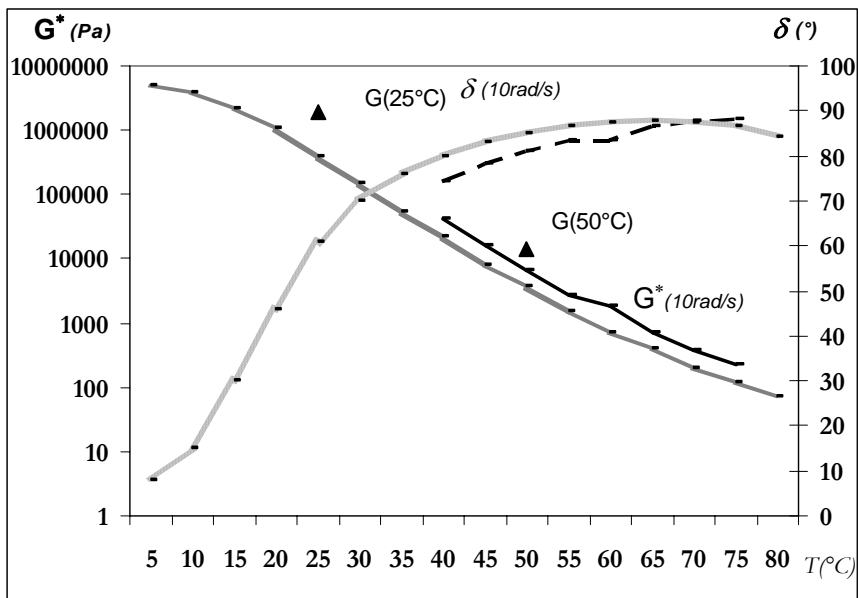


Figura 6-133: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume 70/100 A non modificato (fuso di accettazione bitume base)

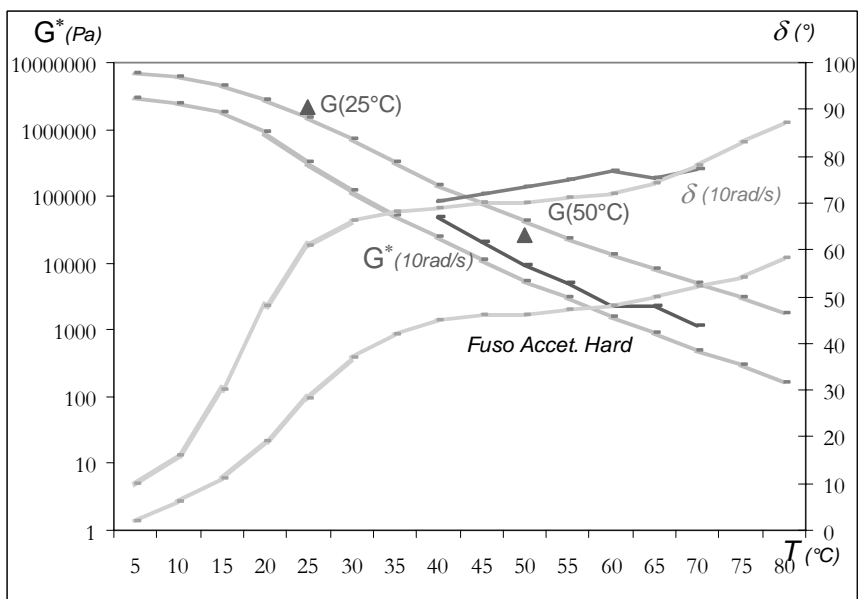


Figura 6-134: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume Asphalt Rubber 70/100 + 18% CRM (fuso di accettazione hard)

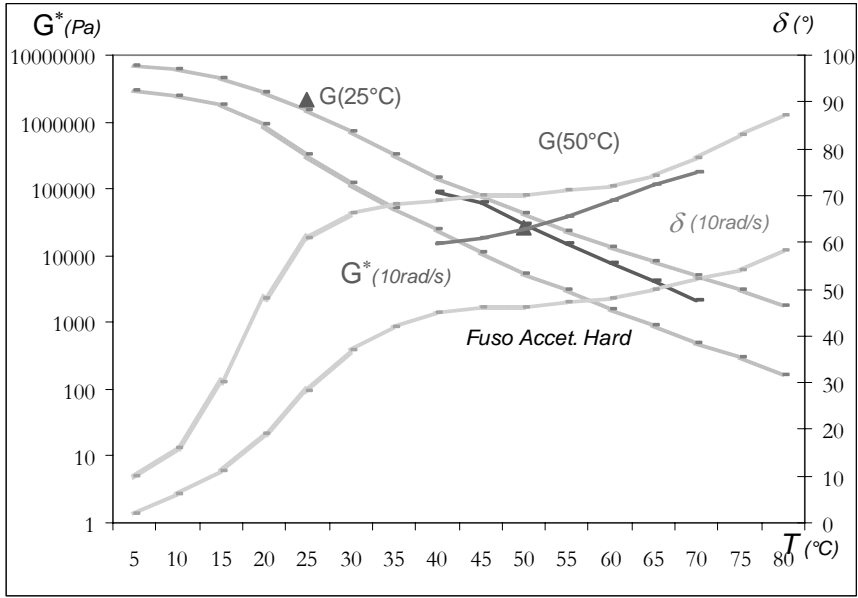


Figura 6-135: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume Asphalt Rubber 70/100+20% CRM (fuso di accettazione hard)

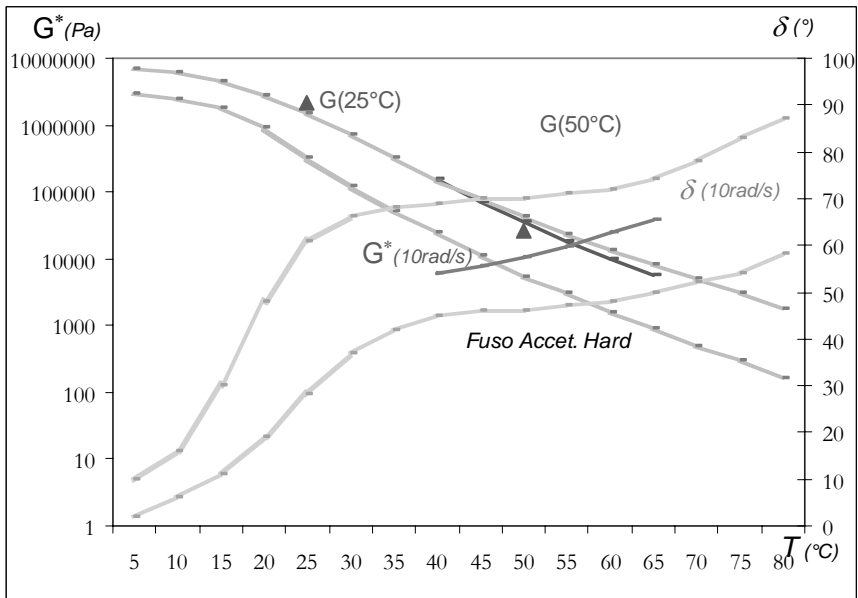


Figura 6-136: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume Asphalt Rubber 40/50 + 18% CRM (fuso di accettazione hard)



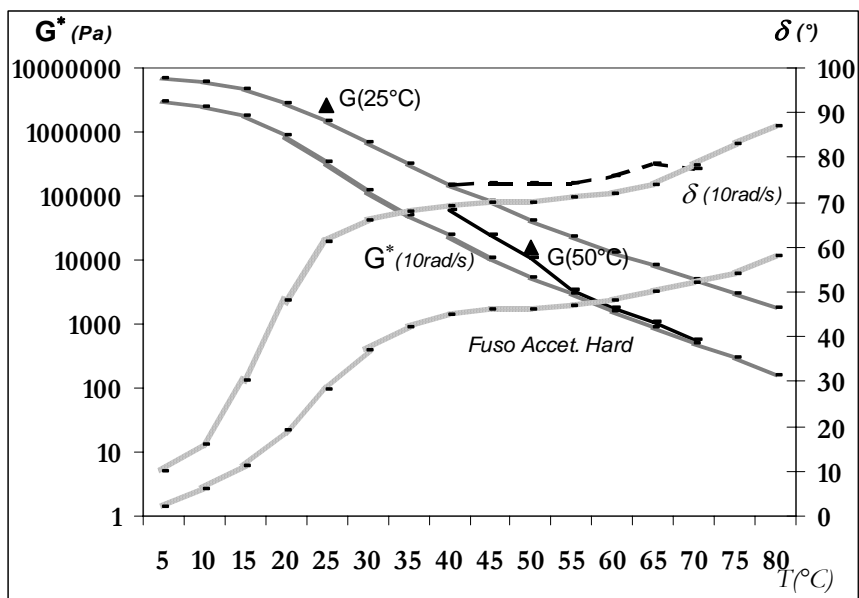


Figura 6-137: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume EVA soft (fuso di accettazione hard)

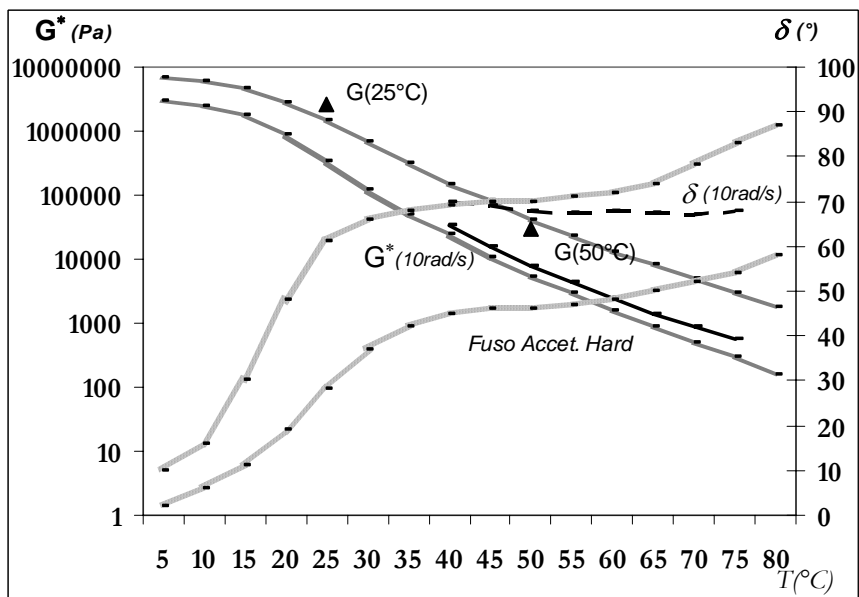


Figura 6-138: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume SBS Soft (fuso di accettazione hard)

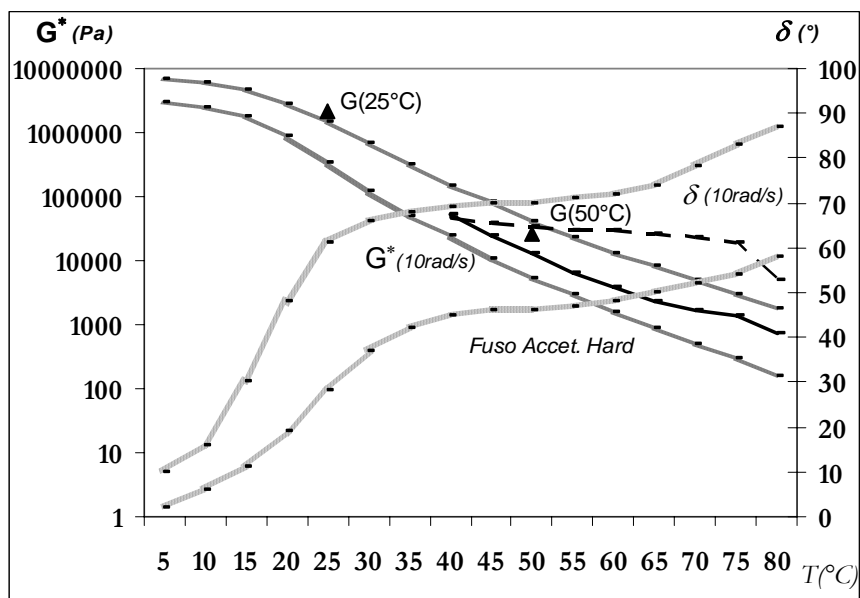


Figura 6-139: Curva Modulo Complesso  $G^*$  – Angolo di Fase  $\delta$  in funzione della temperatura per il bitume SBS Hard (fuso di accettazione hard)

Si è verificato che per quanto riguarda l'analisi reologica i leganti Asphalt Rubber rispettano le esigenze da capitolato. È già stato ampiamente discusso in questa tesi che un progettista quando sceglie questo tipo di legante deve lasciar da parte le formulazioni e “ricette” tradizionali (ad esempio per utilizzare 9% di legante in un conglomerato piuttosto che 4,5%) e utilizzare altre metodologie per valutare la qualità del legante prima di verificarla in servizio.

Tutti i risultati sono riportati più dettagliatamente nell'Appendice 1.8 “Fusi di Accettazione”.

### 6.6.2 Master Curve

La curva maestra è quella costruzione grafico-analitica che, sfruttando un principio basilare di corrispondenza tra effetti prodotti sulle proprietà reologiche dei mezzi viscoelastici da variazioni del tempo di carico e dalla temperatura, consente di descrivere il comportamento del materiale su un intervallo temporale molto ampio, altrimenti non copribile per via unicamente strumentale.

Si presentano le curve maestre per ogni bitume studiato calcolate con il PSU Model, utilizzando i dati delle prove DSR e BBR.

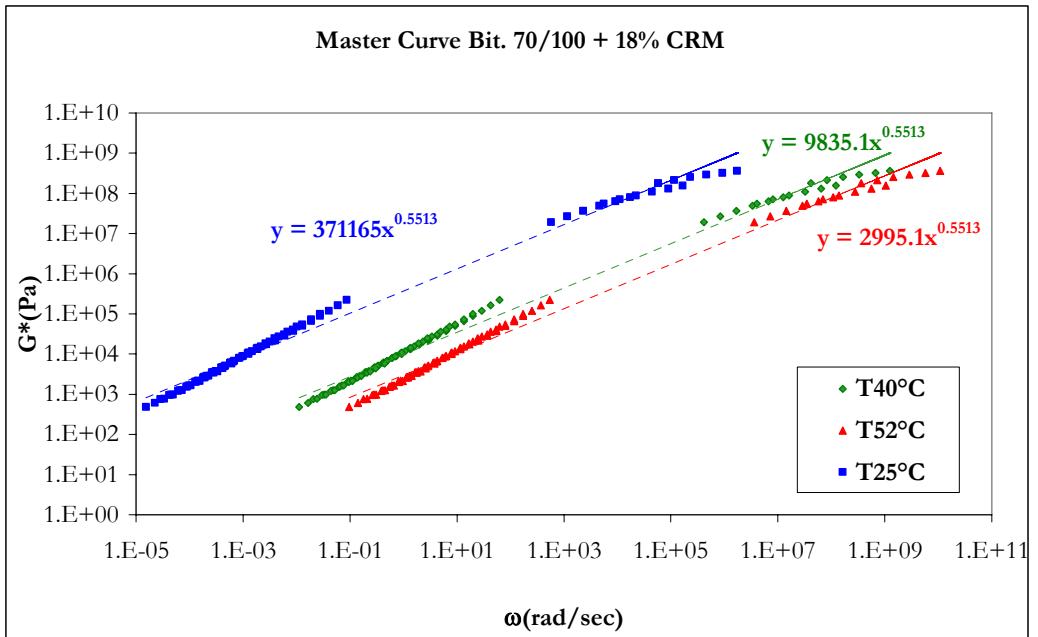


Figura 6-140: Master Curve per il bitume 70/100 + 18 %CRM

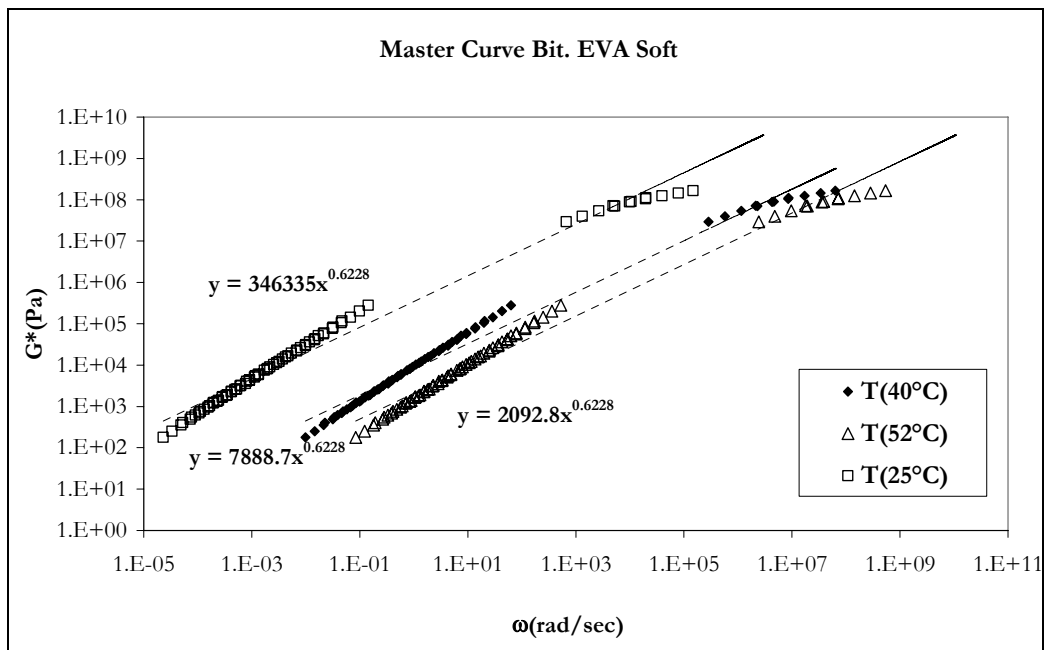


Figura 6-141: Master Curve per il bitume EVA Soft

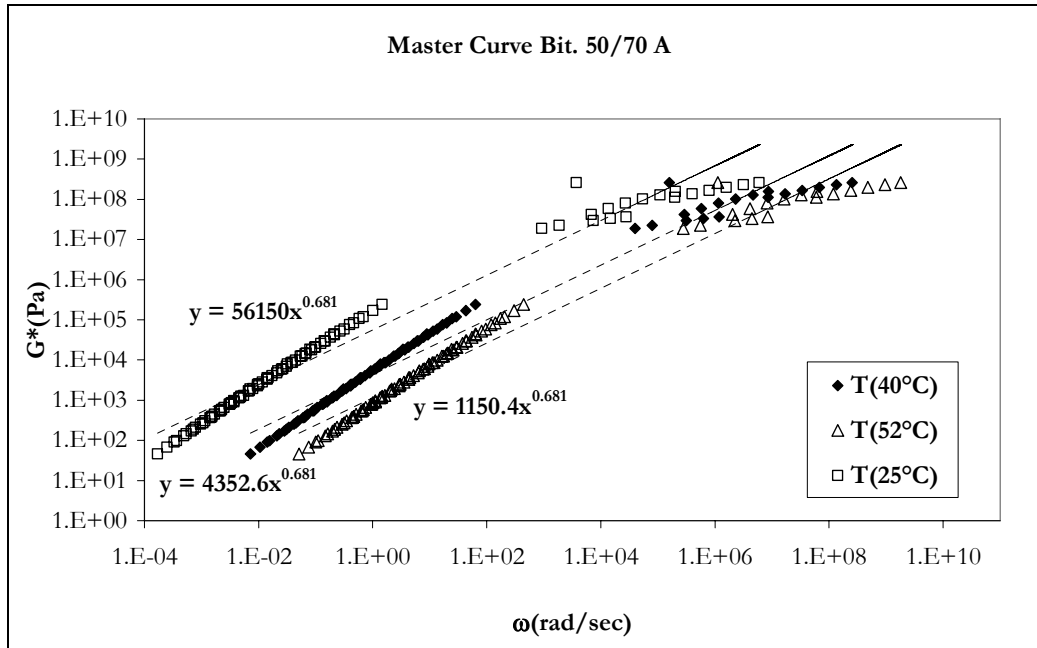


Figura 6-142: Master Curve per il bitume 50/70 A

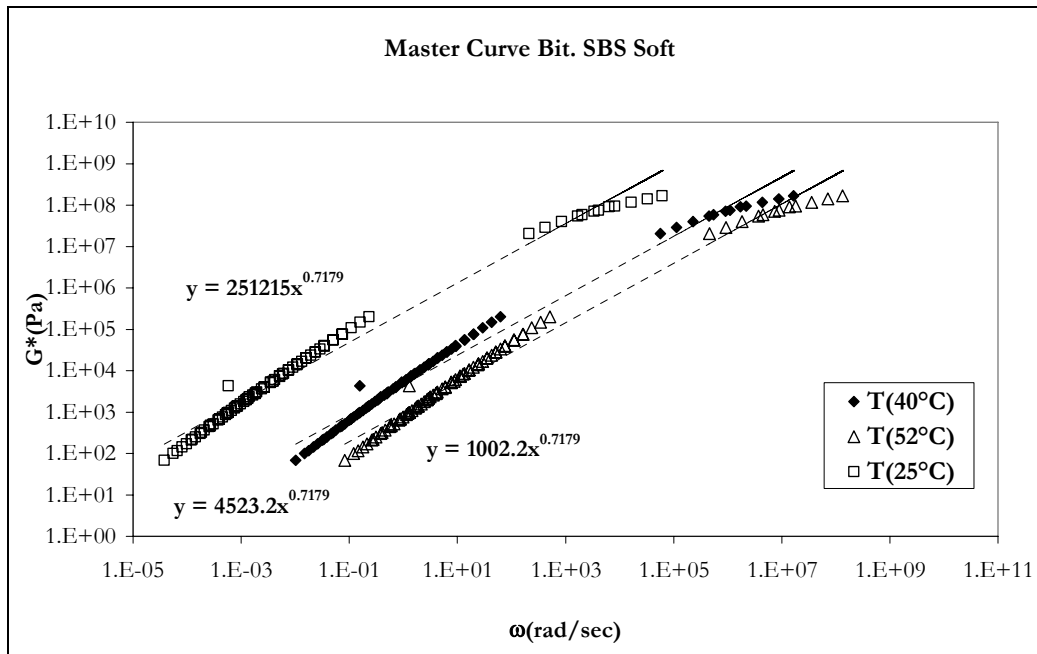


Figura 6-143: Master Curve per il bitume SBS Soft

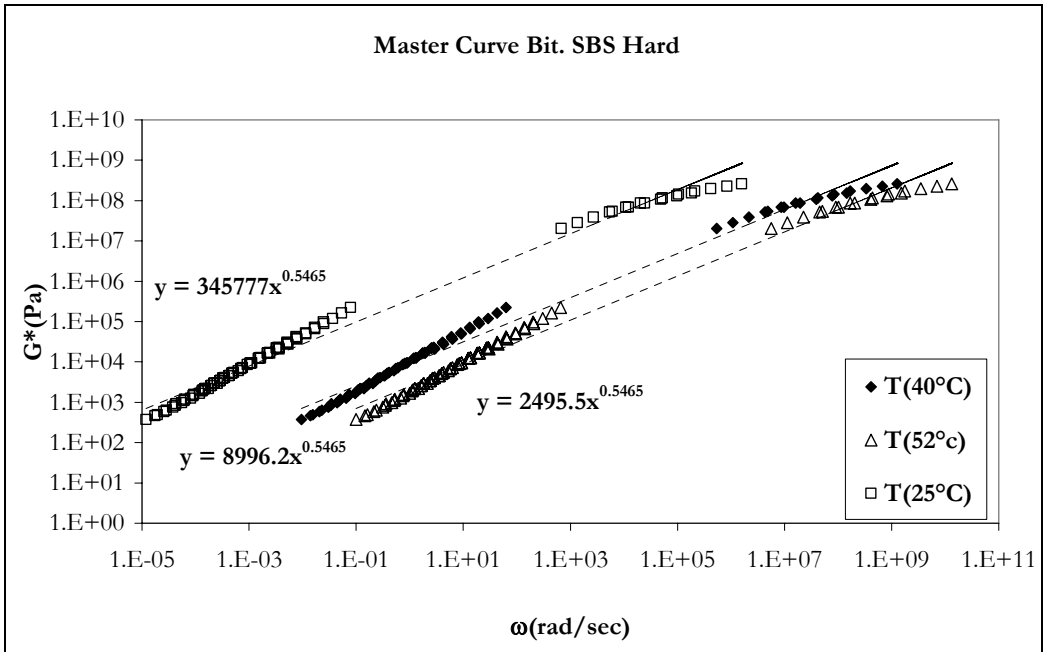


Figura 6-144: Master Curve per il bitume SBS Hard

## 6.7 Considerazioni sui risultati ottenuti

I risultati illustrati approfondiscono il percorso teorico e tecnologico per lo studio della reologia e della classificazione dei bitumi modificati con polverino di gomma su scala di laboratorio, evidenziandone in maniera metodica ed oggettiva le notevoli proprietà prestazionali.

Dalle prove convenzionali si evince come la modifica con polverino, estremamente condizionata dal processo di produzione in senso generale (temperatura e tempo di reazione fra bitume base e gomma), comporti un notevole incremento della rigidità e della risposta elastica del legante.

Mentre per i bitumi convenzionali le azioni di invecchiamento accelerato comportano un'azione ossidante che implica un aumento della frazione asfaltenica e della consistenza dello stesso legante, nel caso del bitume CRM si osserva una parziale amplificazione, nel caso specifico benefica, delle risorse di duttilità. Ciò denota che la stessa procedura di invecchiamento accelerato (film sottile, alte temperature ed alte pressioni), verosimilmente, rende più omogeneo e compartecipante il legame tra gomma e bitume base.

I risultati dell'analisi dinamica hanno consentito di evidenziare come i valori di Performance Grade individuati risultino maggiori nei bitumi modificati con CRM, e in generale crescenti al crescere dell'importanza della modifica.

Dalle prove di *stress sweep* e *frequency sweep* si evince che l'aggiunta di gomma comporta un incremento sistematico dei valori di modulo complesso al variare della temperatura di prova. D'altra parte, l'angolo di fase si ridimensiona verso valori più bassi, che consentono una minore deformabilità del bitume ed una migliore resistenza all'ormaiamento.

Bitumi che mostrano comportamenti simili per basse deformazioni possono evidenziare differenze se, sottoposti a deformazioni elevate, si trovano a lavorare nel campo non lineare. Il modulo complesso mostra una forte dipendenza dalla deformazione alle basse temperature e i bitumi appaiono sensibili al tempo di applicazione dei carichi; in particolare, basse frequenze, a parità di sollecitazione, determinano consistenti deformazioni. Le prove effettuate, fuori del limite di viscoelasticità lineare, hanno inoltre permesso di fare luce sul "disturbo da fatica" (diminuzione di  $G^*$  all'aumentare della deformazione).

---

Per quanto riguarda la suscettibilità all'invecchiamento, i risultati ottenuti hanno permesso di concludere che in seguito ad invecchiamento RTFOT i valori di PG restano immutati nei bitumi non modificati, mentre generalmente decrescono per i bitumi modificati con polimeri e crescono per i leganti Asphalt Rubber. Come già osservato nel caso delle prove convenzionali, il processo di invecchiamento ad alta pressione PAV conferisce al legante modificato CRM delle proprietà di maggiore duttilità (angolo di fase maggiore) rispetto al bitume invecchiato con RTFOT. A titolo comparativo, è stata valutata anche la temperatura limite per bitume invecchiato tramite PAV dalla quale si nota una temperatura di equideformabilità inferiore rispetto a quella dei bitumi base e CRM vergini.

Nei bitumi tal quali sottoposti ad invecchiamento RTFOT l'angolo di fase si riduce, con conseguente aumento dell'aliquota elastica del modulo complesso (detto anche modulo di restituzione), mentre nei bitumi fortemente modificati in seguito ad invecchiamento RTFOT si assiste ad un incremento dell'angolo di fase. L'invecchiamento MRTFOT non ha determinato un cambiamento del Performance Grade, tanto meno una variazione significativa della "temperatura limite".

Dalle prove di creep recovery si desume che la presenza del polverino esalta le componenti elastiche del bitume. Il bitume base è caratterizzato già a 25°C da un comportamento proprio di un materiale viscoso. La prova evidenzia come l'invecchiamento comporti una variazione dell'entità e dei tempi di recupero dello scorrimento al quale è stato sottoposto il bitume di prova. L'impatto della quantità di polverino di gomma ha dimostrato che aumentando la percentuale di polverino si aumenta significativamente la resistenza all'ormaiamento del bitume, in parte in funzione anche del tipo di bitume base utilizzato. Le proprietà elastiche della gomma sono risultate influenzare significativamente le proprietà del bitume modificato.

Per quanto riguarda la formulazione del tipo Terminal Blend, i migliori valori di resilienza e recupero elastico mostrati da questi materiali rispetto al bitume base sono da attribuirsi soprattutto alla modifica con polverino, piuttosto che all'additivazione con acido polifosforico. Comparando un terminal blend con un legante Asphalt Rubber standard, ovvero avente un contenuto di polverino superiore al 15%, il primo presenta una riduzione della viscosità. I risultati riscontrati permettono di concludere che i miglioramenti nelle prestazioni ottenuti con l'aggiunta di additivi a base di acido polifosforico consentono di rendere tali materiali competitivi rispetto a leganti modificati con SBS, ma non consentono di raggiungere performance a livello di un legante Asphalt Rubber standard.

In conclusione si può affermare che l'aggiunta di polverino di gomma amplifica il campo di applicazione del bitume di base, estendendo l'intervallo di temperatura di esercizio da -22°C a 82°C, con una modifica di 18% di CRM (vedi Tabella 6-46).

**Tabella 6-46: Performance Grade**

<b>BITUME</b>	<b>Grado PG</b>	
	<b>DSR</b>	<b>BBR</b>
	[°C]	[°C]
<b>50/70</b>	<b>64</b>	<b>-22</b>
<b>EVA soft</b>	<b>64</b>	<b>-16</b>
<b>SBS soft</b>	<b>70</b>	<b>-16</b>
<b>SBS hard</b>	<b>70</b>	<b>-22</b>
<b>50/70+18% CRM</b>	<b>82</b>	<b>-22</b>
<b>70/100+18% CRM</b>	<b>70</b>	<b>-28</b>

---



# Conclusioni

La produzione scientifica sull'utilizzo di polverino di pneumatico riciclato per la modifica dei bitumi stradali e, più in generale, per la realizzazione di conglomerati bituminosi, come evidenziato nel corso della Tesi, risulta particolarmente articolato ed apre a numerose e concrete prospettive di sviluppo. Come spesso si assiste, anche per il riciclaggio dei pneumatici lo stato della pratica ha anticipato in molti casi le conclusioni alle quali molti studiosi sono pervenuti nel campo della formulazione degli impasti, della scelta delle temperature di impiego e della tecnica di lavorazione.

Questa Tesi, tuttavia, ha avuto l'ambizione (il lettore giudicherà in tal senso) di fare un punto della situazione sulle conoscenze nell'ambito delle applicazioni denominate Asphalt Rubber o, in modo più esteso, CRM, e, nel contempo, articolare un programma sperimentale per cogliere la complessità del comportamento di questo materiale. Si è cercato di caratterizzare dal punto di vista prestazionale le formulazioni di oggi, per comprendere i miglioramenti possibili e gli sviluppi futuri. Caso emblematico è la possibile transizione concettuale ed operativa da bitumi CRM a bitumi modificati con processo Terminal Blend.

Prove reologiche, azioni di invecchiamento artificiale, additivazione con sostanze terze hanno fatto parte di un ampio programma sperimentale, per sviluppare il quale, più volte si è avuto la sensazione di perdere il filo, di far precedere gli stimoli dell'entusiasmo a quelli della fredda razionalità. Ed anche per questo aspetto, il lettore benevolo saprà giudicare...

Nel concreto delle conclusioni finali, aperte alle numerose chiavi di lettura dei risultati presentati, utili al produttore, alle imprese ed ai ricercatori del settore stradale, appare importante sottolineare che l'utilizzo di elevate percentuali di bitumi *Asphalt Rubber*, nell'ordine del 9%, con alte concentrazioni del polverino di gomma, intorno al 20%, permette di ottenere conglomerati bituminosi con eccellenti proprietà meccaniche, con elevata resistenza alla propagazione di fessure, a fatica ed alle deformazioni permanenti e ottima stabilità alle azioni di invecchiamento prodotte dai raggi UV, oltre ad un contributo fonoassorbente non trascurabile.

La presente tesi ha posto la sua attenzione sulle caratteristiche reologiche all'avanzare della vita in servizio, simulata mediante invecchiamento artificiale dalla quale è emerso che se per i bitumi tradizionali le azioni di invecchiamento accelerato comportano un'azione ossidante che implica un aumento della frazione asfaltenica e della consistenza dello stesso legante, nel caso del bitume CRM si osserva una parziale amplificazione, nel caso specifico benefica, delle risorse di duttilità. L'analisi di materiali non convenzionali quali l'Asphalt Rubber è stata inserita all'interno del quadro conoscitivo costituito da leganti tradizionali (sia non modificati che modificati con polimeri SBS e EVA).

L'approfondimento dello studio del bitume CRM assolve al duplice scopo di estendere la comprensione del comportamento di questo legante e di incentivare la diffusione di un materiale in grado di coniugare elevate prestazioni con una tecnologia produttiva basata sul riciclaggio e su un progresso tecnologico eco-compatibile.

I risultati cui si è pervenuti avvalorano la necessità di approfondire il percorso teorico e tecnologico per lo studio della reologia e della classificazione dei bitumi modificati con CRM su scala di laboratorio, per poter evidenziarne le notevoli potenzialità, soprattutto a fronte delle significative prestazioni che tali bitumi attualmente dimostrano su strada. La modifica con polverino, estremamente condizionata al processo di produzione in senso generale (temperatura e durata della miscelazione fra bitume base e gomma), comporta un notevole incremento della rigidezza e della risposta elastica. Nei casi esaminati tale rigidezza risulta decisamente elevata, indicando l'idoneità di questi bitumi per applicazioni in ambiti stradali ed in contesti ambientali particolari.

La risposta si apprezzerà strada facendo.

---

# Bibliografia

## Capitolo 1

[1-1] L. Cini, “Lezioni di tecnologia dei materiali e chimica applicata”, Cooperativa Libreria Universitaria Editrice Bologna.

[1-2] U. Isacson and X. Lu, “Properties of bitumen modified with elastomers and plastomers”, 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona 2000.

[1-3] C. Giavarini, M. Scarsella, “Struttura e composizione del bitume”, Rassegne di Scienza e Tecnologia, La chimica e l'industria, Roma 1993.

[1-4] J. Anderson, V. Pampulim, R. Saim e Sousa, “Asphalt Rubber laboratory properties related to type and process technology of Crumb Rubber”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal.

[1-5] M. Philips. C. Robertus “Binder Rheology and Asphaltic Pavement Permanent Deformation: the Zero-shear viscosity”. Euroasphalt and Eurobitume Congress, 1996 France.

[1-6] E. Diani, “Le caratteristiche dei polimeri sintetici modificanti”, Giornata di studio “Dalle piste alla strada, la qualità della pavimentazione bituminosa per una maggiore sicurezza”, 1992.

[1-7] “Les liants modifiés, les liants avec additifs et les bitumes spéciaux”, Routes Roads n°303.

[1-8] S. Neto, M. Farias, J. Pais, P. Pereira, L. Santos, “Properties of asphalt rubber binders related to characteristics of the incorporated crumb rubber”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.

[1-9] F. Canestrari, “Appunti del Corso di Gestione e Manutenzione delle Pavimentazioni Stradali”, Università delle Marche.

[1-10] G. Orange, D. Dupuis, J. Martin, F. Farcas, C. Such, B. Marcant, “Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: properties–microstructure relationship”. Euroasphalt and Eurobitume Congress 2004, Vienna.

[1-11] I. Antunes, F. Giuliani, J. Sousa e G. Way – “Asphalt Rubber: Il bitume modificato con Polverino di Gomma di Pneumatico Riciclata”, Varirei – V International Congress Valorisation and Recycling of Industrial Waste, L'Aquila 2005.

## Capitolo 2

- [2-1] J. Gallego, “Spanish Experience with Asphalt Pavements Modified with Tire Rubber”, Final Report, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [2-2] K. Holtz, “Partnership For Sustainability - A New Approach To Highway Materials”, Texas 2000.
- [2-3] R. Winters, “The conception and development of Asphalt Rubber, Presentation to the National Seminar on Asphalt Rubber”, Kansas City Missouri 1989.
- [2-4] J. Epps, “Uses of recycled Rubber Tires in Highways, NCHRP”, Synthesis of Highway Practice n.198, TRB National Research Council, Washington 1994.
- [2-5] E. Hunt, “Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon”, Final Report SPR355, Oregon Department of Transportation, 2002.
- [2-6] M. Heitzman, “Design and Construction of Asphalt Paving materials with Crumb Rubber Modifier” - Transportation Research Record n. 1339, TRB National Research Council, Washington D.C., 1992.
- [2-7] J. Sousa, G. Way, D. Carlson, “Cost Benefit Analysis and Energy Consumption of Scrap Tire Management Options”.
- [2-8] D. Carlson, H. Zhu, “Asphalt-Rubber: an Anchor to Crumb Rubber Markets” - Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment International Rubber Forum, Veracruz, Mexico, 1999.
- [2-9] J. Oliver, “Modification of Paving Asphalts by Digestion with Scrap Rubber”, Transportation Research Record n. 821, TRB National Research Council, Washington D.C., 1979.
- [2-10] T. Shuler, C. Adams, M. Lamborn, “Asphalt Rubber Binder Laboratory Study”, Report FHWA TX-85/71 347 IF, TTI, Texas A&M, 1985.
- [2-11] S. Neto, M. Farias, J. Pais, P. Pereira, L. Santos, “Properties of Asphalt Rubber binders related to characteristics of the incorporated Crumb Rubber”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [2-12] F. Roberts, P. Kandal, E. Brown, R. Dunning, “Investigation and evaluation of ground tire rubber in hot mix asphalt” – NCAT Report n. 89-3, National Center of Asphalt Technology, 1989.
- [2-13] J. Anderson, V. Pampulim, R. Saim e Sousa, “Asphalt Rubber laboratory properties related to type and process technology of Crumb Rubber”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal.
- [2-14] R. Hicks, “Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines”, Vol. 1 – Design Guidelines prepared for Northen Carolina Rubberized Asphalt Concrete Technology Center and California Integrated Waste Management Board, 2002.
-

- 
- [2-15] C. Estakhri, J. Button, E. Fernando, "Use, Availability and Cost Effectiveness of Asphalt Rubber in Texas" – Transportation Research Record n. 1339, TRB National research Council, Washington D.C, 1992.
- [2-16] L. Momm, R. Salini, "Study of Recycled Tire Rubber in Asphalt Concrete Mixtures", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Portugallo.
- [2-17] J. Medina, J. Muñoz, "Tipos de Mezclas Bituminosas con Caucho de Neumáticos. Experiencia Española en la Conservación de Carreteras", Actos do Congresso Rodoviário Português, 2004.
- [2-18] K. Kaloush, M. Witezak, G. Way, "Laboratory Evaluation of Asphalt Rubber Mixtures using the Dynamic Modulus Test", Proceedings of the 82<sup>nd</sup> TRB Annual Meeting, Washington D.C., 2003.
- [2-19] R. Hicks, J. Lundy, R. Leahy, "Crumb Rubber Modifier in Asphalt Pavement: Summary of Practice in Arizona, California and Florida", USDOT-FHWA Report, 1995.
- [2-20] C. Glover, "A Comprehensive Laboratory and Field Study of High-Cure Crumb Rubber Modified Asphalt Materials", Report n. FHWA-TX 171460-1, 2000.
- [2-21] C. Potgieter, D. Sandler, E. Villiers, "Bitumen Rubber Asphalt Experience in the RSA", Proceedings of 7<sup>th</sup> Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 1999.
- [2-22] C. Potgieter, D. Sandler, E. Villiers, "Bitumen Rubber Asphalt; Report on the Long Term Performance in South Africa", Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, 2002.
- [2-23] M. Antunes, F. Baptista, M. Eusébio, M. Costa, C. Miranda, "Characterization of Asphalt Rubber mixtures for pavement rehabilitation projects in Portugal", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugallo.
- [2-24] M. Antunes, P. Domingos, M. Eusébio, M. Costa, "Studies concerning the use of Asphalt Rubber in Portugal". Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [2-25] C. Guerra, F. Ruivo, "Avaliação do Efeito do Pavimento no Ruído de Tráfego Rodoviário", Actos do Congresso Rodoviário Português, 2004.
- [2-26] M. Minhoto, J. Pais, P. Pereira, L. Santos, "Low temperature influence in the predicted of pavement overlay", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [2-27] J. Sousa, J. Pais, R. Saim, G. Way, "Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking", Journal of the Transportation Research Board, 2002.
- [2-28] J. Gallego, M.del Val, R. Tomás, "A Spanish Experience with Asphalt Pavements Modified with Tire Rubber", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugallo.
- [2-29] J. Oliver, "Research on Asphalt Rubber at the Australian Road research Board", National Seminar on Asphalt Rubber, San Antonio, Texas, 1981.
-

- [2-30] M. Curry, A. Murta, L. Figueredo, L. Montegro, “Socioeconomic and environmental analysis for the use of rubberized asphalt in the construction of highways”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [2-31] R. Johnson, J. Sproule, A. Juristovski, “The Full Scale Evaluation of Rubberized Asphalt Concrete in British Columbia”, 1995.
- [2-32] M. Antunes, F. Baptista, M. Eusébio, M. Costa, C. Miranda, “Characterization of asphalt rubber tires for pavement rehabilitation projects”. Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Portogallo.
- [2-33] D. Esch, “Construction and Benefits of Rubber Modified Asphalt Pavements” , Report n. AK RD8217, ADOT and Public Facilities, Fairbanks, 1982.
- [2-34] Van Kirk, “Caltrans Experience with Rubberised Asphalt Concrete”, Proceedings of the Technology Transfer Session of an Introduction to Rubberized Asphalt Concrete, Kansas 1991.
- [2-35] F. Roberts, P. Kandhal, E. Brown, R. Dunning, “Development of the FAA Mixture Design Procedure for Asphalt Rubber Concrete”, Research Report n. 4982-1, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 1989.
- [2-36] H. Allen, C. Turgeon, “Evaluation of PlusRide®”, Final Report, Minnesota DOT, St. Paul, 1990.
- [2-37] J. Shook, “Experimental Construction of Rubber Modified Asphalt Mixtures for Asphalt pavements in New York State”, ARE Inc., Riverdale, Mariland, Report Submitted to the NYSDOT, 1990.
- [2-38] C. Celauro, A. di Francisca, “L’impiego di granulato di gomma da pneumatici usati in tecnica stradale”, Strade & Autostrade, settembre-ottobre 2005.
- [2-39] B. Houang, L. Mohammad, P. Graves, C. Abadie, “Lousiana experience with crumb-rubber modified hot-mix asphalt pavement”.
- [2-40] G. di Mino, P. Tripodi, “An Italian research on mechanical properties of asphalt with tire rubber”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [2-41] B. Celauro, C. Celauro, A. di Francisca, “Studio Sperimentale sull’impiego di CRM (Crumb Rubber Modifier) nei Conglomerati Bituminosi Secondo Processo Dry” – Atti del XIII Convegno Nazionale S.I.I.V., Padova, 2003.
- [2-42] L. de Ferraris, A. Madella, A. Simone, “Conglomerato Bituminoso con Granulato di Gomma per Pavimentazioni Stradali Anti-Vibranti” – Le Strade, Aprile 2005.
- [2-43] M. Pasetto, F. Tattan, “Conglomerati Bituminosi Drenanti Additivati con Polverino di Gomma di Pneumatici Riciclati”, 1999.
-

---

## Capitolo 3

- [3-1] D. Carlson, H. Zhu, "Asphalt-Rubber: An Anchor to Crumb Rubber Markets - Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment International Rubber Forum, Veracruz, Mexico, 1999.
- [3-2] R. Hicks, J. Epps, "Life cycle costs for asphalt rubber paving materials". Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Portogallo.
- [3-3] G. B. Way, "OGFC Meets CRM. Where the rubber meets the rubber 15 years durable success", 2003.
- [3-4] F. Giuliani, "Interventi di Ingegneria delle Infrastrutture per la Sicurezza delle Strade in Esercizio", Programma Integrato per la Costruzione di una Cultura della Sicurezza Stradale, Provincia di Parma, 2004.
- [3-5] J. Medina, J. Muñoz, "Tipos de Mezclas Bituminosas con Caucho de Neumáticos. Experiencia Española en la Conservación de Carreteras", Actos do Congresso Rodoviário Português, 2004.
- [3-6] "Asphalt Rubber Long-Term Performance – Official Publication of RPA", Giugno 2005.
- [3-7] I. Antunes, F. Giuliani, J. Sousa, G. Way – "Asphalt Rubber: Quarant'anni ma non li dimostra", Le Strade N°9, Settembre 2005.
- [3-8] C. Potgieter, D. Sandler, De Villiers, "Bitumen Rubber Asphalt Experience in the RSA", Proceedings of 7<sup>th</sup> Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 1999.
- [3-9] J. Van Kirk, G. Holleran, "Reduced thickness asphalt rubber concrete leads to cost effective pavement rehabilitation", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portogallo.
- [3-10] "Asphalt Rubber Long Term Performance", Rubber Pavement Association, 2004
- [3-11] H. Bahia, R. Davis, "Effect of Crumb Rubber Modifiers on Performance related properties of asphalt binders", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.63, 1994.
- [3-12] M. Nourelhuda, M. Mamlouk, G. Way, D. Forstie, "Accelerated testing of Crumb Rubber modified pavement", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portogallo.
- [3-13] P. Fonseca, "A utilização do betume modificado com borracha em Portugal: balanço de 5 anos de experiência", Actos do Congresso Rodoviário Português, 2004.
- [3-14] F. Reyes, "Asphalt rubber in drainable mixtures", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-15] B. Pulles, L. Treleaven, H. Soleymani, A. Schulz, "2002 Asphalt Rubber Trials in Alberta, Canada".
- [3-16] G. Way, J. Sousa, K. Kaloush, "Hot mix asphalt design prediction and field performance, an Arizona Study", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
-

- [3-17] J. Pais, J. Sousa, G. Way, R. Stubstad, “An overlay design method for reflective cracking”. Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Portugal.
- [3-18] V. Gopal, E. Sebaaly, J. Epps, “Effect of Crumb Rubber Particle Size and Content on the lowtemperature rheological properties of Binders”, Annual Meeting Transportation Research Board, Washinton D.C., 2002.
- [3-19] M. Minhoto, J. Pais, P. Pereira, L. Santos, “Low temperature influence in the predicted of pavement overlay”. Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-20] K. Surace, “Sound and noise: generation, propagation and reduction”, RPA Quiet solution, 2003.
- [3-21] “Asphalt Rubber Noise Data Compilation (Synthesis of current practice)”, Executive Summary RPA, 2003.
- [3-22] “Report on the Traffic Noise Reduction in Sacramento County”, Sacramento County Public Works Agency – Transportation Division, 1999.
- [3-23] D. Carlson, H. Z.hu, C. Xiao, “Analisis of Traffic Noise Before and After Paving with Asphalt Rubber”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-24] B. Rymer, Paul Donovan, “Tire/Pavement Noise Intesity Testing in Europe: the NITE Sudy and its Relationship to Ongoing Caltrans Quiet Pavement Activities”, 2004.
- [3-25] “Asphalt Rubber Noise Reduction”, Rubber Pavement Association, 2004.
- [3-26] G. Way, “\$18 Million benefits of using ground tire rubber in asphalt - eleven years of success”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal.
- [3-27] K. Kaloush, M. Witzczak, G. Way, “Performance evaluation of Arizona asphalt rubber mixtures using advanced dynamic material characterization tests”, Final Report 2002.
- [3-28] R. Hicks, J. Epps, “Life cycle costs for asphalt rubber paving materials”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal.
- [3-29] M. Curry, A. Murta, L. Figueredo, L. Montegro, “Socioeconomic and environmental analysis for the use of rubberized asphalt in the construction of highways”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-30] J. Potti, “Betún modificado con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso. Otro tipo de reciclaje”, Congresso Rodoviário Português, “Gestão do sistema rodoviário”, Centro Rodoviário Português, 2004 Lisboa.
- [3-31] D. Carlson, “Rehabilitation of Portland cement concrete pavements with thin asphalt-rubber open graded friction course overlay in Arizona”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Portugal.
- [3-32] J. Van Kirk, “Maintenance and rehabilitation strategies utilizing Asphalt Rubber chip seals”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-33] Van Kirk, L. Jack. (1999), “Review of the Use of Crumb Rubber in Pavement Maintenance and Rehabilitation Strategies,” Basic Resources Inc., Presented at a Meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, Florida 1999.
-



- 
- [3-34] J. Smith, "Asphalt Rubber open graded friction course", Modified Asphalt Technologies, Inc, 2001.
- [3-35] J. Sousa, J. Pais, R. Saim, G. Way, "Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking", Journal of the Transportation Research Board 2002.
- [3-36] I. Antunes, F. Giuliani, J. Sousa, "Caracterização Reológica de Betumes Modificados CRM sujeitos a Envelhecimento Artificial", 1st European Road Congress, Lisbon 2004.
- [3-37] S. Neto, M. Farias, J. Pais, P. Pereira, L. Santos, "Behaviour of Asphalt Rubber hot mixes obtained with high Crumb Rubber contents", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-38] H. Takallou, M. Takallou, "Effect of mixing time and temperature on the viscoelastic properties of asphalt rubber binder", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-39] G. Airey, M. Rahman, A. Collop, "The influence of crude source and penetration grade on the interaction of crumb rubber and bitumen", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
- [3-40] J. Anderson, V. Pampulim, R. Saim e Sousa, "Asphalt Rubber laboratory properties related to type and process technology of Crumb Rubber", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura.
- [3-41] "Air quality issues and best management practices with the production of Asphalt Rubber asphaltic concrete", 2004.
- [3-42] G. Holleran, J. Reed, "Emulsification of asphalt rubber blends", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal.
- [3-43] J. Van Kirk, G. Holleran, "Reduced thickness asphalt rubber concrete leads to cost effective pavement rehabilitation", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal.
- [3-44] T. Mang, E. R. Byron, "Recycling of Asphalt Rubber Pavements", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.
-

## Capitolo 4

- [4-1] A. Montepara, F. Giuliani, I. Antunes, D'Elia e Italia, "Evaluation of modified bitumen out of the Linear Viscoelastic Approach", Eurasphalt and Eurobetume Congress, Viena 2004.
- [4-2] D. Anderson. et al., "Binder Characterization and Evaluation, Physical Characterization", SHRP Final Report A-369, Vol.III, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., 1994.
- [4-3] M. Philips. C. Robertus "Binder Rheology and Asphaltic Pavement Permanent Deformation: the zero-shear viscosity", Euroasphalt and Eurobitume Congress 1996, France.
- [4-4] C. Giavarini, M. Scarsella, "Struttura e composizione del bitume", Rassegne di Scienza e Tecnologia, La chimica e l'industria, Roma, 1993.
- [4-5] E. Santagata, "Manuale dei materiali per l'ingegneria, Bitumi e conglomerati bituminosi", McGraw Hill 1996.
- [4-6] D. Little et al., "Rheological and rheo-optical characterization of asphalt cement and evaluation of relaxation properties", Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
- [4-7] U. Isacson and X. Lu, "Ageing Characteristics of Bituminous Binders", Eurobitume Workshop, Performance Related Properties for Bituminous Binders, Lussemburgo, 1999
- [4-8] Des Croix, Di Benedetto, "Binder-Mix rheology: limits of linear domain, non linear behaviour", Eurasphalt and Eurobitume Congress, 1996.
- [4-9] H. Bahia, H. Zhai, Connetti, Kose, "Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders", Asphalt Paving Technology, Vol. 68, 1999.
- [4-10] H. Bahia, H. Zhai, "Critical properties of modified binders: summary of results from NCHRP 9-10 Project", Transportation Research Board, 78th Annual Meeting, Washington, D.C., 1999.
- [4-12] Y.Kim, Y.R. Kim, "Evaluation of microcrack damage growth and healing of asphalt concrete pavements using stress wave method", Proceedings of Engineering-Mechanics, Vol. 1, 1996.
- [4-13] U. Bahia et al., "Characterization of modified binders using the Superpave Technology", Eurobitume Workshop, Performance Related Properties for Bituminous Binders, Lussemburgo, 1999.
-

---

## Capitolo 5

- [5-1] U. Bahia et al., "Characterization of modified binders using the Superpave Technology", Eurobitume Workshop, Performance Related Properties for Bituminous Binders, Lussemburgo, 1999.
- [5-2] D. Anderson et al., "Binder Characterization and Evaluation, Physical Characterization", SHRP Final Report A-369, Vol.III, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., 1994.
- [5-3] W. Teugels, B.Gustavsson, "Practical Experience in working with a controlled stress rheometer", Eurobitume Workshop, 1995.
- [5-4] Des Croix, Di Benedetto, "Binder-Mix rheology: limits of linear domain, non linear behaviour", Eurasphalt and Eurobitume Congress, 1996.
- [5-5] H. Bahia, H. Zhai, Connetti, Kose, "Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders", Asphalt Paving Technology, vol. 68, 1999.
- [5-6] M. Philips, C. Robertus, "Binder Rheology and Asphaltic Pavement Permanent Deformation: the Zero-shear viscosity", Euroasphalt and Eurobitume Congress 1996, France.
- [5-7] A. Anderson, M. Marasteanu, "Determination of Asphalt Binders Viscosity from other Rheological Parameters", Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, 2002.
- [5-8] A. Anderson, M. Marasteanu, "Improved Model for Bitumen Rheological Characterization", Eurobitume Workshop, Luxembourg 1999.
- [5-9] M. Philips, D. Leseur, C. Desmazes, M. Lecomte, "A Protocol for Reliable Measurement of ZSV in Order to evaluate the Anti-Rutting Performance of Binders", 2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona 2000.
- [5-10] Bouldin, Dongre, Rowe G. et al, "Predicting Thermal Cracking of Pavements from Binder Properties: Theoretical Basis and Field Validation", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 69, 2000.
- [5-11] I. Hopkins, R. Hamming, "On Creep and Relaxation", Journal of Applied Physics, Volume 28, N°8, 1957.
- [5-12] W.Heukelom, Klomp, "Road Design and Dynamic Loading", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 33, 1964.
- [5-13] Lytton, J. Uzan et al., "Development and validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes", SHRP-A-357, National Research Council, Washington DC, 1993.
- [5-14] M. Valentinetti, "Sviluppi normativi nel campo dei bitumi stradali", Giornata di studio sul bitume stradale, EniTecnologie, 2002.
-

## Capitolo 6

- [6-1] I. Antunes, F. Giuliani, J. Sousa e G. Way, “Asphalt Rubber: Il bitume modificato con Polverino di Gomma di Pneumatico Riciclata”, Varirei, V International Congress Valorisation and Recycling of Industrial Waste, L’Aquila 2005.
- [6-2] H. Bahia, “Damage characterization-The next step in bitumen evaluation”, 4th European Symposium-Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements, Nottingham 2002.
- [6-3] H. Bahia, H. Zhai, “Critical properties of modified binders: summary of results from NCHRP 9-10 Project”, Transportation Research Board, 78th Annual Meeting, Washington, D.C., 1999.
- [6-4] J. Anderson, V. Pampulim, R. Saim e Sousa, “Asphalt Rubber laboratory properties related to type and process technology of Crumb Rubber”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portugal.
- [6-5] J. Martin, “Innovalt R - PmB Type Crumb Rubber Modified Bitumen”, Innovalt Thecnology, Innophos, 2005.
- [6-6] K. Kaloush, M. Witczak, G. Way, “Performance evaluation of Arizona asphalt rubber mixtures using advanced dynamic material characterization tests”, Final Report, 2002.
- [6-7] D. Anderson et al., “Binder Characterization and Evaluation, Test Methods”, SHRP Final Report A-370, Vol. IV, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., 1994.
- [6-8] D. Angelo, I. Para, S. Ramaiah, “Modified Rolling Thin Film Oven (MRTFO) validation conducted by FHWA 90-0 - Minutes of TRB Superpave Asphalt Binder”, ETG Meeting of May 3 & 4, Washington D.C. 2000.
- [6-9] H. Bahia, H. Zhai, K. Connetti, S. Kose, “Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders”, Asphalt Paving Technology, vol. 68, 1999.
-

# Glossario Asphalt Rubber

## ***ASPHALT RUBBER***

È un bitume prodotto tramite miscelazione in cantiere e reazione di un minimo di 15% di polverino di gomma di pneumatico riciclata con un bitume non modificato, a temperature elevate, per un periodo specifico di tempo. Diversi distillati di petrolio, quali oli di estensione, possono essere addizionati per ridurre la viscosità, aumentare la spruzzabilità e la lavorabilità. È definito anche *Rubberized Asphalt*.

## ***ADDITIVO***

Sostanza che viene aggiunta in piccole quantità per migliorare o mantenere nel tempo le prestazioni dei prodotti e dei materiali ai quali viene addizionato. Un additivo reologico è una sostanza che aumenta o diminuisce la viscosità di un prodotto.

## ***ARCO-ARM-R-SHIELD (ARIZONA REFINING PROCESS)***

È un processo di produzione di Asphalt Rubber sviluppato nel 1975. Il legante è composto da circa 20% di gomma (40% devulcanizzata e 60% vulcanizzata ambientalmente) e 80% di bitume additivato con una percentuale tra l'1 e il 2% di olio di estensione *Witco*. Il polverino di gomma ha una granulometria caratterizzata dal passaggio del 98% nel setaccio No. 16 e dell'8% nel No. 100.

## ***BUFFING WASTE***

Gomma di pneumatico riciclato di alta qualità prodotta dal condizionamento delle carcasse dei pneumatici durante il processo di rigenerazione.

## ***CAPE SEAL***

È un chip seal seguito dall'applicazione di uno slurry seal come trattamento superficiale finale. Questo risulta in un strato sottile utile per riabilitare la superficie della pavimentazione, aumentando l'aderenza e riducendo la rumorosità.

### **CHIP SEAL**

È una strategia di riabilitazione in cui l'Asphalt Rubber è spruzzato da un camion distributore (spruzzatrice) direttamente sulla superficie della strada, dopo di che l'aggregato viene steso e rullato.

### **CONGLOMERATO CRM O HMRA (O ASPHALT-RUBBER HOT MIX)**

Conglomerato bituminoso a caldo nel quale il legante è l'Asphalt Rubber, ovvero è un conglomerato realizzato con un legante *Crumb Rubber Modified*.

### **CONGLOMERATO TIPO AFC (ASPHALT FRICTION COURSE O ASPHALT-RUBBER CONCRETE)**

Conglomerato chiuso realizzato con Asphalt Rubber e aggregati *dense-graded* (a granulometria chiusa), generalmente utilizzato come base.

### **CONGLOMERATO PER USURA TIPO ARFC (ASPHALT-RUBBER FRICTION COURSE)**

Strato di usura in conglomerato aperto realizzato con Asphalt Rubber e aggregati *open-graded* (a granulometria aperta o drenante).

### **CONGLOMERATO SEMIAPERTO TIPO HMRA-GG (ASPHALT RUBBER HOT MIX GAP GRADED)**

È un conglomerato bituminoso semiaperto in Asphalt Rubber. Rispetto ad un conglomerato convenzionale utilizza una maggior percentuale di bitume sul peso totale (tra il 7 a l'8.5% vs dal 4.5 al 6%). Grazie all'utilizzo di Asphalt Rubber questo tipo di conglomerato ha la capacità di sigillare pavimentazioni molto fessurate e di evitare l'entrata di acqua negli strati inferiori delle stesse, rendendole più durature e flessibili. Il rumore del traffico si riduce significativamente, mentre aumenta l'aderenza.

### **CONGLOMERATO APERTO TIPO HMRA-OG (ASPHALT RUBBER HOT MIX OPEN GRADED)**

È un conglomerato utilizzato per realizzare strati drenanti. L'utilizzo dell'Asphalt Rubber nella realizzazione di questi drenanti permette di aumentare la vita utile rispetto a un convenzionale strato di usura drenante. L'elevata viscosità dell'Asphalt Rubber permette di usare percentuali maggiori di bitume all'interno del conglomerato (tra l'8 e il 10%), con il beneficio di un maggior ricoprimento dell'aggregato che lo rende più duraturo e resistente. Il rumore del traffico cala significativamente, mentre aumenta l'aderenza.

### **CRUMB RUBBER MODIFIER (CRM - POLVERINO DI GOMMA)**

Termine generalmente utilizzato per il polverino di gomma pneumatico riciclata trattato e con granulometria specifica, utilizzato come modificante nella produzione di Asphalt Rubber. Le particelle presentano una forma approssimativamente cubica, omogenea e ridotta superficie specifica.

---

---

***GOMMA DI PNEUMATICO RICICLATA***

Gomma ottenuta dal processo di riutilizzo dei pneumatici fuori uso provenienti da automobili e camion (autoveicoli e autocarri).

***GOMMA PESTATA***

Gomma che consiste principalmente in gomma pestata con il 5% di materiale pressato (approssimativamente).

***GOMMA DEVULCANIZZATA***

Gomma che ha subito un trattamento di esposizione a elevata temperatura, pressione o addizione di agenti ammorbidenti.

La gomma, avente una macro struttura complessa, attraverso la vulcanizzazione delle molecole di zolfo forma complesse connessioni tra e dentro le macromolecole che compongono la struttura della gomma. La devulcanizzazione è il processo con il quale si rompono i legami tra le molecole di zolfo, formando e stabilizzando le molecole di gomma: in tal modo si facilita la formazione di nuove connessioni attraverso la struttura in presenza di calore e pressione.

***GOMMA VULCANIZZATA***

Gomma ottenuta tramite un processo dovuto ad agenti, come il solfuro, che aggiunti nel processo di formazione della gomma danno al prodotto particolari caratteristiche come forza, durezza, elasticità. La gomma è una struttura complessa di macro molecole e attraverso la vulcanizzazione le molecole di solfuro formano legami tra e dentro la struttura di macro molecole.

***GOMMA INTEGRALE DI PNEUMATICO (WHOLE TIRE RUBBER)***

Gomma che include battistrada e altre parti del pneumatico in proporzioni in peso simili a quelle di un pneumatico medio.

***GRANULATORE***

Apparecchiatura utilizzata nel processo di triturazione che taglia le particelle di gomma utilizzando dischi rotanti di acciaio con tolleranza chiusa, riducendo le dimensioni delle particelle di gomma a una dimensione compresa fra 9.5mm e 2.0mm.

***GRANULOMETRIA APERTA TIPO OPEN-GRADED***

Aggregati aventi una granulometria uniforme composta da un massimo di 2 o 3 classi di setacciatura e con pochi fini.

***GRANULOMETRIA CHIUSA TIPO DENSE-GRADED***

Aggregati graduati con una granulometria continua.

***GRANULOMETRIA SEMIAPERTA TIPO GAP-GRADED***

Aggregati graduati con una granulometria continua con una o due classi di setacciatura mancanti.

---

### **GROUND CRUMB RUBBER MODIFIER**

Polverino di gomma da pneumatico riciclata con particelle di forma irregolare ed una area superficiale elevata, generalmente prodotta tramite processo *crackermill*.

### **MACINAGGIO (SHREDDING)**

Processo che riduce la gomma di pneumatici a piccoli pezzi di dimensione inferiore a 0.15 m<sup>2</sup> (6 in.<sup>2</sup>).

### **METODO DRY**

Metodo che mescola il polverino di gomma (CRM) con gli aggregati prima della aggiunta del legante nella produzione di conglomerati bituminosi.

### **METODO WET**

Metodo che mescola il polverino di gomma (CRM) con il bitume prima della miscelazione con gli aggregati nella produzione di conglomerati bituminosi.

### **MICRO-TRITURAZIONE (MICRO-MILL)**

Processo che reduce la dimensione delle particelle di gomma ad una dimensione inferiore a 425 micron (No. 40 sieve).

### **MULINO**

Apparecchiatura utilizzata per lacerare le briciole di gomma tramite il passaggio di materiale tra due cilindri rotanti di acciaio, riducendo le dimensioni della gomma generalmente da 4.75 mm a 425 micron.

### **OLIO DI ESTENSIONE**

Olio aromatico utilizzato per sollecitare la reazione dell'asfalto con le particelle di gomma (CRM).

### **PLUSRIDE**

È un processo brevettato di produzione di conglomerati modificati con polverino di gomma. Il prodotto è stato sviluppato nel 1960 in Svezia e brevettato con il nome PlusRide negli USA e Rubit in Svezia. Utilizza circa il 3% sul peso del conglomerato di Ground CRM (da 0.6 mm a 6 mm) addizionato direttamente come filler negli aggregati, in modo di ottenere una granulometria chiusa.

### **PNEUMATICO DI AUTOMOBILE**

Pneumatici con diametro esterno minore di 66 cm utilizzati in automobili, pickups e furgoni.

### **PNEUMATICO DI CAMION**

Pneumatici con diametro esterno superiore a 66 cm e inferiore a 152 cm, utilizzati su veicoli commerciali, autocarri, camion e autobus.

---



---

**PROCESSO AMBIENTALE (AMBIENT GROUND RUBBER)**

Processo tramite il quale la gomma di pneumatico viene macinata o processata alla temperatura ambiente o superiore ad essa.

**PROCESSO CRACKERMILL**

Processo che tritura la gomma di pneumatico utilizzando martelli di acciaio che riducono le particelle ad una dimensione compresa generalmente fra 4.75 mm e 425 micron (setacci dal No. 4 al No. 40 sieve).

**PROCESSO CRIOGENICO**

Processo che gela gli scarti di gomma e li rompe in particelle di dimensioni desiderate, prima della triturazione.

**RAFFINAZIONE**

E' l'insieme delle operazioni di trasformazione del petrolio greggio in derivati utili. Si procede innanzitutto ad un frazionamento per distillazione, preriscaldando il greggio in un forno tubolare a circa 400° C. Esso viene successivamente iniettato alla base della colonna di distillazione. A diverse altezze al suo interno si raccolgono le varie frazioni: GPL, benzina leggera, nafta, cherosene, gasolio e residui.

**REAZIONE**

Iterazione tra bitume e il polverino di gomma quando vengono miscelati insieme ad una determinata temperatura per un fissato periodo di tempo. La reazione è definita più appropriatamente come un rigonfiamento del polimero e non è una reazione chimica. È l'assorbimento degli oli aromatici del bitume nelle catene di polimeri della gomma.

**SCRUB SEAL**

L'applicazione di uno Scrub Seal è molto simile ad una SAM, ma con un tasso di stesa molto inferiore e con la preoccupazione di fare penetrare il bitume Asphalt Rubber all'interno delle fessure, insistendo in questi punti durante il processo applicativo.

**STRESS ABSORVING MEMBRANE (SAM)**

L'applicazione di una SAM fornisce una duratura membrana impermeabile che ha la flessibilità necessaria per sopportare traffico pesante, assestamenti della base della fondazione e cambiamenti climatici.

Il legante bituminoso viene spruzzato con un determinato tasso di stesa, che è normalmente il doppio dello spessore di un bitume tradizionale in una mano di attacco. Dopo la stesa il bitume Asphalt Rubber viene ricoperto con aggregato di 1-1.3 cm *pre-coated*.

L'applicazione di una SAM è l'ideale per la riabilitazione di superfici di pavimentazioni che presentano diversi tipi di problemi (fessurazione, disgregazione ed altro). Lo spessore nominale normalmente rientra in un range compreso tra 6 e 9 mm.

---

### ***STRESS ABSORVING MEMBRANE INTERLAYER (SAMI)***

Una SAMI è una applicazione simile ad una SAM, con la differenza che una SAMI è seguita dalla costruzione di un ulteriore strato che consiste in un manto di usura in conglomerato a caldo o altro tipo di trattamento superficiale.

### ***SISTEMI DI DUE O TRE STRATI (TWO AND THREE LAYER SYSTEMS)***

Questi sistemi multi-strato prevedono la realizzazione dello strato superficiale mediante l'utilizzo di SAMI associato alla applicazione di un strato di usura in conglomerato CRM, semiaperto o aperto (gap graded o open graded). L'utilizzo di questi sistemi può permettere una miglior riabilitazione delle pavimentazioni deteriorate, evitando costi di ricostruzione generalmente troppo elevati.

### ***SOLVENTE***

Prodotto petrolifero leggero (tipicamente cherosene) addizionato all'Asphalt Rubber primache questo venga spruzzato sulla superficie della pavimentazione.

### ***TERMINAL BLEND O REFINERY BLEND PROCESS***

Processo di produzione di bitume modificato CRM che utilizza una % di polverino di gomma inferiore a 10%, in una normale raffineria. Esempi: *TARMAC* e *Polyfalt*.

### ***TRATTAMENTO SUPERFICIALE FLUSH COAT***

Applicazione di una emulsione bituminosa sulla superficie di una pavimentazione nuova per evitare la perdita di graniglia in chip seals o il raveling in HMA.

### ***VULCANIZZAZIONE O RETICOLAZIONE***

Operazione mediante la quale l'elastomero perde le proprie caratteristiche plastiche per acquistare quelle di un materiale elastico. Il processo di reticolazione coinvolge un insieme di reazioni chimiche il cui risultato è la formazione di un reticolo tridimensionale permanente tra le molecole di gomma, tale da impedire scorrimenti di molecole le une rispetto alle altre. Il termine vulcanizzazione è stato utilizzato originariamente per indicare il processo di reticolazione della gomma naturale con zolfo ad alta temperatura, ma oggi, in senso più lato, comprende ogni reazione chimica che produce effetti analoghi, sugli elastomeri o su altri materiali polimerici.

---

# **Appendice 1**

## **Risultati complementari**



# Appendice 1.1

## Curve di Viscosità

- Vergine
- RTFOT
- Dopo ultimo ciclo Riscaldamento



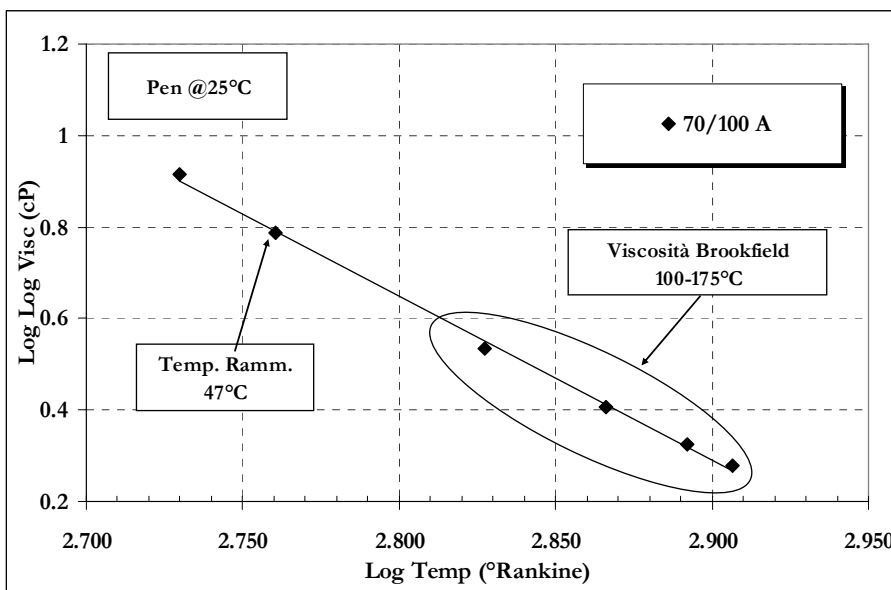


Figura 1: Modello di Maryland per le curve di sensibilità viscosità-temperatura per il bitume 70/100 A non modificato

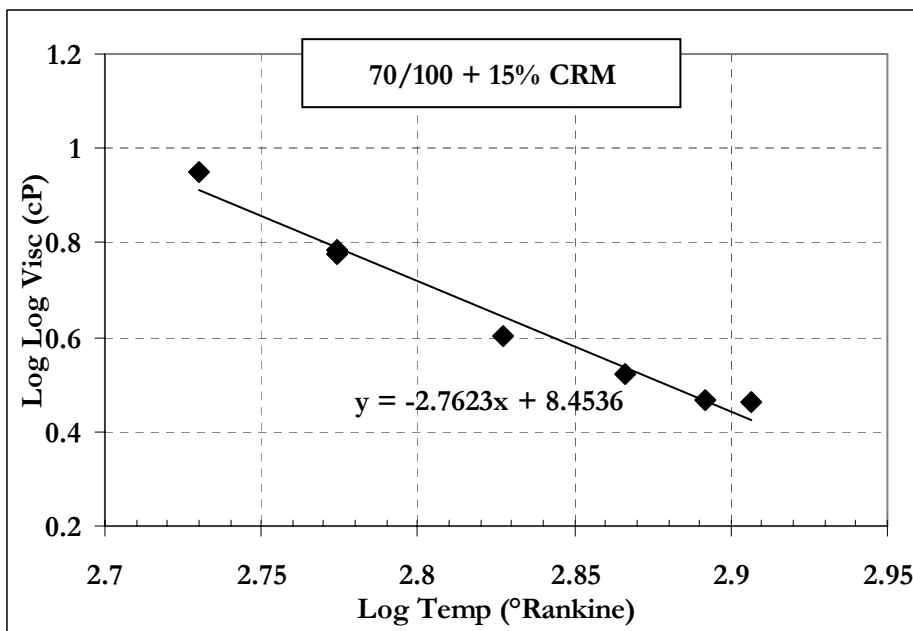


Figura 2: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con il 15% di CRM

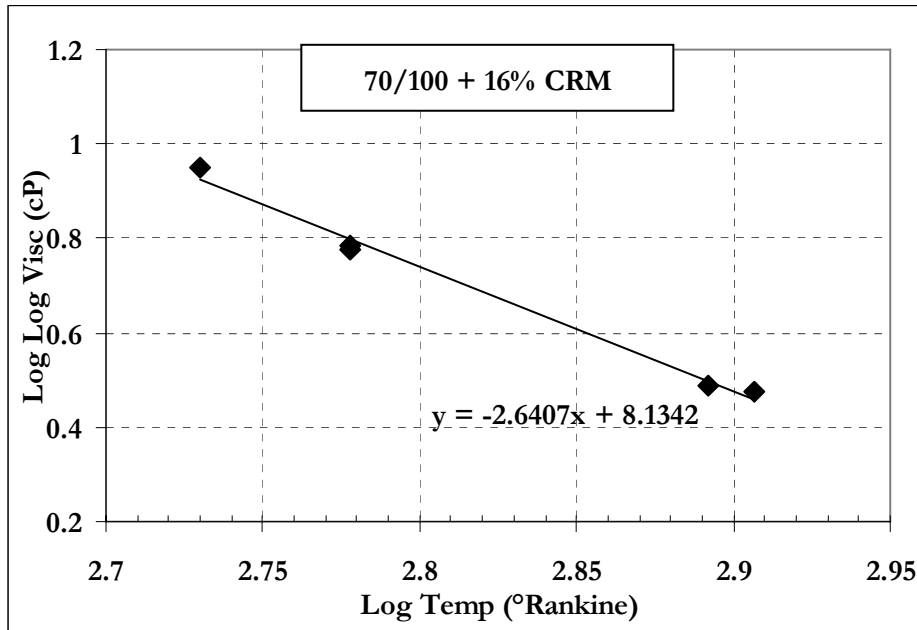


Figura 3: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con 16% di CRM

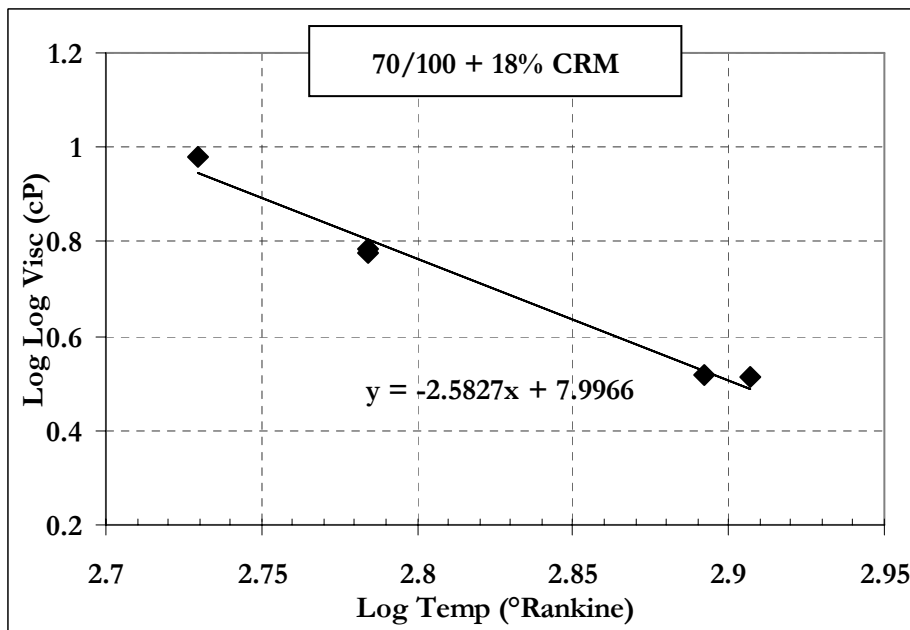


Figura 4: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con 18% di CRM



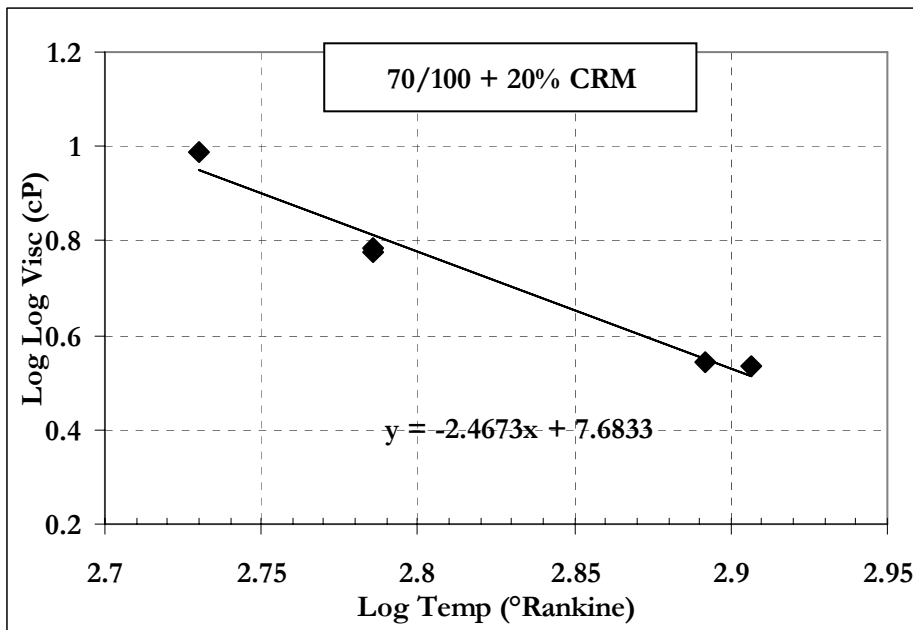


Figura 5: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con 20% di CRM

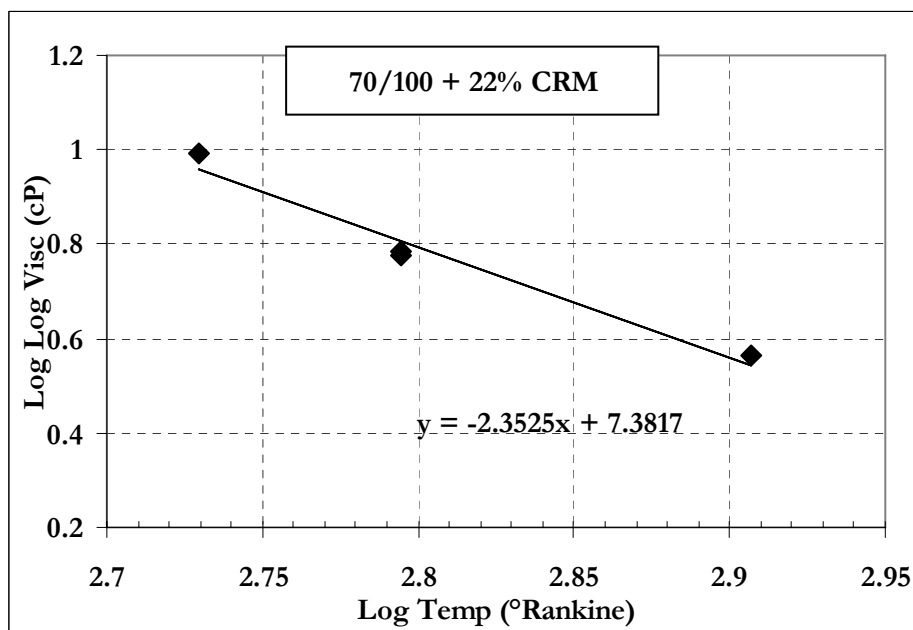


Figura 6: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con 22% di CRM

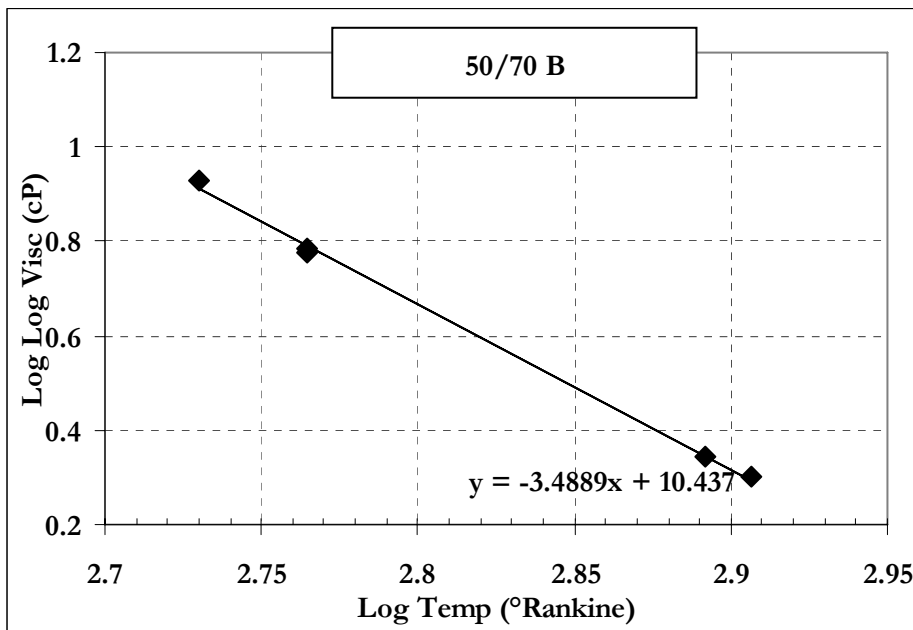


Figura 7: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 50/70 B non modificato

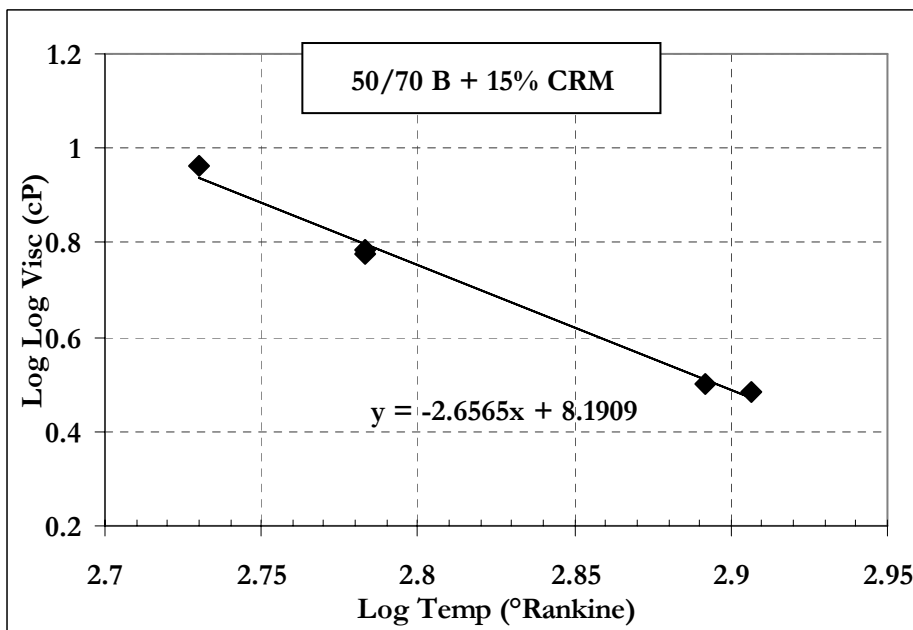


Figura 8: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 50/70 B modificato con 15% di CRM

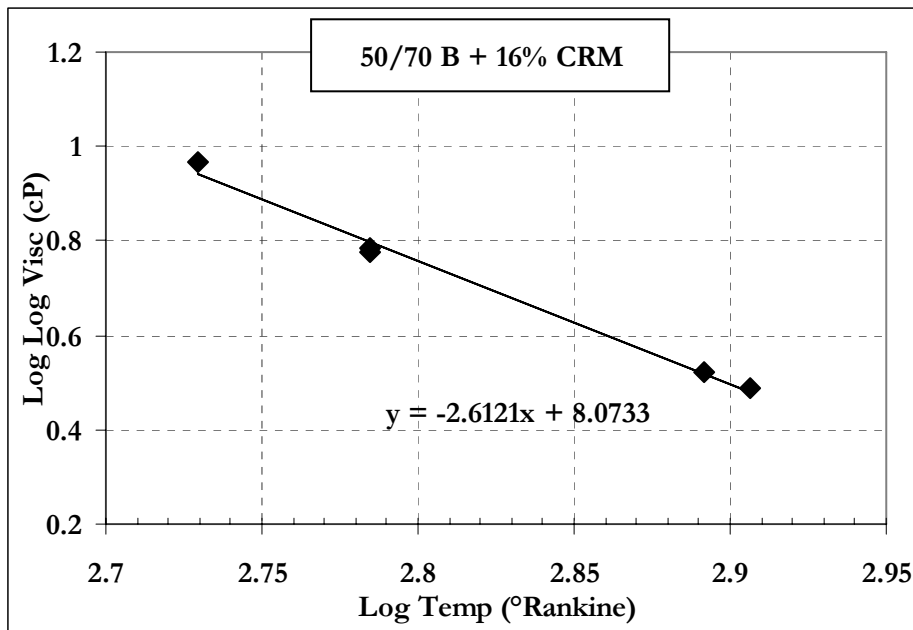


Figura 9: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 50/70 B modificato con 16% di CRM

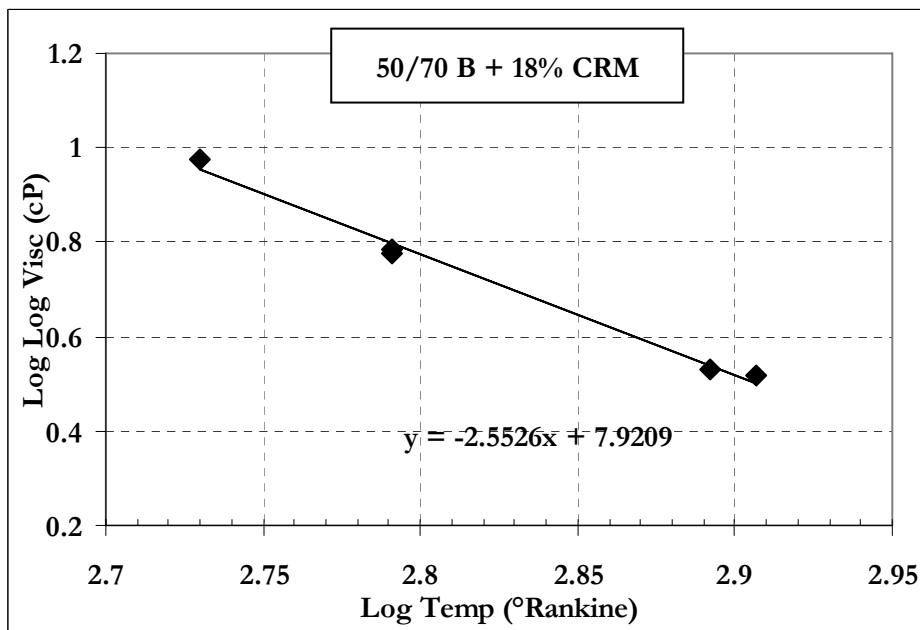


Figura 10: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 50/70 B modificato con 18% di CRM

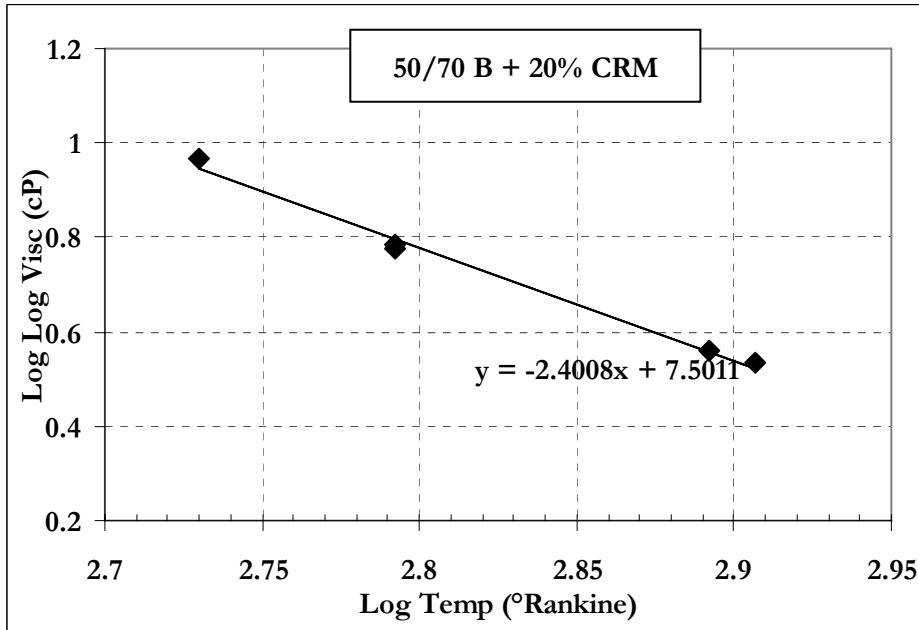


Figura 11: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 50/70 B modificato con 20% di CRM

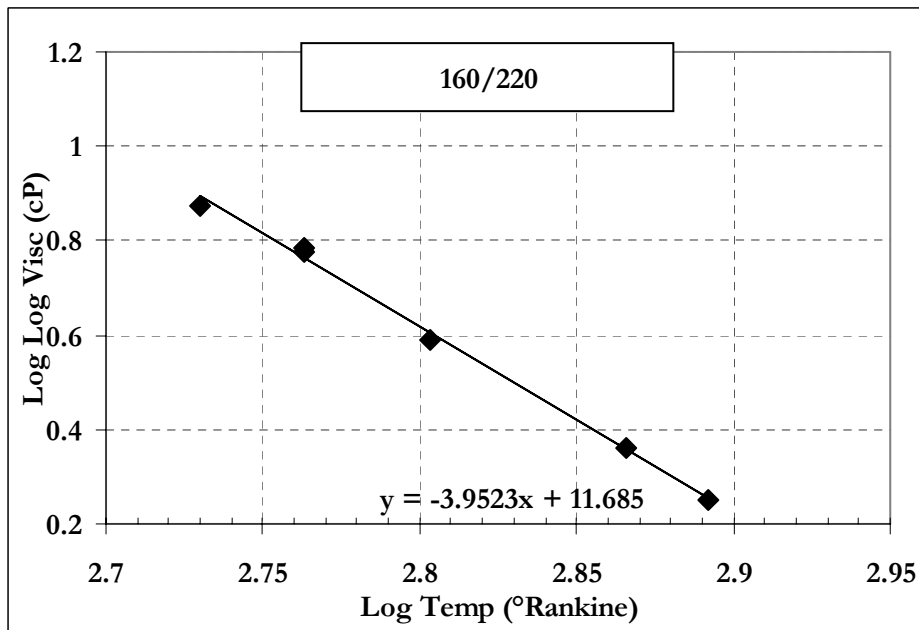


Figura 12: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 160/220 non modificato

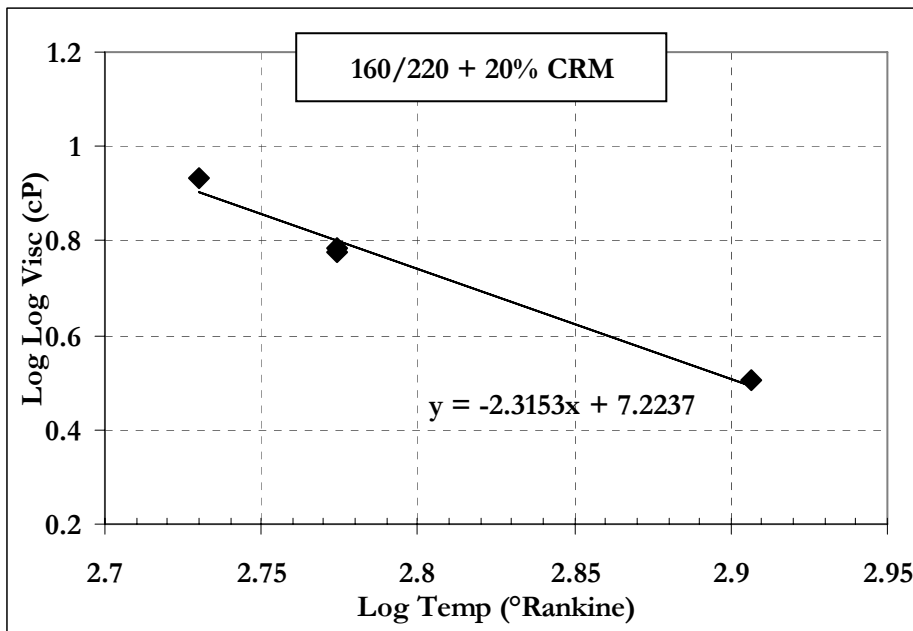


Figura 13: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 160/220 modificato con il 20% di CRM

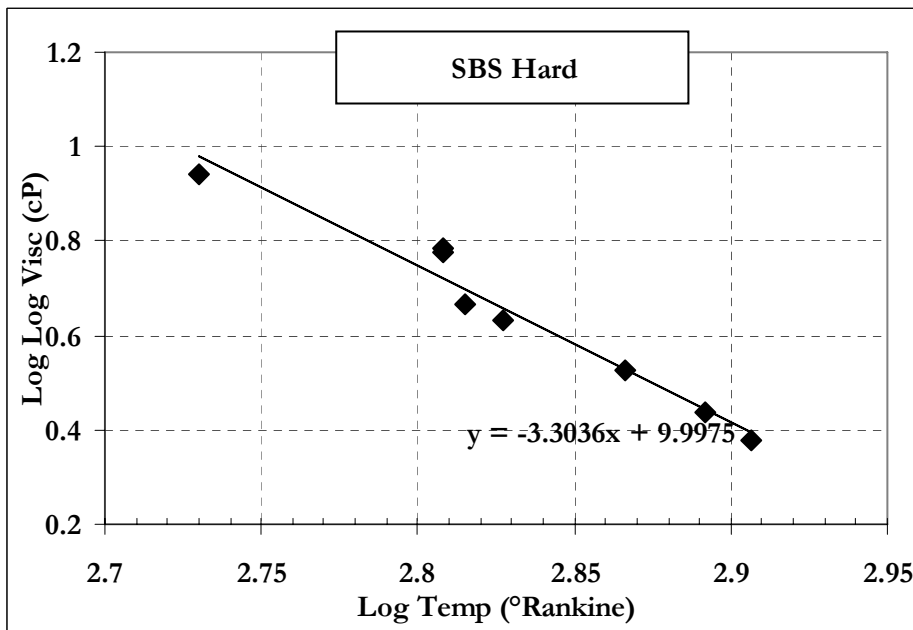


Figura 14: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume SBS Hard

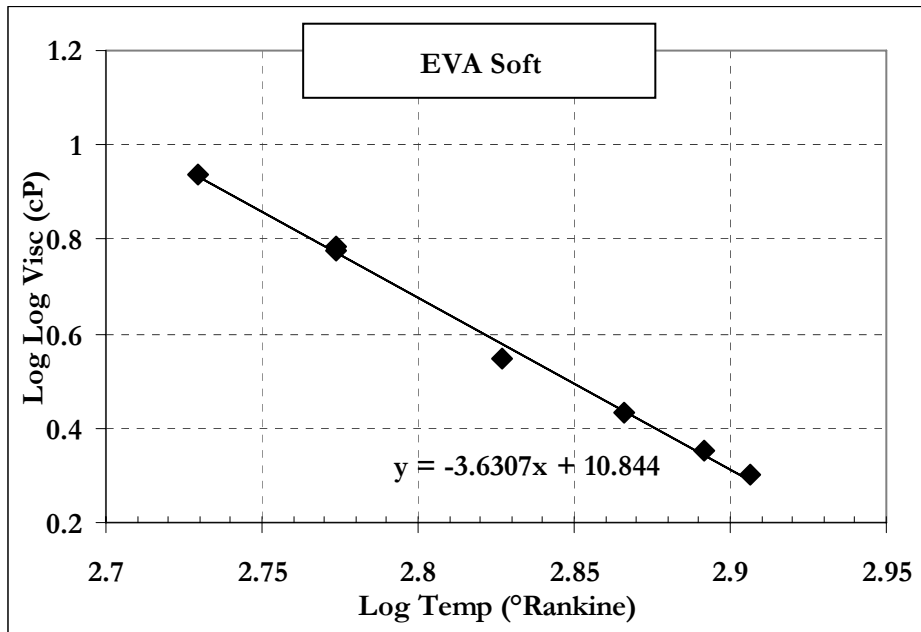


Figura 15: Curva di sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume EVA Soft

---

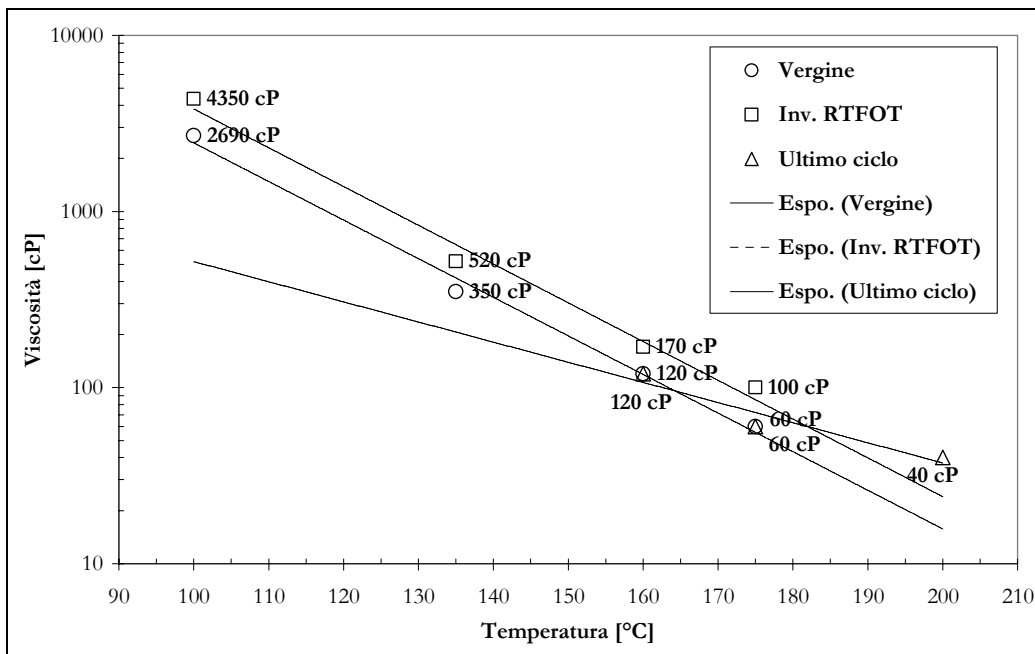


Figura 16: Sensibilità della viscosità alla temperatura del bitume 70/100 A

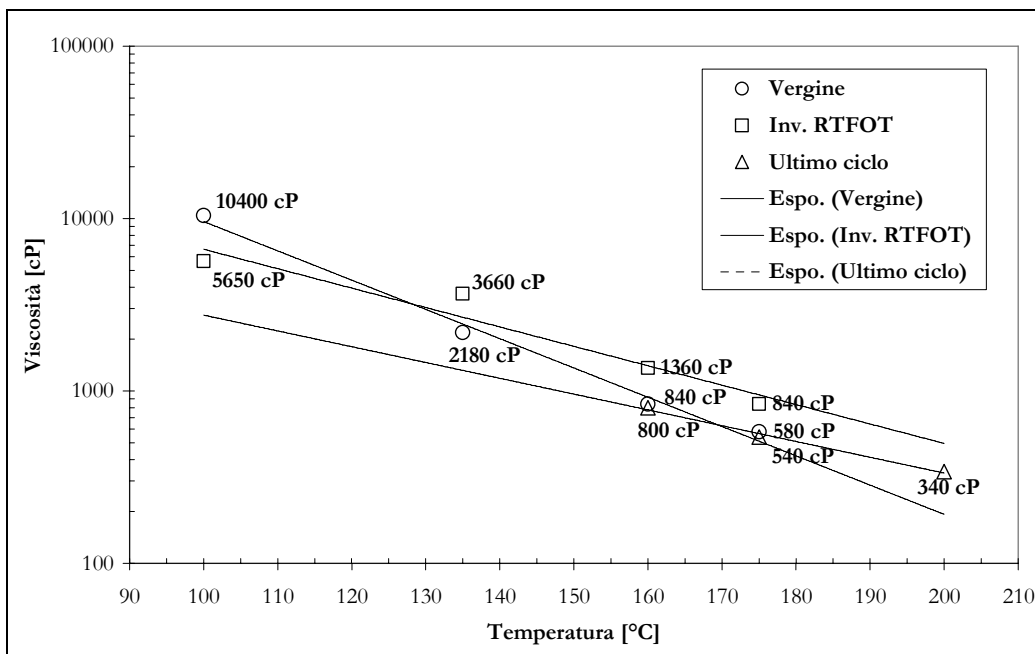


Figura 17: Sensibilità della viscosità alla temperatura del bitume 70/100 A + 15% CRM

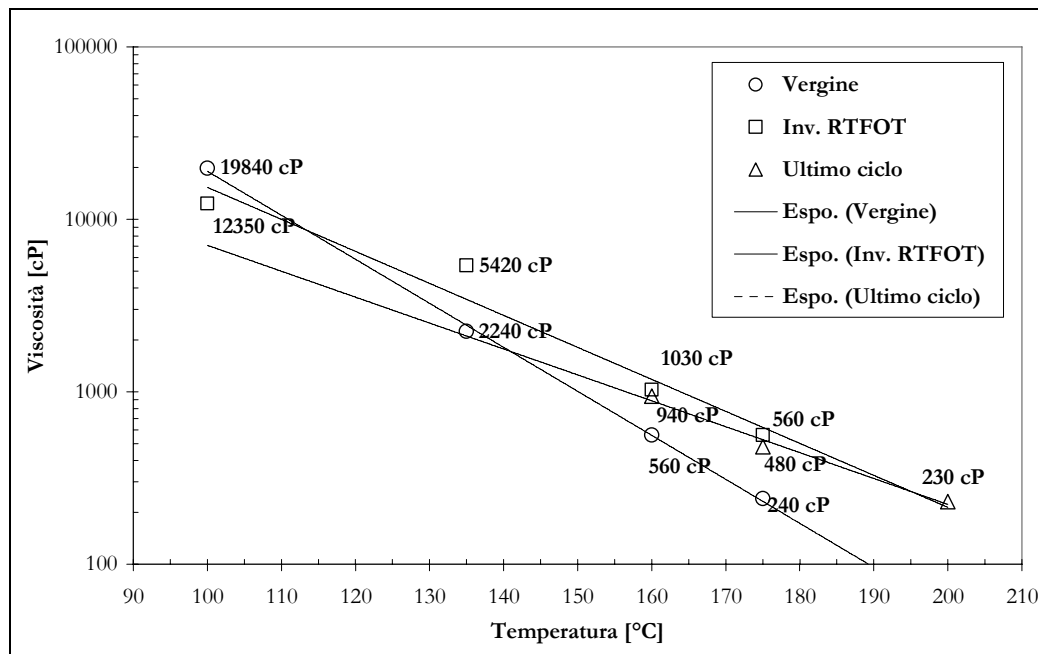


Figura 18: Sensibilità della viscosità alla temperatura del bitume SBS

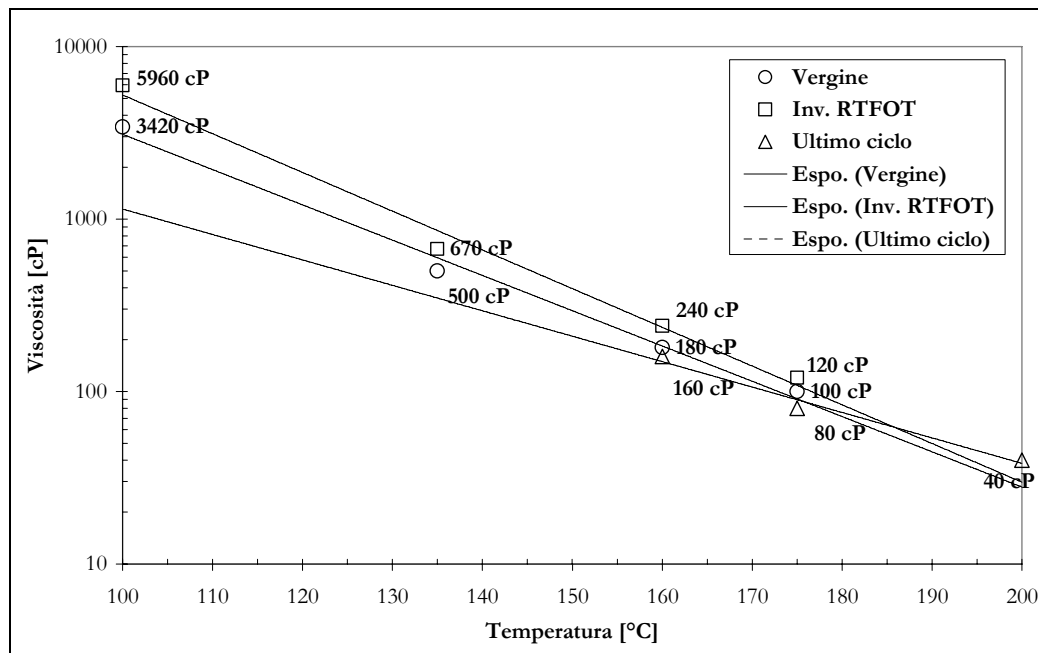


Figura 19: Sensibilità della viscosità alla temperatura del bitume EVA



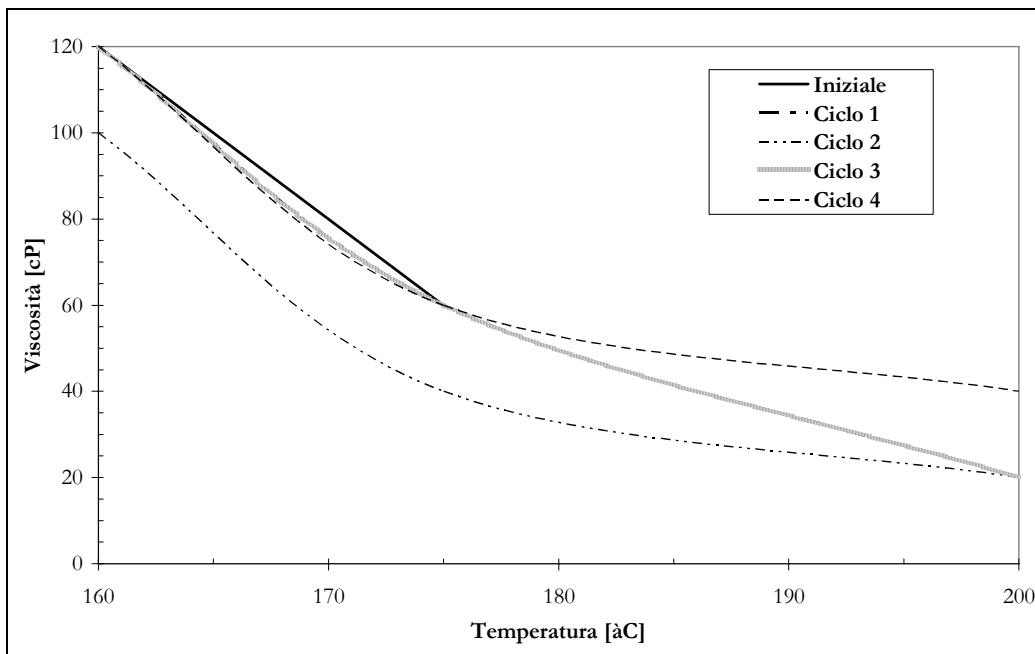


Figura 20: Evoluzione della viscosità del bitume 70/100 A lungo i cicli di riscaldamento e raffreddamento

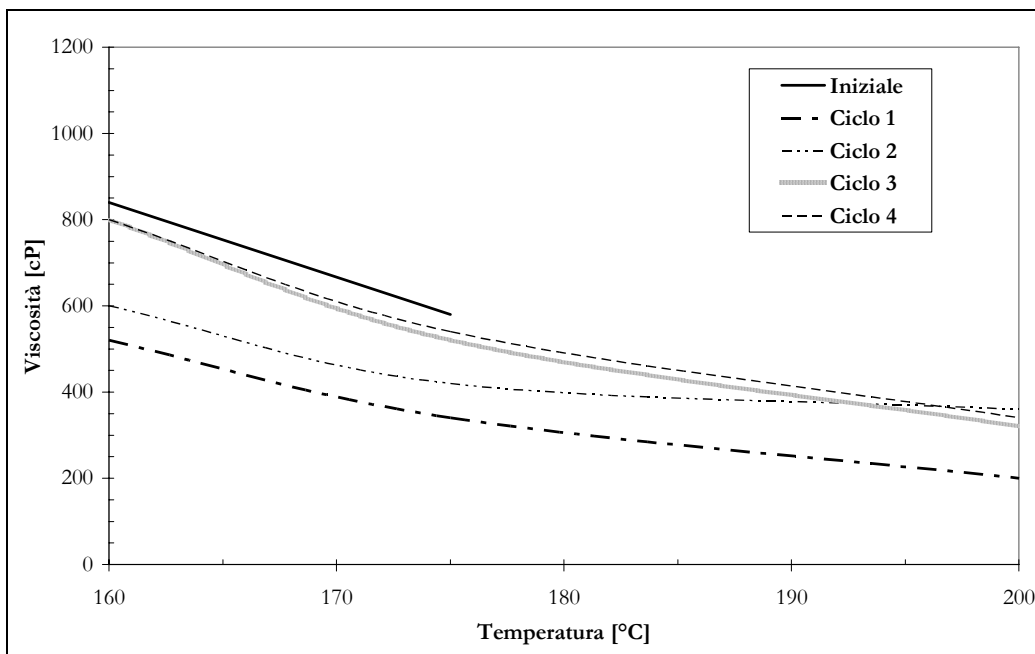


Figura 21: Evoluzione della viscosità del bitume 70/100 A + 15% CRM lungo i cicli di riscaldamento e raffreddamento

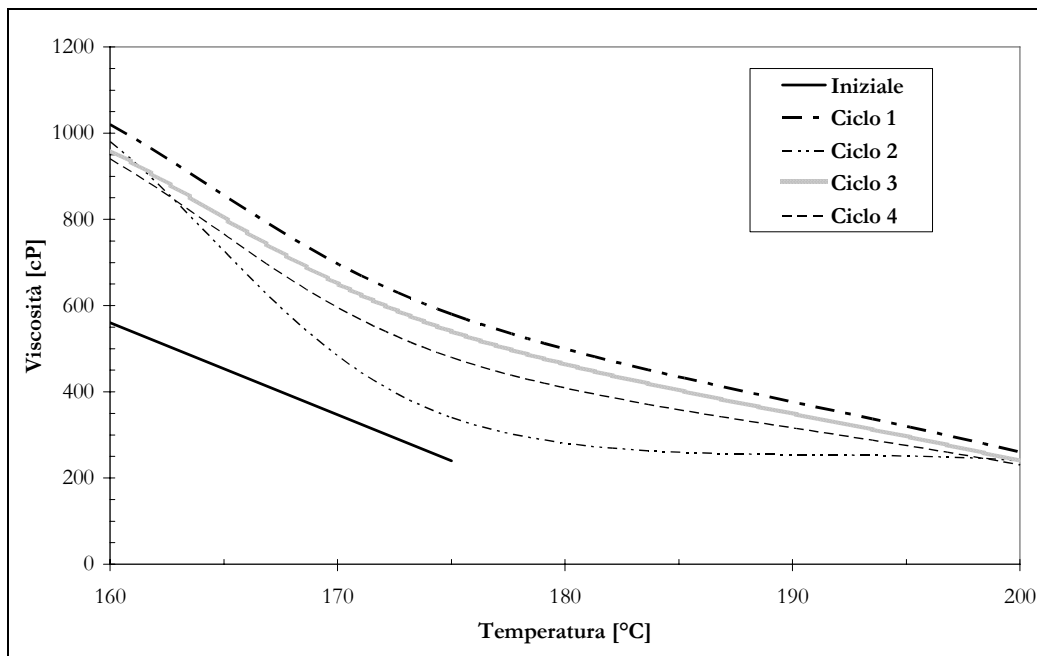


Figura 22: Evoluzione della viscosità del bitume SBS lungo i cicli di riscaldamento e raffreddamento

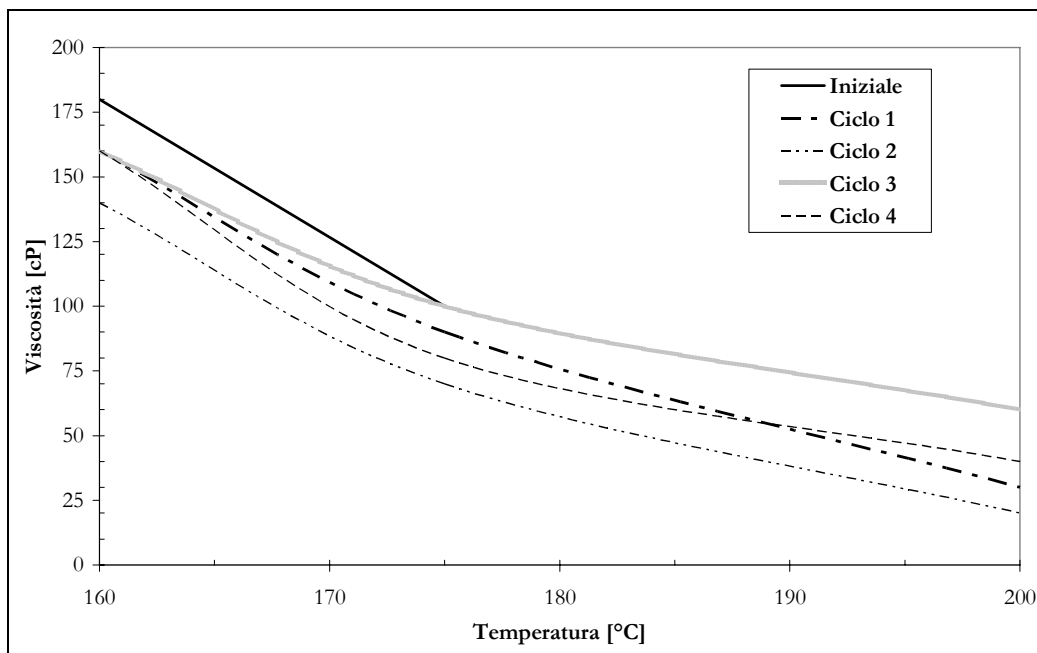


Figura 23: Evoluzione della viscosità del bitume EVA lungo i cicli di riscaldamento e raffreddamento

## Appendice 1.2

### Temperatura Limite Superiore

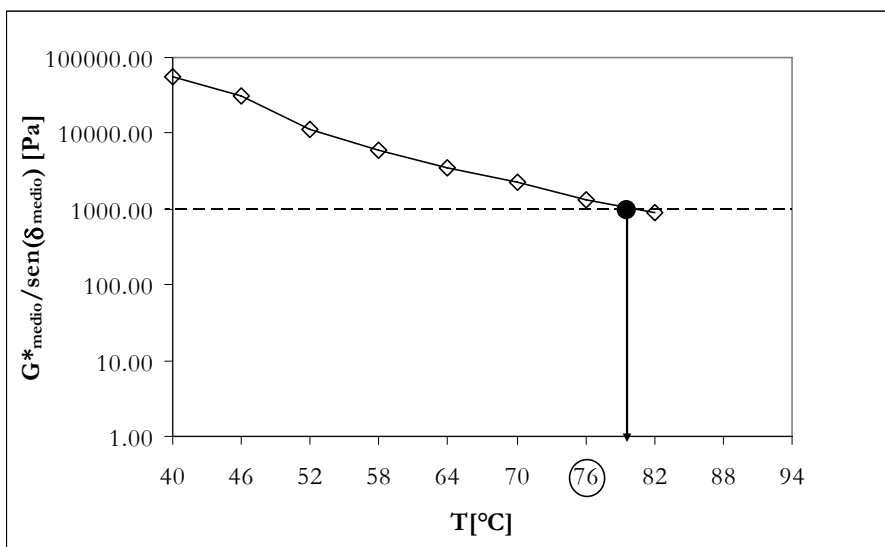
- Vergine
- RTFOT
- MRTFOT
- PAV



**SBS Hard vergine**

<b>T</b>	<b><math>\delta_1</math></b>	<b><math>\delta_2</math></b>	<b><math>\delta_3</math></b>	<b><math>\delta_{medio}</math></b>	<b><math>\delta_{medio}</math></b>	<b>sen(<math>\delta_{medio}</math>)</b>
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
40	68.58	68.55	68.37	<b>68.50</b>	1.20	0.93
46	67.41	67.55	64.81	<b>66.59</b>	1.16	0.92
52	66.71	66.73	66.74	<b>66.73</b>	1.16	0.92
58	66.30	66.33	66.47	<b>66.37</b>	1.16	0.92
64	66.20	66.29	66.26	<b>66.25</b>	1.16	0.92
70	67.84	68.06	66.53	<b>67.48</b>	1.18	0.92
76	63.72	64.12	62.88	<b>63.57</b>	1.11	0.90
82	58.55	59.51	58.90	<b>58.99</b>	1.03	0.86

<b>T</b>	<b><math>G^*_1(10rad/s)</math></b>	<b><math>G^*_2(10rad/s)</math></b>	<b><math>G^*_3(10rad/s)</math></b>	<b><math>G^*_{medio}(10rad/s)</math></b>	<b><math>G_{medio}/sen(\delta_{medio})</math></b>
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
40	52304.59	52293.68	52231.83	<b>52276.70</b>	<b>56088.53</b>
46	23388.67	23570.79	37002.73	<b>27987.40</b>	<b>30527.17</b>
52	10114.45	10167.62	10232.68	<b>10171.58</b>	<b>11094.62</b>
58	5516.33	5545.46	5313.96	<b>5458.58</b>	<b>5953.93</b>
64	3210.18	3227.14	3242.17	<b>3226.50</b>	<b>3519.29</b>
70	2134.97	2097.05	2067.59	<b>2099.87</b>	<b>2271.10</b>
76	1161.47	1133.58	1181.47	<b>1158.84</b>	<b>1293.78</b>
82	793.82	787.22	778.18	<b>786.41</b>	<b>917.31</b>

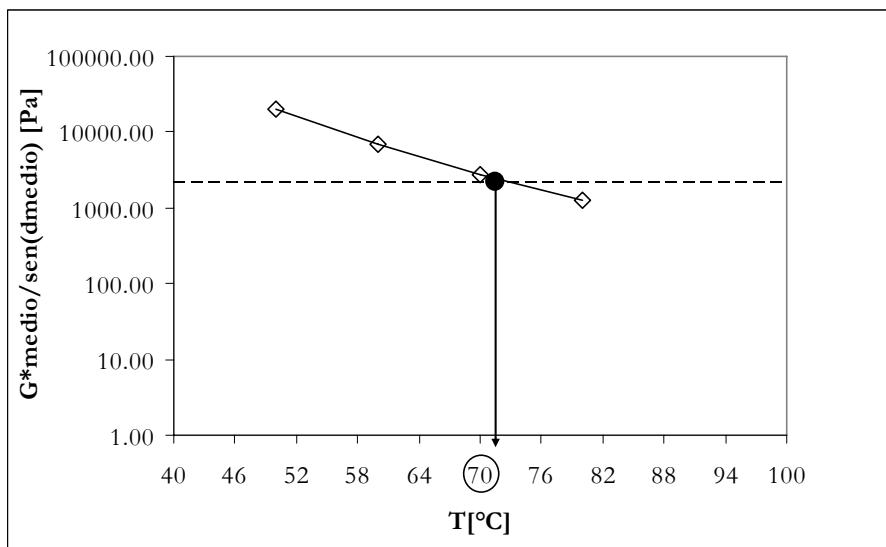


**Temperatura limite = 80.68°C**  
**PERFORMANCE GRADE = 76°C**

**SBS Hard RTFOT**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$\text{sen}(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
50	66.98	67.03	66.91	<b>66.97</b>	1.17	0.92
60	66.43	66.46	66.57	<b>66.49</b>	1.16	0.92
70	66.74	66.60	66.66	<b>66.67</b>	1.16	0.92
80	64.53	65.21	63.66	<b>64.47</b>	1.13	0.90

T	$G^*_1(10\text{rad/s})$	$G^*_2(10\text{rad/s})$	$G^*_3(10\text{rad/s})$	$G^*_{medio}(10\text{rad/s})$	$G_{medio}/\text{sen}(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50	18688.43	18571.27	18672.62	<b>18644.11</b>	<b>20265.34</b>
60	6563.76	6450.95	6437.13	<b>6483.95</b>	<b>7047.77</b>
70	2504.12	2478.12	2473.62	<b>2485.29</b>	<b>2701.40</b>
80	1116.97	1098.32	1116.28	<b>1110.52</b>	<b>1233.91</b>



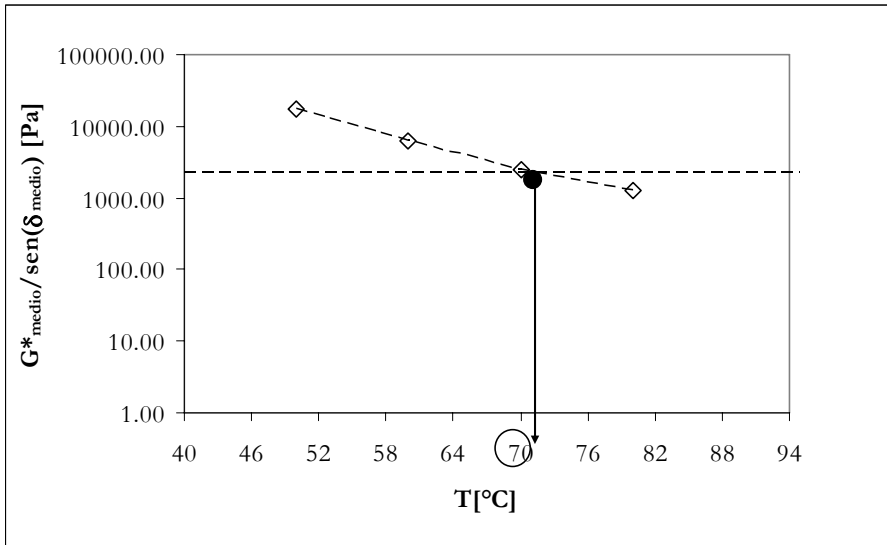
Temperatura limite = 73.42°C

**PERFORMANCE GRADE = 70°C**

**SBS Hard MRTFOT**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$sen(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
50	67.17	67.19	67.22	<b>67.19</b>	1.17	0.92
60	66.70	66.74	66.71	<b>66.72</b>	1.16	0.92
70	67.00	67.40	66.72	<b>67.04</b>	1.17	0.92
80	66.69	65.26	66.97	<b>66.31</b>	1.16	0.92

T	$G^*_{1(10rad/s)}$	$G^*_{2(10rad/s)}$	$G^*_{3(10rad/s)}$	$G^*_{medio(10rad/s)}$	$G_{medio}/sen(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50	16500.78	16444.00	16382.16	<b>16442.31</b>	<b>17872.08</b>
60	5651.01	5651.26	5679.41	<b>5660.56</b>	<b>6152.78</b>
70	2205.03	2348.77	2246.79	<b>2266.86</b>	<b>2463.98</b>
80	1169.26	1140.71	1116.29	<b>1142.09</b>	<b>1241.40</b>

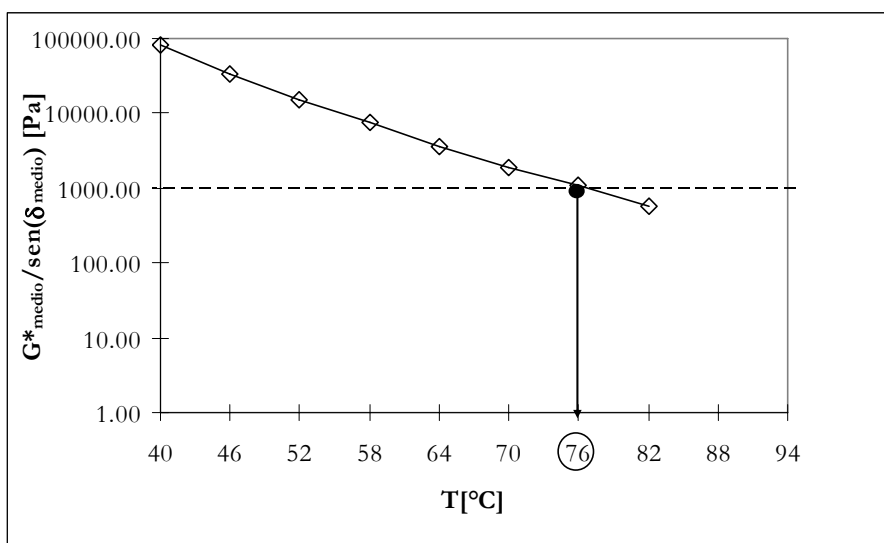


Temperatura limite = 72.16°C  
**PERFORMANCE GRADE = 70°C**

**SBS Soft vergine**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$sen(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
40	72.11	72.27	72.13	<b>72.17</b>	1.26	0.95
46	72.83	72.74	72.90	<b>72.82</b>	1.27	0.96
52	72.80	72.82	73.23	<b>72.95</b>	1.27	0.96
58	72.57	72.78	72.78	<b>72.71</b>	1.27	0.95
64	73.07	73.20	73.31	<b>73.19</b>	1.28	0.96
70	74.53	74.54	74.44	<b>74.50</b>	1.30	0.96
76	73.89	74.42	74.18	<b>74.16</b>	1.29	0.96
82	74.41	75.52	75.35	<b>75.09</b>	1.31	0.97

T	$G^*_{i(10rad/s)}$	$G^*_{2(10rad/s)}$	$G^*_{3(10rad/s)}$	$G^*_{medio(10rad/s)}$	$G_{medio}/sen(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
40	80991.03	75880.34	79476.15	<b>78782.51</b>	<b>82928.96</b>
46	31921.28	31952.82	31595.45	<b>31823.18</b>	<b>33149.15</b>
52	14627.94	14417.95	15528.20	<b>14858.03</b>	<b>15477.11</b>
58	7325.60	7025.16	6906.32	<b>7085.69</b>	<b>7458.62</b>
64	3584.39	3462.75	3418.38	<b>3488.51</b>	<b>3633.86</b>
70	1806.78	1783.23	1754.09	<b>1781.37</b>	<b>1855.59</b>
76	1043.40	1012.96	1031.81	<b>1029.39</b>	<b>1072.28</b>
82	586.90	556.80	551.05	<b>564.92</b>	<b>582.39</b>



Temperatura limite = 76.89°C

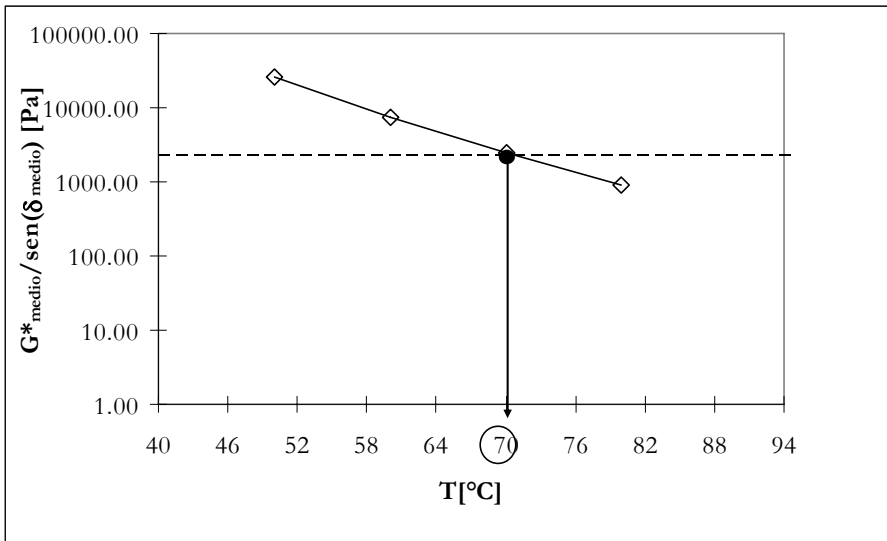
**PERFORMANCE GRADE = 76°C**



**SBS Soft inv. RTFOT**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$sen(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
50	72.25	71.47	72.24	<b>71.99</b>	1.26	0.95
60	73.12	72.72	72.86	<b>72.90</b>	1.27	0.96
70	73.68	74.00	73.80	<b>73.83</b>	1.29	0.96
80	76.61	76.58	77.45	<b>76.88</b>	1.34	0.97

T	$G^*_1(10rad/s)$	$G^*_2(10rad/s)$	$G^*_3(10rad/s)$	$G^*_{medio}(10rad/s)$	$G_{medio}/sen(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50	24359.78	25352.64	24754.82	<b>24822.41</b>	<b>26128.85</b>
60	7099.06	7216.33	7108.01	<b>7141.13</b>	<b>7438.68</b>
70	2468.65	2389.04	2336.50	<b>2398.06</b>	<b>2497.98</b>
80	874.64	907.67	911.17	<b>897.83</b>	<b>925.60</b>

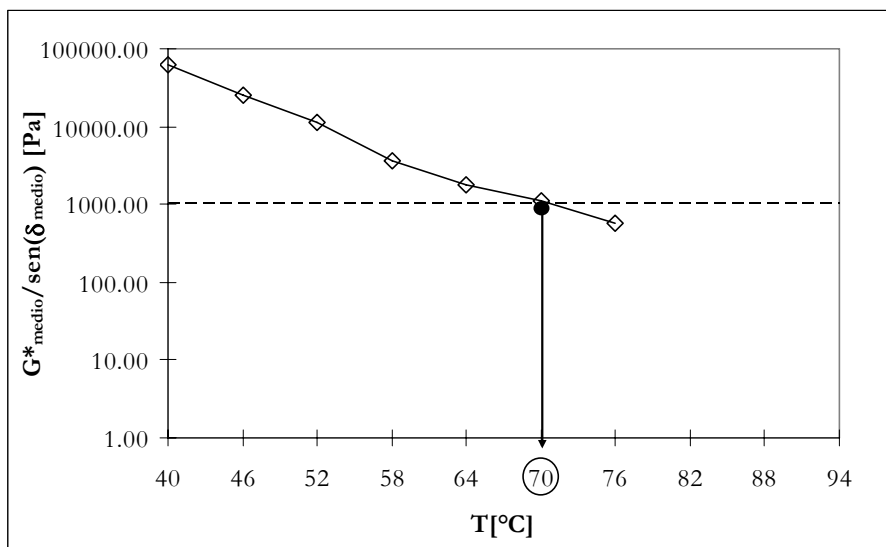


**Temperatura limite = 71.90°C**  
**PERFORMANCE GRADE = 70°C**

**EVA Soft vergine**

<b>T</b>	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{\text{medio}}$	$\delta_{\text{medio}}$	$\text{sen}(\delta_{\text{medio}})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
40	73.98	73.94	73.89	<b>73.94</b>	1.29	0.96
46	74.23	74.10	74.06	<b>74.13</b>	1.29	0.96
52	74.21	74.19	74.16	<b>74.19</b>	1.29	0.96
58	74.27	74.44	74.38	<b>74.36</b>	1.30	0.96
64	75.86	75.91	76.09	<b>75.95</b>	1.33	0.97
70	77.00	79.02	80.05	<b>78.69</b>	1.37	0.98
76	75.82	78.20	78.46	<b>77.49</b>	1.35	0.98

<b>T</b>	$G^*_{1(10\text{rad/s})}$	$G^*_{2(10\text{rad/s})}$	$G^*_{3(10\text{rad/s})}$	$G^*_{\text{medio}(10\text{rad/s})}$	$G_{\text{medio}}/\text{sen}(\delta_{\text{medio}})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
40	60404.20	59733.63	59195.97	<b>59777.93</b>	<b>62214.56</b>
46	24437.02	25000.56	24965.72	<b>24801.10</b>	<b>25812.03</b>
52	11018.34	10693.56	10521.05	<b>10744.32</b>	<b>11182.27</b>
58	3451.76	3411.02	3447.81	<b>3436.86</b>	<b>3566.84</b>
64	1794.16	1765.34	1744.17	<b>1767.89</b>	<b>1820.41</b>
70	1030.78	1097.49	1171.75	<b>1100.01</b>	<b>1122.56</b>
76	589.69	528.91	534.83	<b>551.14</b>	<b>564.85</b>



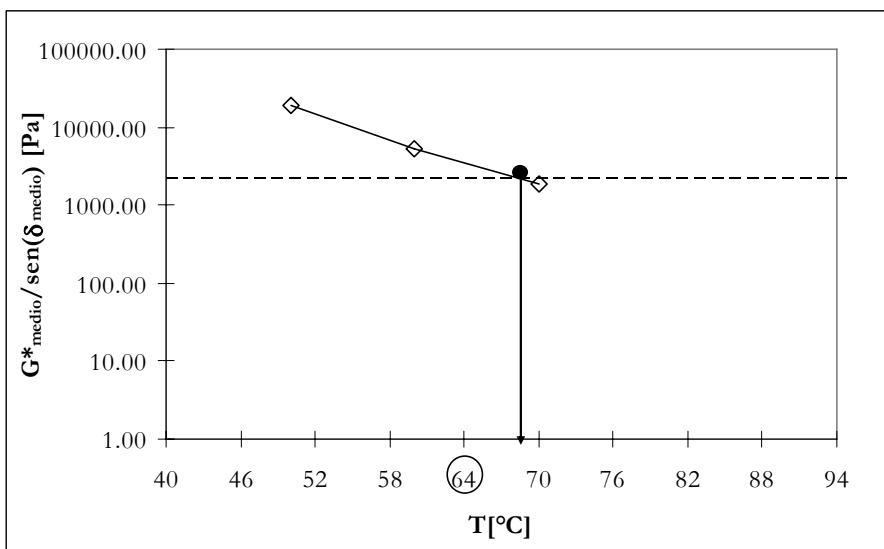
Temperatura limite = 71.39°C

**PERFORMANCE GRADE = 70°C**

**EVA Soft inv. RTFOT**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$sen(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
50	72.72	73.46	73.29	<b>73.16</b>	1.28	0.96
60	74.20	74.30	74.28	<b>74.26</b>	1.30	0.96
70	75.84	75.97	76.21	<b>76.01</b>	1.33	0.97

T	$G^*_1(10rad/s)$	$G^*_2(10rad/s)$	$G^*_3(10rad/s)$	$G^*_{medio}(10rad/s)$	$G_{medio}/sen(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50	19247.31	18264.34	18524.51	<b>18678.72</b>	<b>19457.00</b>
60	5285.30	5152.04	5157.27	<b>5198.20</b>	<b>5414.79</b>
70	1801.31	1788.33	1773.08	<b>1787.57</b>	<b>1842.86</b>

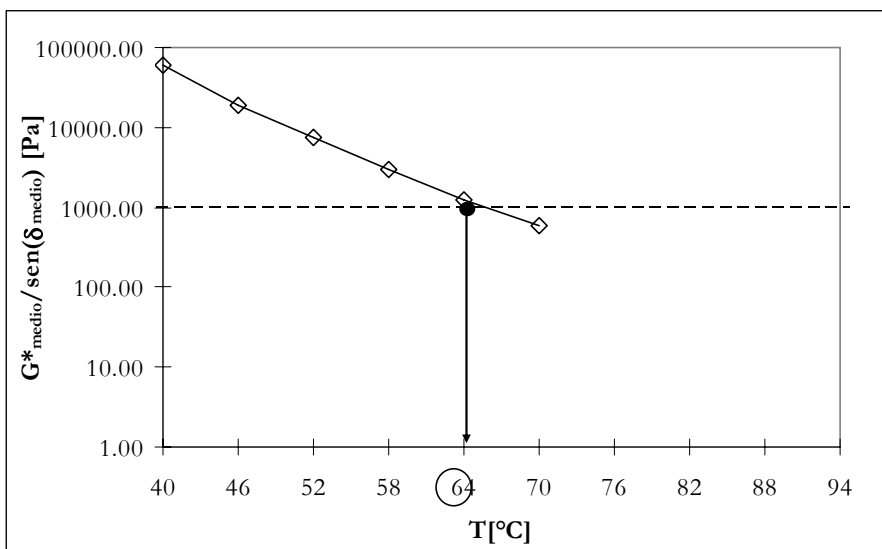


**Temperatura limite = 69.00°C**  
**PERFORMANCE GRADE = 64°C**

**50/70 A vergine**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	sen( $\delta_{medio}$ )
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
40	82.57	82.56	82.47	<b>82.53</b>	1.44	0.99
46	85.10	85.13	85.15	<b>85.13</b>	1.49	1.00
52	87.05	87.03	86.93	<b>87.00</b>	1.52	1.00
58	88.45	88.51	88.52	<b>88.49</b>	1.54	1.00
64	89.37	89.51	89.50	<b>89.46</b>	1.56	1.00
70	89.76	89.89	89.75	<b>89.80</b>	1.57	1.00

T	G* <sub>1</sub> (10rad/s)	G* <sub>2</sub> (10rad/s)	G* <sub>3</sub> (10rad/s)	G* <sub>medio</sub> (10rad/s)	G <sub>medio</sub> /sen( $\delta_{medio}$ )
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
40	44937.23	44170.43	44112.03	<b>44406.56</b>	<b>59181.15</b>
46	19330.11	18871.45	18539.08	<b>18913.55</b>	<b>18975.45</b>
52	7456.24	7422.25	7429.67	<b>7436.05</b>	<b>7445.65</b>
58	3048.12	2982.08	2943.76	<b>2991.32</b>	<b>2992.74</b>
64	1267.70	1234.61	1213.87	<b>1238.73</b>	<b>1238.80</b>
70	583.14	574.81	579.61	<b>579.19</b>	<b>579.19</b>

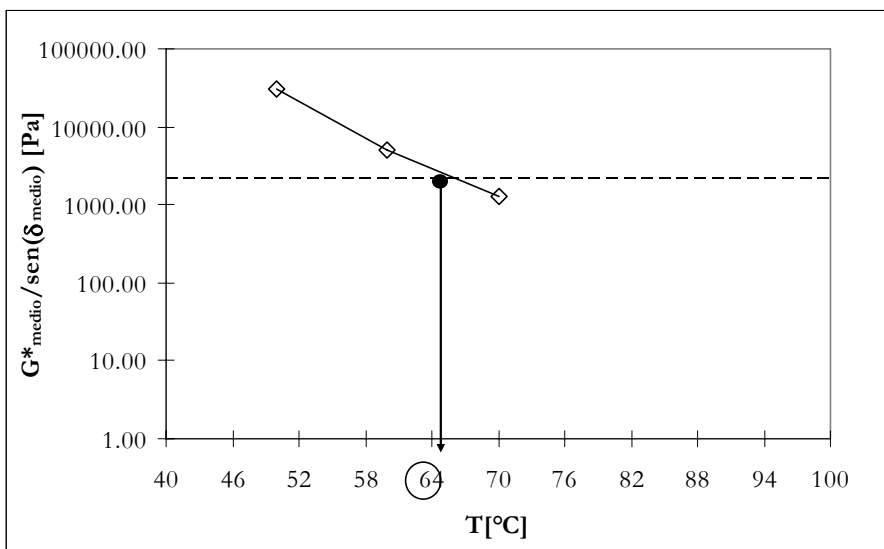


Temperatura limite = 66.17°C  
**PERFORMANCE GRADE = 64°C**

**50/70 A inv. RTFOT**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$sen(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
50	80.03	79.36	80.60	<b>80.00</b>	1.40	0.98
60	86.37	86.43	86.29	<b>86.36</b>	1.51	1.00
70	87.96	88.31	87.98	<b>88.08</b>	1.54	1.00

T	$G^*_1(10rad/s)$	$G^*_2(10rad/s)$	$G^*_3(10rad/s)$	$G^*_{medio}(10rad/s)$	$G_{medio}/sen(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50	30170.91	28249.94	29496.11	<b>29305.65</b>	<b>29903.72</b>
60	5153.54	4974.53	4933.98	<b>5020.68</b>	<b>5029.97</b>
70	1326.33	1272.64	1285.74	<b>1294.90</b>	<b>1295.51</b>



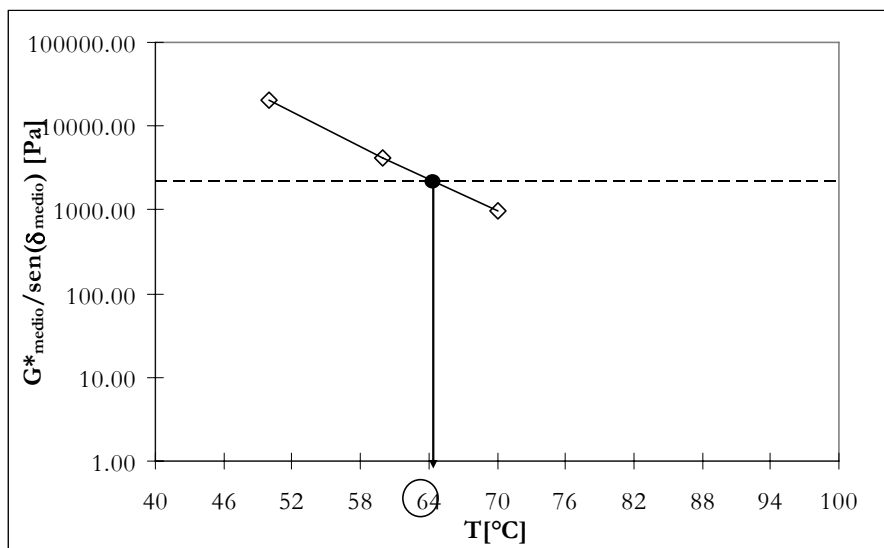
**Temperatura limite = 65.63°C**

**PERFORMANCE GRADE = 64°C**

**50/70 A inv. MRTFOT**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$sen(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
50	82.90	82.66	82.79	<b>82.78</b>	1.44	0.99
60	86.66	86.64	86.63	<b>86.64</b>	1.51	1.00
70	88.47	88.25	88.68	<b>88.47</b>	1.54	1.00

T	$G^*_1(10rad/s)$	$G^*_2(10rad/s)$	$G^*_3(10rad/s)$	$G^*_{medio}(10rad/s)$	$G_{medio}/sen(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50	19934.84	20467.81	20300.07	<b>20234.24</b>	<b>20438.63</b>
60	4322.83	4160.66	4097.52	<b>4193.67</b>	<b>4201.43</b>
70	993.24	1041.51	920.94	<b>985.23</b>	<b>985.70</b>

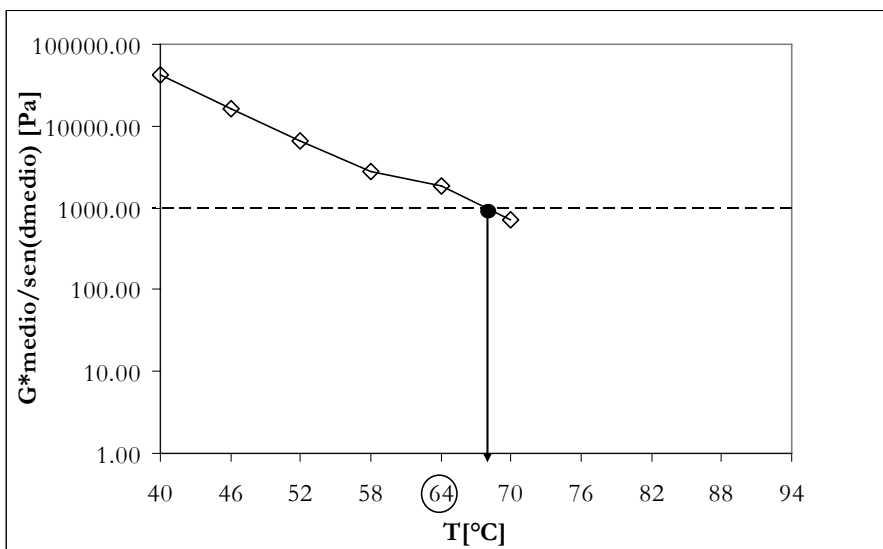


**Temperatura limite = 66.22°C**  
**PERFORMANCE GRADE = 64°C**

**50/70 B vergine**

T	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$	$\delta_{medio}$	$sen(\delta_{medio})$
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
40	74.45	74.32	74.27	<b>74.35</b>	1.30	0.96
46	78.22	78.06	78.08	<b>78.12</b>	1.36	0.98
52	80.99	80.81	80.98	<b>80.93</b>	1.41	0.99
58	83.47	83.50	83.68	<b>83.55</b>	1.46	0.99
64	84.47	85.95	79.36	<b>83.26</b>	1.45	0.99
70	86.73	86.26	86.65	<b>86.55</b>	1.51	1.00

T	$G^*_1(10rad/s)$	$G^*_2(10rad/s)$	$G^*_3(10rad/s)$	$G^*_{medio}(10rad/s)$	$G_{medio}/sen(\delta_{medio})$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
40	35146.64	45156.71	42768.72	<b>41024.02</b>	<b>42575.55</b>
46	15658.23	15736.88	15587.09	<b>15660.73</b>	<b>16015.23</b>
52	6485.99	6718.92	6562.61	<b>6589.17</b>	<b>6675.28</b>
58	2818.24	2766.04	2751.67	<b>2778.65</b>	<b>2795.79</b>
64	1952.12	2107.20	1506.00	<b>1855.11</b>	<b>1868.73</b>
70	727.24	737.52	723.61	<b>729.46</b>	<b>730.81</b>



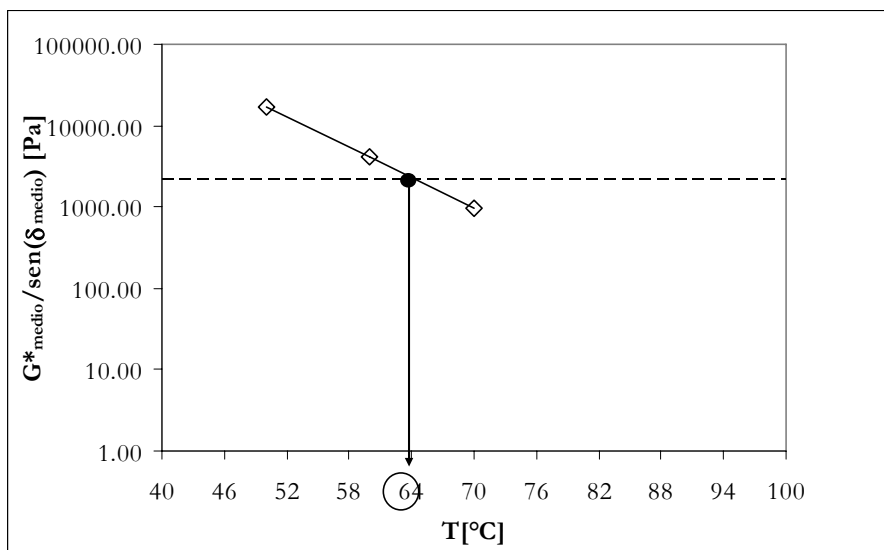
Temperatura limite = 68.58°C

**PERFORMANCE GRADE = 64°C**

**50/70 B inv. RTFOT**

<b>T</b>	<b><math>\delta_1</math></b>	<b><math>\delta_2</math></b>	<b><math>\delta_3</math></b>	<b><math>\delta_{medio}</math></b>	<b><math>\delta_{medio}</math></b>	<b>sen(<math>\delta_{medio}</math>)</b>
[°C]	[°]	[°]	[°]	[°]	[rad]	[-]
50	76.88	76.99	76.97	<b>76.95</b>	1.34	0.97
60	82.01	82.73	81.76	<b>82.17</b>	1.43	0.99
70	84.60	84.18	84.62	<b>84.47</b>	1.47	1.00

<b>T</b>	<b><math>G^*_1(10rad/s)</math></b>	<b><math>G^*_2(10rad/s)</math></b>	<b><math>G^*_3(10rad/s)</math></b>	<b><math>G^*_{medio}(10rad/s)</math></b>	<b><math>G_{medio}/sen(\delta_{medio})</math></b>
[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50	16126.03	15753.96	16653.06	<b>16177.68</b>	<b>16678.02</b>
60	3708.24	2954.76	5833.22	<b>4165.41</b>	<b>4207.48</b>
70	989.30	949.15	914.53	<b>950.99</b>	<b>950.99</b>



**Temperatura limite = 64.77°C**

**PERFORMANCE GRADE = 64°C**



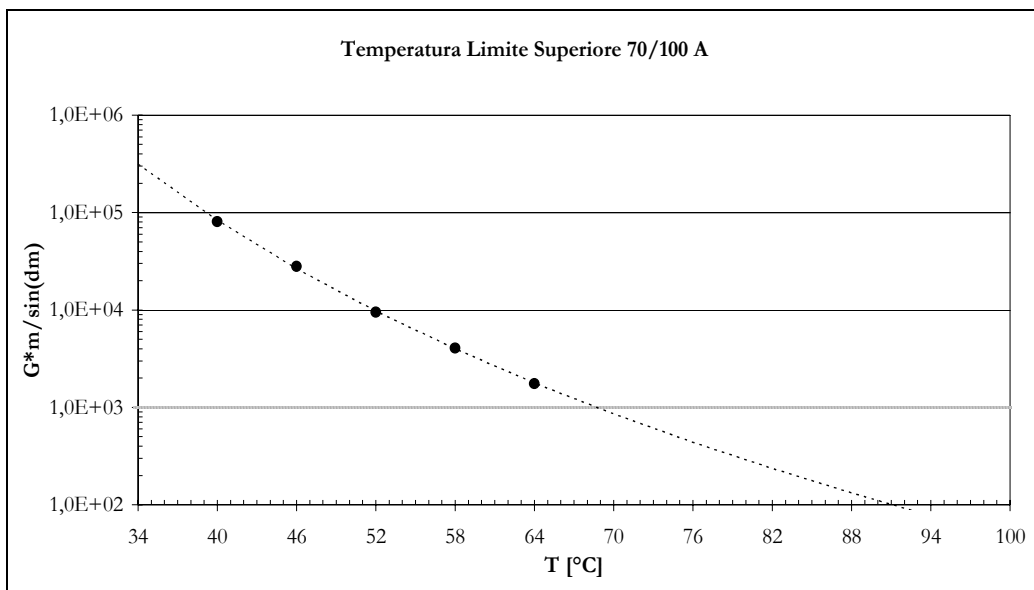


Figura 1: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A non invecchiato

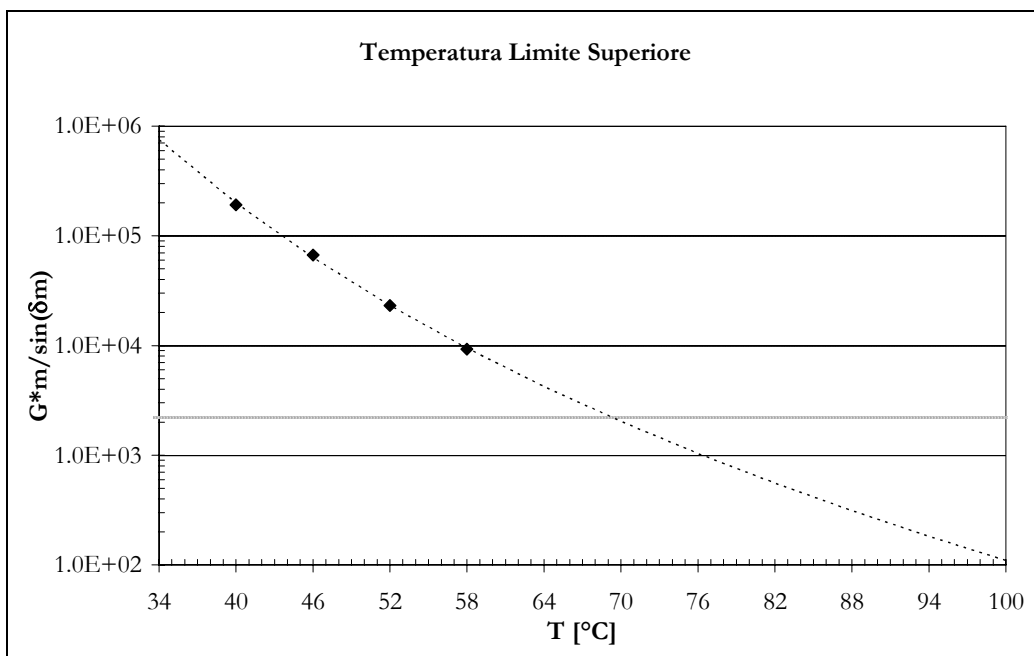
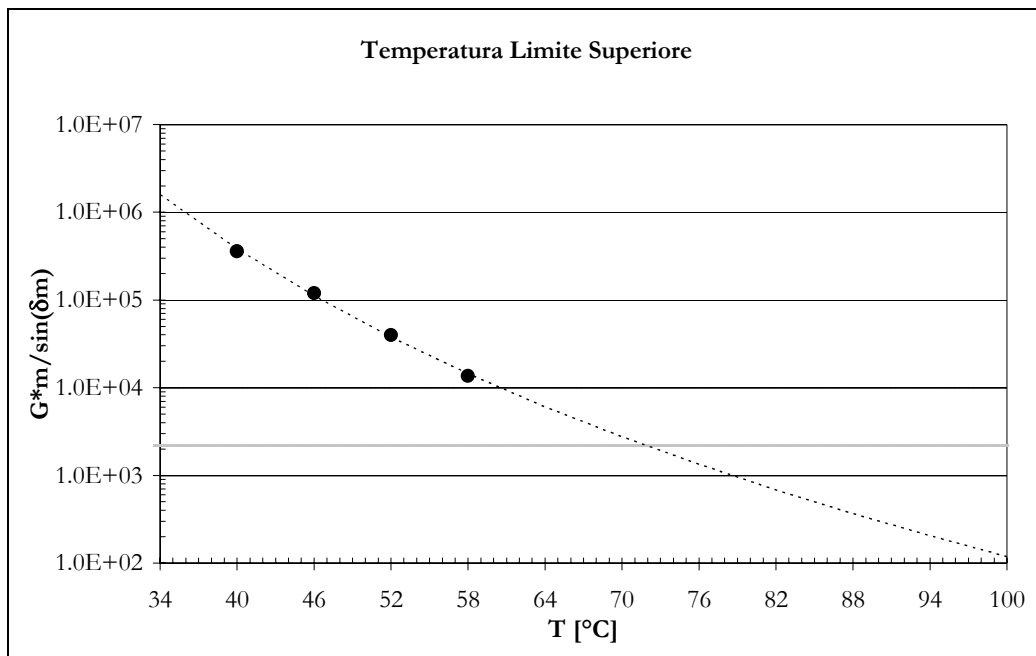
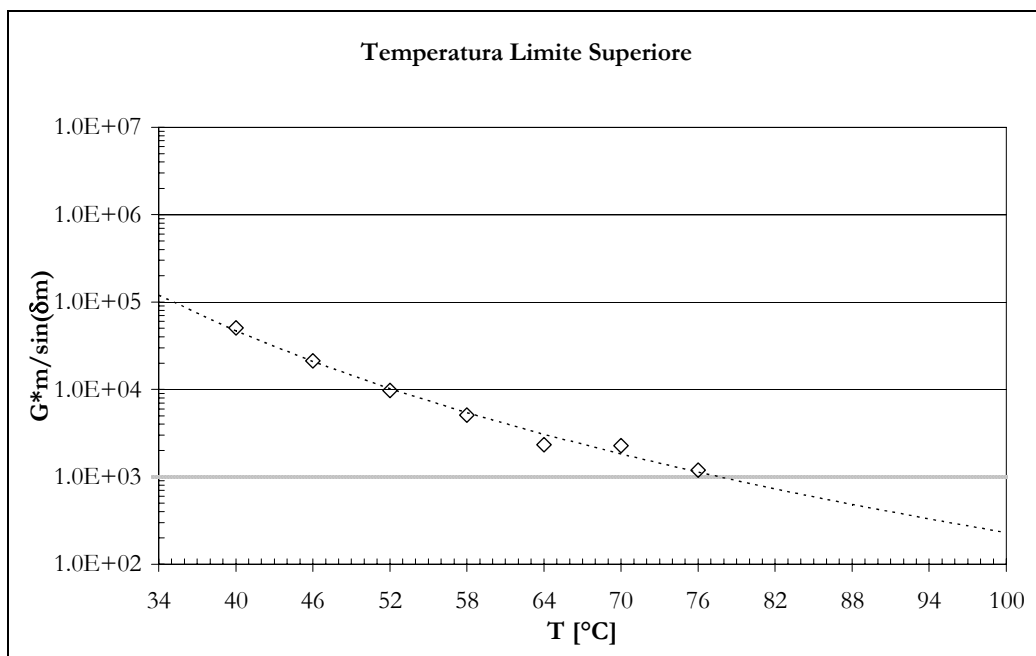


Figura 2: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A invecchiato RTFOT



**Figura 3: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A invecchiato PAV**



**Figura 4: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A + 18% CRM vergine**

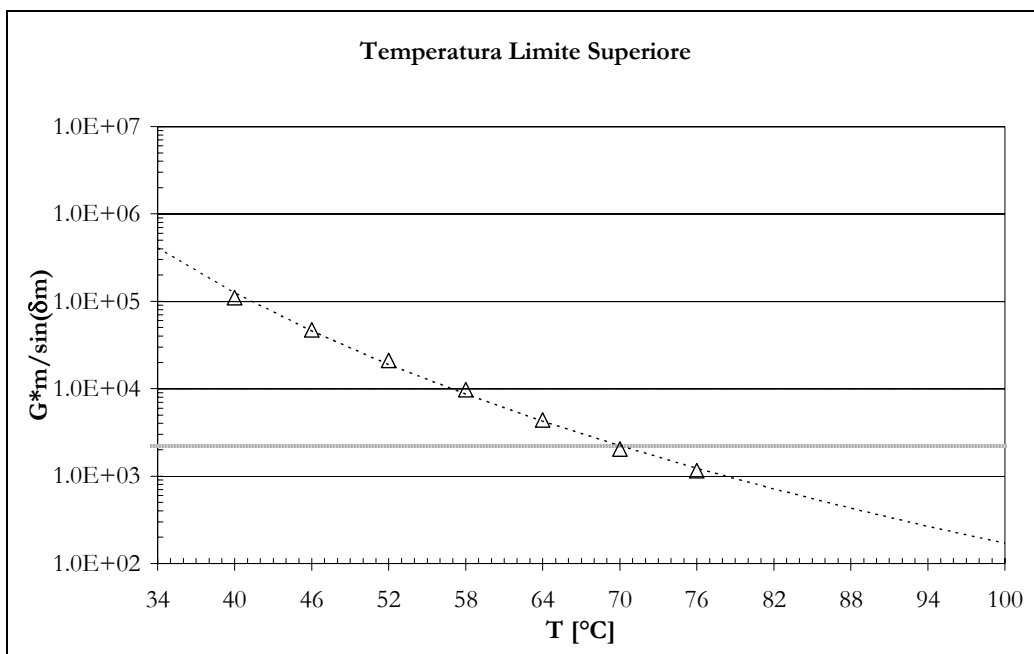


Figura 5: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A + 18% CRM invecchiato RTFOT

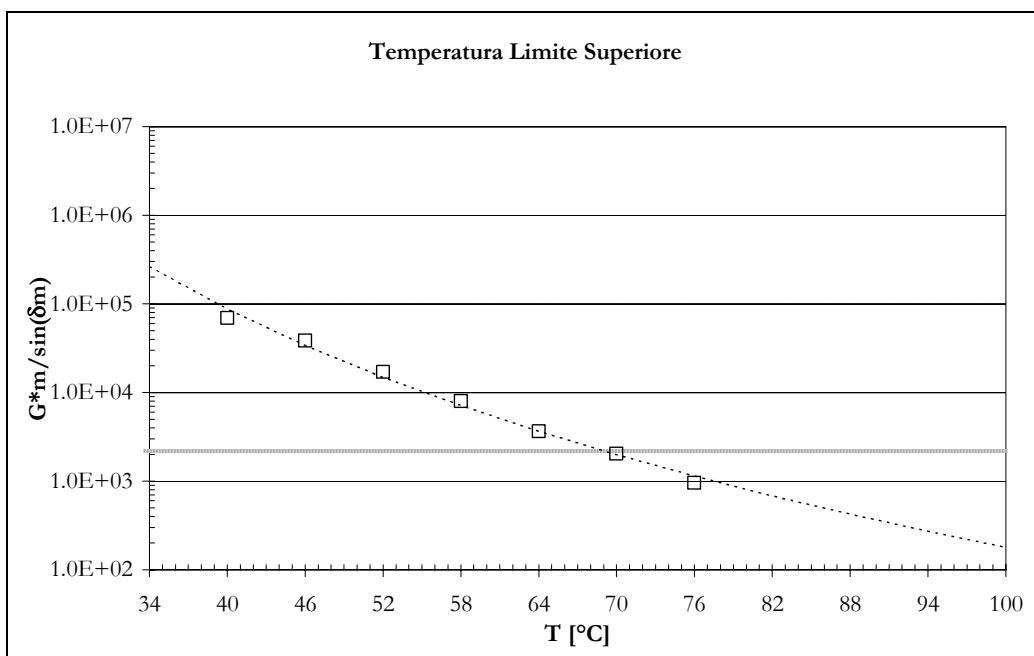
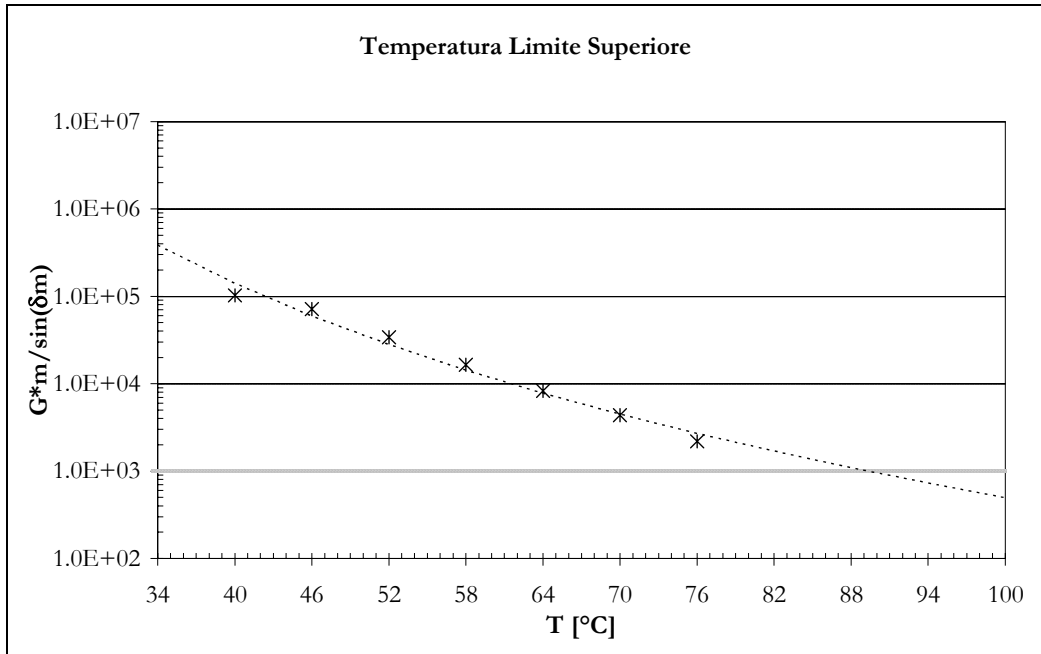
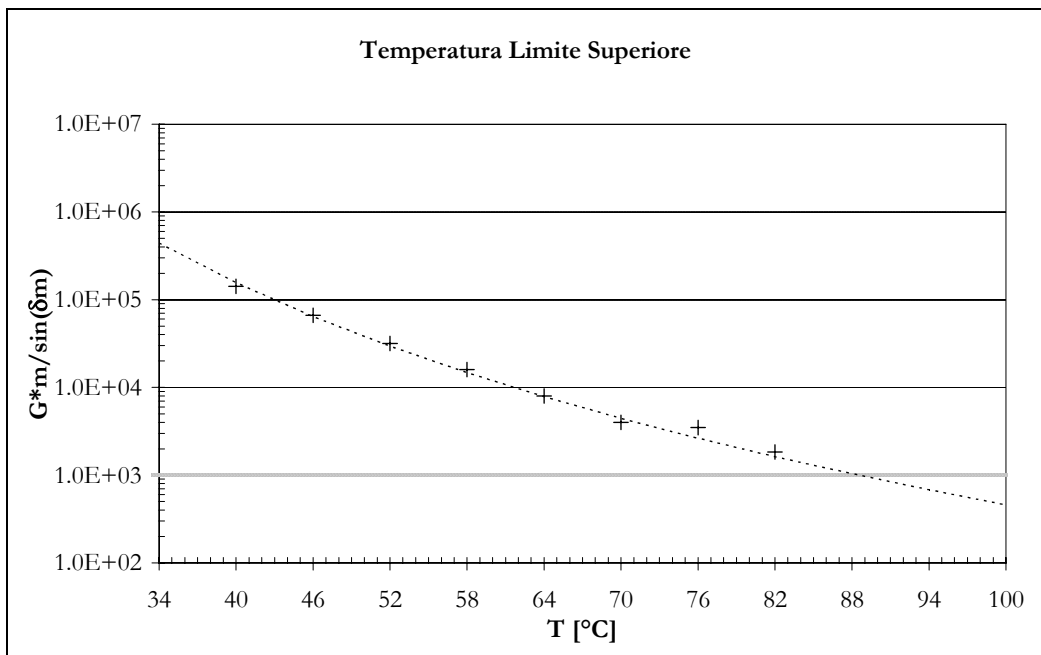


Figura 6: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A + 18% CRM invecchiato PAV



**Figura 7: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A + 20% CRM vergine**



**Figura 8: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A + 22% CRM vergine**

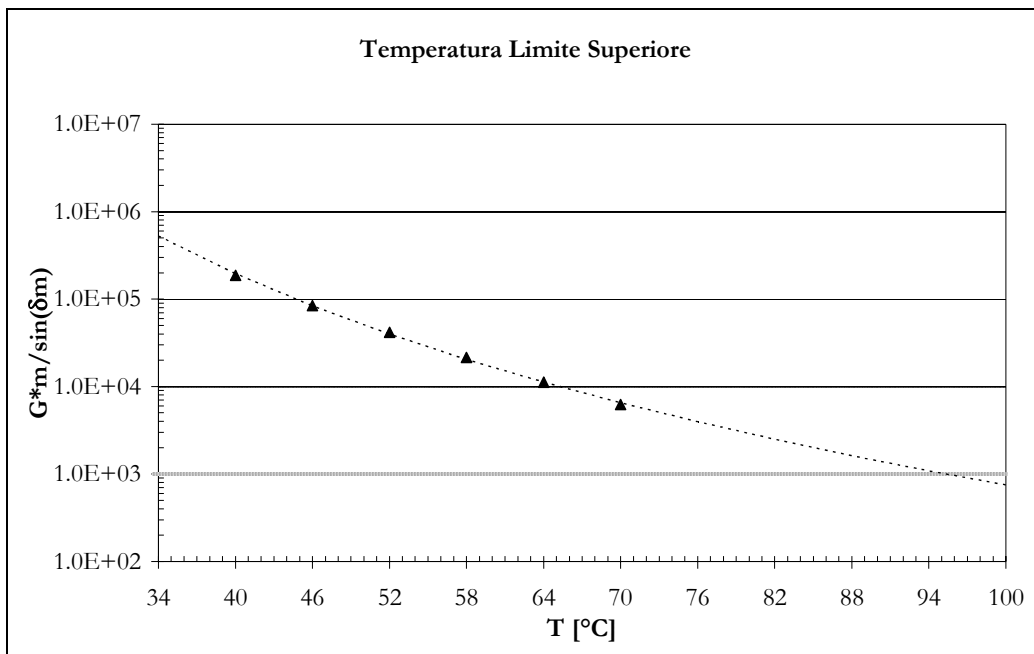


Figura 9: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 40/50 A + 18% CRM vergine

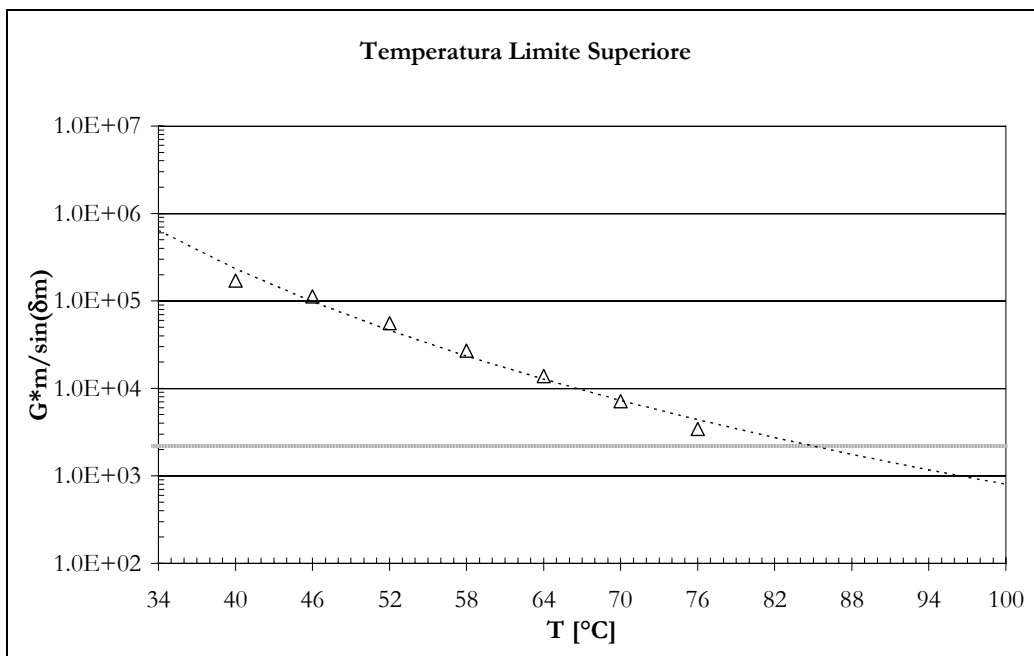
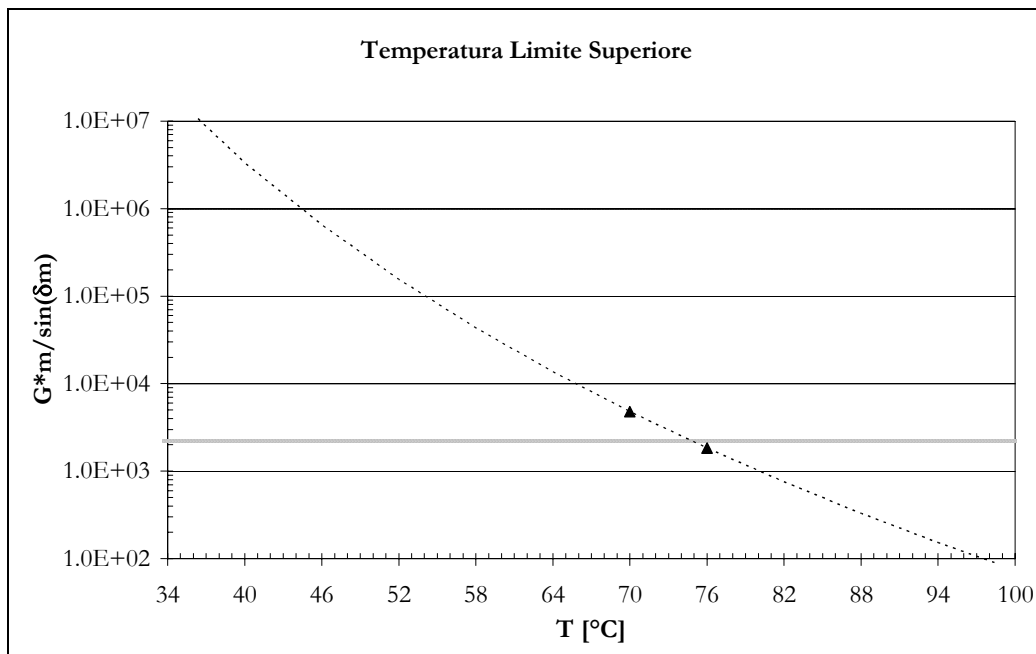
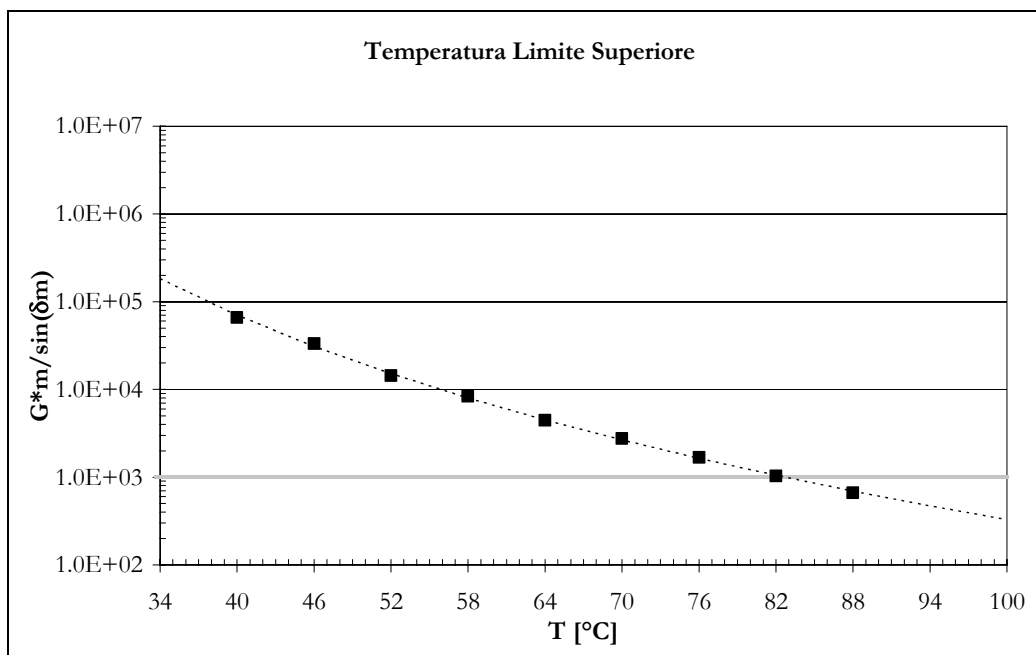


Figura 10: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 40/50 A + 18% CRM invecchiato RTFOT



**Figura 11: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume 40/50 A + 18% CRM invecchiato PAV**



**Figura 12: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume SBS Hard vergine**

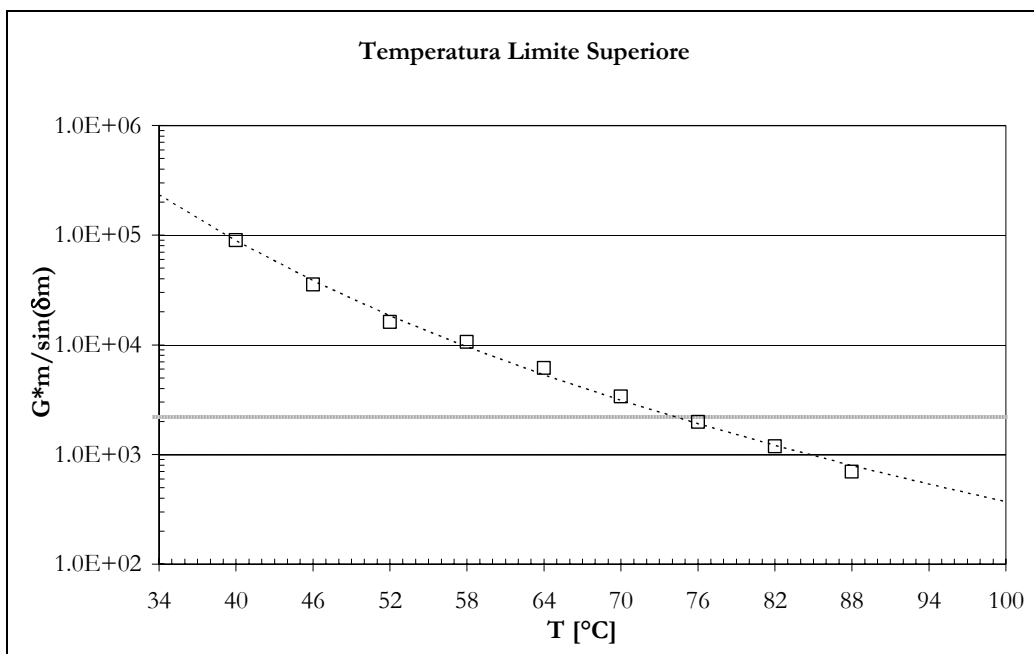


Figura 13: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume SBS Hard invecchiato RTFOT

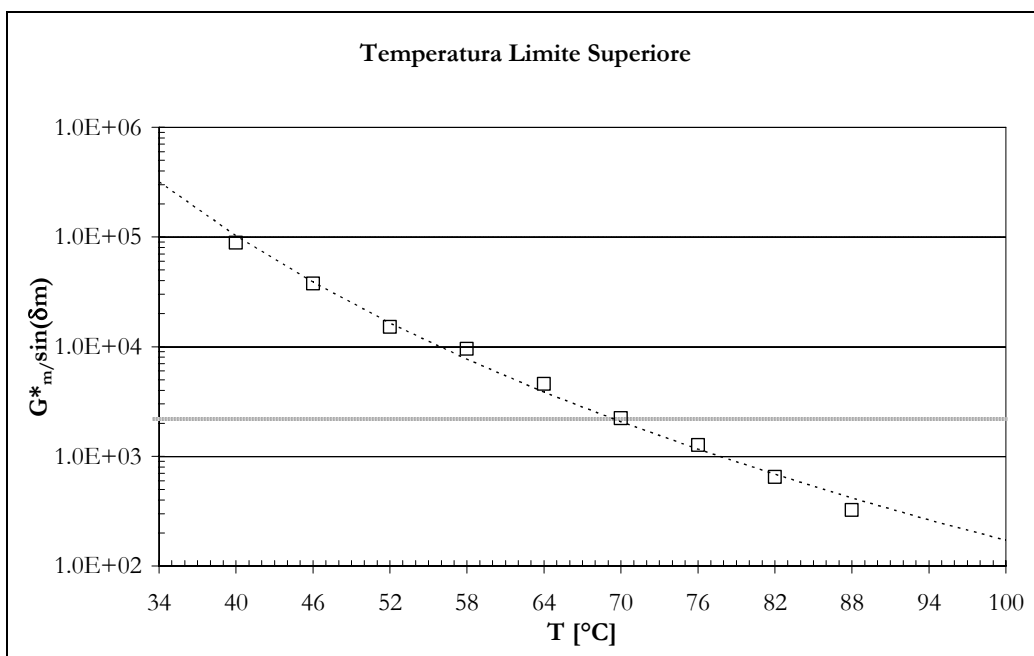


Figura 14: Determinazione della temperatura limite superiore PG per il bitume SBS Hard invecchiato PAV





## Appendice 1.3

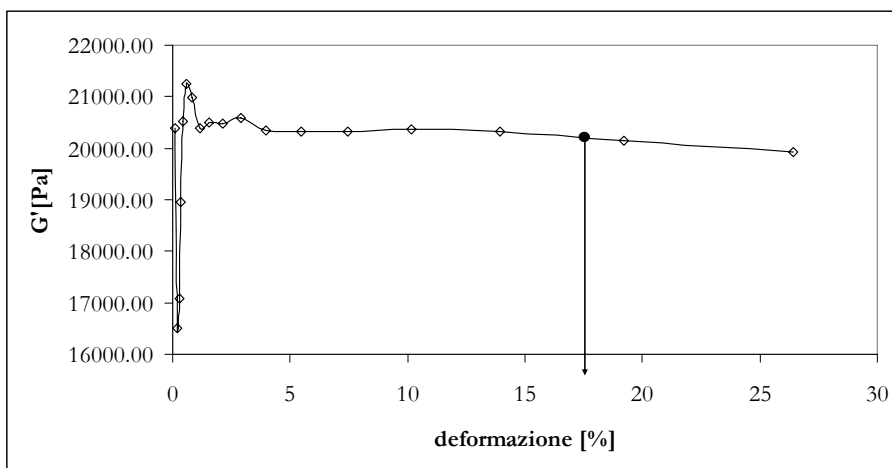
### Limite Lineare funzione della temperatura

- 40°C
- 52°C
- 76°C



**SBS Hard a 40°C**

<b>T</b>	<b>ω</b>	<b>τ</b>	<b>G'</b>	<b>δ</b>	<b>γ</b>
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
40.00	9.24	65.18	20392.57	67.94	0.12
40.00	9.24	89.15	16508.46	67.88	0.20
40.00	9.24	121.93	17081.26	66.95	0.28
40.00	9.24	166.76	18966.45	66.91	0.35
40.00	9.24	228.08	20521.33	66.73	0.44
40.00	9.24	311.94	21246.23	66.58	0.58
40.00	9.24	426.64	20985.30	66.56	0.81
40.00	9.24	583.51	20384.31	66.56	1.14
40.00	9.24	798.07	20500.19	66.48	1.55
40.00	9.24	1091.52	20474.87	66.48	2.13
40.00	9.24	1492.87	20586.79	66.52	2.89
40.00	9.24	2041.80	20340.11	66.58	3.99
40.00	9.24	2792.57	20319.56	66.60	5.46
40.00	9.24	3819.40	20322.01	66.62	7.46
40.00	9.24	5223.79	20374.30	66.61	10.18
40.00	9.24	7144.58	20323.14	66.65	13.94
40.00	9.24	9771.64	20136.17	66.71	19.19
40.00	9.24	13364.68	19920.73	66.81	26.42
40.00	9.24	18278.87	19475.06	66.96	36.73
40.00	9.24	25000.01	18791.33	67.21	51.54



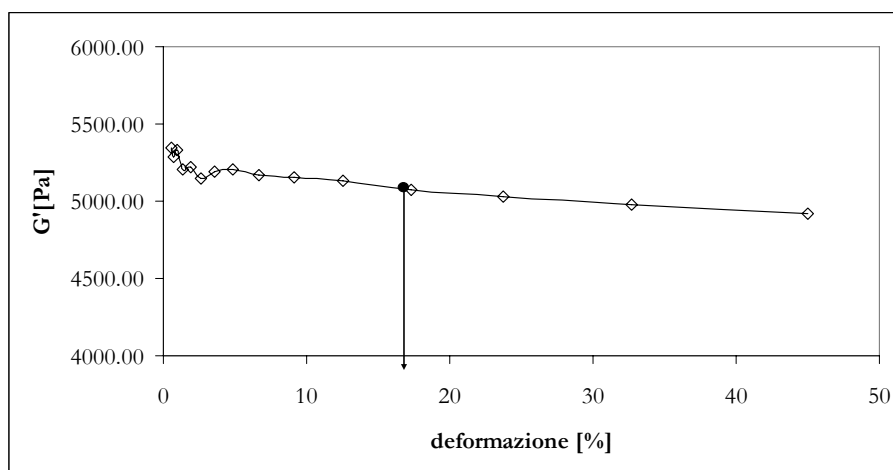
**0.95\*G'max = 20183.92 Pa**

**sollecitazione limite lineare = 9018.15 Pa**

**LIMITE LINEARE:            γ = 17.68%**

**SBS Hard a 52°C**

T	$\omega$	$\tau$	G'	$\delta$	$\gamma$
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
52.00	9.24	65.18	5343.16	64.84	0.52
52.00	9.24	89.15	5283.82	64.50	0.73
52.00	9.24	121.93	5334.29	64.50	0.98
52.00	9.24	166.76	5209.09	64.42	1.38
52.00	9.24	228.08	5222.44	64.38	1.89
52.00	9.24	311.94	5145.36	64.35	2.63
52.00	9.24	426.64	5192.13	64.40	3.55
52.00	9.24	583.51	5204.11	64.39	4.85
52.00	9.24	798.07	5171.31	64.42	6.66
52.00	9.24	1091.52	5153.75	64.49	9.12
52.00	9.24	1492.87	5132.93	64.52	12.51
52.00	9.24	2041.80	5070.47	64.58	17.28
52.00	9.24	2792.57	5031.31	64.66	23.75
52.00	9.24	3819.40	4980.01	64.77	32.70
52.00	9.24	5223.79	4921.70	64.92	44.98
52.00	9.24	7144.58	4822.41	65.16	62.24
52.00	9.24	9771.64	4657.56	65.36	87.46
52.00	9.24	13364.68	4484.33	65.41	124.02
52.00	9.24	18278.87	4306.20	65.07	178.94
52.00	9.24	25000.01	4244.83	63.99	258.25



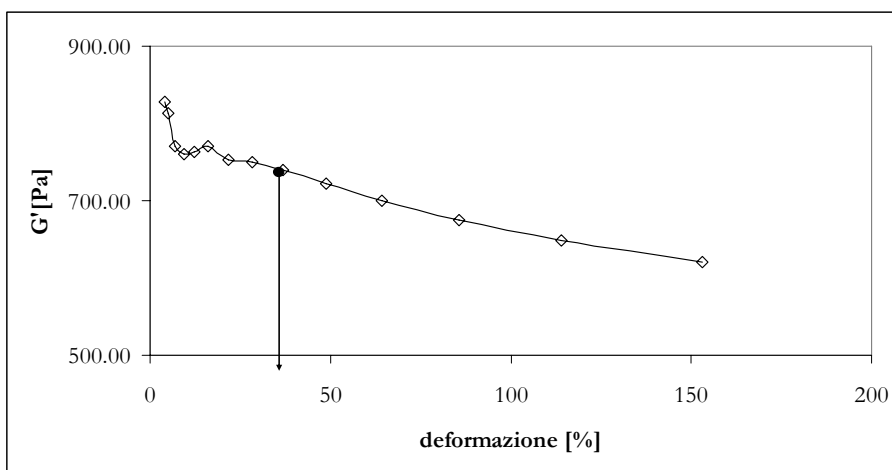
$0.95 \cdot G'_{\max} = 5067.58 \text{ Pa}$

sollecitazione limite lineare = 2089.36 Pa

**LIMITE LINEARE:**  $\gamma = 17.69\%$

**SBS Hard a 76°C**

<b>T</b>	<b>ω</b>	<b>τ</b>	<b>G'</b>	<b>δ</b>	<b>γ</b>
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
76.00	9.24	65.18	828.47	59.88	3.95
76.00	9.24	84.95	813.27	60.47	5.15
76.00	9.24	110.72	771.03	60.57	7.06
76.00	9.24	144.30	760.15	60.41	9.37
76.00	9.24	188.06	763.07	59.79	12.40
76.00	9.24	245.10	770.23	59.46	16.17
76.00	9.24	319.44	753.10	59.42	21.58
76.00	9.24	416.33	749.89	59.43	28.24
76.00	9.24	542.61	740.32	59.82	36.84
76.00	9.24	707.19	722.00	60.18	48.71
76.00	9.24	921.68	700.49	60.69	64.41
76.00	9.24	1201.23	675.42	61.22	85.63
76.00	9.24	1565.57	648.94	61.80	114.00
76.00	9.24	2040.42	619.92	62.29	153.04
76.00	9.24	2659.30	599.08	62.59	204.34
76.00	9.24	3465.88	584.98	62.52	273.35
76.00	9.24	4517.10	582.99	61.97	364.17
76.00	9.24	5887.17	593.93	60.79	483.76
76.00	9.24	7672.79	619.62	59.05	636.92
76.00	9.24	10000.00	649.03	57.13	836.31



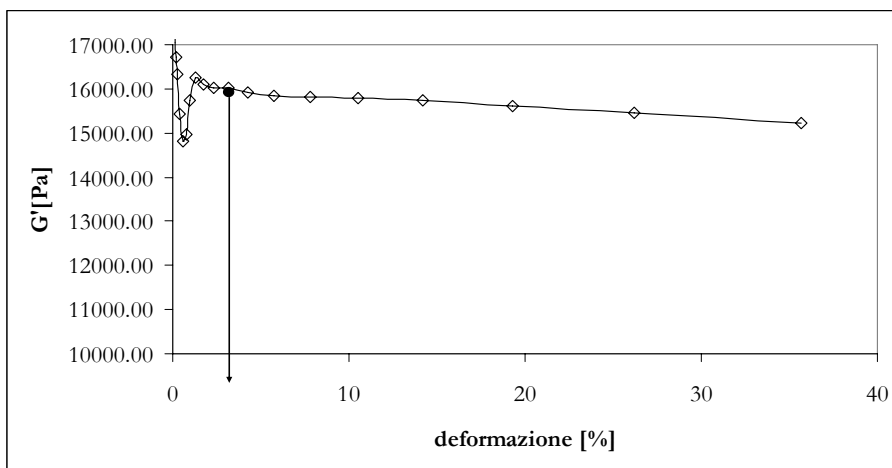
**0.95\*G'max = 732.48 Pa**

**sollecitazione limite lineare = 607.25 Pa**

**LIMITE LINEARE:            γ = 41.48%**

**EVA Soft a 40°C**

T	$\omega$	$\tau$	G'	$\delta$	$\gamma$
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
40.00	9.24	65.18	17224.35	73.47	0.11
40.00	9.24	88.11	17049.92	73.75	0.15
40.00	9.24	119.10	16712.90	73.64	0.20
40.00	9.24	160.99	16335.18	73.64	0.28
40.00	9.24	217.61	15417.83	73.53	0.40
40.00	9.24	294.15	14813.96	73.57	0.56
40.00	9.24	397.61	14976.44	73.55	0.75
40.00	9.24	537.46	15740.11	73.60	0.96
40.00	9.24	726.50	16257.81	73.63	1.26
40.00	9.24	982.04	16087.88	73.66	1.72
40.00	9.24	1327.45	16024.02	73.68	2.33
40.00	9.24	1794.35	16023.24	73.73	3.14
40.00	9.24	2425.48	15906.85	73.78	4.26
40.00	9.24	3278.60	15843.71	73.82	5.77
40.00	9.24	4431.78	15820.21	73.86	7.79
40.00	9.24	5990.58	15795.31	73.92	10.51
40.00	9.24	8097.65	15750.87	73.97	14.20
40.00	9.24	10945.85	15611.76	74.03	19.29
40.00	9.24	14795.84	15455.94	74.12	26.19
40.00	9.24	20000.00	15212.61	74.27	35.65



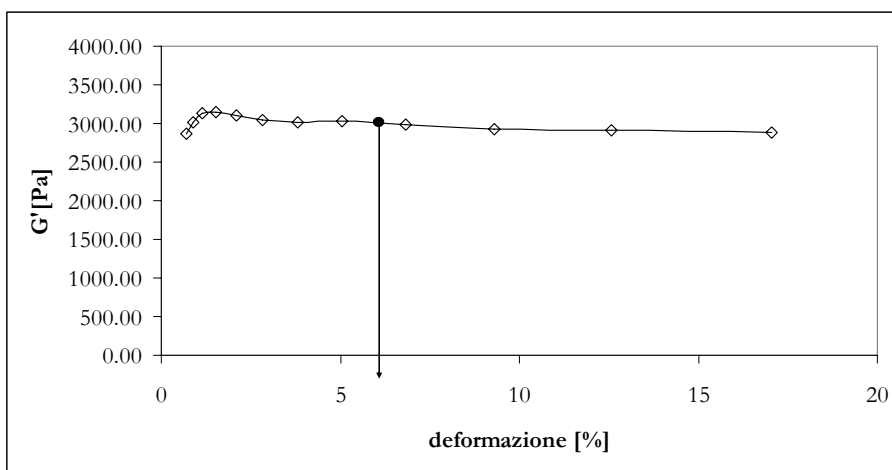
$0.95 \cdot G'_{\max} = 15877.26 \text{ Pa}$

sollecitazione limite lineare = 2793.02 Pa

**LIMITE LINEARE:**  $\gamma = 4.91\%$

**EVA Soft a 52°C**

T	$\omega$	$\tau$	G'	$\delta$	$\gamma$
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
52.00	9.24	65.18	2862.09	72.25	0.69
52.00	9.24	88.11	3011.76	72.25	0.89
52.00	9.24	119.10	3133.85	72.34	1.15
52.00	9.24	160.99	3151.48	72.50	1.54
52.00	9.24	217.61	3100.72	72.75	2.08
52.00	9.24	294.15	3047.36	73.00	2.82
52.00	9.24	397.61	3021.43	73.23	3.80
52.00	9.24	537.46	3032.33	73.42	5.06
52.00	9.24	726.50	2987.01	73.66	6.84
52.00	9.24	982.04	2933.69	73.89	9.29
52.00	9.24	1327.45	2912.47	74.00	12.56
52.00	9.24	1794.35	2886.80	74.07	17.06
52.00	9.24	2425.48	2869.46	74.11	23.15
52.00	9.24	3278.60	2842.09	74.17	31.46
52.00	9.24	4431.78	2815.60	74.32	42.55
52.00	9.24	5990.58	2769.51	74.47	57.92
52.00	9.24	8097.65	2681.43	74.64	79.98
52.00	9.24	10945.85	2574.85	74.77	111.68
52.00	9.24	14795.84	2445.09	74.62	160.52
52.00	9.24	20000.00	2207.98	73.76	253.26



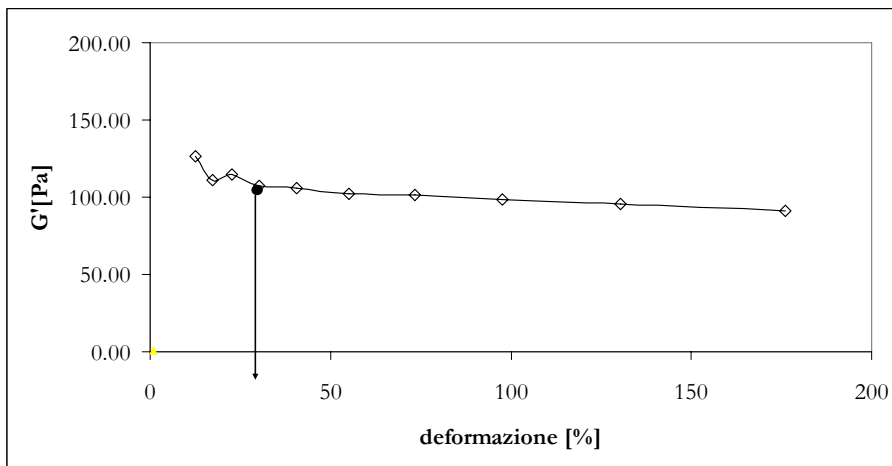
$0.95 * G'_{max} = 2993.91 \text{ Pa}$

sollecitazione limite lineare = 693.71 Pa

**LIMITE LINEARE:**  $\gamma = 6.53\%$

**EVA Soft a 76°C**

T	$\omega$	$\tau$	G'	$\delta$	$\gamma$
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
76.00	9.24	65.18	126.60	75.75	12.67
76.00	9.24	86.78	111.30	77.14	17.35
76.00	9.24	115.54	114.37	77.08	22.59
76.00	9.24	153.84	107.23	77.85	30.20
76.00	9.24	204.82	106.08	77.85	40.65
76.00	9.24	272.70	102.30	78.06	55.17
76.00	9.24	363.08	101.34	78.18	73.39
76.00	9.24	483.41	98.59	78.53	97.55
76.00	9.24	643.62	95.36	78.86	130.36
76.00	9.24	856.93	91.29	79.18	176.21
76.00	9.24	1140.93	87.25	79.49	238.54
76.00	9.24	1519.06	83.73	79.75	322.75
76.00	9.24	2022.50	79.94	79.96	441.24
76.00	9.24	2692.80	75.86	80.13	608.38
76.00	9.24	3585.24	69.85	80.33	861.92
76.00	9.24	4773.46	63.38	80.89	1192.49
76.00	9.24	6355.47	59.31	81.66	1554.06
76.00	9.24	8461.79	47.10	83.11	2156.91
76.00	9.24	11266.18	31.47	84.98	3131.70
76.00	9.24	15000.00	16.99	86.84	4863.59



$0.95 * G'_{max} = 108.65 \text{ Pa}$

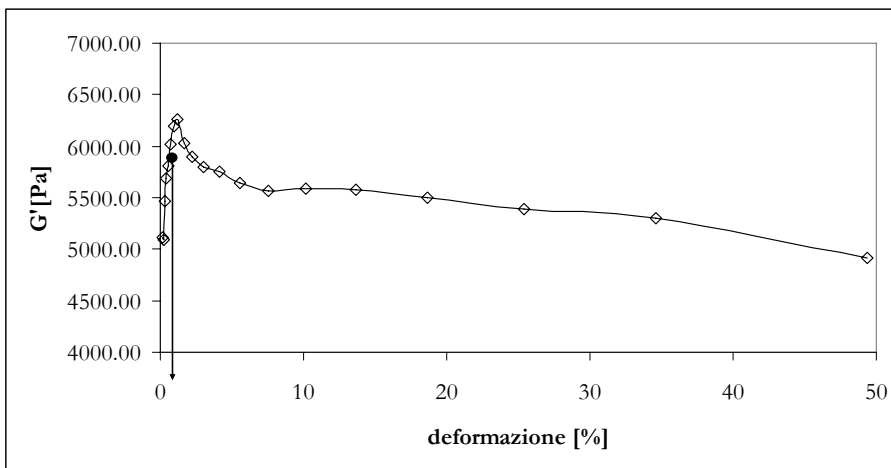
sollecitazione limite lineare = 114.11 Pa

**LIMITE LINEARE:**  $\gamma = 28.46\%$



50/70 A a 40°C

T	$\omega$	$\tau$	G'	$\delta$	$\gamma$
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
40.00	9.24	65.18	5116.32	81.61	0.19
40.00	9.24	88.11	5094.19	81.80	0.25
40.00	9.24	119.10	5463.89	81.56	0.32
40.00	9.24	160.99	5686.12	81.65	0.41
40.00	9.24	217.61	5808.56	81.67	0.54
40.00	9.24	294.15	6022.28	81.73	0.70
40.00	9.24	397.61	6191.61	81.83	0.91
40.00	9.24	537.46	6266.48	81.94	1.20
40.00	9.24	726.50	6024.39	82.10	1.66
40.00	9.24	982.04	5892.44	82.24	2.25
40.00	9.24	1327.45	5795.28	82.36	3.05
40.00	9.24	1794.35	5752.67	82.46	4.09
40.00	9.24	2425.48	5648.35	82.54	5.58
40.00	9.24	3278.60	5569.86	82.62	7.56
40.00	9.24	4431.78	5593.64	82.66	10.12
40.00	9.24	5990.58	5576.64	82.70	13.65
40.00	9.24	8097.65	5496.57	82.74	18.62
40.00	9.24	10945.85	5385.15	82.82	25.42
40.00	9.24	14795.84	5300.39	82.88	34.59
40.00	9.24	20000.00	4913.08	83.04	49.36



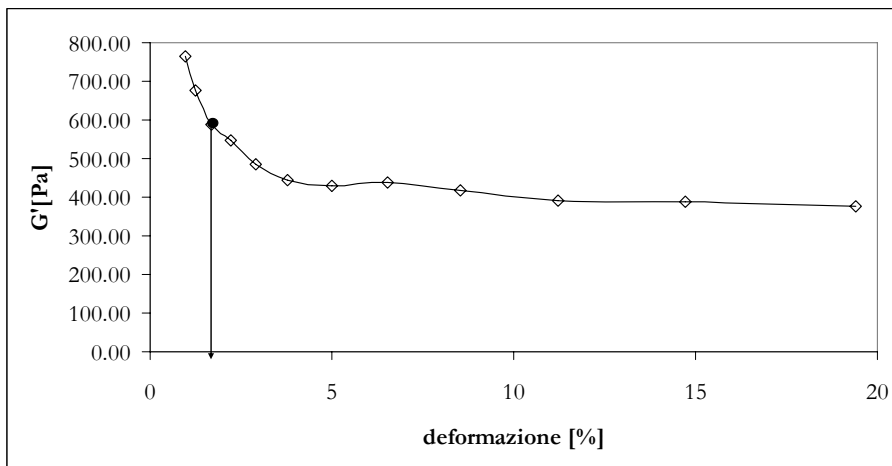
$0.95 * G'_{max} = 5953.16 \text{ Pa}$

sollecitazione limite lineare = 854.15 Pa

**LIMITE LINEARE:**  $\gamma = 1.95\%$

50/70 A a 52°C

T	$\omega$	$\tau$	G'	$\delta$	$\gamma$
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
52.00	9.24	65.18	766.02	83.52	0.96
52.00	9.24	85.77	677.59	84.35	1.25
52.00	9.24	112.86	589.10	84.94	1.69
52.00	9.24	148.51	546.65	85.32	2.22
52.00	9.24	195.42	486.63	85.87	2.89
52.00	9.24	257.15	443.87	86.26	3.78
52.00	9.24	338.38	430.56	86.36	4.99
52.00	9.24	445.26	436.99	86.33	6.52
52.00	9.24	585.90	417.34	86.52	8.53
52.00	9.24	770.98	391.60	86.73	11.23
52.00	9.24	1014.51	389.70	86.76	14.72
52.00	9.24	1334.96	375.33	86.87	19.40
52.00	9.24	1756.64	365.23	86.94	25.65
52.00	9.24	2311.52	353.76	87.02	33.96
52.00	9.24	3041.66	347.48	87.08	44.60
52.00	9.24	4002.44	341.53	87.14	58.52
52.00	9.24	5266.71	325.09	87.27	77.24
52.00	9.24	6930.32	306.92	87.33	105.12
52.00	9.24	9119.42	255.52	87.69	144.16
52.00	9.24	12000.00	175.46	88.07	229.83



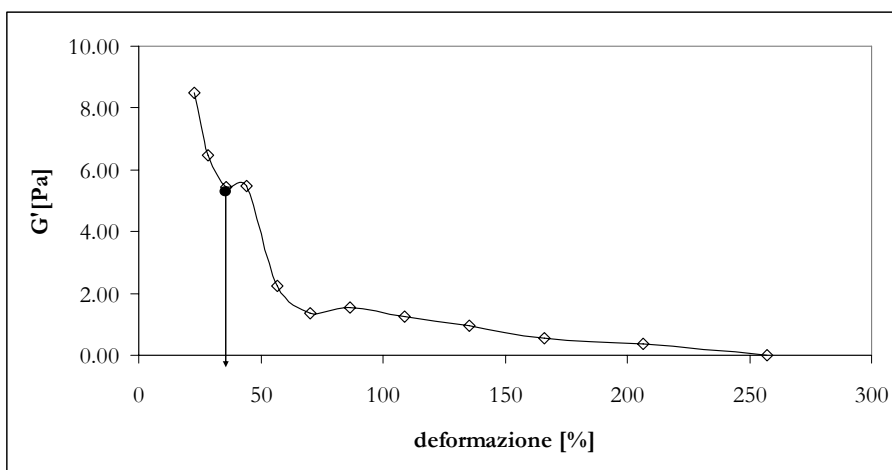
$0.95 * G'_{max} = 559.65 \text{ Pa}$

sollecitazione limite lineare = 136.24 Pa

LIMITE LINEARE:  $\gamma = 2.06\%$

**50/70 A a 76°C**

<b>T</b>	<b>ω</b>	<b>τ</b>	<b>G'</b>	<b>δ</b>	<b>γ</b>
[°C]	[rad/s]	[Pa]	[Pa]	[°]	[%]
76.00	9.24	65.18	8.50	88.30	22.77
76.00	9.24	80.95	6.48	88.69	28.47
76.00	9.24	100.54	5.43	88.89	35.93
76.00	9.24	124.86	5.49	88.89	44.03
76.00	9.24	155.07	2.24	89.53	56.60
76.00	9.24	192.59	1.36	89.72	70.01
76.00	9.24	239.18	1.54	89.68	86.61
76.00	9.24	297.05	1.26	89.74	108.77
76.00	9.24	368.92	0.97	89.80	135.12
76.00	9.24	458.18	0.57	89.88	166.24
76.00	9.24	569.03	0.36	89.93	206.36
76.00	9.24	706.71	0.00	90.00	257.34
76.00	9.24	877.69	0.15	89.97	320.43
76.00	9.24	1090.05	0.35	89.93	399.10
76.00	9.24	1353.78	0.54	89.89	495.91
76.00	9.24	1681.32	0.65	89.86	617.02
76.00	9.24	2088.11	0.68	89.86	776.12
76.00	9.24	2593.31	0.79	89.83	969.40
76.00	9.24	3220.75	0.57	89.88	1211.90
76.00	9.24	4000.00	0.54	89.89	1496.25



**0.95\*G'max = 5.16 Pa**

**sollecitazione limite lineare = 126.75 Pa**

**LIMITE LINEARE:            γ = 44.80%**



## Appendice 1.4

### Dipendenza dalla deformazione

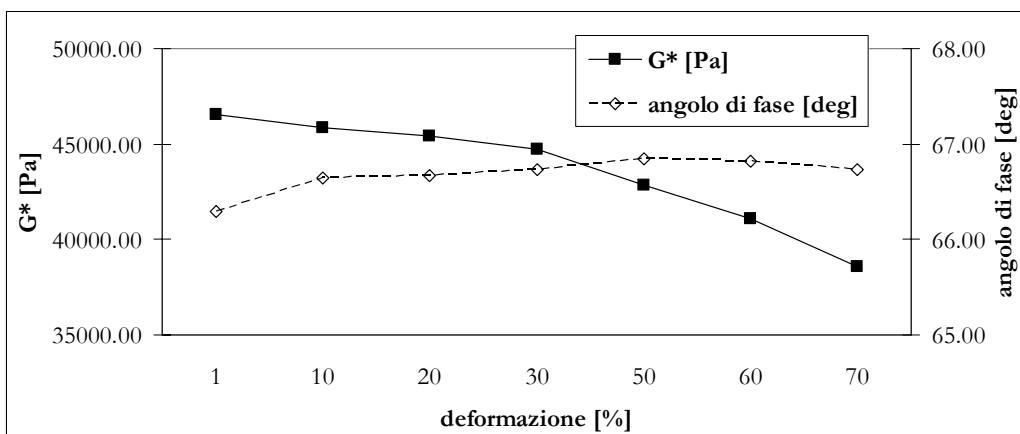
- 40°C
- 52°C
- 76°C



**SBS Hard: dipendenza dalla deformazione a 40°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
<b>modificato SBS hard</b>	40	1	66.27	66.35	66.28	<b>66.30</b>
	40	10	66.66	66.64	66.63	<b>66.64</b>
	40	20	66.70	66.67	66.65	<b>66.67</b>
	40	30	66.75	66.72	66.71	<b>66.73</b>
	40	50	66.89	66.83	66.82	<b>66.85</b>
	40	60	66.80	66.84	66.80	<b>66.82</b>
	40	70	66.74	66.74	66.70	<b>66.73</b>

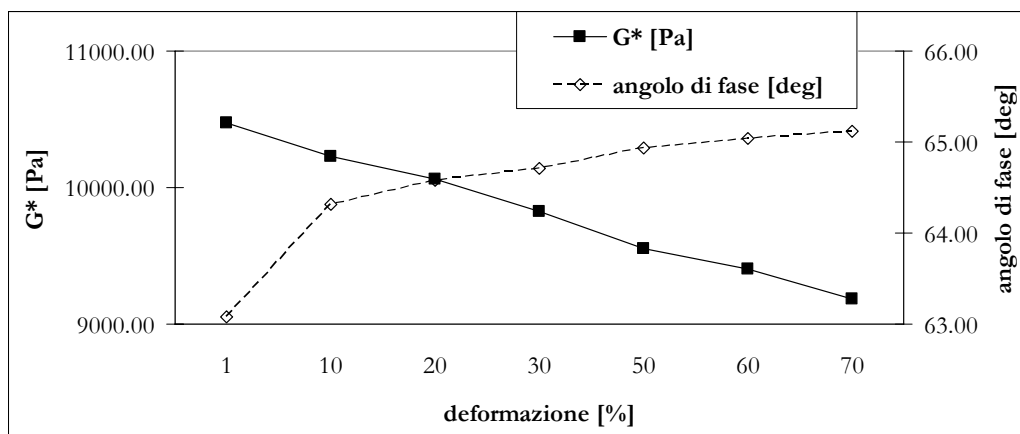
Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24rad/s)$	$G^*_2(9.24rad/s)$	$G^*_3(9.24rad/s)$	$G^*_{medio}(9.24rad/s)$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
<b>modificato SBS hard</b>	40	1	46630.56	46732.07	46351.93	<b>46571.52</b>
	40	10	45704.66	45917.20	45987.24	<b>45869.70</b>
	40	20	45697.42	45457.82	45072.99	<b>45409.41</b>
	40	30	44793.63	44657.61	44814.12	<b>44755.12</b>
	40	50	42854.35	42789.97	42830.29	<b>42824.87</b>
	40	60	40881.50	41013.47	41312.28	<b>41069.08</b>
	40	70	38851.33	38546.13	38309.74	<b>38569.07</b>



**SBS Hard: dipendenza dalla deformazione a 52°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
modificato SBS hard	52	1	63.01	63.12	63.11	<b>63.08</b>
	52	10	64.30	64.32	64.33	<b>64.32</b>
	52	20	64.57	64.59	64.58	<b>64.58</b>
	52	30	64.70	64.72	64.72	<b>64.71</b>
	52	50	64.92	64.93	64.95	<b>64.93</b>
	52	60	65.03	65.03	65.05	<b>65.04</b>
	52	70	65.10	65.13	65.13	<b>65.12</b>

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24rad/s)$	$G^*_2(9.24rad/s)$	$G^*_3(9.24rad/s)$	$G^*_{medio}(9.24rad/s)$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
modificato SBS hard	52	1	10672.64	10394.04	10342.19	<b>10469.62</b>
	52	10	10300.16	10258.18	10131.04	<b>10229.79</b>
	52	20	10113.61	10018.90	10045.65	<b>10059.39</b>
	52	30	9843.33	9858.48	9770.87	<b>9824.23</b>
	52	50	9594.92	9521.16	9543.65	<b>9553.24</b>
	52	60	9455.44	9401.11	9363.83	<b>9406.79</b>
	52	70	9202.79	9170.94	9175.63	<b>9183.12</b>

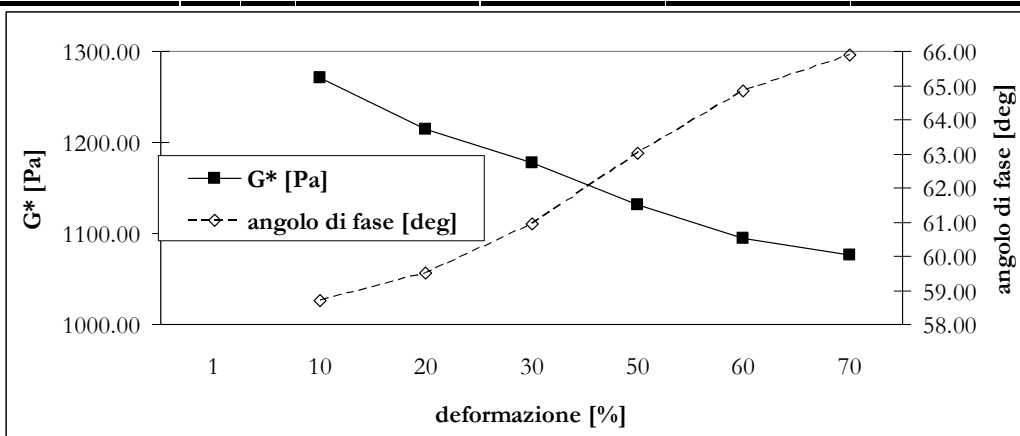




**SBS Hard: dipendenza dalla deformazione a 76°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
modificato SBS hard	76	1	/	/	/	
	76	10	58.84	58.69	58.61	<b>58.71</b>
	76	20	59.32	59.50	59.67	<b>59.50</b>
	76	30	60.60	61.02	61.18	<b>60.93</b>
	76	50	62.41	63.16	63.52	<b>63.03</b>
	76	60	64.47	64.99	65.11	<b>64.86</b>
	76	70	65.62	65.83	66.25	<b>65.90</b>

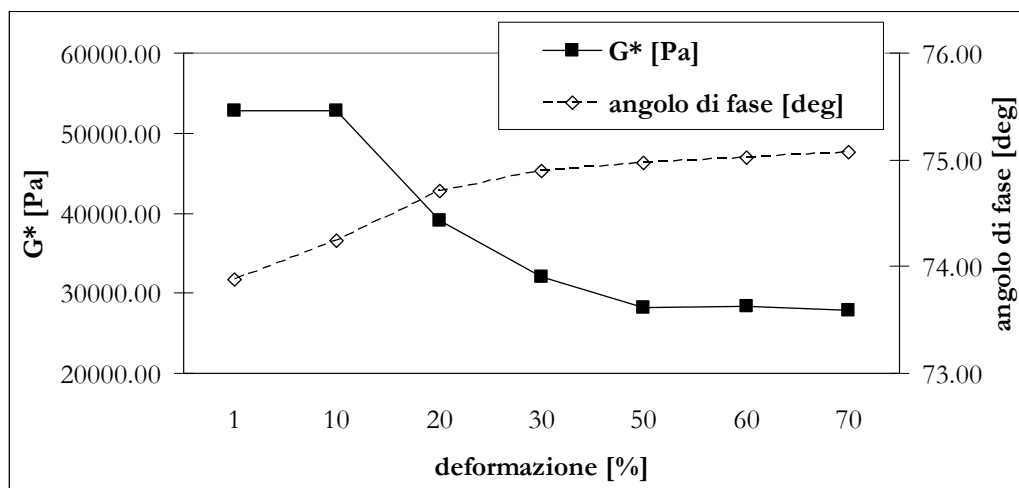
Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24rad/s)$	$G^*_2(9.24rad/s)$	$G^*_3(9.24rad/s)$	$G^*_{medio}(9.24rad/s)$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
modificato SBS hard	76	1	/	/	/	
	76	10	1272.01	1266.06	1275.51	<b>1271.19</b>
	76	20	1215.67	1215.67	1211.60	<b>1214.31</b>
	76	30	1190.87	1174.34	1168.65	<b>1177.95</b>
	76	50	1143.70	1129.25	1122.17	<b>1131.70</b>
	76	60	1098.67	1093.72	1093.49	<b>1095.29</b>
	76	70	1082.13	1076.46	1068.86	<b>1075.82</b>



**EVA Soft: dipendenza dalla deformazione a 40°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{\text{medio}}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
modificato EVA soft	40	1	73.86	73.89	73.89	<b>73.88</b>
	40	10	74.25	74.25	74.23	<b>74.24</b>
	40	20	74.72	74.71	74.70	<b>74.71</b>
	40	30	74.86	74.88	74.93	<b>74.89</b>
	40	50	74.99	74.95	74.98	<b>74.97</b>
	40	60	75.02	75.02	75.02	<b>75.02</b>
	40	70	75.09	75.05	75.09	<b>75.07</b>

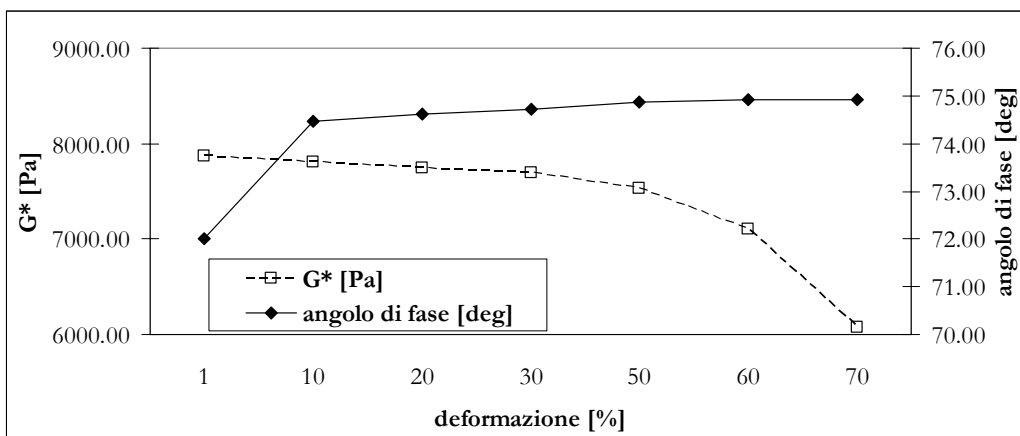
Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24\text{rad/s})$	$G^*_2(9.24\text{rad/s})$	$G^*_3(9.24\text{rad/s})$	$G^*_{\text{medio}}(9.24\text{rad/s})$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
modificato EVA soft	40	1	53686.57	52373.58	52352.86	<b>52804.34</b>
	40	10	52836.68	52684.81	52663.07	<b>52728.19</b>
	40	20	39157.20	39073.09	39097.35	<b>39109.21</b>
	40	30	35413.39	32151.37	28643.61	<b>32069.45</b>
	40	50	29026.57	28339.57	27413.88	<b>28260.01</b>
	40	60	28696.35	27965.56	28518.72	<b>28393.54</b>
	40	70	28030.45	27706.81	27630.69	<b>27789.31</b>



**EVA Soft: dipendenza dalla deformazione a 52°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
Modificato EVA soft	52	1	71.85	71.98	72.17	<b>72.00</b>
	52	10	74.48	74.48	74.47	<b>74.47</b>
	52	20	74.65	74.62	74.61	<b>74.63</b>
	52	30	74.73	74.73	74.73	<b>74.73</b>
	52	50	74.89	74.87	74.87	<b>74.88</b>
	52	60	74.90	74.92	74.90	<b>74.91</b>
	52	70	74.92	74.91	74.93	<b>74.92</b>

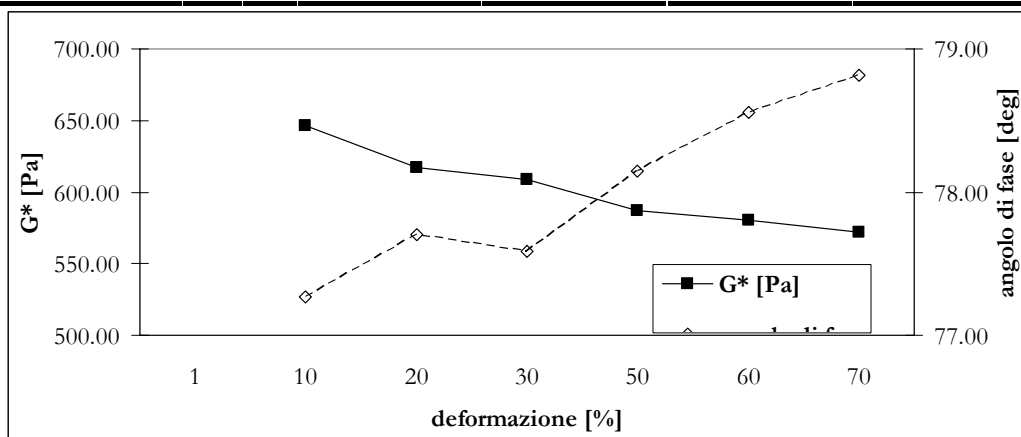
Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24rad/s)$	$G^*_2(9.24rad/s)$	$G^*_3(9.24rad/s)$	$G^*_{medio}(9.24rad/s)$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
Modificato EVA soft	52	1	7943.49	7834.21	7816.38	<b>7864.69</b>
	52	10	7795.16	7858.31	7784.54	<b>7812.67</b>
	52	20	7742.78	7741.46	7763.62	<b>7749.29</b>
	52	30	7735.79	7679.88	7683.02	<b>7699.56</b>
	52	50	7601.12	7518.48	7460.71	<b>7526.77</b>
	52	60	7189.35	7088.47	7022.62	<b>7100.15</b>
	52	70	6297.87	5996.03	5922.79	<b>6072.23</b>



**EVA Soft: dipendenza dalla deformazione a 76°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
<b>Modificato EVA soft</b>	76	1	/	/	/	
	76	10	77.31	77.43	77.07	<b>77.27</b>
	76	20	77.77	77.68	77.66	<b>77.70</b>
	76	30	77.65	77.68	77.44	<b>77.59</b>
	76	50	78.11	78.14	78.18	<b>78.14</b>
	76	60	78.51	78.56	78.60	<b>78.56</b>
	76	70	78.84	78.80	78.81	<b>78.82</b>

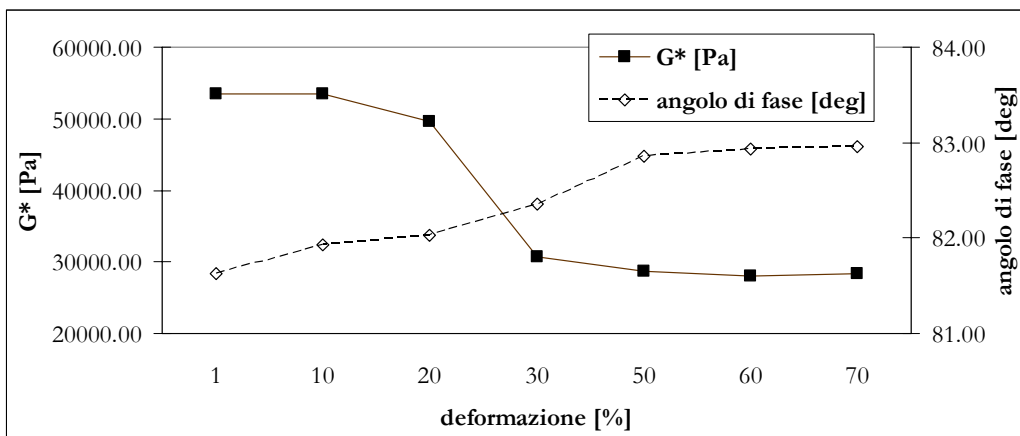
Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24rad/s)$	$G^*_2(9.24rad/s)$	$G^*_3(9.24rad/s)$	$G^*_{medio}(9.24rad/s)$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
<b>Modificato EVA soft</b>	76	1	-	-	-	-
	76	10	634.80	644.10	659.97	<b>646.29</b>
	76	20	615.98	622.01	612.75	<b>616.91</b>
	76	30	601.14	613.72	611.37	<b>608.74</b>
	76	50	588.43	585.82	587.46	<b>587.24</b>
	76	60	580.94	582.96	578.12	<b>580.67</b>
	76	70	574.79	570.32	570.57	<b>571.90</b>



**50/70 A: dipendenza dalla deformazione a 40°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
50/70 tal quale	40	1	81.58	81.62	81.67	<b>81.62</b>
	40	10	81.95	81.91	81.91	<b>81.92</b>
	40	20	82.03	82.02	82.02	<b>82.02</b>
	40	30	82.40	82.37	82.31	<b>82.36</b>
	40	50	82.79	82.89	82.88	<b>82.85</b>
	40	60	82.91	83.00	82.91	<b>82.94</b>
	40	70	82.94	82.93	83.01	<b>82.96</b>

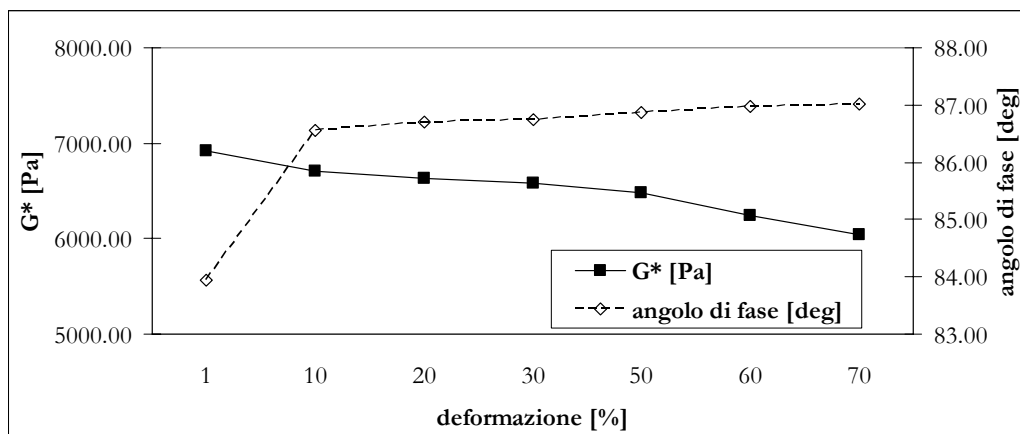
Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24rad/s)$	$G^*_2(9.24rad/s)$	$G^*_3(9.24rad/s)$	$G^*_{medio}(9.24rad/s)$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50/70 tal quale	40	1	53040.37	53047.97	54247.95	<b>53445.43</b>
	40	10	53522.22	53632.88	53372.01	<b>53509.03</b>
	40	20	52225.96	46168.88	50404.00	<b>49599.61</b>
	40	30	31319.53	32031.79	28789.01	<b>30713.44</b>
	40	50	28721.37	29240.03	27940.26	<b>28633.89</b>
	40	60	28866.05	27825.66	27472.02	<b>28054.58</b>
	40	70	28882.27	27559.35	28784.17	<b>28408.60</b>



**50/70 A: dipendenza dalla deformazione a 52°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{medio}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
50/70 tal quale	52	1	83.50	84.64	83.69	<b>83.94</b>
	52	10	86.59	86.51	86.56	<b>86.56</b>
	52	20	86.71	86.68	86.72	<b>86.70</b>
	52	30	86.73	86.75	86.74	<b>86.74</b>
	52	50	86.86	86.87	86.89	<b>86.87</b>
	52	60	86.96	86.97	86.98	<b>86.97</b>
	52	70	87.02	87.02	87.03	<b>87.02</b>

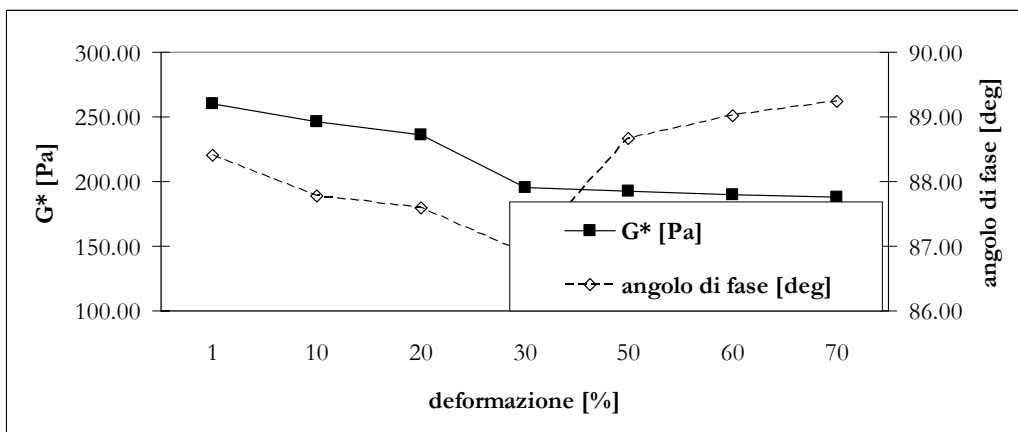
Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24rad/s)$	$G^*_2(9.24rad/s)$	$G^*_3(9.24rad/s)$	$G^*_{medio}(9.24rad/s)$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50/70 tal quale	52	1	6814.70	6993.25	6947.08	<b>6918.34</b>
	52	10	6728.70	6680.88	6721.96	<b>6710.52</b>
	52	20	6631.78	6656.23	6617.80	<b>6635.27</b>
	52	30	6589.54	6562.81	6576.92	<b>6576.42</b>
	52	50	6552.50	6482.71	6395.50	<b>6476.90</b>
	52	60	6267.13	6256.56	6205.25	<b>6242.98</b>
	52	70	6084.68	6059.99	5988.30	<b>6044.32</b>



**50/70 A: dipendenza dalla deformazione a 76°C**

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{\text{medio}}$
	[°C]	[%]	[°]	[°]	[°]	[°]
50/70 A vergine	76	1	88.24	88.08	88.93	<b>88.41</b>
	76	10	88.16	87.62	87.54	<b>87.77</b>
	76	20	87.31	87.94	87.51	<b>87.58</b>
	76	30	87.63	86.88	86.18	<b>86.90</b>
	76	50	88.80	89.37	87.83	<b>88.67</b>
	76	60	89.44	88.58	89.05	<b>89.02</b>
	76	70	89.21	89.39	89.12	<b>89.24</b>

Tipologia bitume	T	$\gamma$	$G^*_1(9.24\text{rad/s})$	$G^*_2(9.24\text{rad/s})$	$G^*_3(9.24\text{rad/s})$	$G^*_{\text{medio}}(9.24\text{rad/s})$
	[°C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
50/70 A vergine	76	1	267.95	258.25	253.72	<b>259.97</b>
	76	10	248.85	244.17	244.61	<b>245.88</b>
	76	20	242.95	236.99	228.58	<b>236.18</b>
	76	30	190.51	201.69	192.77	<b>194.99</b>
	76	50	190.90	196.50	190.51	<b>192.64</b>
	76	60	191.40	189.30	188.16	<b>189.62</b>
	76	70	188.23	190.86	184.72	<b>187.94</b>







# **Appendice 1.5**

## **Prove di creep**



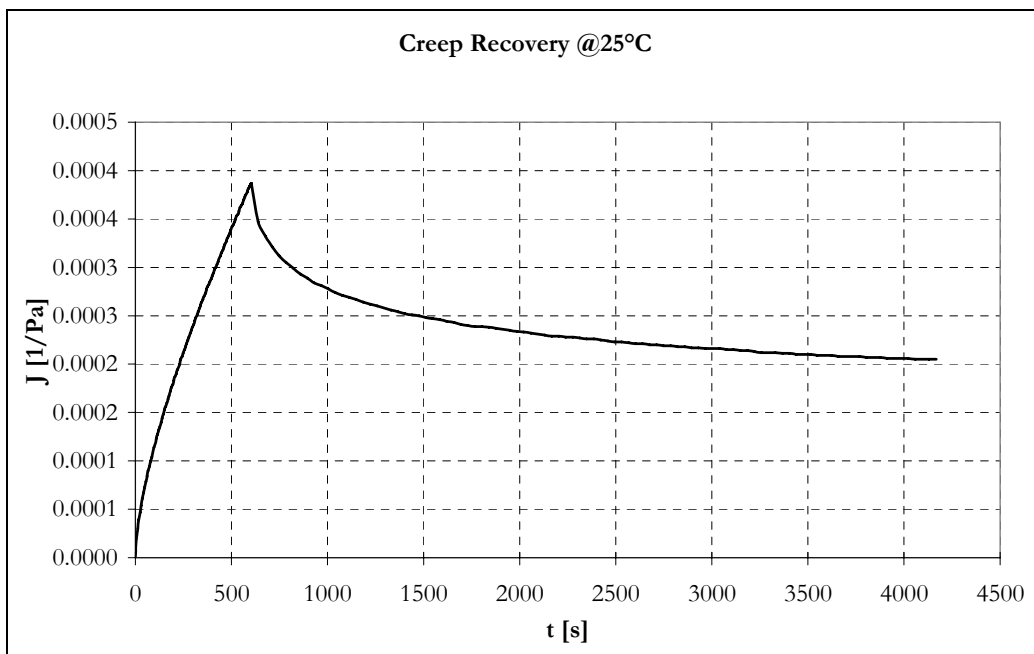
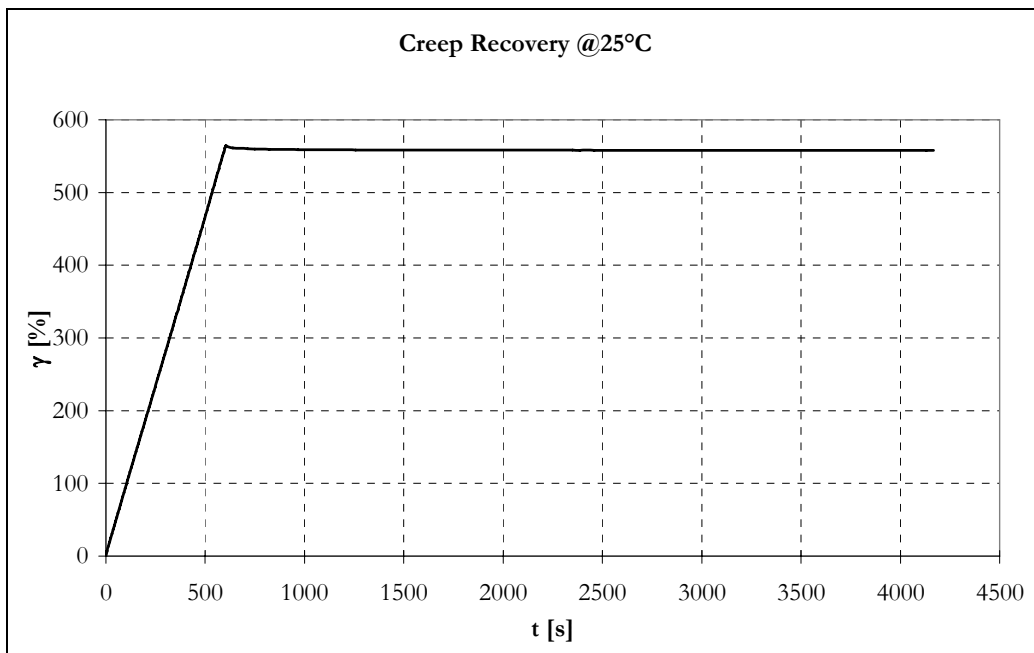


Figura 1: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A vergine

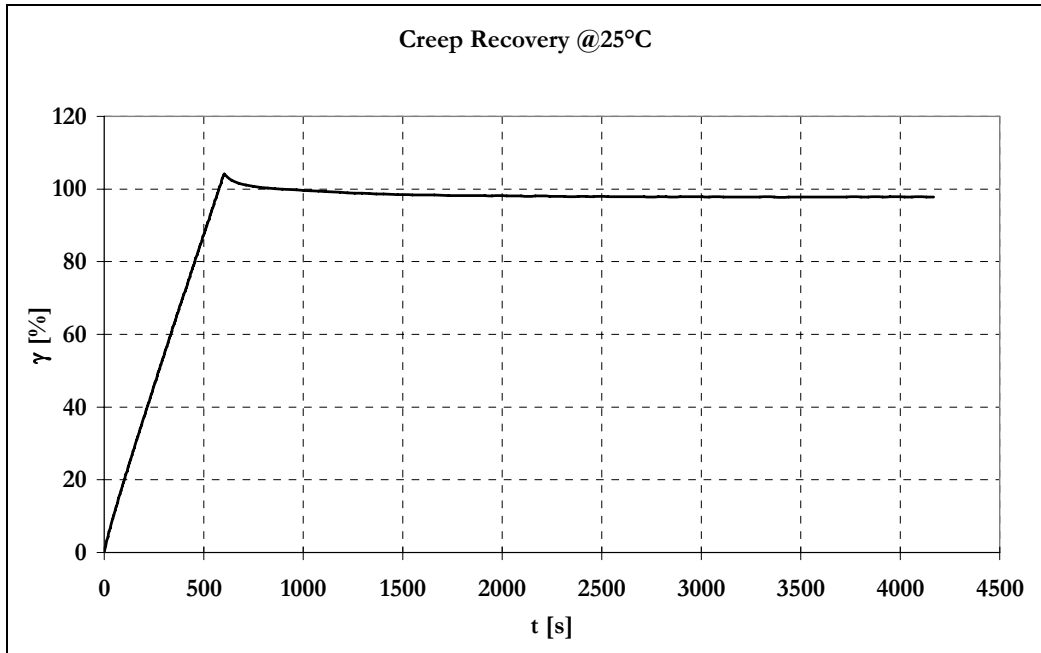


Figura 2: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A invecchiato RTFOT

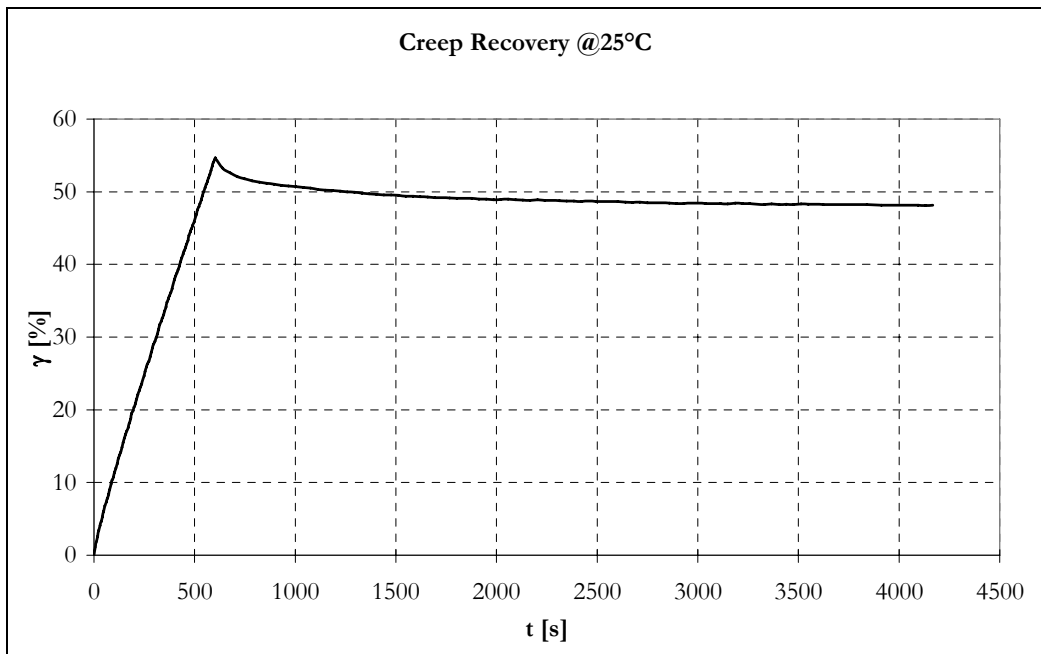


Figura 3: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A invecchiato PAV

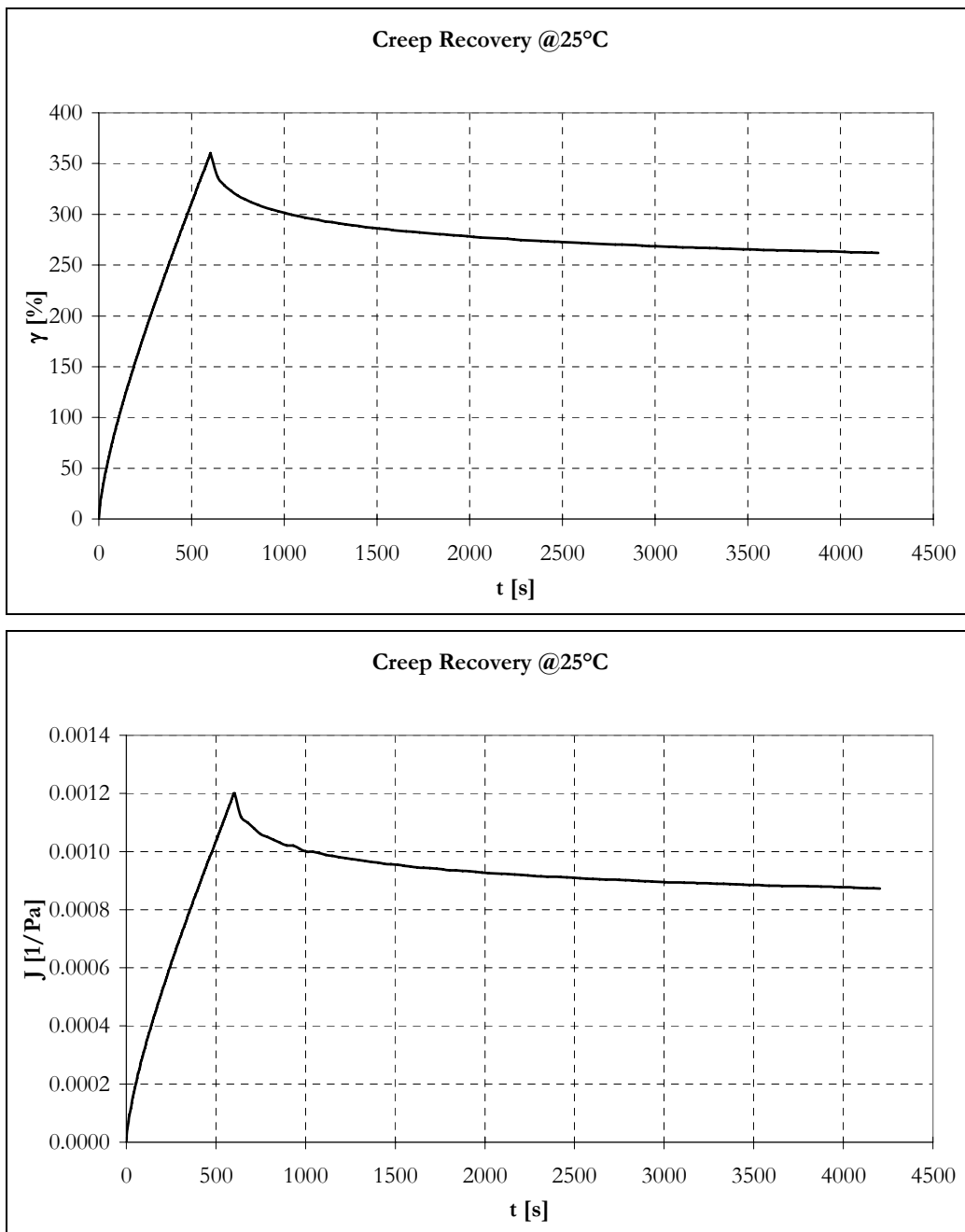


Figura 4: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A + 18% CRM vergine

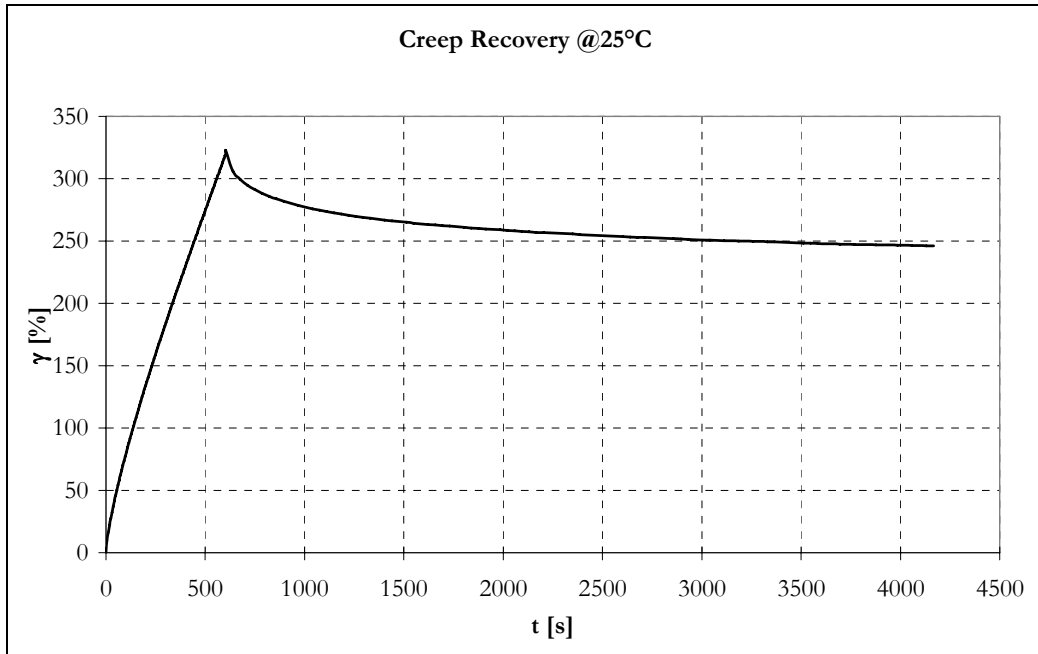


Figura 5: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A + 18% CRM invecchiato PAV

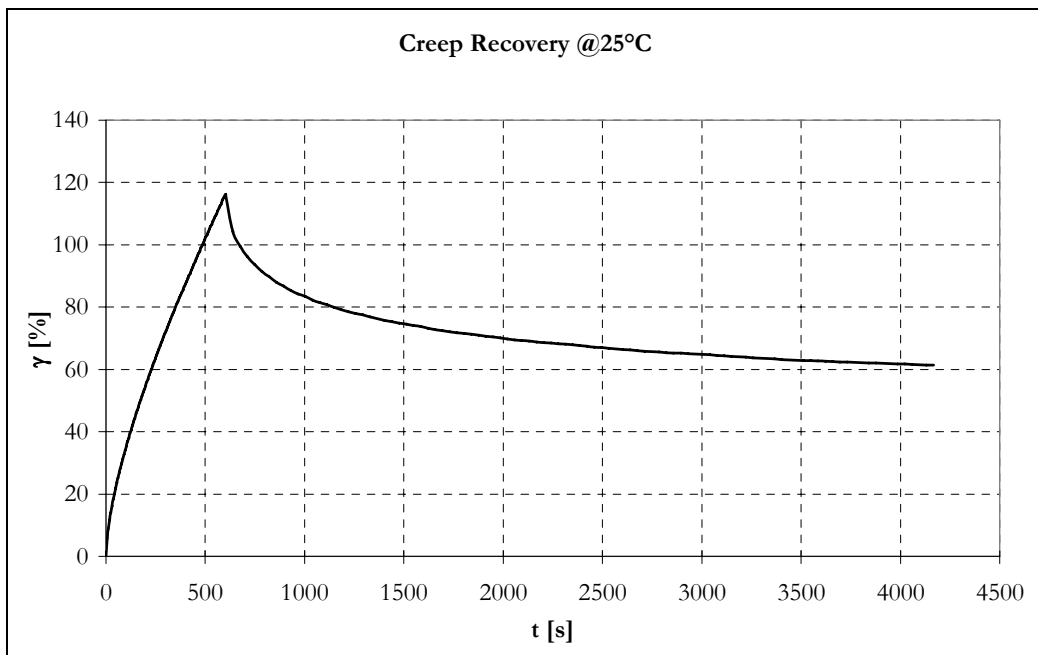


Figura 6: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A + 20% CRM vergine

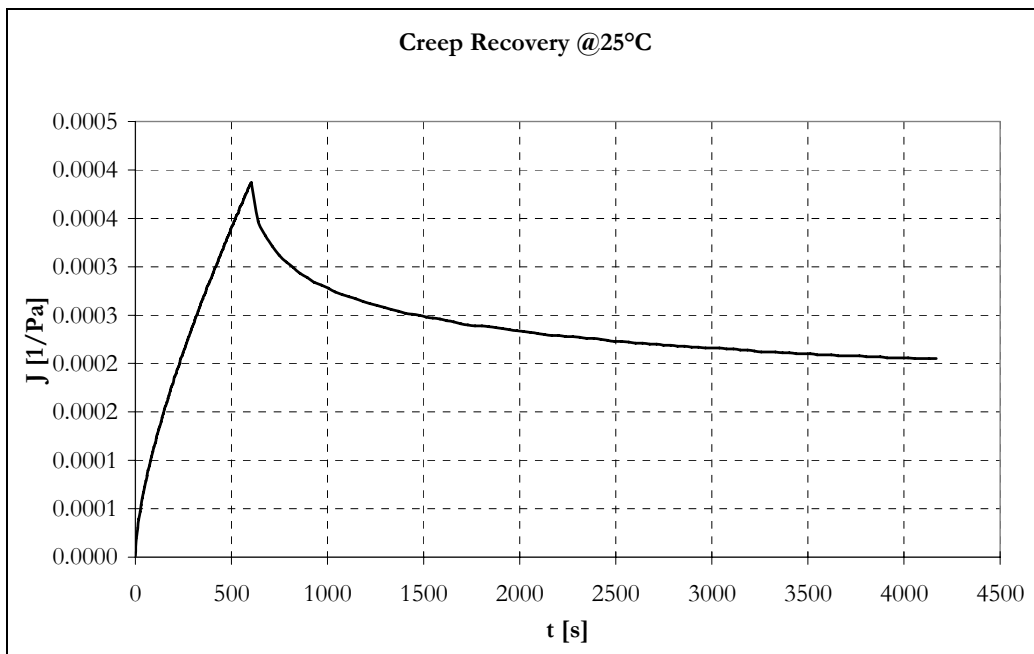


Figura 7: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A + 20% CRM vergine

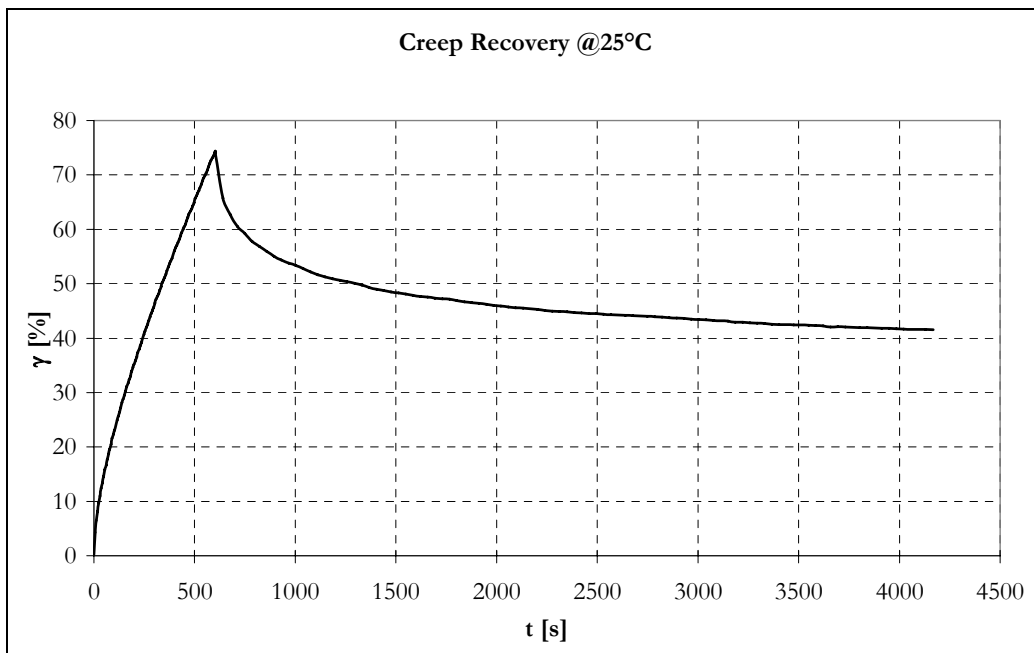


Figura 8: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 70/100 A + 22% CRM vergine

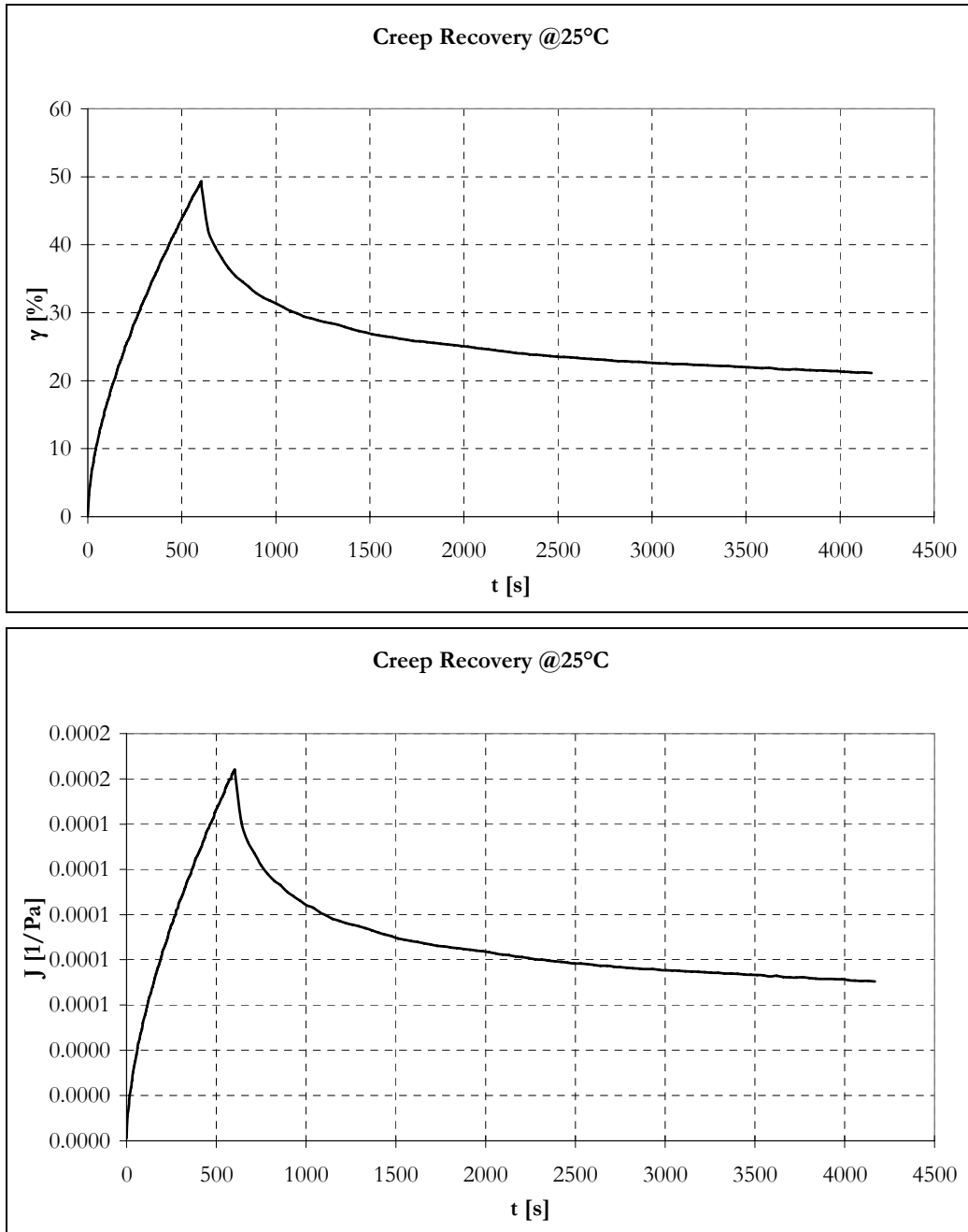


Figura 9: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 40/50 + 18% CRM vergine



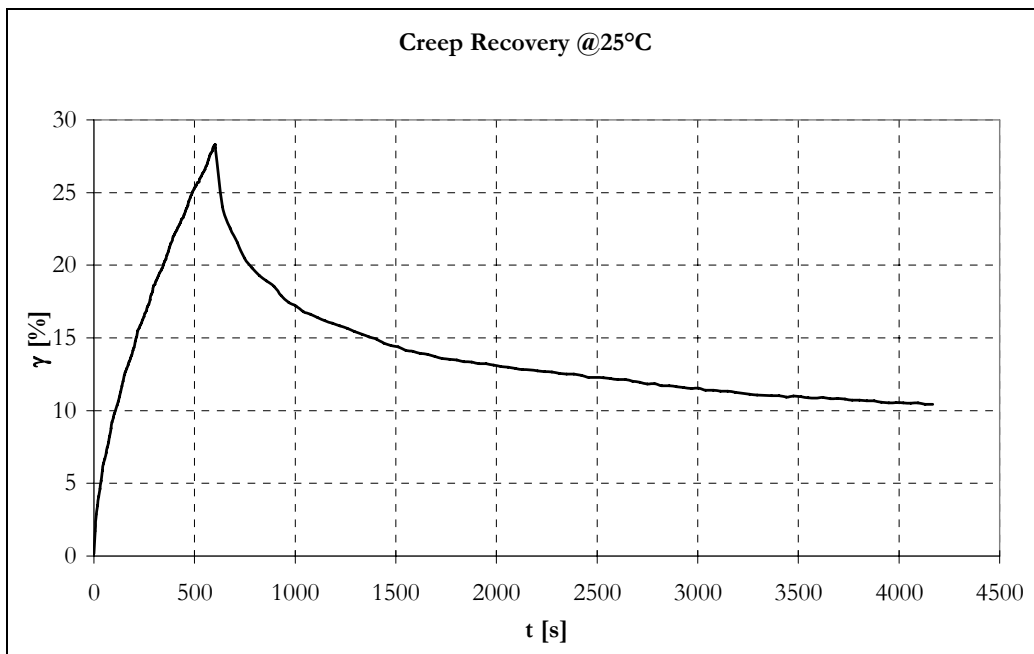


Figura 10: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume 40/50 + 18% CRM invecchiato RTFOT

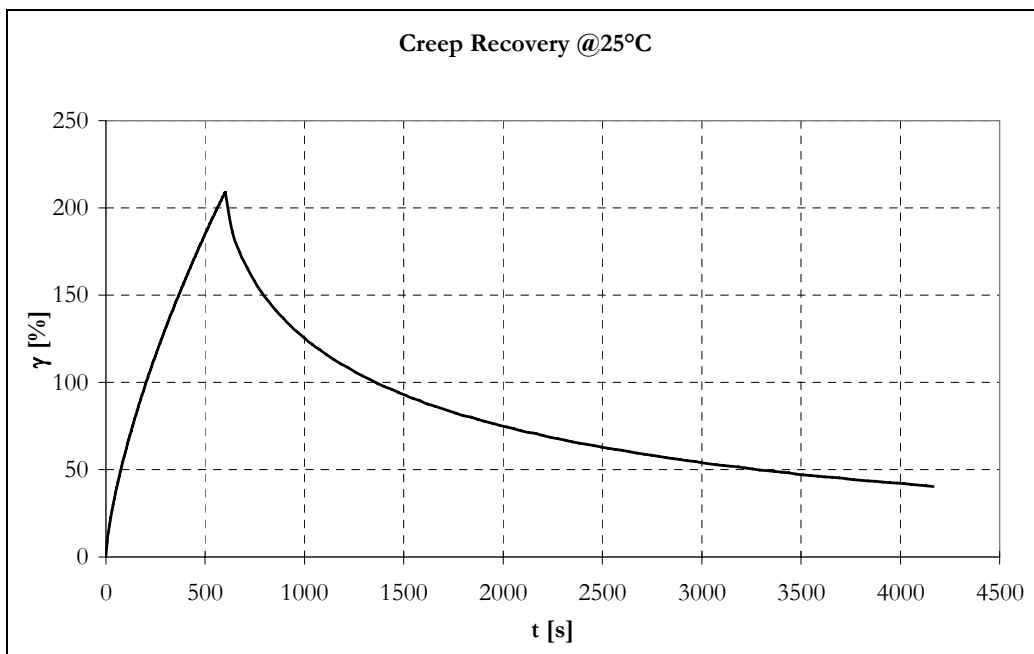


Figura 11: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume SBS Hard vergine

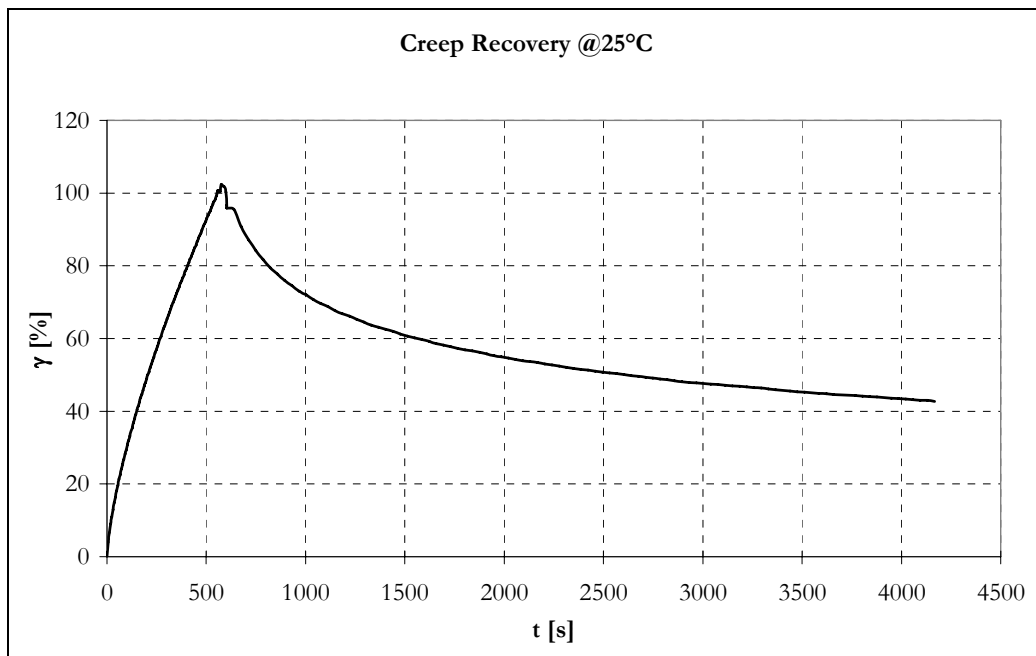


Figura 12: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume SBS Hard invecchiato RTFOT

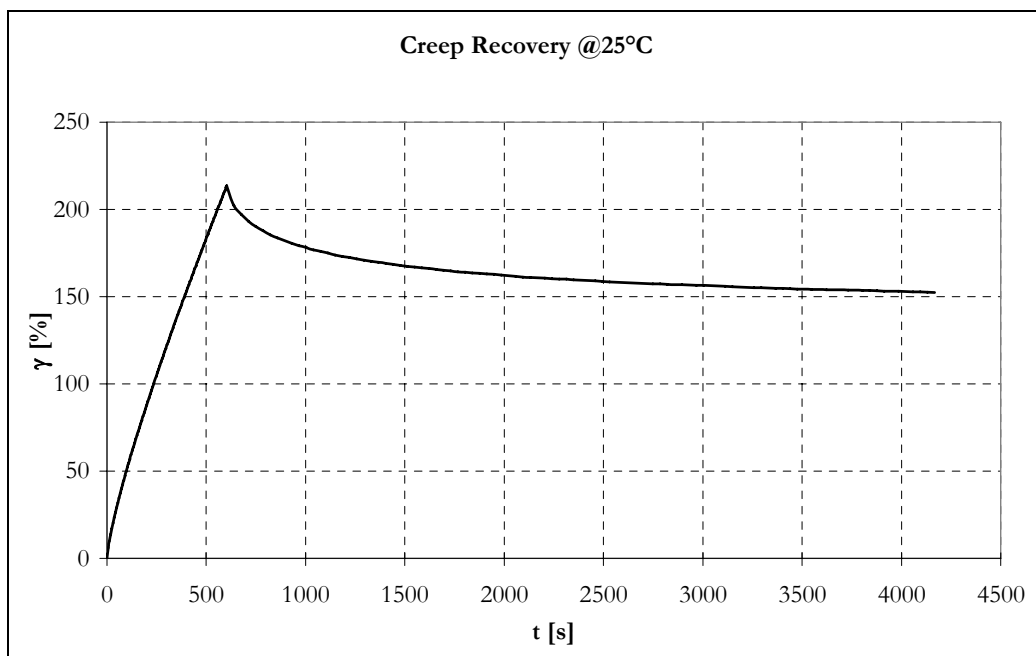


Figura 13: Prova di creep recovery a 25°C per il bitume SBS Hard invecchiato PAV

## **Appendice 1.6**

### **Prove di Zero Shear Viscosity**



**50/70 + 18% CRM**

**DSR:** PP25 mm, Gap=2mm

**Modalità di Prova:** CS-Control Stress, Stress=50 Pa

**Temperatura:** 60°C

**Durata:** 3600s, Acquisizione: 1/30 s

**Tabella 1: Bitume 50/70 B + 18% CRM - Ripetizione 1/2**

<b>n</b>	<b>t</b> [s]	$\eta$ [Pas]	$\gamma$ [%]	$d\gamma/dt$ [s-1]	<b>J</b> [Pa-1]
90	2700	13820	907	0,0036	0,18
91	2730	13860	918	0,0036	0,18
92	2760	13900	928	0,0036	0,19
93	2790	13950	939	0,0036	0,19
94	2820	14020	949	0,0036	0,19
95	2850	14100	960	0,0035	0,19
96	2880	14180	970	0,0035	0,19
97	2910	14240	981	0,0035	0,20
98	2940	14290	991	0,0035	0,20
99	2970	14330	1002	0,0035	0,20
100	3000	14340	1013	0,0035	0,20
101	3030	14350	1023	0,0035	0,20
102	3060	14320	1034	0,0035	0,21
103	3090	14310	1045	0,0035	0,21
104	3120	14270	1056	0,0035	0,21
105	3150	14260	1066	0,0035	0,21
106	3180	14270	1076	0,0035	0,22
107	3210	14260	1087	0,0035	0,22
108	3240	14240	1098	0,0035	0,22
109	3270	14240	1108	0,0035	0,22

<b>n</b>	<b>t</b> [s]	$\eta$ [Pas]	$\gamma$ [%]	$d\gamma/dt$ [s-1]	<b>J</b> [Pa-1]
110	3300	14250	1119	0,0035	0,22
111	3330	14260	1129	0,0035	0,23
112	3360	14240	1141	0,0035	0,23
113	3390	14220	1152	0,0035	0,23
114	3420	14220	1162	0,0035	0,23
115	3450	14180	1173	0,0035	0,23
116	3480	14150	1184	0,0035	0,24
117	3510	14100	1195	0,0035	0,24
118	3540	14060	1205	0,0036	0,24
119	3570	14000	1217	0,0036	0,24
120	3600	13910	1229	0,0036	0,25

**ZSV=14166 Pas**

**Tabella 2: Bitume 50/70 B + 18% CRM – Ripetizione 2/2**

<b>n</b>	<b>t</b> [s]	$\eta$ [Pas]	$\gamma$ [%]	$d\gamma/dt$ [s-1]	<b>J</b> [Pa-1]
90	2700	74510	38	0,0007	0,01
91	2730	58840	50	0,0008	0,01
92	2760	45160	65	0,0011	0,01
93	2790	32460	92	0,0015	0,02
94	2820	23460	121	0,0021	0,02
95	2850	17770	147	0,0028	0,03
96	2880	14050	174	0,0036	0,03
97	2910	11510	200	0,0043	0,04
98	2940	9797	224	0,0051	0,04
99	2970	8594	249	0,0058	0,05

---

<b>n</b>	<b>t</b> [s]	$\eta$ [Pas]	$\gamma$ [%]	$d\gamma/dt$ [s-1]	<b>J</b> [Pa-1]
100	3000	7762	272	0,0064	0,05
101	3030	7182	296	0,007	0,06
102	3060	6716	319	0,0074	0,06
103	3090	6385	341	0,0078	0,07
104	3120	6205	365	0,0081	0,07
105	3150	6139	388	0,0081	0,08
106	3180	6156	413	0,0081	0,08
107	3210	6233	437	0,008	0,09
108	3240	6304	461	0,0079	0,09
109	3270	6352	484	0,0079	0,10
110	3300	6384	509	0,0078	0,10
111	3330	6394	533	0,0078	0,11
112	3360	6380	557	0,0078	0,11
113	3390	6361	582	0,0079	0,12
114	3420	6330	607	0,0079	0,12
115	3450	6308	630	0,0079	0,13
116	3480	6282	655	0,008	0,13
117	3510	6264	678	0,008	0,14
118	3540	6269	701	0,008	0,14
119	3570	6279	724	0,008	0,14
120	3600	6303	747	0,0079	0,15

---

**ZSV=13908 Pas**

---





## **Appendice 1.7**

**Risultati BBR**

**Temperatura Limite Inferiore**



**Tabella 1: Risultato della prova BBR per il bitume 70/100 A modificato con 18% di CRM, non invecchiato**

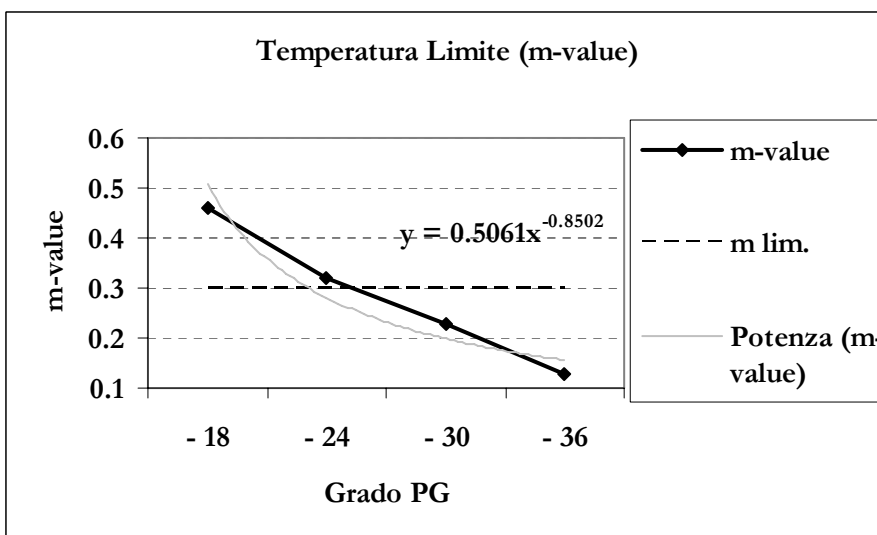
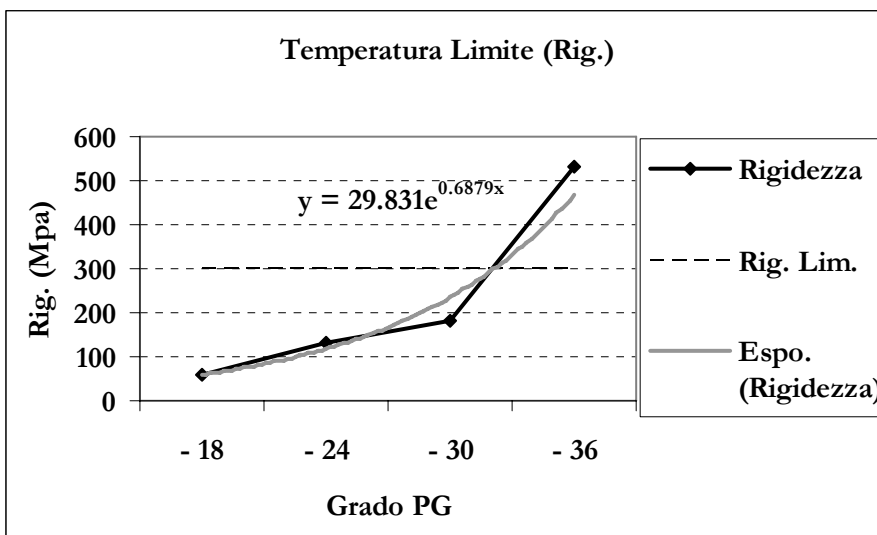
<b>70/100 + 18% Vergine</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rigidezza (Mpa)</b>	<b>Valore m (-)</b>	<b>Risultato</b>
- 18	60	0.46	<b>OK</b>
- 24	132	0.32	<b>OK</b>
- 30	182	0.23	<b>NO</b>
- 36	534	0.13	<b>NO</b>
<b>PG -34</b>			

**Tabella 2: Risultato della prova BBR per il bitume 70/100 A modificato con 18% di CRM, invecchiato PAV**

<b>70/100 + 18% inv. PAV</b>			
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rigidezza (Mpa)</b>	<b>Valore m (-)</b>	<b>Risultato</b>
- 12	55	0.38	<b>OK</b>
- 18	96	0.35	<b>OK</b>
- 24	109	0.27	<b>NO</b>
<b>PG -28</b>			

70/100 + 18% CRM vergine

Temperatura	Stiff	Rig. Lim	m	m lim
- 18	60	300	0.46	0.30
- 24	132	300	0.32	0.30
- 30	182	300	0.23	0.30
- 36	534	300	0.13	0.30
T lim (° C)		-32		-25
T lim "Pg"			-25	



70/100 + 18% CRM inv. PAV

Temperatura	Rig. (Mpa)	Rig. Lim	m	m lim
-12	55	300	0.38	0.30
-18	96	300	0.35	0.30
-24	109	300	0.27	0.30
T lim (° C)		-24		-22
T lim "Pg"				-22

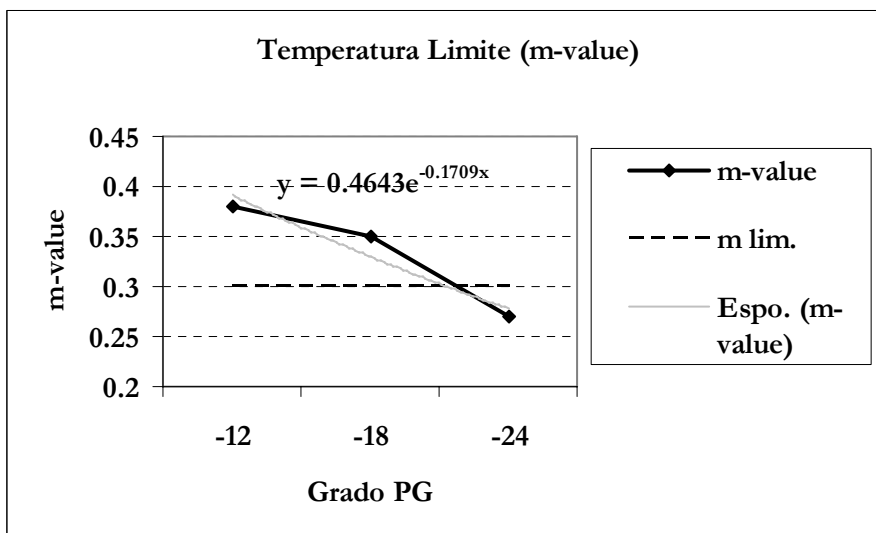
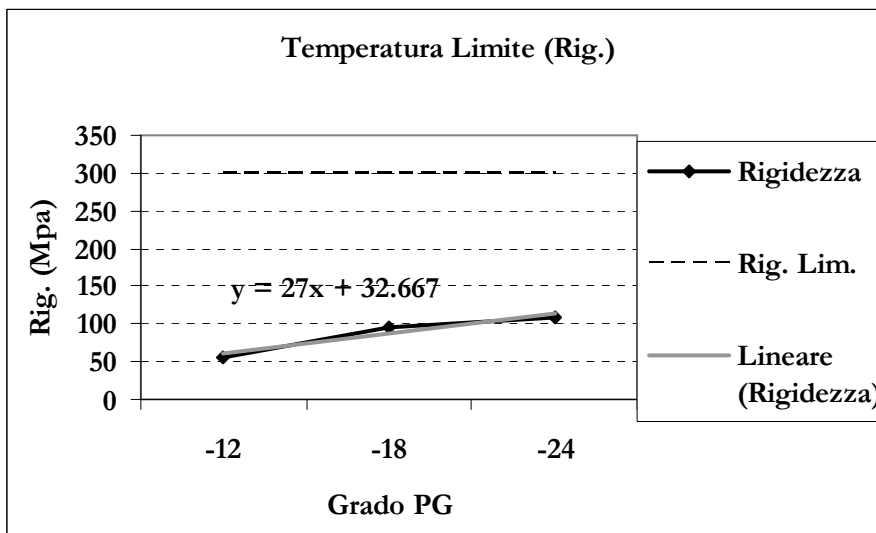


Tabella 3: Risultato della prova BBR per il bitume SBS Hard, non invecchiato

SBS Hard vergine				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	116	117	0.44	0.44
- 12	117		0.44	
- 18	260	306	0.32	0.31
- 18	330		0.32	
- 18	333		0.32	
- 18	295		0.31	
- 18	298		0.31	
- 18	322		0.31	
- 24	511		0.24	
PG - 22				

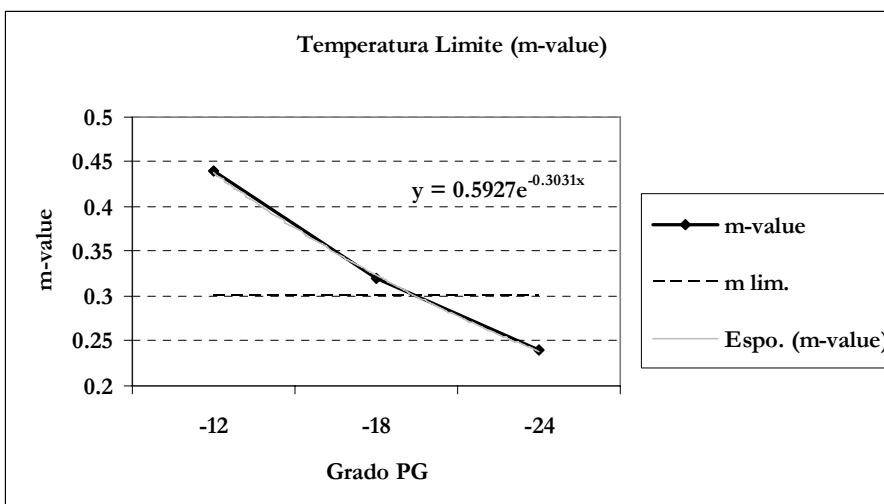
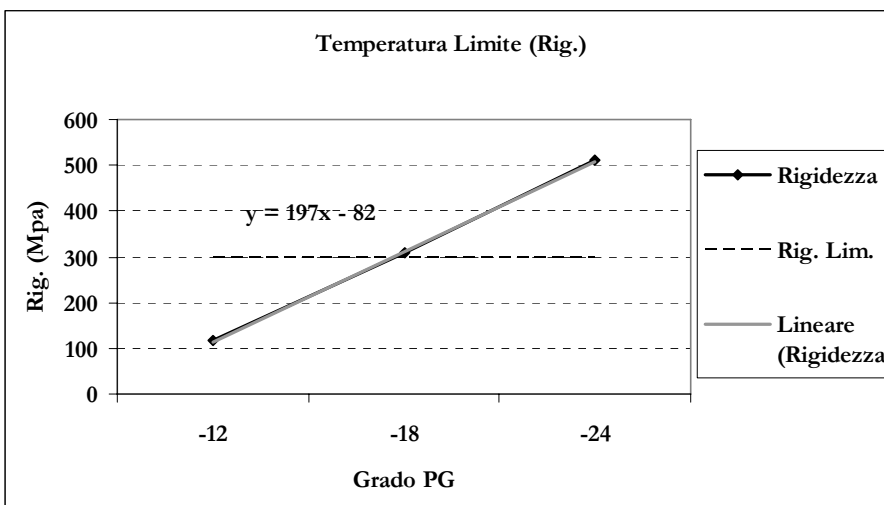
Tabella 4: Risultato della prova BBR per il bitume SBS Hard, invecchiato PAV

SBS Hard inv. PAV				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	161	161	0.41	0.40
- 12	161		0.40	
- 18	295	274	0.29	0.29
- 18	251		0.29	
- 18	277		0.29	
- 24	521	538	0.27	0.24
- 24	559		0.26	
- 24	535		0.20	
PG -22				

SBS Hard vergine

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
-12	116	116.50	0.44	0.44
-12	117		0.44	
-18	260	307.33	0.32	0.32
-18	330		0.33	
-18	332		0.32	
-24	511		0.24	

PG - 12 o - 18



**SBS Hard inv. PAV**

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	161	161.00	0.41	0.40
- 12	161		0.40	
- 24	521	538.33	0.27	0.24
- 24	559		0.26	
- 24	535		0.20	

**PG -12**

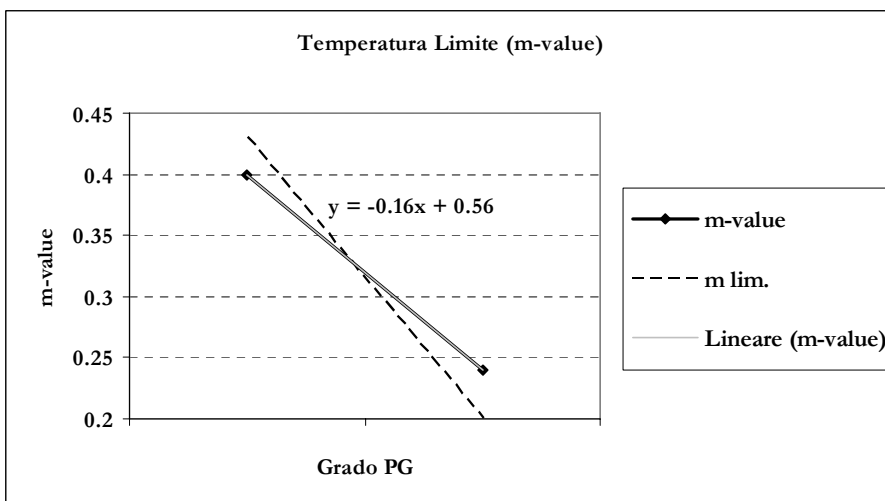
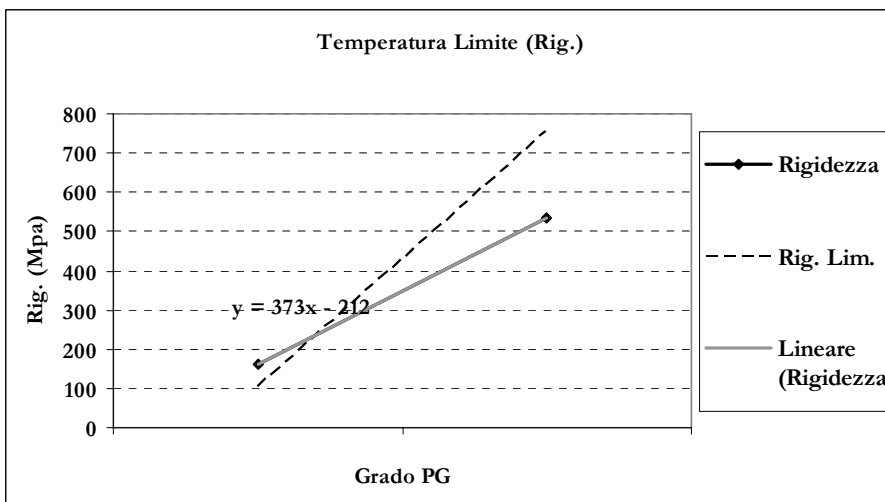




Tabella 5: Risultato della prova BBR per il bitume SBS Soft, non invecchiato

SBS Soft vergine				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	193	190	0.39	0.39
- 12	187		0.39	
- 18	438		0.28	
- 24	688		0.20	
PG - 22				

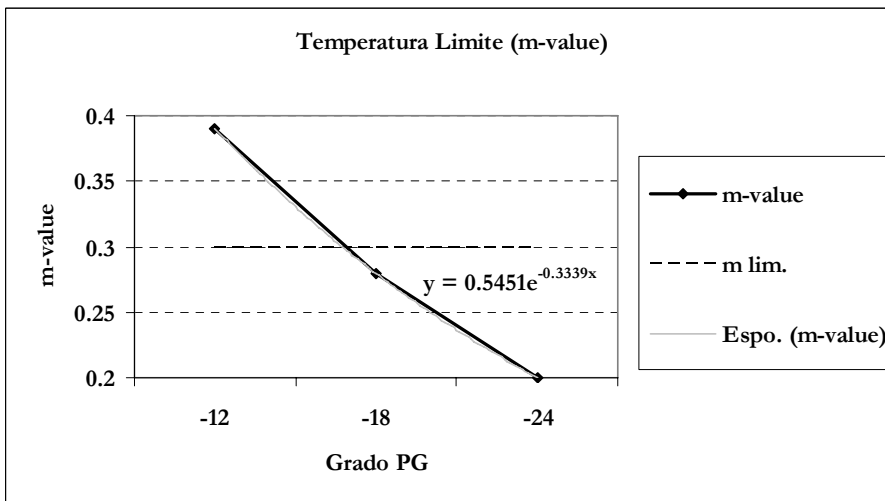
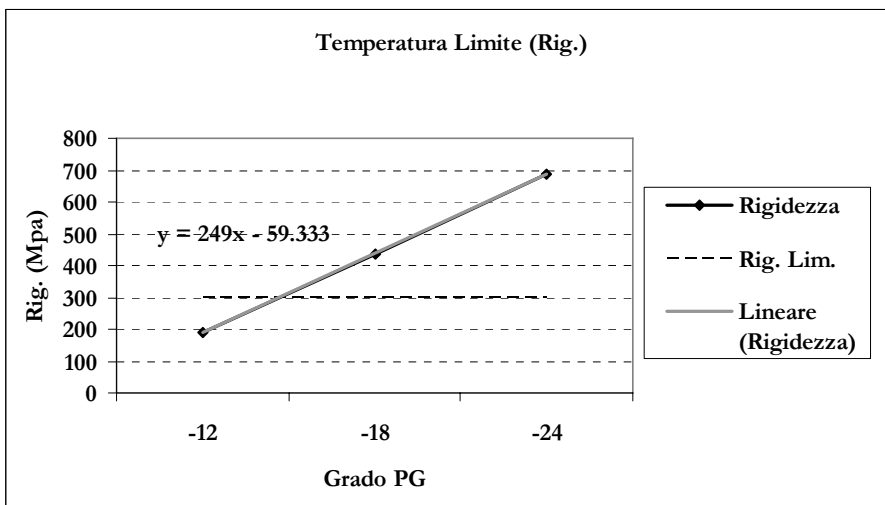
Tabella 6: Risultato della prova BBR per il bitume SBS Soft, invecchiato PAV

SBS Soft inv. PAV				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 6	82	86	0.43	0.43
- 6	87		0.43	
- 6	90		0.43	
- 12	401		0.27	
- 18	602	607	0.24	0.24
- 18	611		0.23	
- 24	635	674	0.23	0.23
- 24	713		0.22	
PG - 16				

SBS Soft vergine

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	193	190.00	0.39	0.39
- 12	187		0.39	
- 18	438		0.28	
- 24	688		0.20	

PG - 12



**SBS Soft inv. PAV**

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
-12	401		0.27	
-18	602		0.24	
-18	611	606.50	0.23	0.24
-24	635		0.23	
-24	713	674.00	0.22	0.23

PG - 6

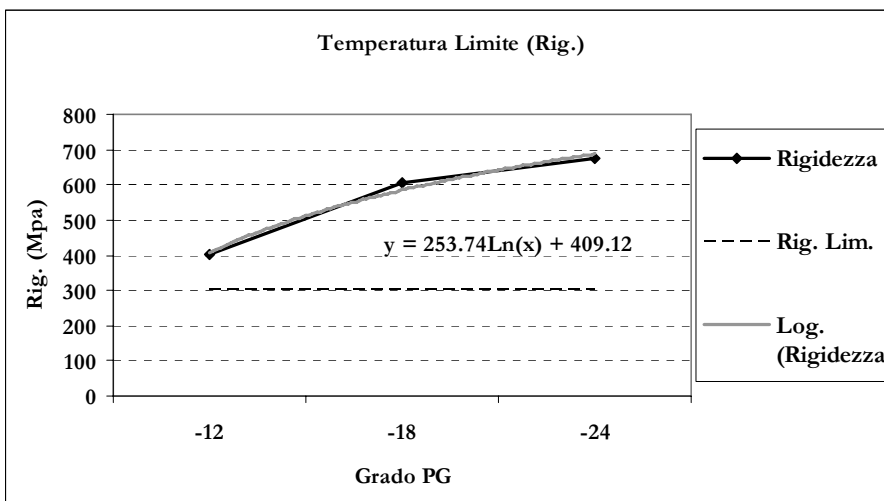


Tabella 7: Risultato della prova BBR per il bitume EVA Soft, non invecchiato

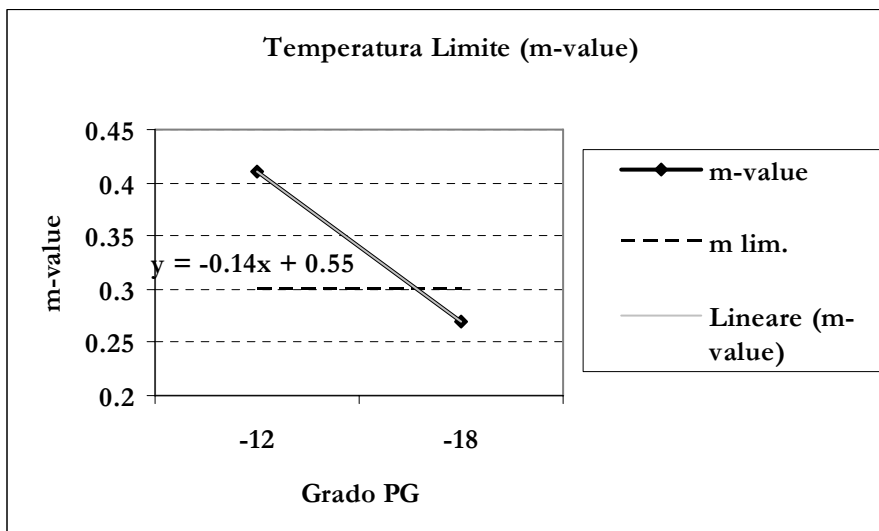
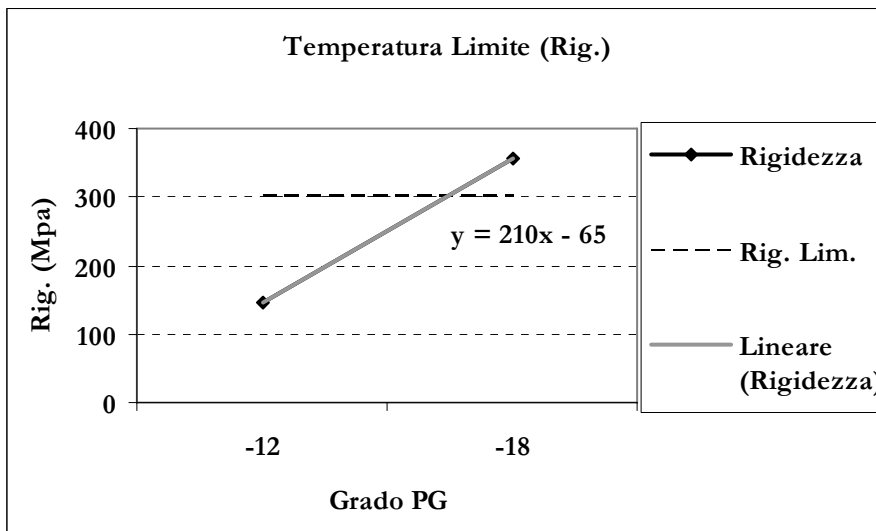
EVA Soft vergine				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
-12	161		0.41	
-12	160	145	0.41	0.41
-12	113		0.41	
-18	316		0.26	
-18	372	355	0.28	0.27
-18	376		0.27	
<b>PG - 22</b>				

Tabella 8: Risultato della prova BBR per il bitume EVA Soft, invecchiato PAV

EVA Soft inv. PAV				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
-6	97		0.98	
-6	93	98	0.40	0.59
-6	103		0.38	
-12	341		0.29	
-12	324	333	0.30	0.30
<b>PG -16</b>				

EVA Soft vergine

Temperatura	Stiff	Rig. Lim	m	m lim
-12	145	300	0.41	0.30
-18	355	300	0.27	0.30
T lim (° C)		-17	-17	
T lim "PG"		-17		



EVA Soft inv. PAV

Temperatura	Rig. (Mpa)	Rig. Lim	m	m lim
-6	98	300	0.59	0.30
-12	333	300	0.3	0.30
T lim (° C)		-11		-12
T lim "Pg"				-11

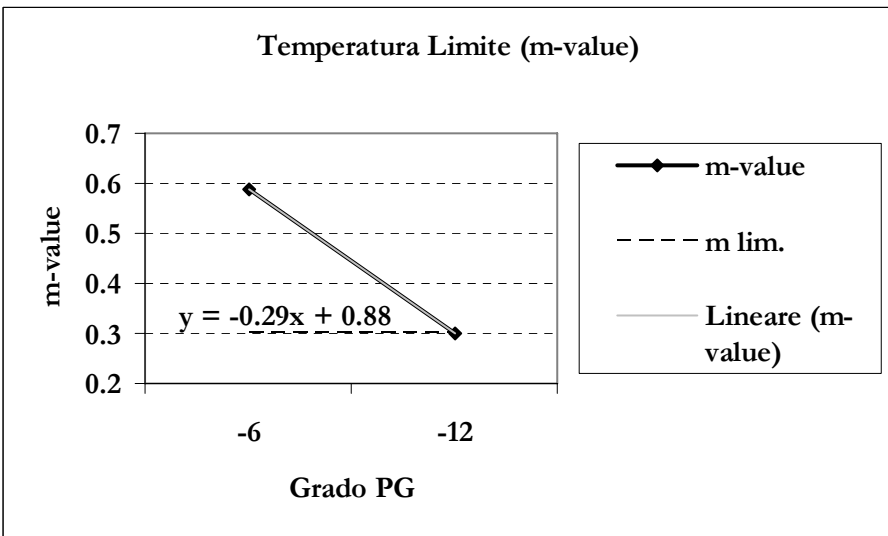
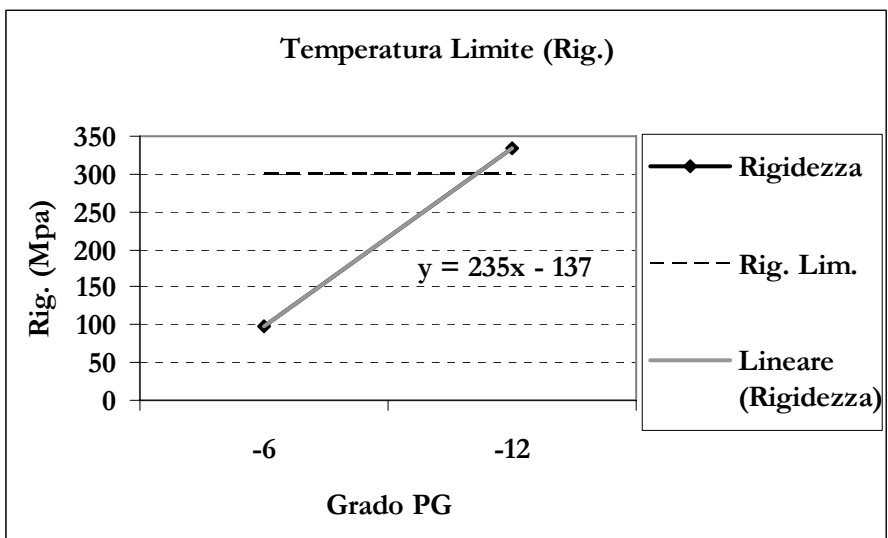


Tabella 9: Risultato della prova BBR per il bitume 50/70A, non invecchiato

50/70 A vergine		
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Valore m (-)
- 12	238	0.41
- 18	500	0.26
- 24	687	0.20
PG -22		

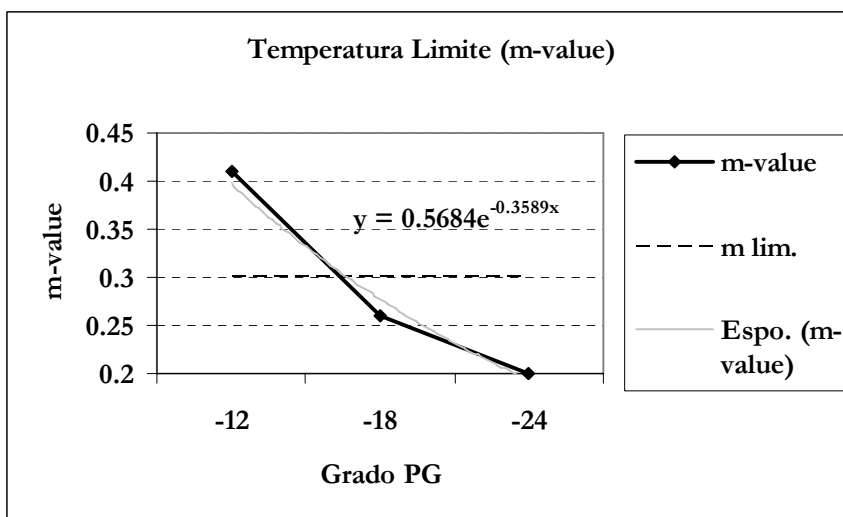
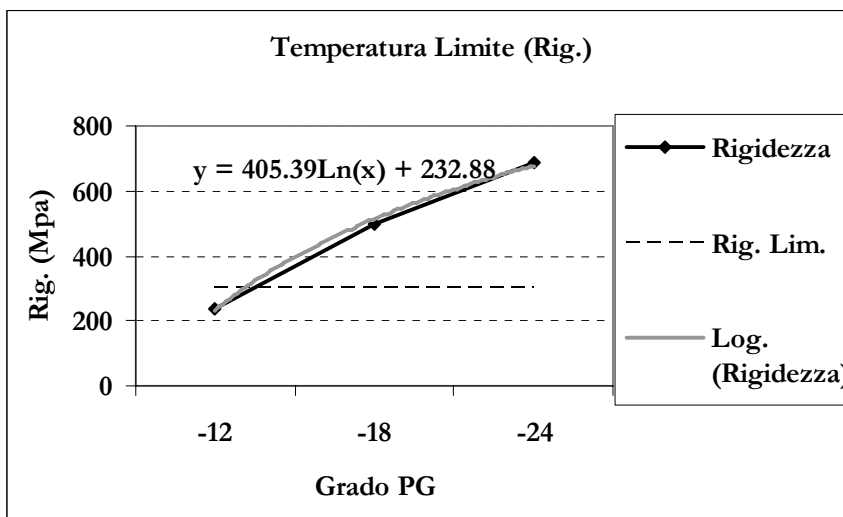
Tabella 10: Risultato della prova BBR per il bitume 50/70A, invecchiato PAV

50/70 A inv. PAV				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
-6	167		0.36	
-6	143	167	0.36	0.36
-6	161		0.35	
-12	331		0.31	
-12	320	297	0.30	0.30
-12	310		0.31	
-12	226		0.29	
-18	575		0.24	
-24	778	740	0.21	0.21
-24	702		0.21	
PG -22				

50/70 A vergine

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	238		0.41	
- 18	500		0.26	
- 24	687		0.20	

PG -12





50/70 A inv. PAV

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	303		0.31	
- 18	574		0.24	
- 24	775	743.00	0.21	0.21
- 24	711		0.21	

PG -12

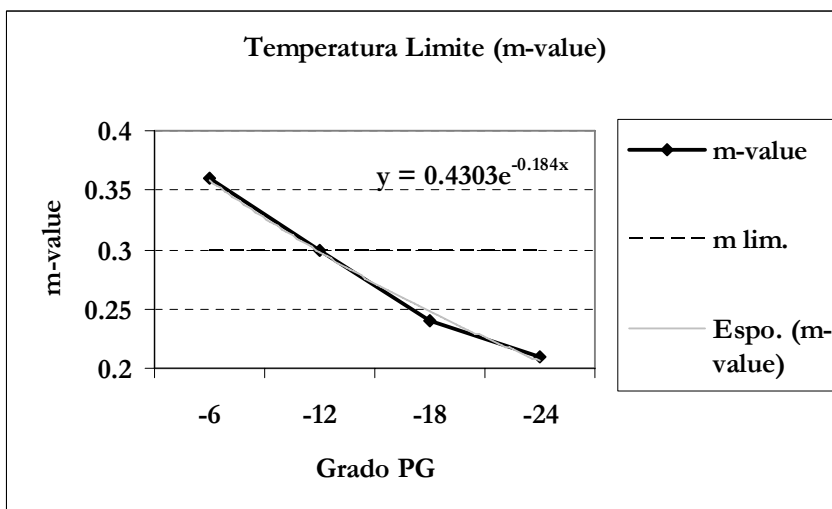
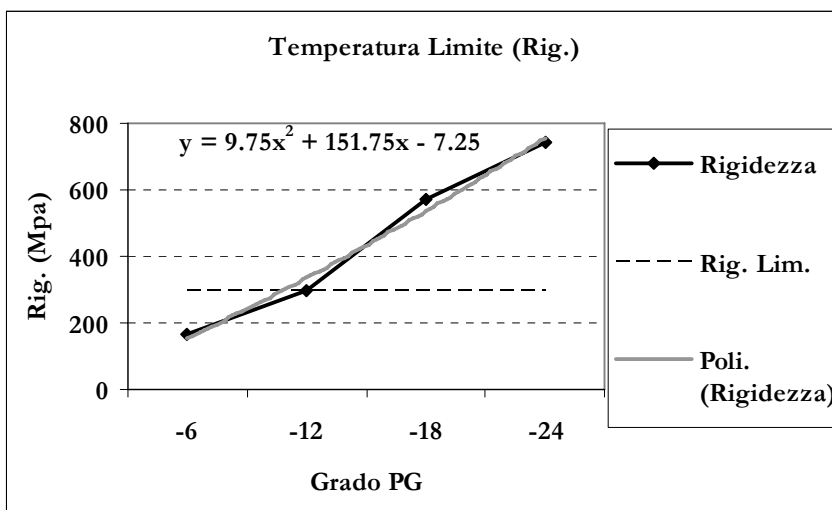


Tabella 11: Risultato della prova BBR per il bitume 50/70B, non invecchiato

50/70 B vergine				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	136	136	0.40	0.40
- 12	136		0.40	
- 18	383	364	0.31	0.30
- 18	368		0.30	
- 18	341		0.29	
- 24	681	681	0.22	0.22
PG -22				

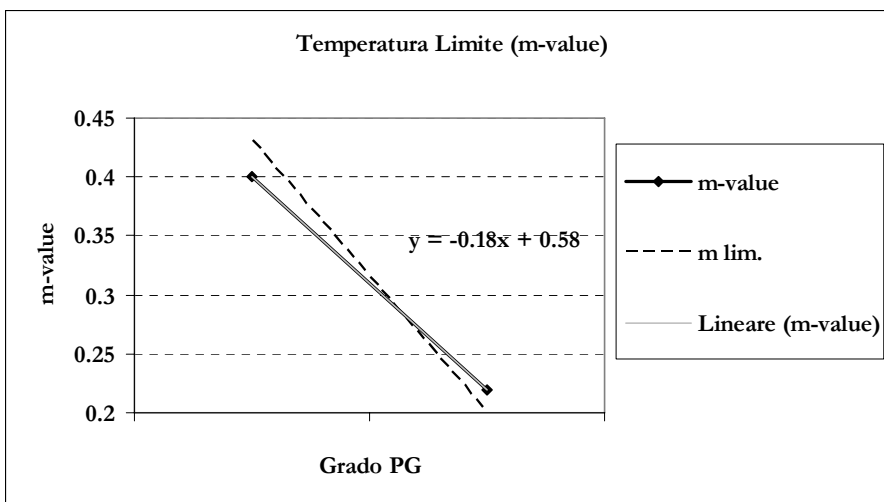
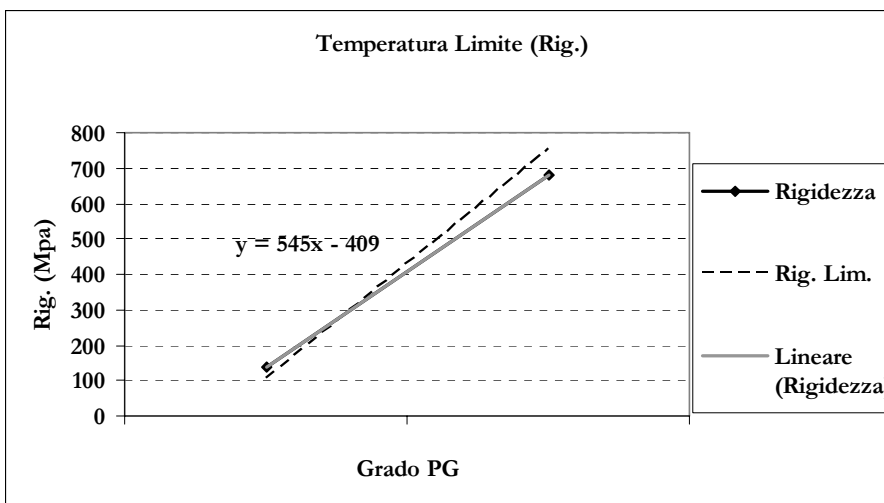
Tabella 12: Risultato della prova BBR per il bitume 50/70B, invecchiato PAV

50/70 B inv. PAV				
Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	198	200	0.32	0.32
- 12	207		0.32	
- 12	194		0.31	
- 18	429	414	0.24	0.25
- 18	376		0.24	
- 18	437		0.25	
- 24	612		0.22	
- 24	883	714	0.17	0.19
- 24	646		0.18	
PG -22				

50/70 B vergine

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	136	136.00	0.40	0.40
- 12	136		0.40	
- 24	681	681.00	0.22	0.22

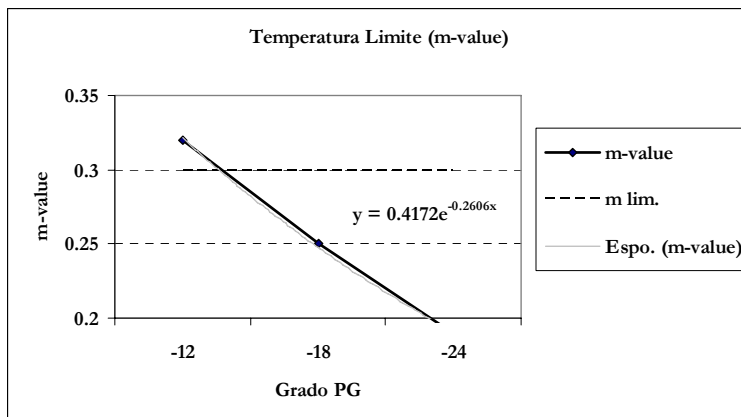
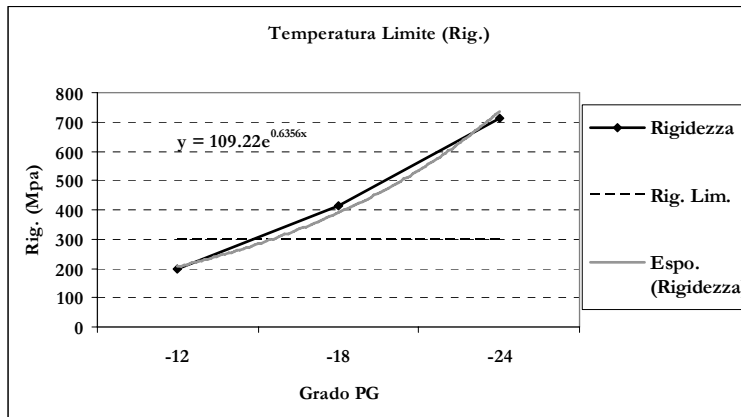
PG -12 o - 18



50/70 B inv. PAV

Temperatura (°C)	Rigidezza (Mpa)	Rig. Media (Mpa)	Valore m (-)	m Medio (-)
- 12	198		0.32	
- 12	207	199.67	0.32	0.32
- 12	194		0.31	
- 18	429		0.24	
- 18	376	414.00	0.24	0.25
- 18	437		0.25	
- 24	612		0.22	
- 24	883	713.67	0.17	0.19
- 24	646		0.18	

PG -12



# **Appendice 1.8**

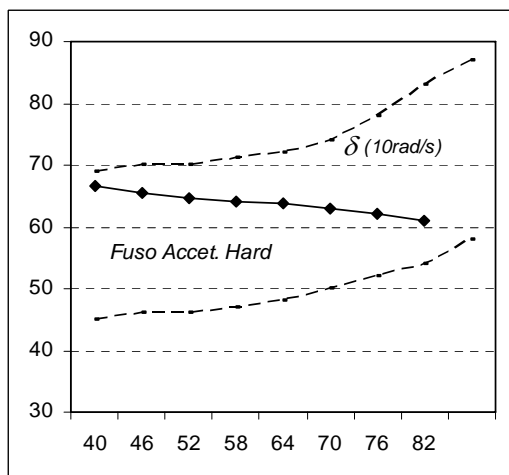
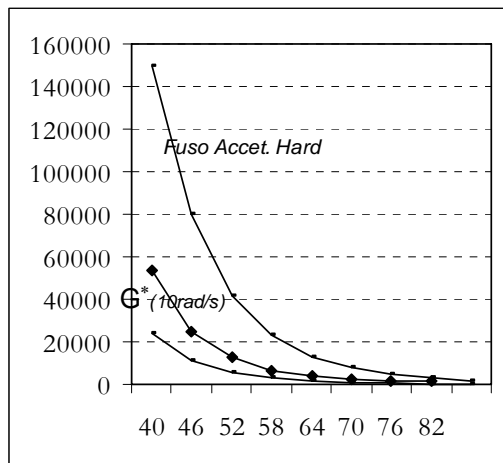
**Fusi di Accettazione**

**Capitolato Autostrade**



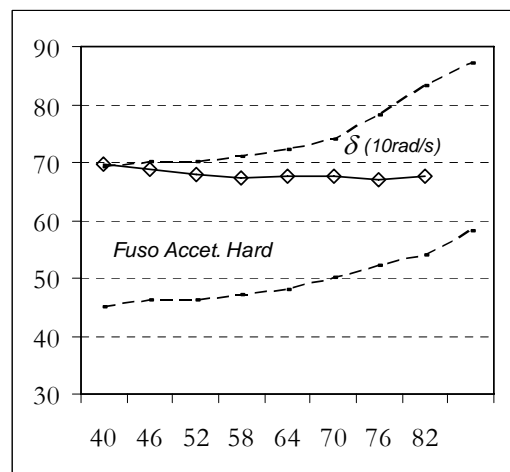
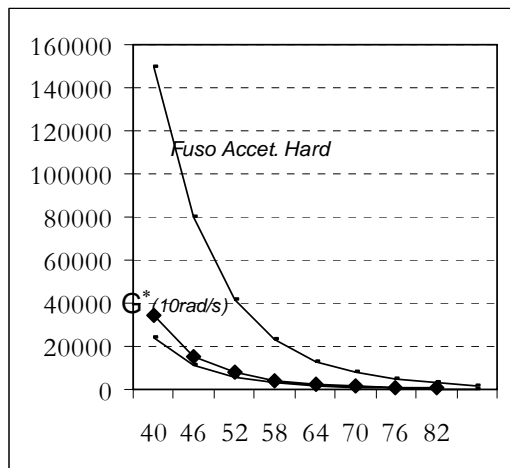
**SBS Hard**

T (°C)	G*(10rad/s)	$\delta$ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	53291.89	66.73
46	24561.70	65.59
52	12516.27	64.63
58	6442.12	63.99
64	3762.52	63.85
70	2318.95	63.06
76	1632.13	62.14
82	1349.62	61.00



**SBS Soft**

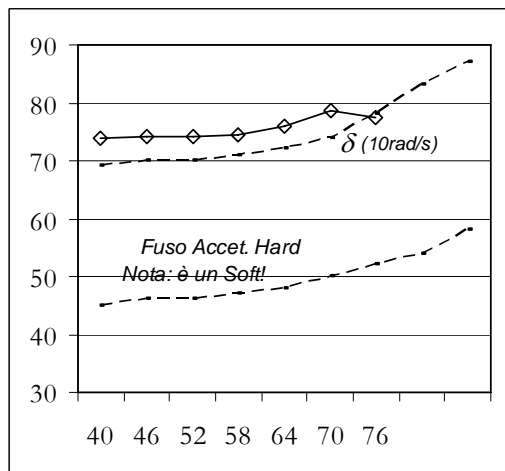
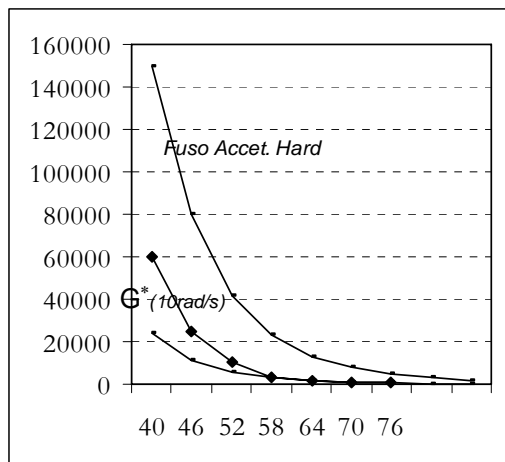
T (°C)	G*(10rad/s)	δ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	34673.98	69.80
46	15345.80	68.88
52	7762.60	67.92
58	4370.16	67.39
64	2410.65	67.69
70	1399.11	67.56
76	877.38	66.94
82	554.68	67.71





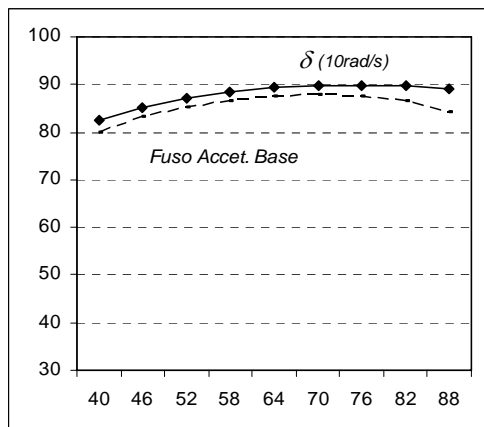
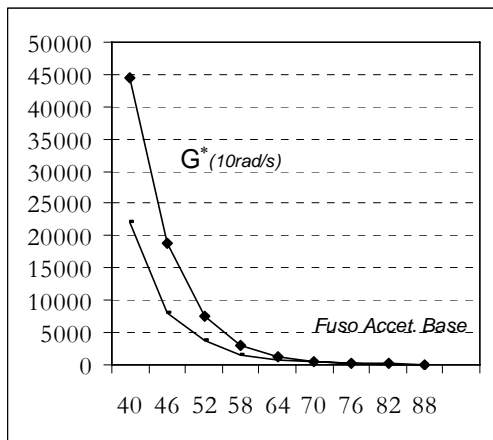
**EVA Soft**

T (°C)	G*(10rad/s)	$\delta$ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	59777.93	73.94
46	24801.10	74.13
52	10744.32	74.19
58	3436.86	74.36
64	1767.89	75.95
70	1100.01	78.69
76	551.14	77.49



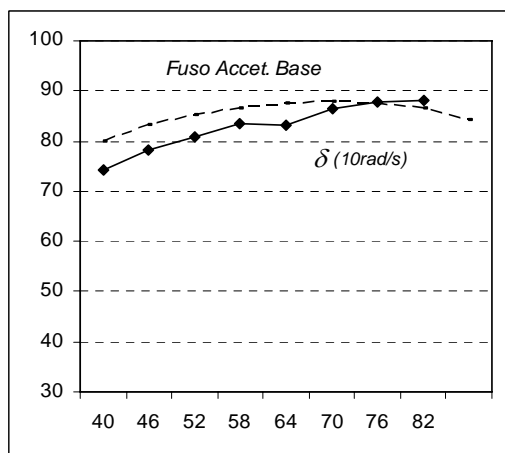
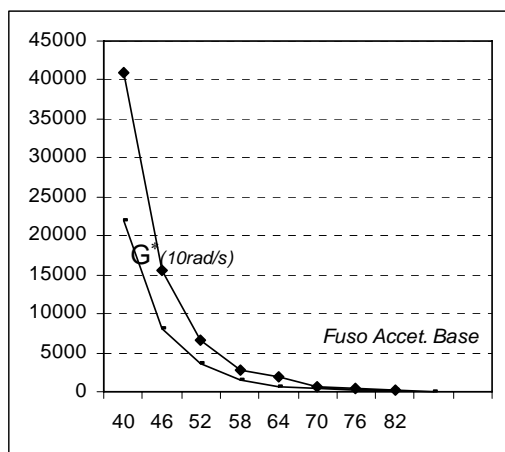
50/70 A

T (°C)	G*(10rad/s)	$\delta$ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	44406.56	82.53
46	18913.55	85.13
52	7436.05	87.00
58	2991.32	88.49
64	1238.73	89.46
70	579.19	89.80
76	298.25	89.88
82	155.39	89.66
88	91.03	88.96



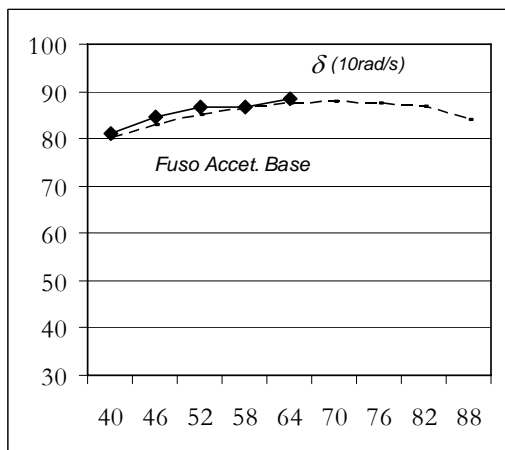
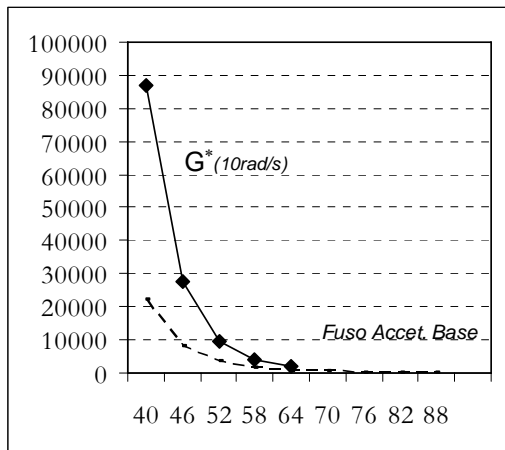
**50/70 B**

T (°C)	G*(10rad/s)	$\delta$ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	41024.02	74.35
46	15660.73	78.12
52	6589.17	80.93
58	2778.65	83.55
64	1855.11	83.26
70	729.46	86.55
76	384.58	87.88
82	225.92	88.19



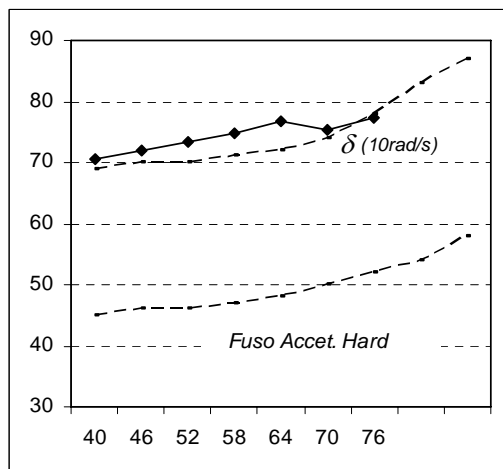
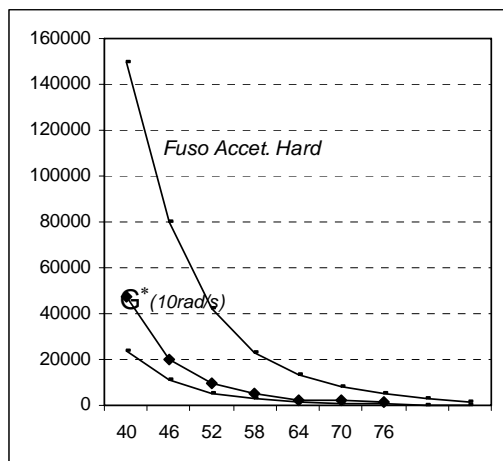
70/100 A

T (°C)	G*(10rad/s)	$\delta$ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	86884.74	81.13
46	27780.73	84.62
52	9501.35	86.80
58	4059.25	86.71
64	1793.67	88.56



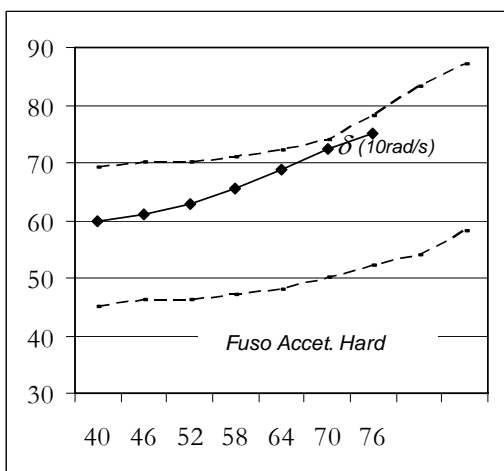
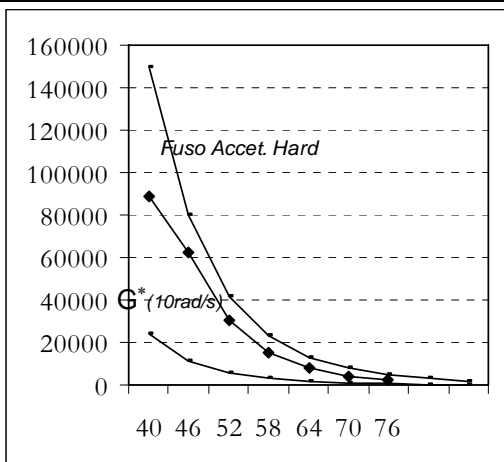
**70/100 A+ 18% CRM**

T (°C)	G*(10rad/s)	$\delta$ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	47761.58	70.45
46	20228.61	71.83
52	9318.44	73.48
58	4885.03	74.93
64	2274.55	76.66
70	2202.02	75.38
76	1166.91	77.26



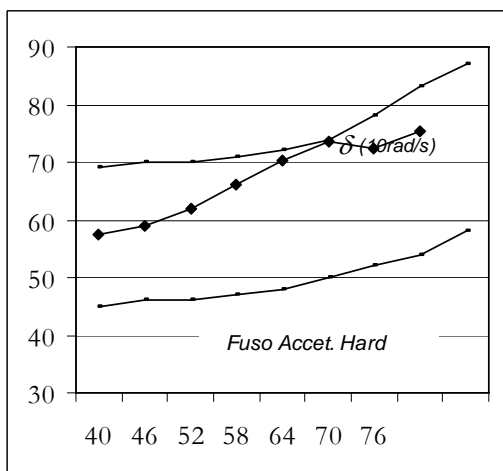
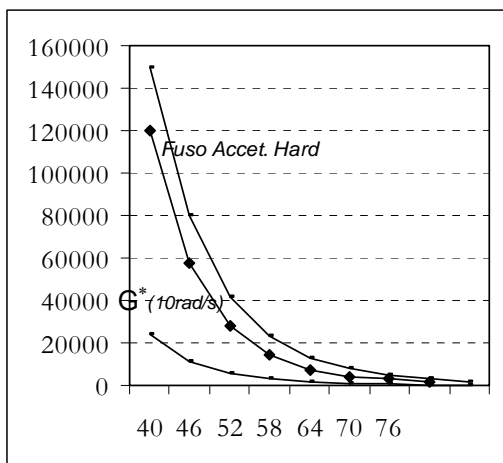
**70/100 A+ 20% CRM**

T (°C)	G*(10rad/s)	δ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	88625.20	59.85
46	62341.10	60.98
52	30130.91	62.77
58	14948.36	65.56
64	7726.23	68.94
70	4160.70	72.27
76	2100.07	75.02



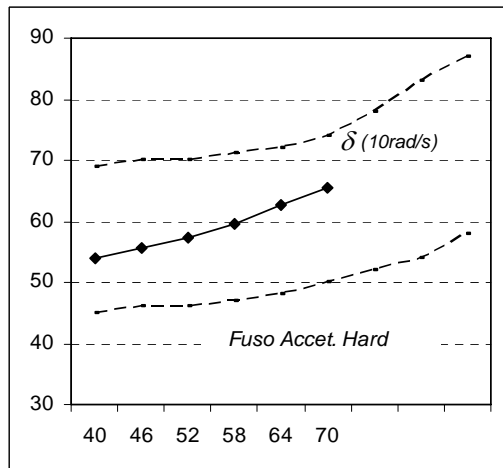
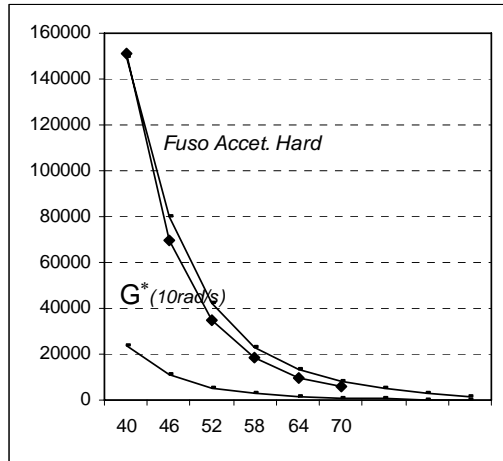
**70/100 A+ 22% CRM**

T (°C)	G*(10rad/s)	δ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	119910.81	57.35
46	57276.75	59.01
52	28083.35	62.01
58	14577.20	66.05
64	7491.38	70.19
70	3884.81	73.55
76	3320.25	72.28
82	1784.35	75.28



40/50+18%CRM

T (°C)	G*(10rad/s)	δ (10rad/s)
[°C]	[Pa]	[°]
40	151335.23	54.05
46	69719.08	55.62
52	35057.32	57.29
58	18540.87	59.60
64	9937.84	62.73
70	5755.89	65.40





## **Appendice 2**

### **Applicazione pratica della caratterizzazione PG**



## Appendice 2.1

# Mappa Territoriale di Performance Grade

## Applicazione Pratica per il Territorio Portoghese

Come è già stato ampiamente spiegato nel Capitolo 5 della presente tesi, la classificazione del *Performance Grade* si sintetizza nei passi seguenti:

- In funzione dei valori delle temperature minima e massima del luogo dove si intende stabilire il PG minimo e massimo, si attribuisce un Grado PG X-Y che deve essere richiesto ai bitumi che dovranno essere utilizzati in quella regione.
- Per verificare se un determinato bitume può essere applicato nella zona prescelta, si deve determinare il Grado PG con gli specifici metodi di prova della SHRP per il Performance Grade.

# Determinazione del PG richiesto per i bitumi nel Portogallo Continentale

## 1.1 Metodologia di Calcolo

Sono state analizzate le temperature fornite dall'*Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica*, di 75 stazioni meteorologiche del territorio continentale portoghese (vedi Tabella 2). In particolare la procedura adottata è la seguente:

1. Per ogni anno e per ogni Stazione Meteorologica vengono calcolate: la massima delle medie delle temperature massime in un periodo di 7 giorni consecutivi e la temperatura minima verificata;
2. Successivamente si calcolano la media e la varianza delle due temperature estreme, considerando una distribuzione gaussiana con un intervallo di affidabilità del 98%;
3. Si calcolano la “temperatura di progetto massima a 20 mm di profondità della pavimentazione” e la “temperatura di progetto minima sulla superficie della pavimentazione”;
4. Si definisce il valore PG massimo X e minimo Y.

## 1.2 Calcolo dettagliato per una regione

Si riportano, per una determinata regione a titolo esemplificativo, tutti i passi richiesti per il calcolo necessario alla definizione del Grado PG X-Y di un bitume.

Il luogo selezionato è la regione di Mindelo, situata nel Nord del Portogallo, a circa 10 Km da Oporto.

---

È necessario conoscere le temperature misurate in questa zona per un periodo di tempo sufficientemente lungo da potere costruire delle statistiche affidabili. Così, sono state studiate le temperature rilevate durante dieci anni consecutivi, dal 1986 al 1995.

I dati utilizzati, forniti dall'*Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica*, sono quelli riferiti alla Stazione Climatologia di Pedras Rubras e vengono riassunti nella tabella seguente.

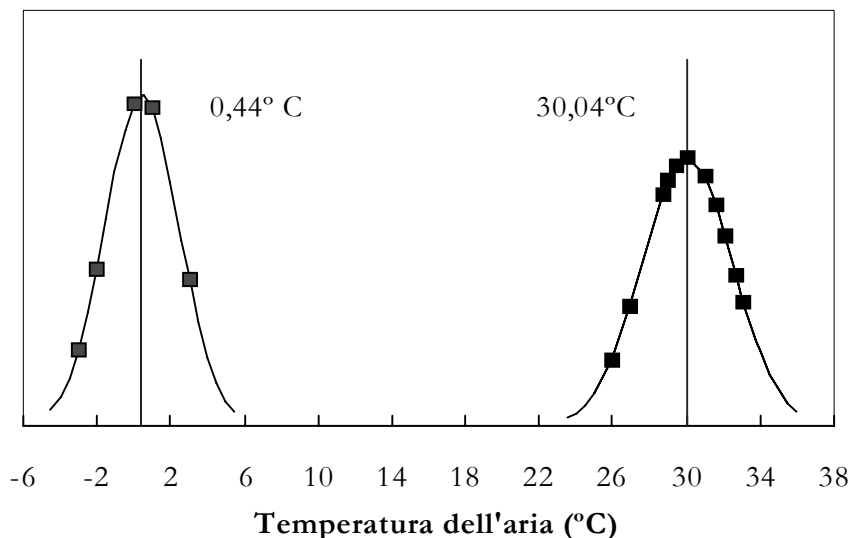
**Tabella 1: Temperature rilevate tra il 1986 e il 1995**

Anno	Temperature massime [°C]	Massima delle medie delle temperature massime di 7 giorni consecutivi[°C]	Temperature minime [°C]
1986	34,0	31,0	-3,0
1987	36,0	29,4	-2,0
1988	35,0	25,9	0,0
1989	37,0	32,1	0,0
1990	37,0	33,1	1,0
1991	37,0	31,6	3,0
1992	31,0	26,9	-----
1993	38,0	28,7	3,0
1994	34,0	29,0	1,0
1995	36,0	32,7	1,0
Media	35,5	30,04	0,44
Varianza	2,1	2,46	2,01

La classificazione PG utilizza la media dei valori massimi delle medie delle temperature massime di sette giorni consecutivi. Utilizza anche la media dei valori di temperatura minima verificate durante un anno. La Tabella 1 rappresenta il riassunto delle temperature riferite che si sono verificate ogni anno e le rispettive media e varianza.

Assumendo una frequenza di distribuzione statistica gaussiana, si verifica, ad esempio che in una estate “normale”, la media dei massimi valori della media delle temperature massime in un periodo di 7 giorni consecutivi è di **30.04°C**. In qualunque anno considerato, la probabilità che questo valore superi la  $T_{\max}$  è del 50%.

Lo stesso ragionamento può essere fatto per un inverno “normale”, la media delle temperature minime dell’aria è di **0,44°C**. Ossia, la probabilità che questo valore, in anni futuri, sia inferiore alla  $T_{\min}$  è di 50% (vedi Figura 1).



**Figura 1: Distribuzione statistica normale delle temperature dell’aria per le Regione di Mindelo (Grado di affidabilità del 50%)**

Di seguito è necessario definire due temperature nella pavimentazione: una temperatura minima sulla superficie della pavimentazione ed una temperatura massima alla profondità di 20 mm.

Temperatura di progetto massima a 20 mm di profondità della pavimentazione:

$$T_{20\text{mm}} = (T_{\text{aria}} - 0.00618 \text{ Lat}^2 + 0.2289 \text{ Lat} + 42.2) (0.9545) - 17.78 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [1]$$

$$T_{20\text{mm}} = 50,01^\circ\text{C}$$

Nella quale:

- $T_{\text{aria}}$  è la media della massima della media delle temperature massime in un periodo di 7 giorni consecutivi ( $^\circ\text{C}$ ), nel presente esempio,  $30,04^\circ\text{C}$  (vedi Tabella 1).
- Lat è la latitudine geografica di progetto ( $^\circ$ ), nel presente esempio pari a  $41.14^\circ$ .

Temperatura di progetto minima sulla superficie della pavimentazione:

$$T_{\text{sup.}} = 0.859 T_{\text{ar}} + 1.7 \quad [2]$$

$$T_{\text{sup}} = 2.07 \text{ °C}$$

Nella quale:

$T_{\text{aria}}$  è la media delle temperature minime dell'aria (°C), nel presente esempio assume il valore di 0.44°C.

Di seguito si passa al calcolo del Grado PG X-Y:

$$\mathbf{X} \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimo valore multiplo di sei più quattro che eccede il valore della} \\ \text{temperatura massima di progetto [Eq. 1];} \\ \\ \text{X} \subseteq [46;82] \end{array} \right.$$

Nel presente esempio  $\mathbf{X} = 52$ :

$$[\text{Min}(\text{multiplo di } 6 + 4) > 50.01] \wedge 52 \subseteq [46;82]$$

$$[(48 + 4) = 52] > 50.01 \wedge 52 \subseteq [46;82]$$

$$\mathbf{Y} \left\{ \begin{array}{l} \text{Massimo valore multiplo di sei meno 4 che non eccede il valore della} \\ \text{temperatura minima di progetto. [Eq. 2];} \\ \\ \text{Y} \subseteq [-34; -46]; \text{ quando X= 46} \\ \text{Y} \subseteq [-10; -46]; \text{ quando X= 52} \\ \text{Y} \subseteq [-16; -40]; \text{ quando X= 58} \\ \text{Y} \subseteq [-10; -40]; \text{ quando X= 64} \vee \text{ X= 70} \\ \text{Y} \subseteq [-10; -34]; \text{ quando X= 76} \vee \text{ X= 82} \end{array} \right.$$

Nel presente esempio  $\mathbf{Y} = -10$ :

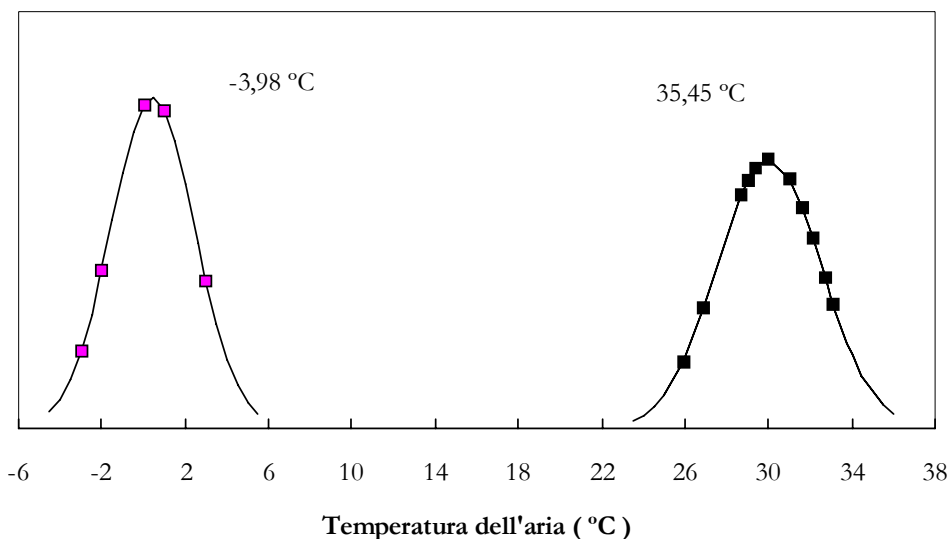
$$X = 52 \Rightarrow Y \subseteq [-10; -46] \wedge [(-6 - 4) = -10 < 2.07]$$

Conseguentemente il bitume da utilizzare in questa zona, con una affidabilità del 50%, dovrà essere un **PG 52 - 10**.

Si ricorda però che i valori di temperatura di progetto definiti prima hanno una affidabilità del 50%.

In generale il progettista deve lavorare con una affidabilità del 98%, quindi di seguito si eseguiranno i calcoli per tale valore di affidabilità, in modo da valutare quanto l'intervallo di affidabilità associato alla temperatura possa cambiare il risultato finale.

Così, si pretende che la affidabilità delle temperature  $T_{max}$  e  $T_{min}$  utilizzate nel calcolo della “temperatura di progetto massima a 20 mm di profondità della pavimentazione” e della “temperatura di progetto minima sulla superficie della pavimentazione” sia del 98%.



**Figura 2: Distribuzione statistica normale delle temperature dell'aria per la Regione di Mindelo (Grado di affidabilità del 98%)**

Con base nei valori della Figura 2, abbiamo:

$$T_{max} = 35,4 \text{ °C} \quad (30.04 + 2.2 \times 2.46)$$

$$T_{min} = - 3,98 \text{ °C} \quad (0.44 - 2.2 \times 2.01)$$

Di seguito si calcola rispettivamente:

Temperatura di progetto massima a 20 mm di profondità della pavimentazione:

$$T_{20mm} = 55,34 \text{ °C}$$

Temperatura di progetto minima sulla superficie della pavimentazione:

$$T_{sup} = -1,718 \text{ °C}$$

E conseguentemente il bitume da utilizzare in questa zona, con una affidabilità del 98%, dovrà essere un **PG 58 – 10**.



### 1.3 Mappa Territoriale di Performance Grade per il Portogallo Continentale

Nella Tabella seguente si indicano i valori di Performance Grade calcolati per ogni stazione meteorologica riferita al paragrafo precedente.

**Tabella 2: Gradi PG per le diverse stazioni meteorologiche**

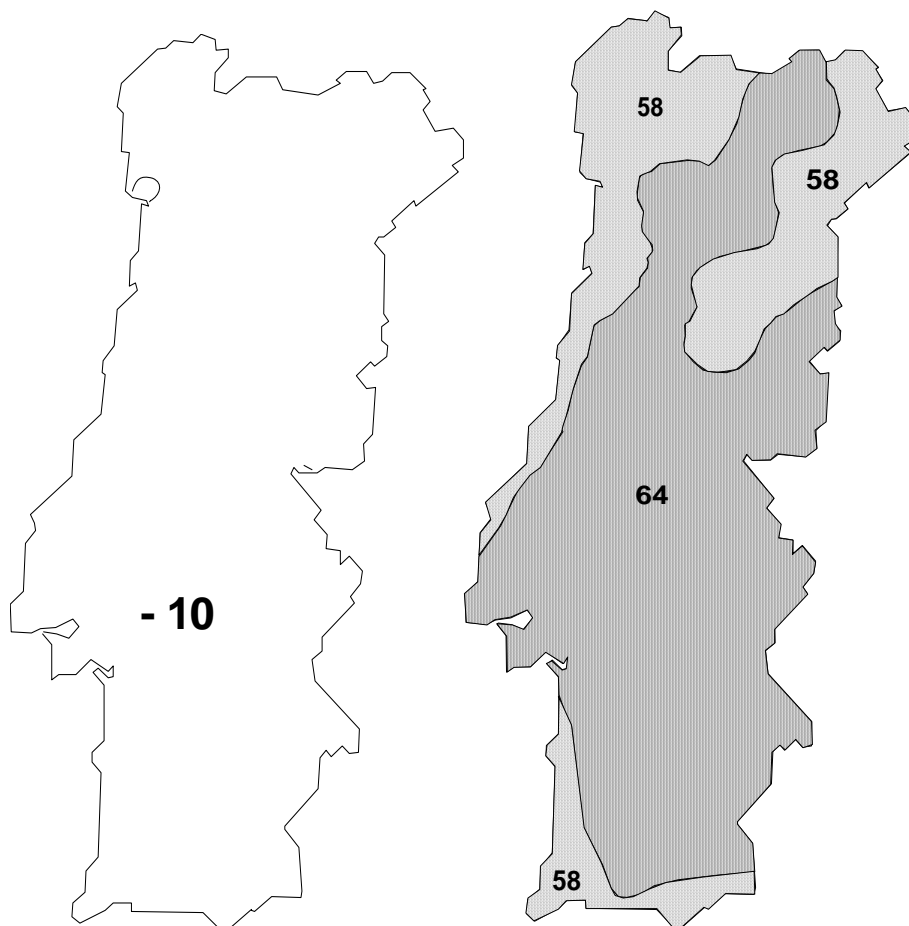
N° della Stazione	Nome della Stazione Meteorologica	LATIT.	LONG.	ALT.	PGmax °C	PGmin °C	PG
11	MONTALEGRE	41 49	7 47	1005	52.6	-8.0	58-10
14	PONTE DE LIMA/ARCOZ	41 45	8 35	50	58.4	-2.0	64-10
18	CHAVES/AERODROMO	41 43	7 28	360	60.1	-6.0	64-10
19	CABRIL/S.LOURENCO	41 43	8 1	585	57.1	-2.6	58-10
23	BRAGA/POSTO AGRARIO	41 33	8 24	190	56.9	-2.6	58-10
32	MIRANDELA	41 31	7 12	250	59.4	-6.1	64-10
35	MIRANDA DO DOURO	41 31	6 17	693	56.8	-9.8	58-10
37	MOGADOURO	41 20	6 44	644	56.2	-5.2	58-10
43	PACOS DE FERREIRA	41 16	8 23	320	56.6	-4.7	58-10
44	CARRAZEDA DE ANSIAE	41 14	7 18	715	55.6	-7.9	58-10
45	BOA NOVA	41 13	8 43	17	53.1	-1.1	58-10
49	PORTO/S.GENS	41 11	8 39	90	54.6	-2.1	58-10
52	REGUA	41 10	7 48	65	59.9	-3.4	64-10
55	PINHAO/SANTA BARBAR	41 10	7 33	130	61.6	-3.1	64-10
57	LUZIM	41 9	8 15	250	57.6	-2.7	58-10
70	FIGUEIRA DE CASTELO	40 52	6 54	635	57.5	-8.0	58-10
75	VISEU	40 40	7 54	443	58.1	-5.6	64-10
85	NELAS	40 31	7 51	440	58.6	-3.9	64-10
88	MANTEIGAS	40 24	7 32	815	56.1	-5.4	58-10
90	ALDEIA DE SOUTO/QTA	40 23	7 24	468	58.9	-5.0	64-10
98	FUNDAO	40 8	7 30	495	58.6	-4.6	64-10
107	COIMBRA/BENCANTA	40 13	8 27	27	57.9	-3.3	58-10
110	MONTEMOR-O-VELHO	40 11	8 43	15	55.9	-2.7	58-10
121	S.PEDRO DE MUEL	39 45	9 2	40	51.4	-2.1	58-10
126	ALCOBACA/E.FRUTICUL	39 31	8 58	38	56.2	-3.1	58-10
132	SANTAREM/ESCOLA AGR	39 15	8 42	54	60.5	-2.2	64-10
134	FONTE BOA	39 12	8 44	73	60.8	-1.3	64-10
136	VIMEIRO	39 11	9 20	10	52.6	-2.8	58-10
144	CORUCHE	38 57	8 32	25	60.4	-3.6	64-10
148	COLARES/SARRAZOLA	38 48	9 27	55	53.3	0.7	58-10
150	CABO DA ROCA	38 47	9 30	142	51.6	0.4	58-10
160	SASSOEIROS	38 42	9 19	50	56.6	0.5	58-10

N° della Stazione	Nome della Stazione Meteorologica	LATIT.	LONG.	ALT.	PGmax °C	PGmin °C	PG
162	LISBOA/TAPADA AJUDA	38 42	9 11	37	57.6	0.2	58-10
164	VENDAS NOVAS	38 42	8 30	127	62.5	-2.8	64-10
166	LAVRADIO	38 41	9 3	6	57.7	-0.0	58-10
167	PEGOES	38 38	8 39	64	60.2	-2.8	64-10
171	SETUBAL/SETENAVE	38 29	8 49	4	60.3	0.0	64-10
174	ALCACER DO SAL	38 23	8 31	51	59.7	-3.3	64-10
183	ALVALADE	37 57	8 24	61	60.6	-4.6	64-10
188	ZAMBUJEIRA	37 30	8 45	106	55.7	-3.1	58-10
192	MONCHIQUE	37 19	8 33	465	56.1	-1.4	58-10
195	TUNES	37 10	8 15	56	58.7	-2.6	64-10
196	VILA DO BISPO	37 5	8 53	115	54.4	0.5	58-10
201	LADOEIRO/RIBEIRO DO	39 52	7 15	180	61.7	-5.3	64-10
223	BENAVILA	39 6	7 52	150	61.8	-3.1	64-10
229	VILA FERNANDO	38 55	7 19	360	60.7	-3.1	64-10
235	ELVAS	38 53	7 9	208	61.2	-4.4	64-10
247	VIANA DO ALENTEJO	38 20	8 3	202	61.4	-3.4	64-10
250	AMARELEJA	38 13	7 13	192	62.6	-4.2	64-10
253	CONTENDA	38 3	7 4	450	61.0	-2.5	64-10
263	MERTOLA/VALE FORMOS	37 45	7 33	190	60.6	-3.6	64-10
264	NEVES CORVO	37 35	7 58	225	61.5	-1.5	64-10
279	PRAIA DA ROCHA	37 7	8 32	19	55.1	0.2	58-10
282	TAVIRA	37 7	7 39	25	56.8	-1.0	58-10
530	CABO CARVOEIRO	39 21	9 24	32	47.8	0.5	58-10
532	SINTRA/GRANJA/BASE	38 50	9 20	134	55.3	-2.6	58-10
534	MONTIJO/BASE AEREA	38 42	9 3	14	57.8	-1.6	58-10
535	LISBOA	38 43	9 9	77	56.8	0.1	58-10
537	ALVERCA/BASE AEREA	38 53	9 2	2	59.4	0.2	64-10
538	SAGRES	36 59	8 57	40	51.8	1.7	58-10
540	MONTE REAL/BASE AER	39 50	8 53	52	55.1	-2.8	58-10
542	SINES	37 57	8 53	15	48.8	1.9	58-10
543	VIANA DO CASTELO/ME	41 42	8 48	16	55.4	-2.1	58-10
545	PORTO/PEDRAS RUBRAS	41 14	8 41	70	53.8	-1.9	58-10
546	PORTO/SERRA PILAR	41 8	8 36	93	54.5	-1.6	58-10
549	COIMBRA/GEOFISICO	40 12	8 25	141	58.9	-2.1	64-10
552	TANCOS/BASE AEREA	39 29	8 26	83	60.5	-3.7	64-10
554	FARO/AEROPORTO	37 1	7 58	8	55.6	-0.3	58-10
557	EVORA	38 34	7 54	309	59.4	-2.0	64-10
562	BEJA	38 1	7 52	246	61.1	-2.7	64-10
566	VILA REAL	41 19	7 44	481	57.9	-4.4	58-10
568	PENHAS DOURADAS	40 25	7 33	1380	51.1	-9.3	58-10
571	PORTALEGRE	39 17	7 25	597	59.4	-2.6	64-10
575	BRAGANCA	41 48	6 44	690	56.1	-7.9	58-10
579	LISBOA/GAGO COUTINH	38 46	9 8	104	58.9	0.9	64-10

I valori ottenuti per il Territorio Portoghese per le temperature di progetto massima e minima sono rappresentati nella Figura 3:



**Figura 3: Rappresentazione spaziale delle temperature di progetto massima e minima per la definizione del Grado PG.**



**Figura 4: Rappresentazione spaziale dei Gradi PG con una affidabilità del 98%.**

Si conclude che il bitume da utilizzare sul territorio portoghese deve avere almeno un PG massimo di (+64) in tutto il paese, con eccezione della zona ovest e Nord interiore, dove il PG massimo dovrà essere almeno di (+58).

Il PG minimo per tutto il Portogallo è (-10).

La sovrapposizione delle esigenze massime e minime definisce due Gradi PG distinti: **PG 64-10** e **PG 58-10**. La scelta deve essere la più conservativa e quindi il PG da esigere ai bitumi per la costruzione stradale in Portogallo deve essere **PG 64-10**.

## 1.4 Correzione dei Gradi PG

I Gradi PG definiti prima nella Figura 3.2 devono essere corretti, ossia aumentati di una categoria o di 6 gradi nel caso sia verificata una delle seguenti condizioni, o di due categorie nel caso le due condizioni seguenti si verificano simultaneamente:

- Traffico Intenso                      Traffico > 30 E<sup>6</sup> ESAL's (80 kN)
- Traffico Lento                        Velocità di percorrenza < 70 km/h

Nella tabella 3, a titolo di esempio, sono stati corretti i Gradi PG, in funzione delle condizioni verificate.

**Tabella 3 – Gradi PG corretti**

<b>Grado PG definito per la zona</b>	<b>Condizioni verificate</b>	<b>Grado PG ridefinito per la zona</b>
PG 58-10	-	PG 58-10
	Traffico Intenso	PG 64-10
	Traff.ico Lento	PG 64-10
	Traff. Intenso e Lento	PG 70-10
PG 64-10	-	PG 64-10
	Traffico Intenso	PG 70-10
	Traffico Lento	PG 70-10
	Traff. Intenso e Lento	PG 76-10



## Appendice 2.2

### Determinazione del PG di un Bitume

#### Applicazione Pratica per bitumi del mercato Portoghese

Conosciuto il *Performance Grade* richiesto nel territorio portoghese, sono stati scelti alcuni bitumi fra i tanti presenti nel mercato portoghese per verificare se questi potevano essere utilizzati in tutto il territorio.

# Applicazione Pratica per tre bitumi del mercato Portoghese

## 1.1 Risultati ottenuti - AASHTO MP1

Sono stati testati tre bitumi non modificati di classe di penetrazione diversa: PEN 20/30, PEN 40/50 e PEN 60/70. Questi bitumi sono stati testati d'accordo con quanto definito dalla SUPERPAVE per la Classificazione PG.

### 1.1.1 Risultati ottenuti con il Viscosimetro Brookfield

Criterio da verificare:

- Viscosità (135 °C)  $\leq 3.0$  Pa·s , bitume vergine (non invecchiato)

Tabella 1 – Risultati ottenuti con il Viscosimetro di Brookfield

Bitume	Viscosità @ 135 °C (Pa.s)
PEN 20/30	0.75
PEN 40/50	0.47
PEN 60/70	0.36

### 1.1.2 Risultati ottenuti con il DSR

Criteri da verificare:

- $G^*/\sin \delta$  (temperatura di prova)  $\geq 1.00$  kPa, bitume tal quale (non invecchiato)
  - $G^*/\sin \delta$  (temperatura di prova)  $\geq 2.20$  kPa, bitume invecchiato RTFOT
  - $G^* \times \sin \delta$  (temperatura di prova)  $< 5000$  kPa, bitume invecchiato PAV
-



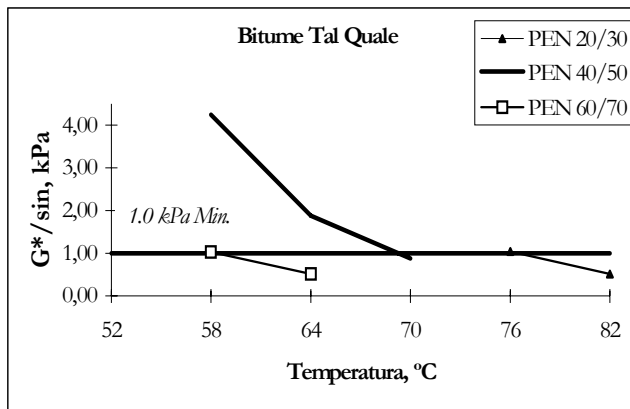


Figura 1.1 – Risultati ottenuti con il DSR, bitume tal quale

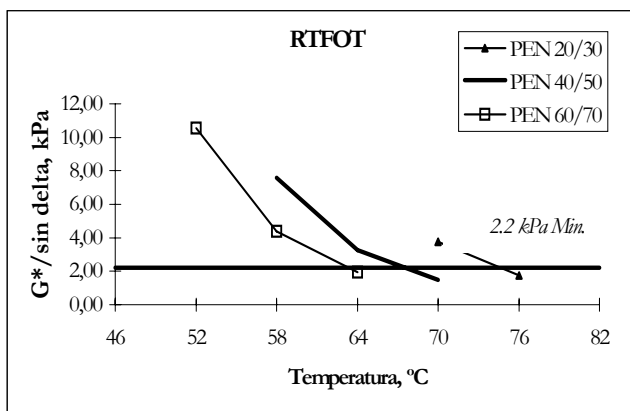


Figura 1.2 – Risultati ottenuti con il DSR, bitume invecchiato RTFOT

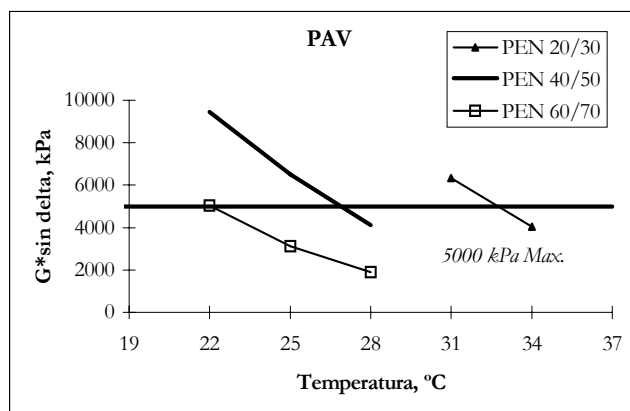


Figura 1.3 – Risultati ottenuti con il DSR, bitume invecchiato PAV

### 1.1.3 Risultati ottenuti con il BBR

Criteri da verificare:

- $S(t)$  (temp. prova)  $\leq 300$  MPa, a 60 secondi, bitume invecchiato RTFOT e PAV
- m-value (temp. prova)  $\geq 0.3$ , a 60 secondi, bitume invecchiato RTFOT e PAV

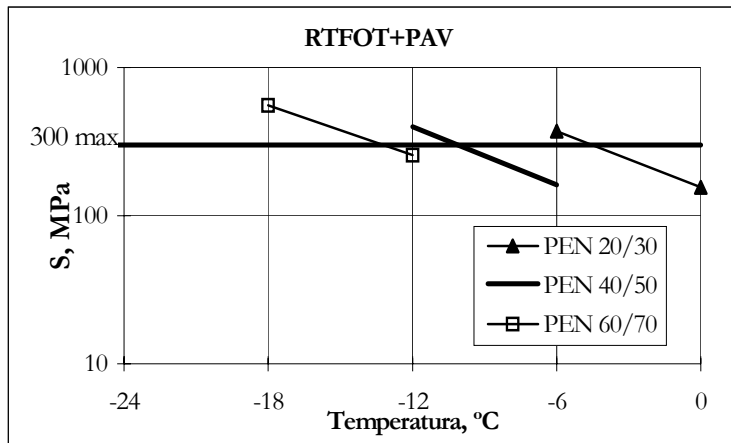


Figura 2.1 –  $S(t)$  misurato con BBR per i bitumi invecchiati RTFOT+PAV

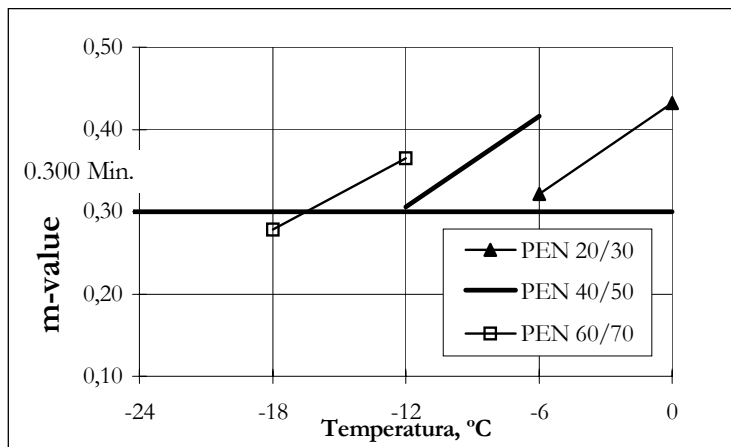


Figura 2.2 – m-value misurato con BBR per i bitumi invecchiati RTFOT+PAV

---

### 1.1.4 Risultati ottenuti con il DTT

I bitumi studiati hanno avuto risultati di rigidità  $S(t)$  nella prova BBR inferiori a 300 MPa, quindi non è necessario eseguire il DTT.

## 1.2 Bitume PEN 40/50

Di seguito, si dettaglia la analisi per la determinazione del Grado PG del bitume PEN 40/50.

1. Per tutti i Gradi PG si deve verificare che la viscosità a 135 °C per il bitume tal quale sia inferiore a 3,0 Pa.s. Questa condizione è verificata, quindi il bitume può avere tutti i gradi X-Y definiti nella Norma.

2. Per definire X, relazionato con le temperature alte, si devono verificare entrambe le condizioni nella prova DSR:

- $G^*/\sin \delta$  (temperatura di prova)  $\geq 1.00$  kPa, bitume tal quale (non invecchiato)
- $G^*/\sin \delta$  (temperatura di prova)  $\geq 2.20$  kPa, bitume invecchiato RTFOT

Il PEN 40/50 verifica la prima condizione per le temperature non superiori a 70 °C. La seconda condizione è verificata per le temperature non superiori a 64 °C.

Così, il valore di X è 64.

3. Per definire Y, relazionato con le temperature basse, si utilizza un risultato della prova DSR, i risultati della prova BBR ed eventualmente la prova DTT.

Per il DSR si deve verificare:

- $G^* \sin \delta$  (temperatura di prova)  $< 5000$  kPa, bitume invecchiato PAV

Il PEN 40/50 verifica questa condizione per le temperature maggiori o uguali a 28°C.

Per il BBR si devono verificare entrambe le condizioni:

- $S(t)$  (temp. prova)  $\leq 300$  MPa, a 60 secondi, bitume invecchiato RTFOT e PAV
- m-value (temp. prova)  $\geq 0.3$ , a 60 secondi, bitume invecchiato RTFOT e PAV

Le temperature per le quali il bitume verifica entrambe le condizioni sono maggiori o uguali a -6 °C.

4. Dal momento che  $S(t)$  nella prova BBR è stato inferiore a 300 MPa, non è necessario eseguire il DTT.

5. Così, d'accordo con la tabella della normativa AASHTO MP1, si verifica che per il valore determinato di  $X = 64$ , il valore di  $Y$  è uguale a 16 e il Grado PG del PEN 40/50 è **PG 64 – 16**.

### 1.3 Grado PG

Per ogni bitume viene di seguito presentata una tabella riassuntiva per il calcolo del rispettivo Grado PG.

**Tabella 2 - Bitume PEN 60/70 – Grado PG 58-22**

Prova	Criterio	Temperatura	Valore X e Y	PG
<b>Brookfield</b>	Visc. < 3.0 Pa.s, tal quale	135 °C	Tutti valori	<b>PG 58-22</b>
<b>DSR</b>	$G^*/\sin\delta \geq 1.00$ kPa TQ	$\leq 58$ °C	$X = \underline{58}$ , 52 o 46	
	$G^*/\sin\delta \geq 2.20$ kPa RTFOT	$\leq 64$ °C	$X = 64, \underline{58}$ , 52 o 46	
	$G^*x\sin\delta < 5000$ kPa PAV	$\geq 22$ °C	$Y = \underline{22}$ o -16	
<b>BBR</b>	$S(t) \leq 300$ Mpa, 60 s. PAV $m\text{-value} \geq 0.3$ , 60 s. PAV	$\geq -12$ °C $\geq -12$ °C	$Y = \underline{22}$ o -16 $Y = \underline{22}$ o -16	
<b>DTT</b>	---			

**Tabella 3 - Bitume PEN 40/50 – Grado PG 64-16**

Prova	Criterio	Temperatura	Valore X e Y	PG
<b>Brookfield</b>	Visc. < 3.0 Pa.s, tal quale	135 °C	Tutti	<b>PG 64-16</b>
<b>DSR</b>	$G^*/\sin\delta \geq 1.00$ kPa TQ	$\leq 70$ °C	$X = 70, \underline{64}, 58, 52$ o 46	
	$G^*/\sin\delta \geq 2.20$ kPa RTFOT	$\leq 64$ °C	$X = \underline{64}$ , 58, 52 o 46	
	$G^*x\sin\delta < 5000$ kPa PAV	$\geq 28$ °C	$Y = \underline{16}$ o -10	
<b>BBR</b>	$S(t) \leq 300$ Mpa, 60 s. PAV $m\text{-value} \geq 0.3$ , 60 s. PAV	$\geq -6$ °C $\geq -12$ °C	$Y = \underline{16}$ o -10 $Y = \underline{22}, \underline{16}$ o -10	
<b>DTT</b>	---			

**Tabella 4 - Bitume PEN 20/30 – Grado PG 70-10**

Prova	Criterio	Temperatura	Valore X e Y	PG
<b>Brookfield</b>	Visc. < 3.0 Pa.s, tal quale	135 °C	Tutti	<b>PG 70-10</b>
<b>DSR</b>	$G^*/\sin\delta \geq 1.00$ kPa TQ	$\leq 76$ °C	$X = 76, \underline{70}, 64, 58, 52, 46$	
	$G^*/\sin\delta \geq 2.20$ kPa RTFOT	$\leq 70$ °C	$X = \underline{70}, 64, 58, 52$ o 46	
	$G^*x\sin\delta < 5000$ kPa PAV	$\geq 34$ °C	$Y = \underline{10}$	
<b>BBR</b>	$S(t) \leq 300$ Mpa, 60 s. PAV $m\text{-value} \geq 0.3$ , 60 s. PAV	$\geq 0$ °C $\geq -6$ °C	$Y = \underline{10}$ $Y = 16$ o $\underline{10}$	
<b>DTT</b>	---			

## 1.4 Applicazione al Territorio Portoghese

Delle tabelle riportate sopra risultano i seguenti Gradi PG:

- Bitume PEN 60/70 – PG 58-22
- Bitume PEN 40/50 – PG 64-16
- Bitume PEN 20/30 – PG 70-10

Così, considerando che la mappa di Performance Grade per il Portogallo (Vedi A4.1), definiva due Gradi PG possibili, in funzione della zona (**PG 64-10** e **PG 58-10**) si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il bitume PEN60/70 non è adeguato a tutte le regioni potendo il suo utilizzo, nelle regioni indicate con PG 64-10, originare ammaloramenti, a breve termine, nella pavimentazione, dal momento in cui non ha una buona performance sopra i 58°C.
  - L'utilizzo dei bitumi PEN 40/50 e PEN 20/30, non dovrebbe causare problemi dal momento in cui hanno un PG sufficiente. Per quanto riguarda il PEN 40/50 il progettista, però, deve fare attenzione alle condizioni di traffico della strada in questione, poichè il PG 64-16, non è sufficiente per condizioni di traffico intenso e/o lento.
-



## **Appendice 2.3**

**Tabella riassuntiva della classificazione  
SHRP per PG**





## NORMATIVA SHRP

PERFORMANCE GRADE	PG 46-			PG 52-							PG 58-					PG 64-					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average 7-day Maximum Pavement Design Temperature, °C	< 46			< 52							< 58					< 64					
Minimum Pavement Design Temperature, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
<b>ORIGINAL BINDER</b>																					
Flash Point Temp. T48: Minimum °C	230																				
Viscosity, ASTM D4402 Maximum, 3 Pa*s, Test Temp. °C	135																				
Dynamic Shear, TP5: G*/senδ, Minimum 1,00 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	46			52							58					64					
<b>ROLLING THIN FILM OVEN (T240) OR THIN FILM OVEN RESIDUE (T179)</b>																					
Mass Loss, Maximum percent	1,00																				
Dynamic Shear, TP5: G*/senδ, Minimum 2,20 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	46			52							58					64					
<b>PREASSURE AGING VESSEL RESIDUE (PP1)</b>																					
PAV Aging Temperature °C	90			90							100					100					
Dynamic Shear, TP5: G*senδ, Maximum 5000 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Physical Hardening	Report																				
Creep Stiffness TP1: S, Maximum 300 MPa m – value Minimum, 0,300 Test Temp @ 60s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Direct Tension, TP3 Failure Strain Minimum 1.0% Test Temp @ 1,0 mm/min °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

PERFORMANCE GRADE	PG 70-						PG 76-					PG 82-				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Average 7-day Maximum Pavement Design Temperature, °C	< 70						<76					< 82				
Minimum Pavement Design Temperature, °C	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>- 16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
<b>ORIGINAL BINDER</b>																
Flash Point Temp. T48: Minimum °C	230															
Viscosity, ASTM D4402 Maximum, 3 Pa*s, Test Temp. °C	135															
Dynamic Shear, TP5: G <sup>*</sup> senδ, Minimum 1,00 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	70						76					82				
<b>ROLLING THIN FILM OVEN (T240)</b>																
Mass Loss, Maximum percent	1,00															
Dynamic Shear, TP5: G <sup>*</sup> senδ, Minimum 2,20 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	70						76					82				
<b>PREASSURE AGING VESSEL RESIDUE (PP1)</b>																
PAV Aging Temperature °C	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Dynamic Shear, TP5: G <sup>*</sup> senδ, Maximum 5000 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Physical Hardening	Report															
Creep Stiffness TP1: S, Maximum 300MPa m – value Minimum, 0,300 Test Temp @ 60s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Direct Tension, TP3 Failure Strain Minimum 1,0% Test Temp @ 1,0 mm/min °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

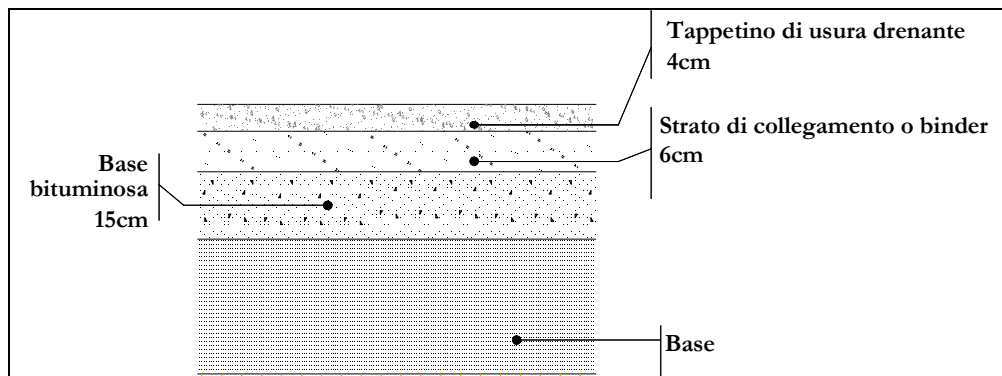
# Appendice 3

## Analisi Economica

### 1.1 Esempio di Analisi Economica (valutazione dell'investimento iniziale)

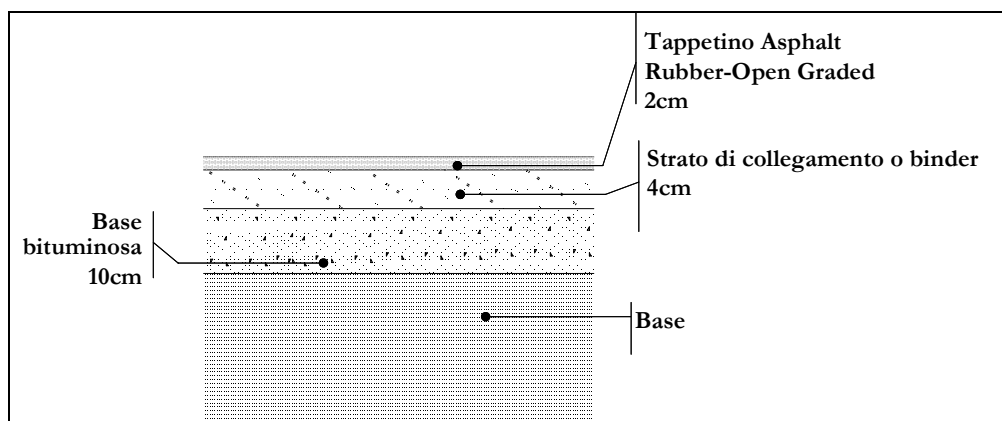
Si è considerato interessante includere nella presente tesi un esempio indicativo di analisi economica dell'investimento iniziale associato a due alternative progettuali per la realizzazione di una pavimentazione nuova. La prima delle due ricorre a leganti convenzionali, non modificati e modificati con SBS, mentre, per la seconda alternativa, viene previsto l'impiego di bitume Asphalt Rubber.

In particolare, la prima soluzione prevede un manto di usura drenante dello spessore di 4 cm, con un contenuto di bitume modificato SBS pari al 4.5% in peso del conglomerato e la frazione di inerti è costituita per il 20% da aggregato basaltico e per il restante 80% da aggregato normale (vedi Figura 1). Il binder, dello spessore di 6 cm, non prevede l'utilizzo di aggregato basaltico e il legante rappresenta il 4.9% in peso del conglomerato. Infine, lo strato bituminoso di base prevede uno spessore di 15 cm ed un contenuto di legante pari al 4.1%.



**Figura 1:** Schema della struttura della soluzione con legante convenzionale

La soluzione riconducibile all'impiego di Asphalt Rubber (vedi Figura 2) prevede una riduzione dello spessore degli strati in accordo con il Manuale della Caltrans. Si prevede così un manto di usura drenante dello spessore di 2 cm, con un contenuto di legante AR pari al 9% in peso del conglomerato, mentre, anche in questo caso, il 20% dell'aggregato è di tipo basaltico. Il binder presenta uno spessore di 4 cm ed un contenuto in legante dell'8% in peso, mentre lo strato bituminoso di base ha uno spessore di 10 cm ed un contenuto di bitume AR pari all'8% in peso. Il confronto viene effettuato per ogni singolo strato (drenante, binder e base bituminosa), assumendo come riferimento comune i prezzi riportati nella Tabella 1, aventi valore puramente indicativo del mercato attuale, non essendo desunti da alcun prezzario ufficiale.



**Figura 2:** Schema della struttura della soluzione con legante Asphalt Rubber

**Tabella 1: Elenco prezzi assunto per l'analisi economica comparativa**

Articolo	Unità	Prezzo Unitario
Fornitura di Aggregato normale	Ton	€ 6.00
Fornitura di Aggregato basaltico	Ton	€ 20.00
Fornitura di Bitume normale	Ton	€ 230.00
Fornitura di Bitume modificato SBS	Ton	€ 330.00
Fornitura di Bitume Asphalt Rubber	Ton	€ 430.00
Fornitura di Base normale	m <sup>3</sup>	€ 68.28
Fornitura di Binder modificato	m <sup>3</sup>	€ 85.53
Fornitura di Conglomerato drenante per strato di usura	m <sup>2</sup> /cm	€ 1.78

Il calcolo del costo del bitume Asphalt Rubber, nello specifico, è comprensivo del costo del bitume non modificato (230€) più circa 200€, valore che è normalmente utilizzato in Europa e comprende in media il costo di 20% di polverino di gomma e tutti gli oneri occorrenti per l'impianto di produzione, in modo da dare il prodotto finito.

In particolare, si effettua una prima analisi comparativa assumendo che tutte le voci di prezzo, compresi gli utili d'impresa, rimangano invariate per le due soluzioni, al fine di calcolare il costo unitario per m<sup>2</sup> di realizzazione della pavimentazione da parte dell'ente gestore, della concessionaria o, comunque, del committente.

Per quanto riguarda il tappeto d'usura, l'analisi di prezzo delle due soluzioni (vedi Tabella 2 e Tabella 3) mostra che, nonostante un prezzo unitario leggermente superiore, espresso in m<sup>2</sup> per centimetro di spessore, la soluzione con AR fornisce un prezzo totale al m<sup>2</sup> inferiore, per via delle proprietà prestazionali che consentono di applicarne uno strato più sottile anche del 50%.

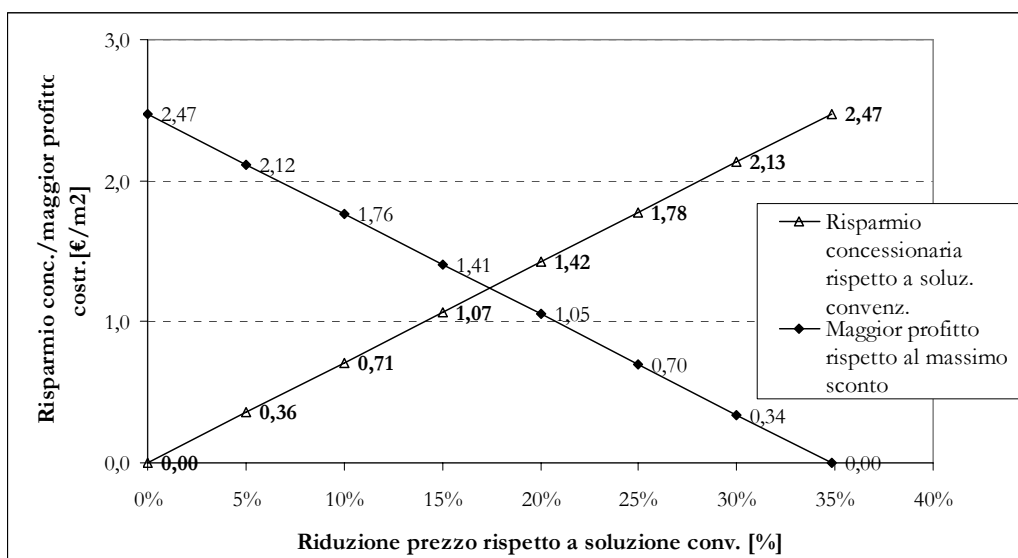
**Tabella 2: Analisi economica preliminare per il tappeto di usura con legante convenzionale**

	Quantità	Prezzo Unitario	Peso specifico	Prezzo Unitario	Spessore	Prezzo
	[% parz.-tot.]	[€/Ton]	[Ton/m <sup>3</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> xcm]	[cm]	[€/m <sup>2</sup> ]
Fornitura di Aggregato normale	80%	6				
Fornitura di Aggregato basaltico	20%	20				
Fornitura di Bitume modificato SBS	4.5%	330				
<i>Costo totale materiali compattati</i>		23.25	2.4	0.56	4	2.23
Confezionamento, stesa, rullatura e quant'altro occorre per la posa in opera del conglomerato, compresi profitti d'impresa				1.22	4	4.87
<b>Prezzo Drenante già steso</b>				<b>€ 1.78</b>	<b>4</b>	<b>€ 7.10</b>

**Tabella 3: Analisi economica preliminare per il tappeto di usura con legante Asphalt Rubber**

	Quantità	Prezzo Unitario	Peso specifico	Prezzo Unitario	Spessore	Prezzo
	[% parz.-tot.]	[€/Ton]	[Ton/m <sup>3</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> xcm]	[cm]	[€/m <sup>2</sup> ]
Fornitura di Aggregato normale	80%	6				
Fornitura di Aggregato basaltico	20%	20				
Fornitura di Bitume Asphalt Rubber	9%	430				
Costo totale materiali compattati		46.71	2.35	1.10	2	2.20
Confezionamento, stesa, rullatura e quant'altro occorre per la posa in opera del conglomerato, compresi profitti d'impresa				1.22	2	2.44
<b>Prezzo Drenante AR già steso</b>				<b>€ 2.32</b>	<b>2</b>	<b>€ 4.63</b>

Una prima analisi di questo tipo, come anticipato, parte dal presupposto che il profitto dell'impresa costruttrice rimanga invariato nel passare da materiali convenzionali ai leganti AR, e quindi in questo caso il vantaggio economico che ne deriva è tutto a favore del committente. In realtà la considerevole riduzione dei costi consente di poter ridurre il risparmio derivante al committente dall'impiego di AR, a beneficio degli utili del costruttore. Il prezzo indicato nella tabella precedente è quasi del 35% inferiore rispetto al prezzo del conglomerato convenzionale e rappresenta il prezzo minimo affinché l'impresa costruttrice non abbia una diminuzione degli utili nel passaggio dai materiali convenzionali all'AR. Al decrescere di questa riduzione di prezzo, il vantaggio economico si sposta gradualmente dal committente verso il costruttore, come mostrato dal grafico di Figura 3.



**Figura 3: Distribuzione del vantaggio economico tra committente e costruttore al variare della riduzione di prezzo tra lo strato di usura in conglomerato AR ed uno tradizionale**

Allo stesso modo, all'aumentare del divario di prezzo tra il manto di usura in Asphalt Rubber rispetto al conglomerato tradizionale, ovvero al diminuire del prezzo unitario del primo (espresso in €/m<sup>2</sup>cm), si ha parallelamente una riduzione graduale degli utili d'impresa addizionali da parte dell'impresa costruttrice, come mostrato nel grafico di Figura 4.

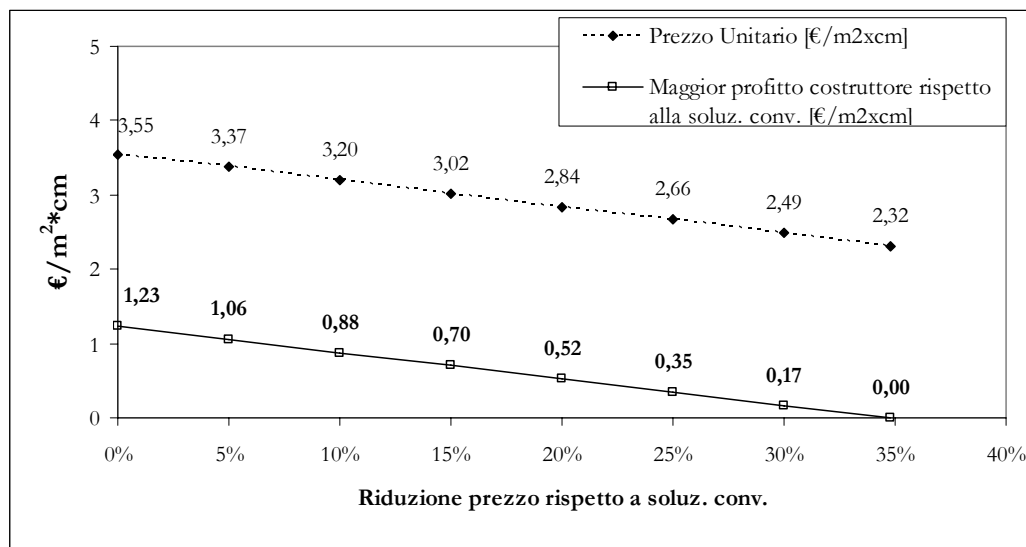


Figura 4: Andamento del prezzo unitario e dei profitti aggiuntivi in relazione al risparmio percentuale per il committente nella realizzazione dello strato di usura in AR

Anche per la realizzazione dello strato di collegamento, l'utilizzo di una soluzione con Asphalt Rubber consente, in ipotesi di invarianza dei profitti del costruttore, di ottenere un risparmio per il committente (vedi Tabelle 4 e 5) rispetto all'impiego di un bitume modificato con SBS.

Tabella 4: Analisi economica preliminare per il binder con legante modificato con SBS

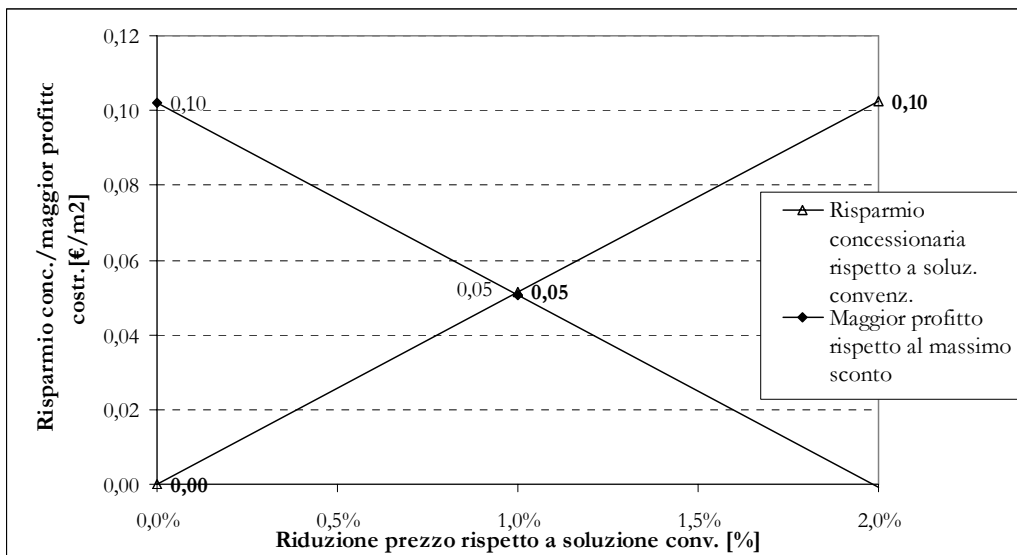
	Quantità	Prezzo Unitario	Peso specifico	Prezzo Unitario	Spessore	Prezzo
	[% parz.-tot.]	[€/Ton]	[Ton/m³]	[€/m²*cm]	[cm]	[€/m²]
Fornitura di Aggregato normale	100%	6				
Fornitura di Bitume normale	4.9%	330				
<i>Costo totale materiali compattati</i>		21.88	2.45	0.54	6	3.22
Confezionamento, stesa, rullatura e quant'altro occorre per la posa in opera del conglomerato, compresi profitti d'impresa				0.32	6	1.92
<b>Costo binder già steso</b>				<b>€ 0.86</b>	<b>6</b>	<b>€ 5.13</b>



**Tabella 5: Analisi economica preliminare per il binder con legante Asphalt Rubber**

	Quantità	Prezzo Unitario	Peso specifico	Prezzo Unitario	Spessore	Prezzo
	[% parz./tot.]	[€/Ton]	[Ton/m <sup>3</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> xcm]	[cm]	[€/m <sup>2</sup> ]
Fornitura di Aggregato normale	100%	6				
Fornitura di Bitume Asphalt Rubber	8.0%	430				
<i>Costo totale materiali compattati</i>		39.92	2.35	0.94	4	3.75
Confezionamento, stesa, rullatura e quant'altro occorre per la posa in opera del conglomerato, compresi profitti d'impresa				0.32	4	1.28
<b>Prezzo binder AR già steso</b>				<b>€ 1.26</b>	<b>4</b>	<b>€ 5.03</b>

Come visto per il tappeto di usura, è possibile impostare un'analisi analoga anche per il binder (vedi Figura 5 e Figura 6), per il quale l'impiego di legante AR consente di ottenere una riduzione del prezzo al m<sup>2</sup> sino al 2% rispetto all'impiego di un legante modificato con SBS.



**Figura 5: Distribuzione del vantaggio economico tra committente e costruttore al variare della riduzione di prezzo tra il binder in conglomerato AR ed uno tradizionale**

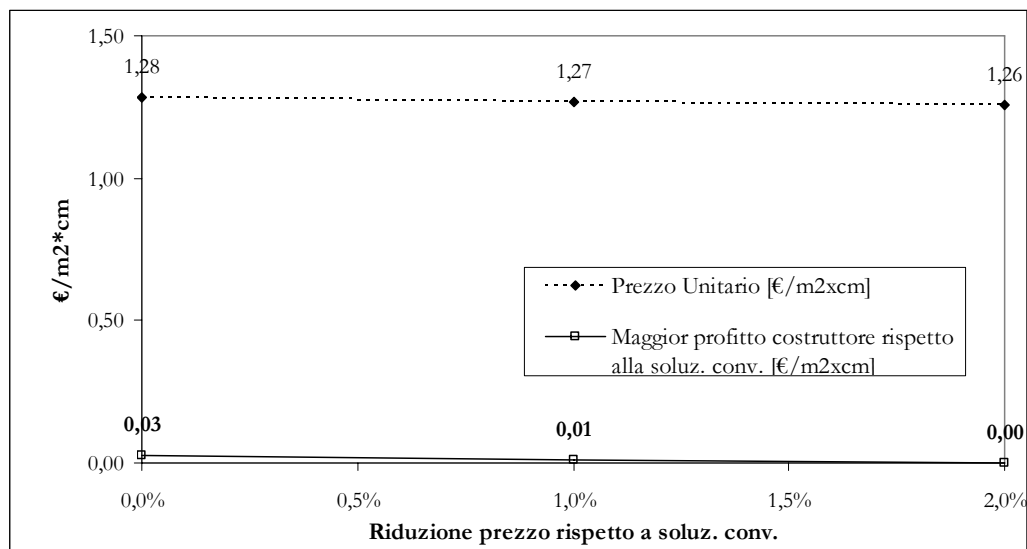


Figura 6: Andamento del prezzo unitario e dei profitti aggiuntivi in relazione al risparmio percentuale per il committente nella realizzazione del binder in AR

Infine, anche per la base bituminosa la scelta di uno strato in conglomerato Asphalt Rubber consente, a parità di prestazioni, di ottenere un notevole risparmio sui costi finali per unità di superficie, come mostrato nelle Tabella 6 e Tabella 7.

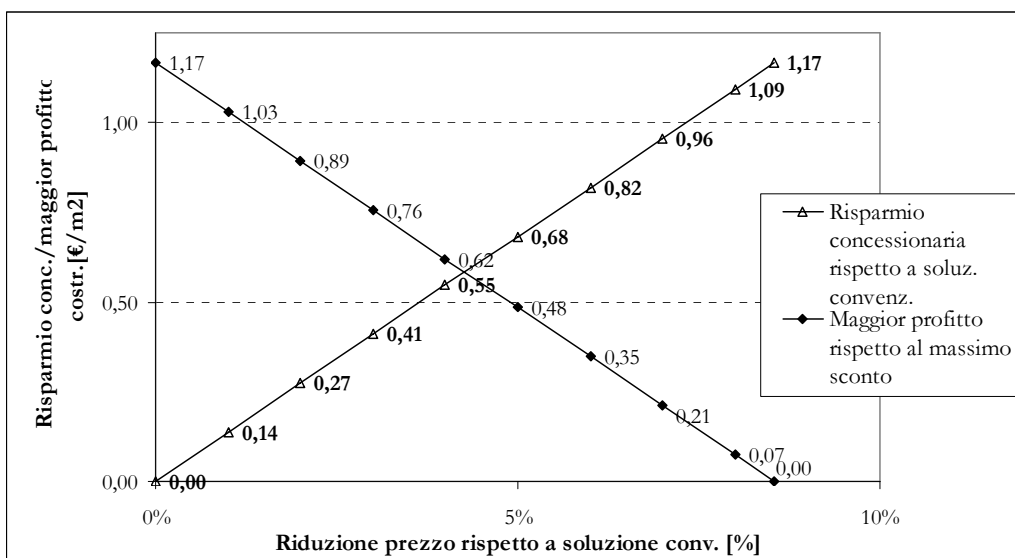
Tabella 6: Analisi economica preliminare per la base bituminosa con legante convenzionale

	Quantità	Prezzo Unitario	Peso specifico	Prezzo Unitario	Spessore	Prezzo
	[% parz.-tot.]	[€/Ton]	[Ton/m³]	[€/m²xcm]	[cm]	[€/m²]
Fornitura di Aggregato normale	100%	6				
Fornitura di Bitume normale	4.1%	230				
<i>Costo totale materiali compattati</i>		15.18	2.45	0.37	20	7.44
Confezionamento, stesa, rullatura e quant'altro occorre per la posa in opera del conglomerato, compresi profitti d'impresa				0.31	20	6.22
<b>Prezzo base già stesa</b>				<b>€ 0.68</b>	<b>20</b>	<b>€ 13.66</b>

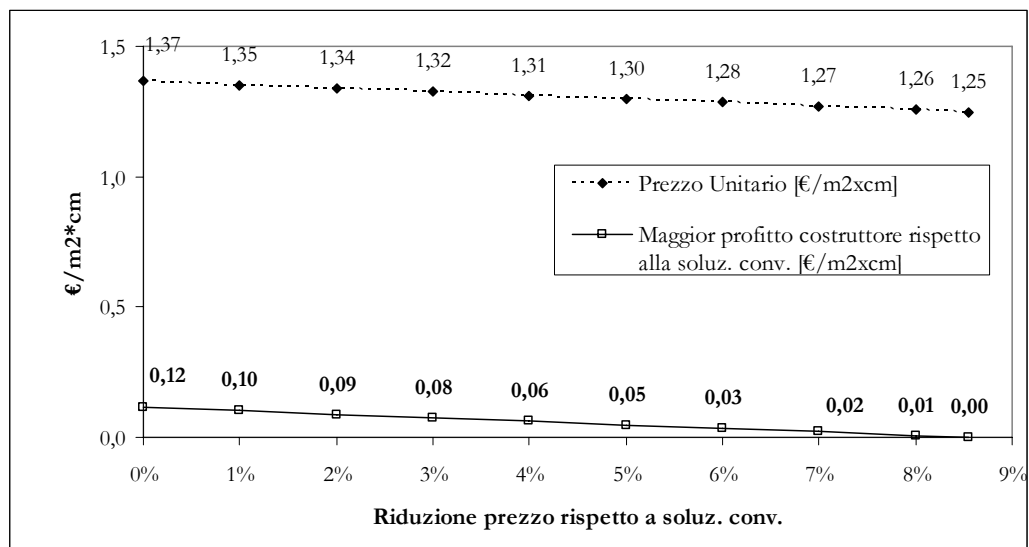
**Tabella 7: Analisi economica preliminare per la base bituminosa con legante Asphalt Rubber**

	Quantità	Prezzo Unitario	Peso specifico	Prezzo Unitario	Spessore	Prezzo
	[% parz.-tot.]	[€/Ton]	[Ton/m³]	[€/m²xcm]	[cm]	[€/m²]
Fornitura di Aggregato normale	100%	6				
Fornitura di Bitume Asphalt Rubber	8.0%	430				
<i>Costo totale materiali compattati</i>		39.92	2.35	0.94	10	9.38
Confezionamento, stesa, rullatura e quant'altro occorre per la posa in opera del conglomerato, compresi profitti d'impresa				0.31	10	3.11
<b>Prezzo base AR già stesa</b>				<b>€ 1.25</b>	<b>10</b>	<b>€ 12.49</b>

Scegliendo un legante AR anche nel caso della realizzazione della base bituminosa si riesce ad ottenere un risparmio pari a circa l'8.5%, consentendo una riduzione del 2/3 di spessore rispetto all'impiego di un legante convenzionale.



**Figura 7: Distribuzione del vantaggio economico tra committente e costruttore al variare della riduzione di prezzo tra la base in conglomerato AR ed uno tradizionale**



**Figura 8: Andamento del prezzo unitario e dei profitti aggiuntivi in relazione al risparmio percentuale per il committente nella realizzazione della base in AR**

Questa analisi tiene soltanto conto dell'investimento iniziale inerente ad una determinata soluzione. Di seguito si presenta il modello *Life Cycle Cost Analysis*, molto efficace per capire l'efficienza economica di una soluzione lungo il tempo. Con base in questo modello una alternativa apparentemente più costosa inizialmente può risultare quella economicamente più vantaggiosa nel tempo. L'analisi LCCA è molto interessante ma a causa della sua complessità non viene sempre utilizzata.

## 1.2 Metodo LCCA per l'Asphalt Rubber

L'analisi economica del tipo *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) è uno strumento utile nella valutazione di alternative di progetto per una pavimentazione. Già nel 1968 la AASHTO *Guide for the Design of Pavement Structures* ha raccomandato l'utilizzo della LCCA per valutare l'efficienza economica di diverse alternative. Nonostante questo, fino al *Designation Act* del 1995 del *National Highway System* (NHS), manuale che richiedeva specificamente agli enti stradale studi LCCA nei progetti NHS aventi un costo superiore o uguale a 25 milioni di dollari, soltanto poche agenzie lo facevano come routine. L'implementazione di questo manuale non ha definito un modello specifico LCCA, limitandosi a definire l'uso di buone pratiche.

---

La posizione della FHWA circa la LCCA è definita nella sua *Final Policy Statement*, rendiconto pubblicato nel 1996, nel quale la LCCA veniva considerata decisiva nella analisi e scelta di programmi di investimento.

Più specificamente, per i materiali Asphalt Rubber, la analisi del ciclo di vita economico LCCA è riconosciuta dagli enti pubblici come uno strumento efficace per guidare la selezione dell'alternativa più vantaggiosa nel progetto di nuove pavimentazioni o di riabilitazioni e trattamenti di manutenzione di pavimentazioni esistenti.

Non possiamo dimenticare che la scelta di utilizzare bitume Asphalt Rubber può non essere economicamente vantaggiosa nell'immediato, a meno che non comporti una riduzione degli spessori. È quindi importante valutare se la sua scelta aumenta la vita utile della pavimentazione.

Storicamente l'AR è stato utilizzato nelle pavimentazioni in peggiori condizioni. I risultati di diversi studi suggeriscono che tale materiale può essere utilizzato su tutte le pavimentazioni in tutte le condizioni di esercizio, ma che sono più economiche quando vanno a risolvere problemi di propagazione della fessurazione, o quando si deve ridurre il rumore.

L'Asphalt Rubber non è la soluzione migliore per tutte le applicazioni e soltanto tramite l'analisi LCCA si può determinare la sua efficienza economica. Pur non esistendo nessuna regola, per l'AR è pressoché accettato che questo deve dimostrarsi economicamente redditizio, ossia deve avere un coefficiente LCC più basso rispetto alle sue alternative.

L'analisi LCCA deve iniziare in concomitanza con l'inizio del progetto. Il dettaglio dell'analisi deve essere coerente con il livello dell'investimento, ossia, più importante è il progetto più dettagliata deve essere la LCCA.

Generalmente il metodo può essere riassunto nei seguenti passi:

*1. Sviluppo di strategie di riabilitazione e manutenzione per il periodo di analisi*

Il primo scopo di una LCCA è quantificare l'implicazione economica a lungo termine di decisioni prese nella fase di progetto della pavimentazione. Diverse strategie di riabilitazione e manutenzione possono essere impiegate durante il periodo di analisi. Questo primo passo consiste nell'identificare le strategie alternative per un determinato orizzonte di progetto, tipicamente 20 anni. Le alternative devono anche considerare gli interventi di manutenzione o riabilitazione durante la sua vita utile di progetto. Per ogni scenario considerato c'è una comparazione fra le diverse soluzioni che devono essere equivalenti strutturalmente.

---

### 2. Stima della vita utile e delle strategie di manutenzione e riabilitazione

Per ogni alternativa considerata deve essere determinata la vita utile considerando anche gli interventi di manutenzione. La tabella seguente rappresenta i valori medi di vita utile di una pavimentazione, calcolati con base in diverse applicazioni.

**Tabella 8: Vita utile tipica per diverse strategie di manutenzione e riabilitazione (dati riferiti alle sole strade a scorrimento veloce)**

Strategia		Vita attesa		
		Media X	Ridotta L	Elevata H
a) Arizona DOT				
Strato di base	Convenzionale	16	10	21
	Asphalt Rubber	18	10	23
Strato di usura	ACHM-FC	9	4.5	12
	ARHM-FC	14	8	20
b) California DOT				
Chip seals	Convenzionale	5	3	7
	Asphalt Rubber	7	3	12
Strato di base	100 mm ACHM-DG	10	3	12
	50 mm ARHM-GG	10	4	12
Strato di usura	ACHM-FC	10	5	12
	ARHM-FC	10	5	15
c) Texas DOT				
Chip seals	Convenzionale	7	3	10
	Asphalt Rubber	10	1	15
Strato di base	50 mm ACHM-DG	7.5	5	12
	50 mm ARHM-GG	12	5	15
Strato di usura	14 mm ACHM-FC	6.5	4	8.5
	14 mm ARHM-FC	12	10	15

### 3. Stima dei costi per la concessionaria

Il costo include tutti gli oneri diretti durante la vita della pavimentazione. Questi costi tipicamente includono il progetto, i contratti di amministrazione, la costruzione, tutte le manutenzioni (di routine e preventive), ed eventuali interventi di riabilitazione. Questi costi sono comparabili al valore di recupero che rappresenta il valore recuperato alla fine delle attività di riabilitazione.

Valore di recupero

$$SV = \left(1 - \frac{L_A}{L_E}\right) C$$

dove:

$L_e$  = Vita utile attesa dopo la riabilitazione

$L_a$  = Parte della vita utile consumata

$C$  = Costo della strategia di riabilitazione

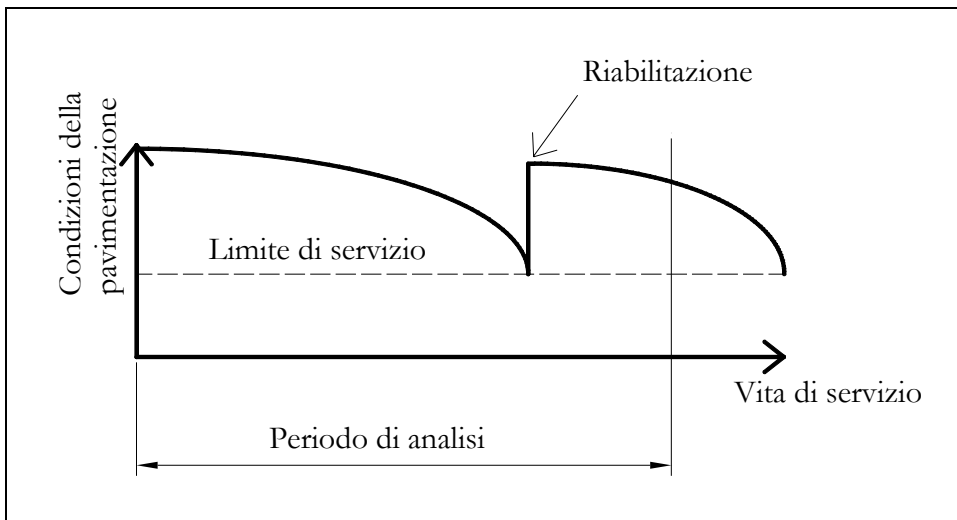


Figura 9: Periodo di analisi per una alternativa di progetto

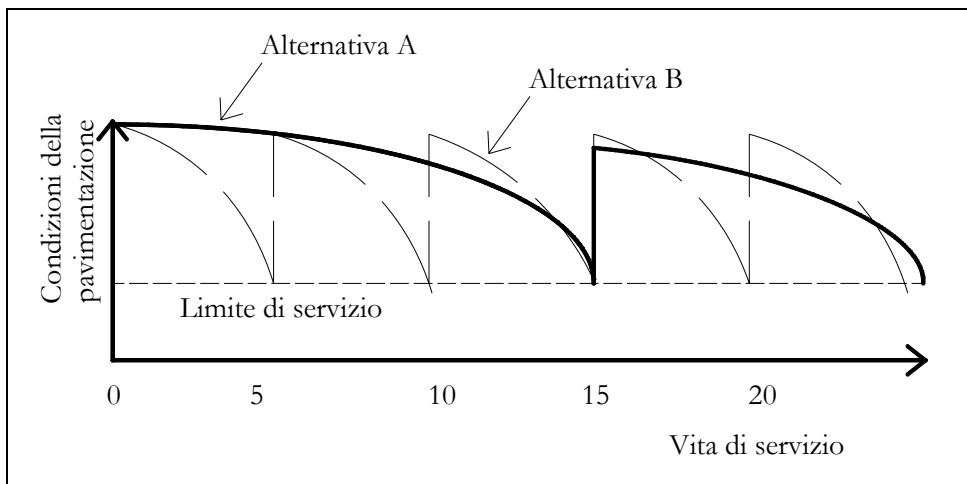


Figura 10: Curve di performance per due strategie di manutenzione o di riabilitazione

4. *Stima dei costi per utente e non utente*

I costi per l'utente includono i costi di operazione del veicolo (VOC), i costi di ritardo dell'utente stesso e i costi di incidente. Per la maggior parte delle pavimentazioni, i costi dell'operazione del veicolo sono considerati simili per tutte le alternative.

Nonostante ciò, sappiamo che ci sono piccole differenze nei tassi di VOC dipendenti da differenze nei valori di tessitura, IRI o di altre caratteristiche superficiali delle pavimentazioni. I costi di incidente possono anche variare col tipo di riabilitazione e strategia di manutenzione.

Per l'analisi dei costi di ritardo dell'utente si fa una distinzione fra il costo di ritardo di un'automobile per il trasporto di passeggeri, che va da 10 a 13 \$/veicolo·h, e il costo di ritardo di un camion, che va da 17 a 24 \$/ve·h.

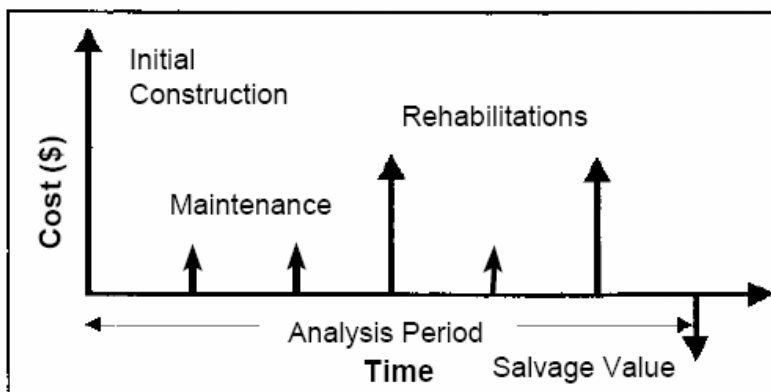
Dal momento che per il calcolo di questi costi abbiamo bisogno di informazioni specifiche, questi sono frequentemente segnalati da autori e generalmente viene utilizzato un modello semplice di applicazioni di un tasso di reddito per corsia, che varia in base al volume di traffico per corsia.

**Tabella 9: Esempio di tassi di reddito per corsia al variare dell'intensità del traffico**

Livello di Traffico	\$/miglia di corsia/giorno
Basso	1000
Moderato	5000
Intenso	10000

*5. Sviluppo della fluttuazione delle spese*

Lo sviluppo della fluttuazione delle spese consiste in rappresentazioni grafiche o tabellari delle spese lungo il tempo. Queste generalmente sono sviluppate per ogni pavimentazione.



**Figura 11: Esempio di analisi della fluttuazione**



### 6. Calcolo del coefficiente Net Present Value (NPV)

La LCCA è una forma di analisi per valutare l'efficienza economica di diverse opzioni di investimento. Una volta che tutti i costi sono stati stabiliti, i costi futuri devono essere ricondotti all'anno base e aggiunti al costo finale per determinare il NPV, che viene calcolato come:

$$NPV = CostoIniziale + \sum_{K=1}^n CostoFuturo_K \left[ \frac{1}{(1+i)^{n_K}} \right]$$

dove:

i= tasso di sconto, tipicamente tra il 3 e il 5%

n= anno della spesa, anno del dispendio

k= costi di manutenzione per ogni azione all'interno della strategia o costi dell'utente

Come si può vedere, sia i costi per l'ente che quelli per l'utente sono incorporati in questa analisi. I risultati possono essere presentati utilizzando un approccio deterministico o probabilistico.

### 7. Analisi dei risultati

Una volta completati, tutti i risultati della LCCA devono essere sottoposti ad analisi di sensitività per determinare l'influenza delle variabili di input. Molte volte l'analisi di sensitività fornisce più peso alle variabili con maggiore grado di incertezza, ad esempio la vita utile.

### 8. Scelta della strategia di progetto

Una volta che il NPV è stato calcolato per ogni alternativa, si devono rivalutare le strategie competitive. Le questioni che devono essere considerate sono:

- La vita di progetto e i costi di strategie di manutenzione e riabilitazione sono appropriate?
- Tutti i costi sono stati considerati?
- Ci sono altre alternative che devono essere considerate?

Finita l'analisi si individua l'alternativa economicamente più vantaggiosa.

Nella decisione interessa considerare vantaggi e svantaggi associati all'AR, sintetizzati nella Tabella 10.

**Tabella 10: Benefici e limiti dell'applicazione di Asphalt Rubber**

<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
Performance Superiore	Il bitume AR costa di più
Riduzione delle fessurazione	I conglomerati sono più difficili da riciclare
Maggiore Resistenza a Fatica	AR necessita di impianto specifico di produzione
Spessori inferiori	AR non è accettato universalmente
Tempi minori di costruzione	(se fosse universalmente accettato verrebbe meno il problema dei pneumatici fuori uso)
Alternativa alla ricostruzione	
Minor costo di manutenzione	
Diminuzione Rumore (equivalente all'85% di traffico in meno)	
Maggior Sicurezza	
Migliora Aderenza, Tessitura e IRI Ambientale (Pneumatici)	

---

# Appendice 4

## Condizioni Tecniche Speciali

### Bitume Modificato con Polverino di Gomma di Pneumatici Riciclata - Asphalt Rubber

Nella maggior parte dei casi, nonostante si impieghi un legante Asphalt Rubber, l'aggiudicatario è tenuto a presentare lo studio di formulazione dei conglomerati bituminosi in accordo con quanto previsto nel capitolato generale, dovendo specificare condizioni e procedure particolari per quando riguarda il legante stesso.

Tale studio di formulazione dovrà essere eseguito da un laboratorio indipendente, riconosciuto e approvato dalla direzione lavori. Dovranno anche essere forniti dall'aggiudicatario tutti i materiali necessari per la sua esecuzione.

Il laboratorio indipendente selezionato dall'aggiudicatario e approvato dalla direzione lavori deve possedere esperienza nella formulazione di conglomerati con bitume modificato con polverino di gomma proveniente da riciclaggio di pneumatici.

Lo studio di formulazione deve, inoltre, discriminare l'origine dell'aggregato minerale, l'origine del bitume base e della gomma frammentata (polverino di gomma CRM), il fornitore del legante bituminoso Asphalt Rubber, così come la natura e il tipo di filler.

Il legante bituminoso deve essere bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico recitata in accordo con i requisiti della normativa, che devono essere specificati in un articolo del capitolato tecnico speciale. Come è già stato spiegato nel capitolo 3, il successo di questa tecnologia dipende da un'adeguata formulazione e dal rispetto delle temperature e dei tempi di reazione nella fase di produzione.

Si è quindi considerato interessante includere un esempio di articolo da aggiungere ad un capitolato tecnico per il legante Asphalt Rubber.

A completamento dello studio sopra riferito, dovranno essere determinate tutte le caratteristiche precipue delle prestazioni del conglomerato bituminoso, tra le quali la resistenza alla deformazione permanente, la resistenza a fatica, il modulo di elasticità e la sensibilità all'acqua della miscela.

Le seguenti condizioni tecniche speciali sono state estratte dal capitolato elaborato dalla società Consulpav Lda di Lisbona, che possiede un'elevata esperienza nella progettazione e costruzione con Asphalt Rubber.

---

# Esempio di Articolo per capitolato di Condizioni tecniche Speciali per Asphalt Rubber

## 1.1 Descrizione

Il bitume modificato con gomma riciclata di pneumatici è ottenuto dalla modifica, in opera, di un bitume convenzionale aggiungendo gomma, con un determinato dosaggio e granulometria, e in condizioni di miscela e reazione controllate.

### 1.1.1 Bitume Base

Il bitume di base (da modificare) deve possedere un grado PG64-16 in accordo con la normativa ASHTTO TP1 potendo, orientativamente, corrispondere ad un bitume con una penetrazione nominale 35/50 o 50/70 e punto di rammollimento nell'ordine dei 50°C.

### 1.1.2 Polverino di Gomma

La gomma vulcanizzata deve essere gomma ottenuta dal riciclaggio di pneumatici, con un contenuto di gomma naturale elevato e in accordo con i seguenti requisiti:

1. La gomma deve essere gomma di pneumatico, 100% vulcanizzata
2. Deve essere esente da tessuto, metallo o da qualsiasi altro materiale contaminante
3. Dopo la triturazione, deve essere una polvere, non incollata, di materiale granulare con un peso specifico di  $1.15 \pm 0.05$  (ASTM D 797)
4. Non deve esserci una quantità di polvere minerale superiore al 4% del peso della gomma, così come carbonato di calcio o talco, utilizzato per impedire l'aderenza delle particelle
5. La gomma deve essere sufficientemente secca e non deve possedere un contenuto d'umidità superiore al 2 % in peso (AASHTO T255 a 60°C e campione di 50 grammi), per evitare la formazione di bollicine d'aria durante il processo di miscelazione.

La granulometria della gomma deve essere testata usando un campione di almeno  $50 \pm 1$  gr.

---

La granulometria della gomma deve rispettare i requisiti di granulometria indicati nella Tabella 1.

**Tabella 1: Requisiti di Granulometria per il Polverino di Gomma**

<b>Granulometria</b>	
<b>Apertura delle maglie del setaccio ASTM</b>	<b>% di Passante</b>
2 mm (n.° 10)	100
1,18 mm (n.° 16)	65 – 100
0,6 mm (n.° 30)	20 – 100
0,3 mm (n.° 50)	0 – 45
0,075 mm (n.° 200)	0 - 5

### 1.1.3 Produzione

Prima di iniziare la produzione del bitume modificato, l'aggiudicatario deve ottenere dal fornitore un certificato che identifichi appropriatamente il numero e la quantità del lotto, data, ora, nome e indirizzo del fornitore.

Il bitume base deve avere un contenuto di gomma di circa il  $20\% \pm 3\%$  rispetto al peso totale della miscela (bitume + gomma). Questa modifica dovrà essere eseguita con ricorso ad apparecchiatura specifica, da installare vicino alla centrale bituminosa, costruendo un by-pass al legante bituminoso originale fra la cisterna d'immagazzinamento e la miscelatrice della centrale bituminosa. Questa apparecchiatura, riscalda e miscela il bitume originale con la gomma, permettendo una reazione fisico-chimica fra i due materiali. Il contenuto esatto di gomma, la temperatura di miscela, così come il tempo minimo di riposo del bitume modificato con gomma, dovrà essere calcolato tramite la formulazione della miscela da un Laboratorio Indipendente.

Una volta calcolata la percentuale di gomma da utilizzare, non possono verificarsi scostamenti superiori all'1% rispetto a questo valore.

La temperatura del bitume originale deve essere tra 175 e 200° C, al momento dell'aggiunta del polverino.

Il bitume e il polverino di gomma devono essere uniti e miscelati per un periodo di tempo di circa 10 minuti in modo da permettere la reazione bitume-gomma nella miscelatrice.

---

Il bitume modificato deve rimanere immagazzinato durante un periodo di un'ora, prima di aggiungere l'aggregato e l'additivo minerale. La temperatura del bitume modificato deve essere sempre tra 160 e 190° C.

Il bitume modificato non deve essere sottoposto ad una temperatura superiore a 175° C durante 10 ore.

In nessun caso si deve fluidificare o flussare il legante bituminoso. Qualunque legante bituminoso soggetto a questi trattamenti deve essere rifiutato. Così, tutto il cherosene o altri solventi utilizzati per la pulizia dell'apparecchiatura, devono essere estratti dal sistema di produzione prima di un qualunque uso successivo.

Alla fine di ogni produzione, l'aggiudicatario deve consegnare al Direttore dei Lavori la seguente documentazione riguardante la produzione dell'Asphalt Rubber:

1. Quantità, grado di penetrazione e temperatura del bitume base, prima dell'aggiunta del polverino di gomma.
2. Quantità di polverino di gomma aggiunto.
3. Viscosità del bitume modificato con il polverino di gomma, immediatamente prima della miscelazione con l'aggregato minerale o con l'additivo minerale.

## 1.2 Controllo di Qualità

Per il controllo di qualità del legante devono essere eseguite prove sul bitume di base in accordo con quanto specificato nel capitolato della concessionaria cliente e con la frequenza indicata nello stesso.

Devono essere eseguite prove di granulometria e densità specifica sulla gomma vulcanizzata con una frequenza tale che permetta di confermare i valori indicati dal fornitore del polverino di gomma.

Il bitume modificato con il polverino di gomma deve essere in accordo con quanto stabilito dalla normativa ASTM D 6114 (*Standard Specification for Asphalt Rubber Binder*), indicati nella Tabella 2.

---

**Tabella 2: Requisiti per l'Asphalt Rubber – Prodotto finale**

<b>Prove</b>	<b>Requisiti</b>
Viscosità @175°C	1500 – 4000 cP
Penetrazione @25°C, minima	20 dmm
Resilienza @25°C, minima	0.15
Punto di rammollimento, minimo	60° C
Duttilità del bitume@25°C, minima	15 cm

Il laboratorio indipendente, responsabile per il controllo della qualità, deve prelevare tutti i giorni un campione di bitume modificato di 4 litri, dalla tubazione che collega il serbatoio di stoccaggio e l'unità di produzione del conglomerato bituminoso. Tale campione deve essere valutato in giornata e rispettare i requisiti sopra nominati.

Il laboratorio indipendente, responsabile per il controllo della qualità, deve mantenere nell'area di produzione l'apparecchiatura necessaria a misurare la viscosità durante la fase di produzione dell'Asphalt Rubber. La viscosità deve essere mantenuta fra i 1500 e i 4000 cP a 175° C e deve essere verificata e registrata per ogni 20 tonnellate di bitume modificato prodotto.

Per il bitume modificato con il polverino di gomma deve essere rispettata la seguente frequenza di prove, riportata nella Tabella 3.

**Tabella 3: Frequenza delle prove**

<b>Prove</b>	<b>Frequenza</b>
Viscosità @175°C	1 prova per ogni ora di lavoro
Penetrazione @25°C	1 per studio di formulazione
Resilienza @25°C	1 per studio di formulazione
Punto di rammollimento	1 per studio di formulazione
Duttilità del bitume@25°C	1 per studio di formulazione

L'aggiudicatario deve fornire al Direttore dei Lavori una copia del certificato del fornitore. Il bitume modificato che è prodotto tramite processo continuo deve essere certificato dal lotto. Un lotto deve consistere nella produzione di un giorno.

Il laboratorio indipendente, responsabile per il controllo della qualità, deve ottenere dal fornitore del bitume Asphalt Rubber informazioni complete riguardo le limitazioni di produzione, la stabilità allo stoccaggio e la lavorabilità del materiale, che deve fornire al Direttore dei Lavori.



---

---

