

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA

XXVII CICLO

RICERCA TEORICA ED APPLICAZIONE DI CORRENTI  
ELETTRICHE CONTINUE A BASSO POTENZIALE NEI TERRENI  
COESIVI PER LA STABILIZZAZIONE DI MOVIMENTI  
GRAVITATIVI

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. FULVIO CELICO

Tutor:

Chiar.mo Prof. ANDREA SEGALINI

Dottorando: PASQUALE ARMILLOTTA



Questi tre anni di dottorato riassumono una serie di significati scientifici, tecnici, professionali, umani, familiari, personali, sociali, ed anche spirituali.

La curiosità, la voglia di conoscere, di sperimentare, di applicare, di innovare e di condividere con gli altri. Ecco la molla che mi ha spinto ad andare oltre.

L'esperienza maturata in questi tre anni è stata notevole, anche dal punto di vista delle persone, delle relazioni, delle realtà territoriali e delle riflessioni personali.

Dedico questo lavoro a tutti coloro che mi sono stati a fianco, a tutti coloro che mi hanno aiutato, a tutti coloro che mi hanno supportato, a tutti coloro che mi hanno insegnato, a tutti coloro che mi hanno accettato, a tutti coloro che hanno creduto in questo percorso di ricerca. È opportuno ricordare anche coloro che non si ritrovano nelle precedenti categorie: è forse grazie anche a loro se il mio percorso di ricerca è giunto a questo punto.

Come non dedicare questo lavoro a chi ha vissuto carnalmente con me questo percorso: mia moglie Sabrina, i miei figli Rachele e Pietro Pio, i miei genitori, i miei splendidi suoceri, i miei fratelli, i miei amici, Livia, Don Giancarlo.

A Te, Sommo Bene, ritorna il dono che mi hai fatto. A Te dono il tuo regalo. Non desisto dal percorrere il cammino che mi hai preparato.

## RINGRAZIAMENTI

Grazie, grazie, grazie!

Cosa avrei fatto senza di voi? Non basterà sicuramente una cena o una menzione in una tesi di dottorato. Il mio GRAZIE verso di voi è quotidiano ed umano; non finisce con la conclusione di questo percorso.

Sto pensando a chi mi ha accolto in ambito accademico, al mio tutor il prof. ing. Andrea Segalini, al nostro coordinatore prof. geol. Fulvio Celico, ai ricercatori, ai professori del Plesso Geologico del Dipartimento, alla prof.ssa ing. Cristina Jommi del Politecnico di Milano, al prof. ing. Guido Musso del Politecnico di Torino. Un pensiero particolare ai Ph.D. Fabrizio Balsamo, Yago Nestola, Stefano Segadelli, alla dottoranda ing. Benedetta Pastarini ed alla Ph.D. ing. Gessica Umili, al personale AIPo.

Ringrazio l'AIPo per la disponibilità dei locali, per il prelievo del terreno, per avermi accolto ogni giorno negli ultimi due anni e mezzo. Ringrazio il responsabile del Laboratorio AIPo di Boretto, il dr. geol. Alessadro Rosso; il dr. geol. Stefano Parodi per l'aiuto ed i preziosi consigli tecnici; il collaboratore Giuseppe Capuano senza il quale, gran parte del lavoro non sarebbe stato possibile per il mio non perfetto stato di salute.

Ringrazio la ditta Speroni di Castelnuovo Sotto (RE) per il materiale donatomi, e la ditta Loffredo di Bibbiano (RE) per il materiale messo a mia disposizione.

Grazie, cara ed amata moglie, per la pazienza, la tolleranza, il conforto, l'aiuto. Scusatemi, figli miei, genitori, fratelli e suoceri, amici, Livia, Don Giancarlo e le care comunità se non vi ho dedicato il tempo giustamente reclamato.

Ma Grazie soprattutto a Te. Ti sei servito di questo cammino per plasmarmi. L'opera delle tue mani è pregevole ai tuoi occhi.

## INDICE

1. PREMESSA .....	1
2. OBIETTIVO .....	8
3. IL BACINO TERZIARIO PIEMONTESE (BTP).....	8
3.1 Inquadramento geologico – strutturale.....	9
3.2 Litologie della successione oligo – miocenica delle Langhe .....	9
3.3 Geomorfologia.....	10
3.3.1 Il territorio delle Langhe .....	10
3.3.2 Caratteristiche idrogeologiche .....	11
3.3.3 Caratteristiche degli scivolamenti planari delle Langhe .....	12
3.3.4 L’evento alluvionale del novembre 1994 (dati di letteratura).....	15
4. ARGILLE E MINERALOGIA (cenni).....	15
5. LA SPERIMENTAZIONE.....	18
5.1 Il terreno su cui è stata effettuata la ricerca.....	18
5.2 Procedura sperimentale in laboratorio .....	23
5.2.1 Procedura sperimentale in laboratorio – Risultati della Fase 1.....	23
5.2.2 Procedura sperimentale in laboratorio – Risultati della Fase 2.....	34
5.2.3 Analisi dei risultati laboratoriali .....	42
5.2.4 Sintesi dei risultati della sperimentazione in laboratorio .....	65
5.2.5 Osservazioni sui risultati.....	66
5.2.6 Conclusioni.....	67
5.3 Procedura sperimentale su modello fisico.....	68
5.3.1 Realizzazione del modello fisico.....	69
5.3.2 I collassi.....	70
5.3.3 Risultati.....	72
5.3.4 Analisi dei risultati.....	77

5.3.5	Sintesi dei risultati della procedura sperimentale su modello .....	78
5.3.6	Osservazioni sui risultati .....	79
5.3.7	Conclusioni sulla procedura sperimentale su modello fisico .....	79
6.	CONCLUSIONI DEL PERCORSO DI RICERCA .....	80
7.	PROSPETTIVE .....	81
8.	BIBLIOGRAFIA .....	82
9.	APPENDICE .....	85
9.1	Dettagli della prova di Optimum Proctor “E” – paragrafo 5.2.1.7 .....	85
9.2	Inviluppi di rottura dei terreni – Fase 1 – paragrafo 5.2.1.8 .....	87
9.3	Dettaglio dei campioni trattati nella Fase 2 .....	89
9.3.1	Campione EO–15g–15V–15cm–prova–iniziale .....	89
9.3.2	Campione EO–15g–15V–15cm .....	91
9.3.3	Campione EO–15g–3V–15cm .....	94
9.3.4	Campione EO–30g–27V–27cm .....	97
9.3.5	Campione EO–30g –5V–27cm .....	101
9.3.6	Campione EO–60g–5V–27cm .....	105
9.3.7	Campione EO–60g–3V–15cm–rainwater1 .....	109
9.3.8	Campione EO–60g–3V–15cm–rainwater2 .....	116
9.4	Operazioni preliminari alla realizzazione del modello fisico.....	119
9.4.1	Verifica della conducibilità elettrica su campioni di terreno insaturo con diverso grado di costipazione .....	119
9.4.2	Risultati del campione EO–60g–3V–15cm–B–promodello .....	120
9.4.3	Realizzazione dell’impianto .....	122
9.4.4	Prove di costipazione del terreno utilizzato per il modello fisico .....	126
9.5	Comparazione di due sequenze fotografiche relative ai collassi del Modello fisico NT6, e del Modello fisico T2.....	128
10.	ALLEGATI – Analisi dell’acqua usata nella procedura sperimentale in laboratorio ...	138



## 1. PREMESSA

Nelle Langhe piemontesi sono stati registrati anche negli ultimi decenni centinaia di fenomeni gravitativi classificati come rock slip e soil slip.

La rilevante instabilità meteorologica dell'autunno 1994 e dei successivi mesi ha attivato e riattivato numerosi fenomeni di instabilità geomorfologica che hanno avuto notevoli ripercussioni sul territorio dal punto di vista sociale ed economico.

Le back – analisys dei movimenti gravitativi traslativi evidenziano incongruenze tra le forze agenti e quelle resistenti pre e post precipitazioni [Chiappone, 1999, par. 4.4] lungo le superfici di scivolamento poco inclinate ( $8^{\circ}$ –  $15^{\circ}$ ) [Regione Piemonte, 2006].

Dagli studi condotti, è emerso che la superficie di scivolamento ha uno spessore di pochi millimetri, che rispetto ai volumi di roccia o di terreno limitrofi a tale superficie è presente un basso contenuto di carbonati (Grafico 1) [Simeoni, 1998], e che è avvenuta [Veniale, 2000]

- la trasformazione dei minerali illitici in minerali smectitici in percentuale rilevante (Grafico 2);
- il loro isoorientamento;
- l'ossidazione della pirite con la formazione di jarosite;
- la solfatazione dei carbonati con formazione di gesso;
- la formazione di cristalli micritici di carbonati.

Queste evidenze sono state messe in relazione con l'infiltrazione, percolazione, circolazione e ristagno di acqua proveniente dalle precipitazioni [Veniale, 2000].

Le coperture superficiali infatti si presentano non raramente fratturate e discontinue; la circolazione e il ristagno avvengono su superfici preferenziali di discontinuità (piano di strato, giunto, contatto tettonico, diaclasi, superficie di sedimentazione, ecc.) [Regione Piemonte, 2006].

Le rilevazioni poc'anzi elencate

- forniscono una valida causa predisponente all'innesco, in presenza di acqua, di fenomeni gravitativi traslativi tipici di questo territorio;



- inducono la variazione di volume dei minerali non solo argillosi e la variabilità dei valori delle caratteristiche meccaniche dei terreni in cui detti minerali sono contenuti, in funzione dei cicli di idratazione – essiccamento.

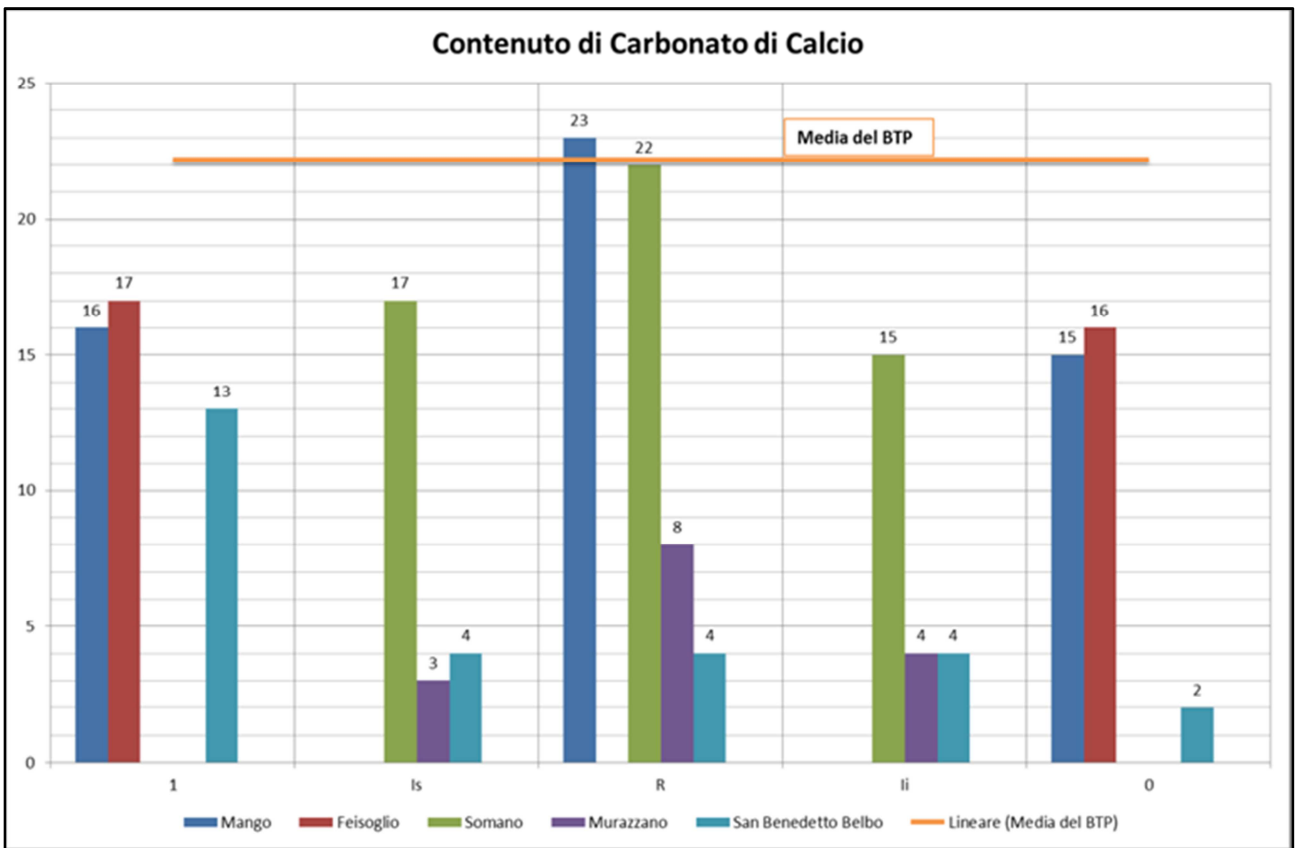


Grafico 1. Confronto tra le percentuali di carbonati presenti nell'intorno della superficie di scivolamento (vedi Figura 1) e la media del BTP [Riboli, 2014. Dati da Simeoni, 1998].

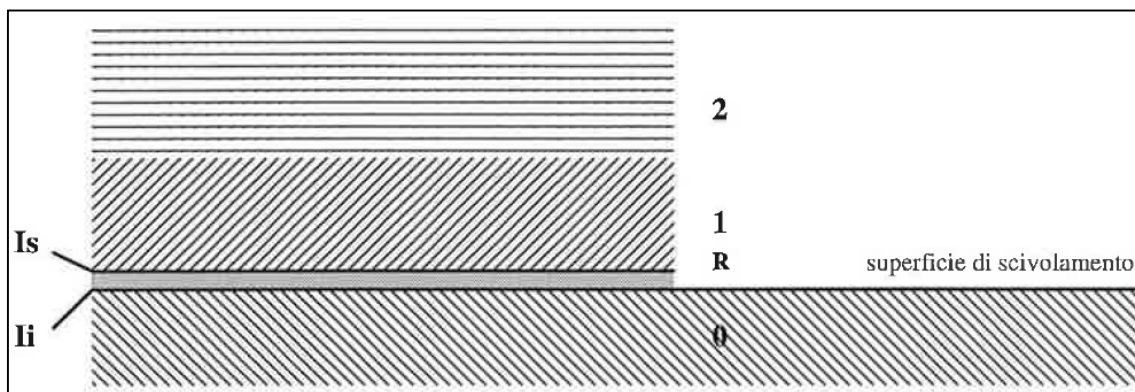
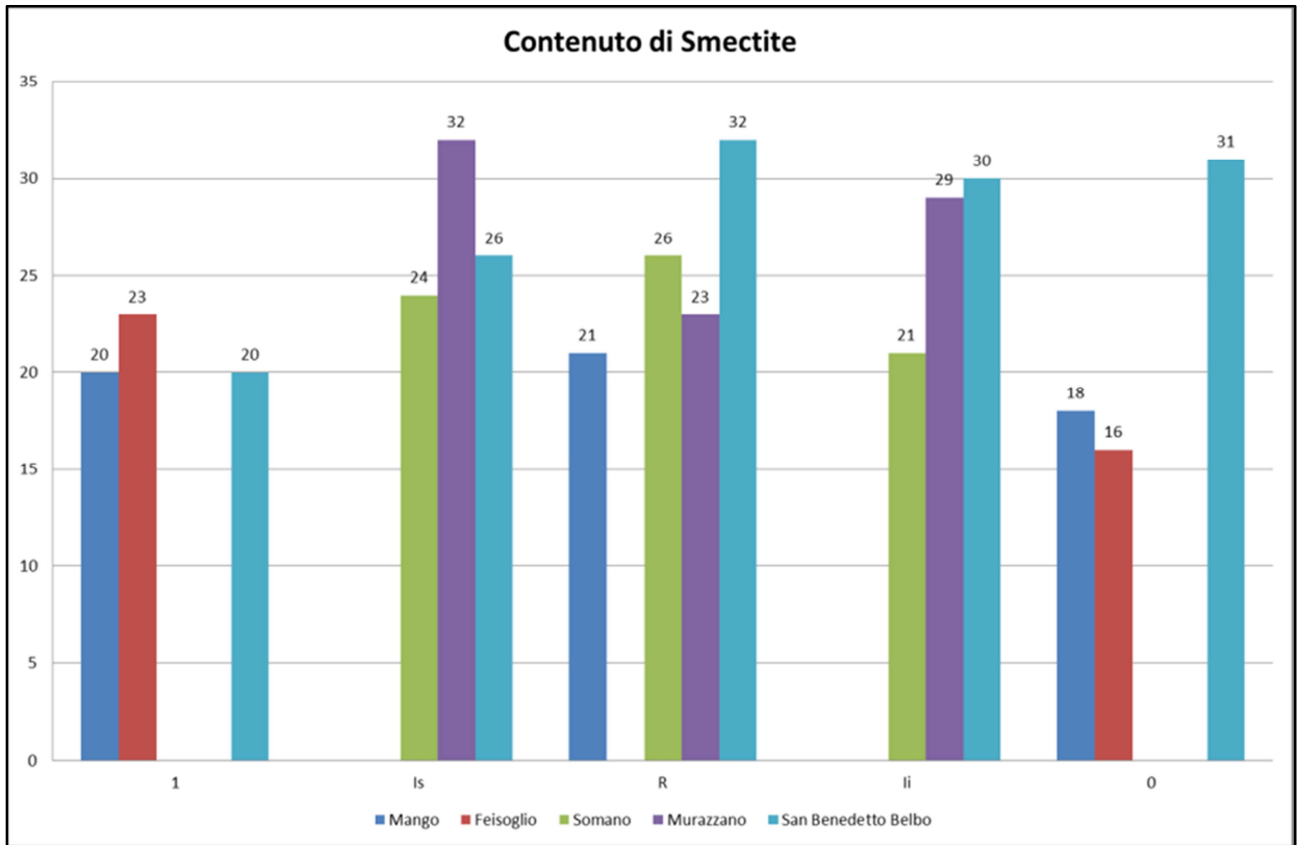


Figura 1. Schema di classificazione degli strati nell'intorno della superficie di scivolamento [Simeoni, 1998].

La schematizzazione dell'intorno della superficie di scivolamento (Figura1) reperita in letteratura è la seguente [Simeoni, 1998]:

- **2:** roccia inalterata;
- **1:** roccia sovrastante il piano di scivolamento;

- **I<sub>S</sub>**: roccia dell'interfaccia superiore del giunto;
- **R**: parte destrutturata della roccia, superficie di scivolamento;
- **I<sub>I</sub>**: roccia dell'interfaccia inferiore del giunto;
- **O**: roccia sottostante il piano di scivolamento.



**Grafico 2. Confronto tra le percentuali di smectiti presenti nell'intorno della superficie di scivolamento [Riboli, 2014. Dati da Simeoni, 1998].**

La pressione di rigonfiamento misurata su 9 campioni prelevati in adiacenza alla superficie di scivolamento varia tra i 419 kPa ed i 2.893 kPa [Chiappone, 1999].

L'ipotesi della decalcificazione ed arricchimento relativo smectitico lungo le superfici di discontinuità e di scivolamento, giustificherebbe gli alti valori di resistenza al taglio in condizioni anidre, ed i bassissimi valori di resistenza al taglio in presenza di acqua.

La variazione di volume dei minerali smectici, a parità di condizioni, è funzione del fluido di permeazione, del suo pH, della sua costante dielettrica, dei cationi disciolti e delle loro percentuali, ecc.

È noto in letteratura scientifica che la compressibilità delle argille diminuisce all'aumentare della concentrazione degli elettroliti, e che le smectiti saturate in acqua distillata con K<sup>+</sup> e Ca<sup>+2</sup> (raggio ionico molto simile) riducono la loro attività e la propensione

alla sostituzione cationica, ed incrementano i valori di resistenza al taglio, sia di picco che residua [Simeoni, 1998].

La presenza di cristalli micritici di  $\text{CaCO}_3$  nel terreno prelevato lungo la superficie di scivolamento è stata attribuita alla sua precipitazione dalla soluzione. La presenza di precipitato di  $\text{CaCO}_3$  aumenta i valori di resistenza meccanica dei terreni [Veniale, 2000].

Applicando correnti elettriche continue ad un terreno coesivo saturo, si generano diversi fenomeni (Figura 2): l'elettrosmosi, l'elettrocinesi (elettromigrazione), i fenomeni di dissoluzione e precipitazione, l'elettroforesi, l'idrolisi.

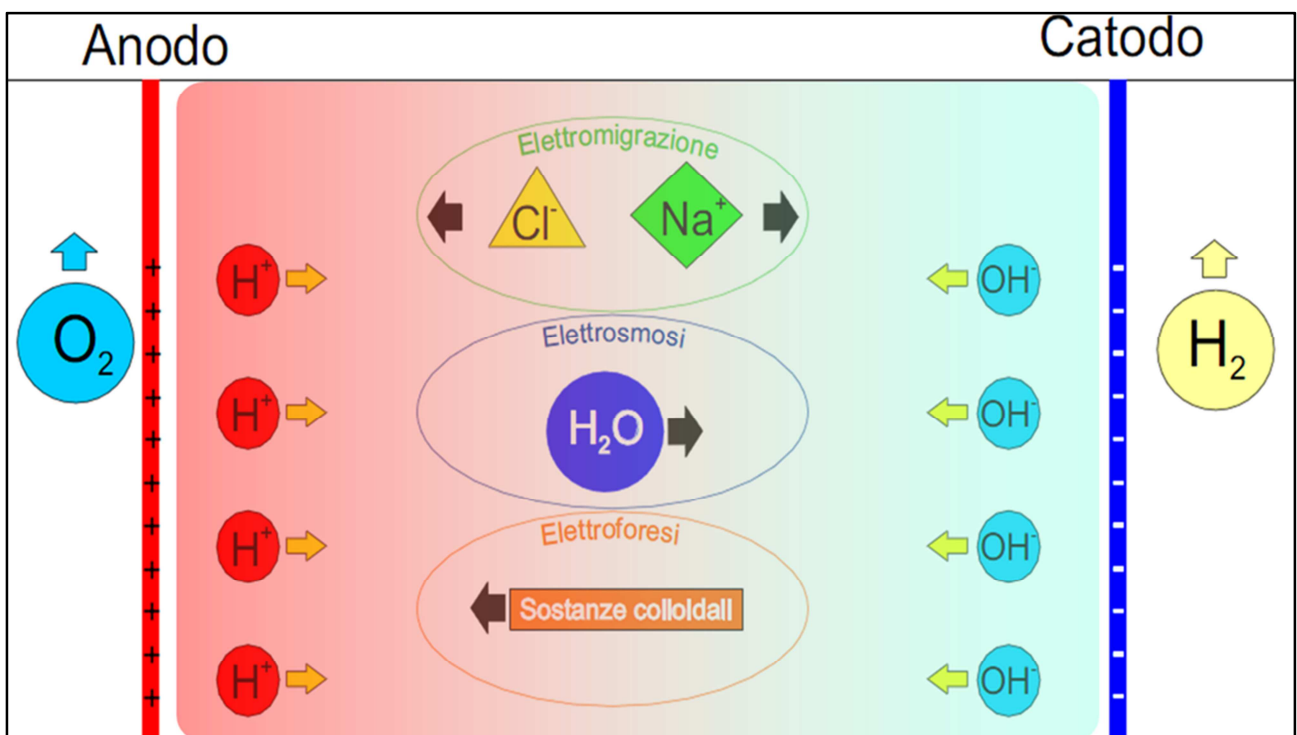


Figura 2. Fenomeni generati dall'applicazione di correnti continue ad un terreno coesivo saturo.

L'elettrosmosi consiste nello spostamento del fluido di permeazione verso una delle due polarità. Ampia è in letteratura la disponibilità di modelli matematici previsionali del comportamento del processo elettrosmotico. In questa sede è opportuno rilevare la diretta proporzionalità tra la velocità e la portata del flusso idrico, la differenza di potenziale elettrico e dello  $\zeta$  potenziale dei minerali argillosi presenti nel terreno coesivo. Lo  $\zeta$  potenziale è un indicatore dello spessore dello strato di Gouy (doppio strato elettrico), variabile in funzione del pH. Il parametro " $\zeta$ " è anche funzione della concentrazione degli elettroliti. Nel caso in cui la concentrazione sia molto elevata, " $\zeta$ " diventa molto piccolo ed il flusso idrico si annulla.

Se  $\zeta < 1$  (eccesso di carica negativa sul minerale argilloso, ambiente alcalino), il flusso idrico è diretto verso il catodo; se  $\zeta > 1$  (eccesso di carica positiva sul minerale argilloso, ambiente acido), il flusso idrico è diretto verso l'anodo; se  $\zeta = 0$ , il flusso idrico si arresta. Di norma,  $\zeta < 1$ .

Affinché il processo elettrosmotico possa verificarsi, è necessario superare una soglia di attivazione che per il terreno analizzato è stato individuato in  $\Delta V = 1,44 \text{ V}$  [Gabrieli et al., 2008].

L'elettrocinesi (elettromigrazione) consiste nello spostamento degli ioni verso la polarità opposta per mezzo della soluzione salina.

Tra gli ioni spostati verso le polarità opposte ci sono lo ione idrogeno ( $\text{H}^+$ ) e l'ossidrilico ( $\text{OH}^-$ ), ovvero si assiste rispettivamente alla migrazione del fronte acido e di quello basico verso la polarità opposta.

Il fronte che si sposta più rapidamente è quello acido, per cui, il volume di terreno ove i due fronti si compensano è, in generale, più vicino al catodo. Si assiste ad un'ampia variabilità di pH nel terreno dall'anodo (pH anche molto acido) al catodo (pH anche molto alcalino) [Cigagna, 2006].

Ciò comporta fenomeni di dissoluzione e di precipitazione di specie mineralogiche in funzione del pH stesso. Trova così spiegazione la comparsa di crepe e fessure nella zona anodica dei campioni in laboratorio durante il trattamento a causa della formazione di  $\text{CO}_2$  dovuta alla dissoluzione di  $\text{CaCO}_3$  [Airoldi, 2009].

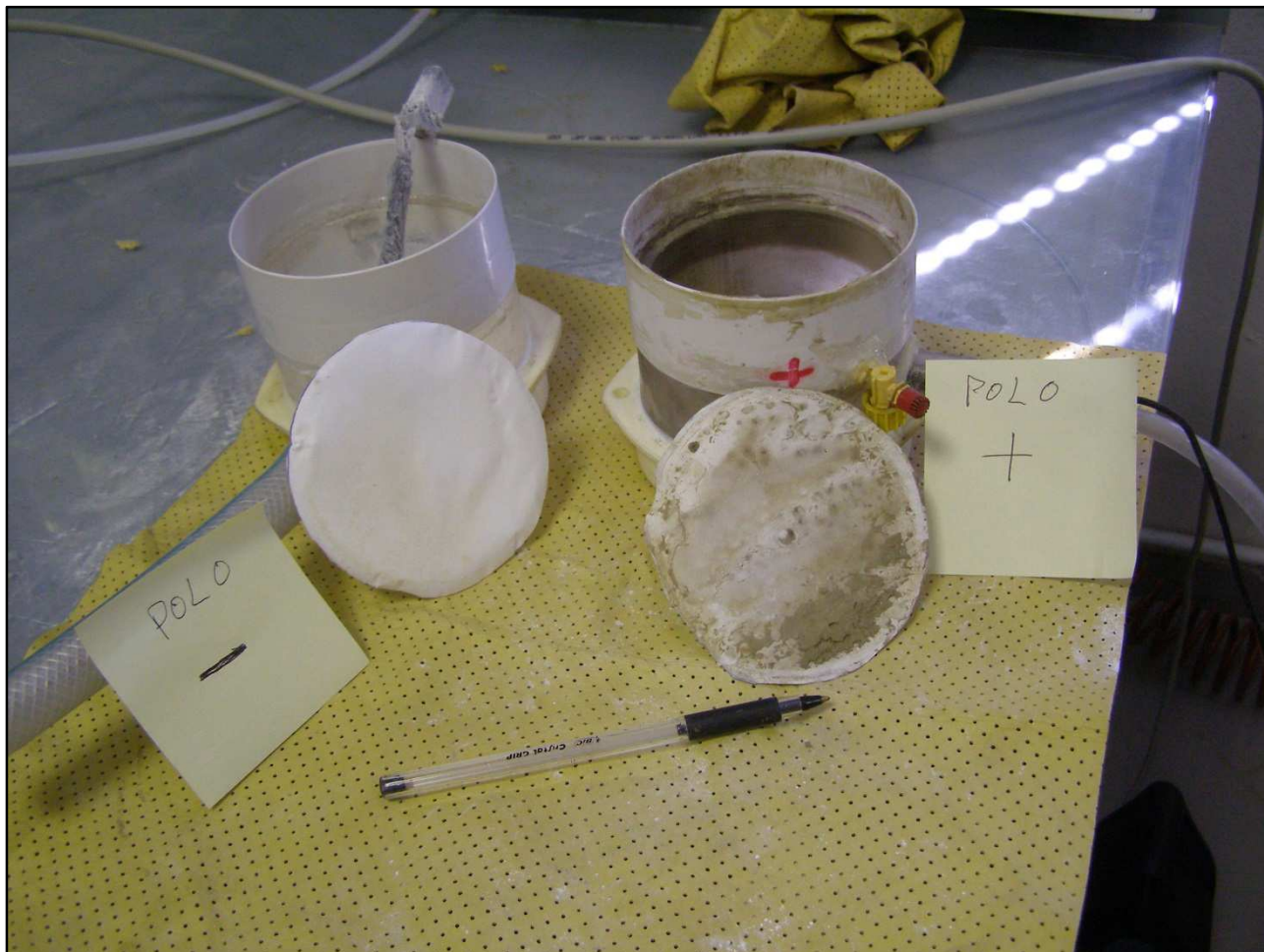
È possibile utilizzare l'elettrocinesi per diffondere nel terreno ioni come il  $\text{Ca}^{+2}$  per stabilizzare le smectiti e quindi migliorarne le caratteristiche tecniche [Asavadorndeja e Glawe, 2005].

L'aggiunta all'anodo di soluzioni di calcio ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaOH}_2$ , acqua della rete domestica con durezza molto elevata), grazie alla loro funzione tampone, aumenta il volume alcalinizzato fino all'80% del totale, e favorisce la precipitazione di agenti cementificanti [Chang-Yu et al., 2009; Asavadorndeja e Glawe, 2005].

È stato notato che il processo elettrocinetico e quelli ad esso correlati sono reversibili e poco significativi per brevi periodi di trattamento (poche ore), mentre si rilevano risultati significativi per periodi di trattamento superiori ai 15 giorni [Gabrieli et al., 2008].

L'elettroforesi consiste nello spostamento della fase colloidale argillosa verso la polarità positiva (Foto 1). La fase colloidale, essendo formata da sospensione non

agglomerata di minerali argillosi, smectiti in gran parte, ha un deficit di carica positiva strutturale permanente che le porta a migrare verso l'anodo.



**Foto 1. Carte da filtro al termine del trattamento con campi elettrici a basso potenziale su campioni di terreno coesivo saturo. Quella anodica, a differenza di quella catodica, evidenzia il risultato del processo elettroforetico. Sulla carta da filtro catodica e sull'elettrodo catodico è presente il precipitato carbonatico.**

Inoltre, applicando una differenza di potenziale si induce, anche in un campione di terreno coesivo saturo, l'idrolisi con sviluppo di ossigeno molecolare all'anodo e di idrogeno molecolare al catodo.

Gli studi e le applicazioni con alte densità di campo (1 V/cm) interessano l'infissione di pali metallici entro terreni coesivi, l'induzione della consolidazione nei terreni coesivi, la riduzione dell'inquinante polare nei fanghi di lavorazione, la bonifica di terreni coesivi inquinati con metalli pesanti.

In passato, le correnti continue sono state utilizzate per la stabilizzazione dei movimenti gravitativi, ma con densità di campo dell'ordine di 100 V / metro [Veniale, 1978]. Questa tecnologia è stata sempre meno impiegata a causa del degrado dei materiali

utilizzati nell'impiantistica, dell'alto costo di realizzazione e gestione degli impianti per ottenere risultati apprezzabili, della conoscenza non approfondita dei fenomeni che si innescano, e degli effetti collaterali all'applicazione con alte tensioni come il riscaldamento del terreno e riduzione della frazione colloidale a favore della sua agglomerazione e quindi aumento della permeabilità [Mancini, 1971].

Grazie anche ai nuovi materiali, l'utilizzo delle correnti elettriche con alta densità di campo ha ripreso nuovo slancio, in particolare per la consolidazione (dewatering) di terreni argillosi saturi e quindi per l'incremento dei valori delle caratteristiche geotecniche (resistenza al taglio e modulo edometrico), ma non per la stabilizzazione di movimenti gravitativi. In letteratura scientifica, però, è presente un lavoro sperimentale recente su modello fisico in piccola scala di terreno coesivo saturo [Zhuang et al., 2008], e l'auspicio di applicare l'elettrosmosi per la stabilizzazione di movimenti franosi in terreni argillosi ricchi d'acqua [Wang et al., 2012].

Sono emerse inoltre differenti rilevazioni su campioni di terreno coesivo saturo sottoposti ad alte densità di campo elettrico rispetto quelli sottoposti a basse differenze di potenziale [O'Bannon, 1977].

Le applicazioni con bassa densità di campo sono correntemente utilizzate anche per la reidratazione e stabilizzazione di terreni coesivi insaturi che manifestano il fenomeno ciclico del rigonfiamento / collasso al variare dei cicli stagionali [Armillotta, 2000; Armillotta, 2002]. In tale applicazione, non sono stati rilevati gli effetti collaterali negativi registrati nelle applicazioni con alte densità di campo.

Quanto esposto pone quindi l'interrogativo sulla possibilità che l'utilizzo delle correnti elettriche continue a basso potenziale possa dare delle risposte sull'aumento dei valori di resistenza al taglio dei terreni coesivi sia saturi, che insaturi.

## 2. OBIETTIVO

Da quanto riportato, è stato formulato l'obiettivo di questa ricerca: l'applicazione di correnti elettriche continue a bassa densità di campo (0,1 – 0,2 V/cm) ad un terreno coesivo per indurre

- la riduzione dell'attività delle smectiti con l'elettrocinesi;
- la riduzione del contenuto in acqua in un terreno coesivo saturo con l'elettrosmosi;
- la precipitazione di carbonati nel volume di terreno in cui è stato indotto un ambiente alcalino.

Il raggiungimento di questi tre obiettivi potrebbe portare all'aumento dei valori della resistenza al taglio dei terreni coesivi trattati ed alla riduzione del loro potenziale di rigonfiamento, e quindi al miglioramento della stabilità del versante costituito da terreni coesivi, interessato da movimenti gravitativi.

## 3. IL BACINO TERZIARIO PIEMONTESE (BTP)

Gli scivolamenti planari superficiali (soil slip) diffusi nel territorio delle Langhe, sono stati ritenuti idonei per essere trattati con la tecnica individuata e sviluppata nel corso della presente ricerca.

Sebbene questa tipologia di movimenti franosi sia presente un po' su tutto il territorio nazionale, si è focalizzata l'attenzione su quelli delle Langhe a causa dei numerosi ed approfonditi studi seguiti agli eventi franosi del piovoso autunno 1994 e della relativa "concentrazione areale" del fenomeno, a seguito dell'interessamento, tra gli altri, della Regione Piemonte e dell'Università degli Studi di Torino ai fini della sicurezza, monitoraggio, fruibilità e salvaguardia del territorio, del mantenimento delle attività antropiche (agricole, industriali, civili, ecc.), della difesa del suolo, dei beni artistici e di quelli infrastrutturali, ecc.

Si riportano di seguito alcuni dati reperiti in letteratura.

### 3.1 Inquadramento geologico – strutturale

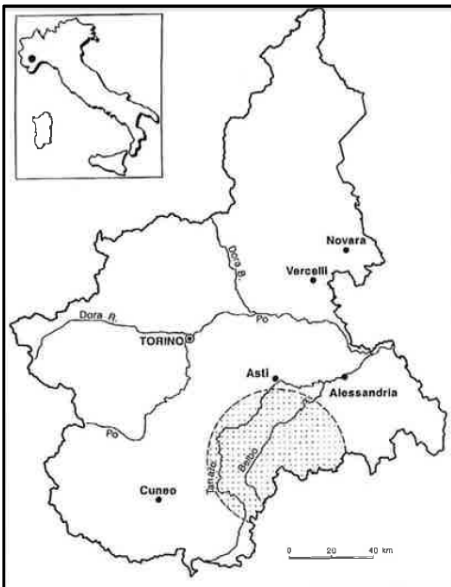


Figura 3. Ubicazione geografica delle Langhe piemontesi [Simeoni, 1998].

Il BTP si presenta come un complesso di sedimenti di età Oligo – Miocenica e Pliocenica, che occupa l'area piemontese compresa tra la Alpi Liguri e la Pianura Padana e che interessa le aree delle Langhe (Figura 3), della Collina Torinese, del Monferrato e la pianura alessandrina. È interpretabile come un bacino episuturale e, secondo modelli interpretativi recenti, il substrato del BTP presenta una geometria crostale complessa risultante da indentazioni di crosta metamorfica alpina e di unità liguridi – appenniniche, con implicazioni del mantello superiore [Cassano et al., 1986].

Questo assetto strutturale è dovuto ai processi tettonici inerenti la collisione tra la placca europea e la microplacca adriatica, e l'apertura del Mediterraneo nord-occidentale [Gelati e Gnaccolini, 1988; Biella et al., 1992].

### 3.2 Litologie della successione oligo – miocenica delle Langhe

In generale, il territorio è costituito da un'alternanza regolare di rocce sedimentarie terrigene oligo – mioceniche superiori di mare poco profondo, e torbiditiche, successive all'ingressione marina oligocenica che è proceduta da NE a SO.

La litostratigrafia della successione oligo – miocenica della Langhe è costituita in grande parte da un'alternanza di strati di marne, marne argillose, marne siltose, con intercalazioni di arenarie e sabbie e, talvolta, con intercalazioni calcaree.

I litotipi prevalenti sono di natura marnoso – siltosa da grigio – giallognoli ad azzurri, ed arenaceo – sabbiosi grigi, giallastri e rossastri, con spessori anche di due metri, ma più frequentemente da 5 a 50 cm.



### 3.3 Geomorfologia

#### 3.3.1 Il territorio delle Langhe

I limiti del territorio possono essere individuati a nord ed ad ovest dal Fiume Tanaro, a sud dai rilievi liguri, ad est dal Torrente Orba.

Le Langhe sono un vasto territorio collinare del Piemonte meridionale (altezza massima dei rilievi: circa 650 m s.l.m.) di circa 1.000 kmq caratterizzato da valli asimmetriche con lunghi e debolmente inclinati fianchi con stratificazione a franapoggio che si immergono verso NO, cui si oppongono fianchi molto ripidi con stratificazione a reggipoggio che si immergono verso SE, cui si oppongono fianchi molto ripidi con stratificazione a reggipoggio (Figura 4).

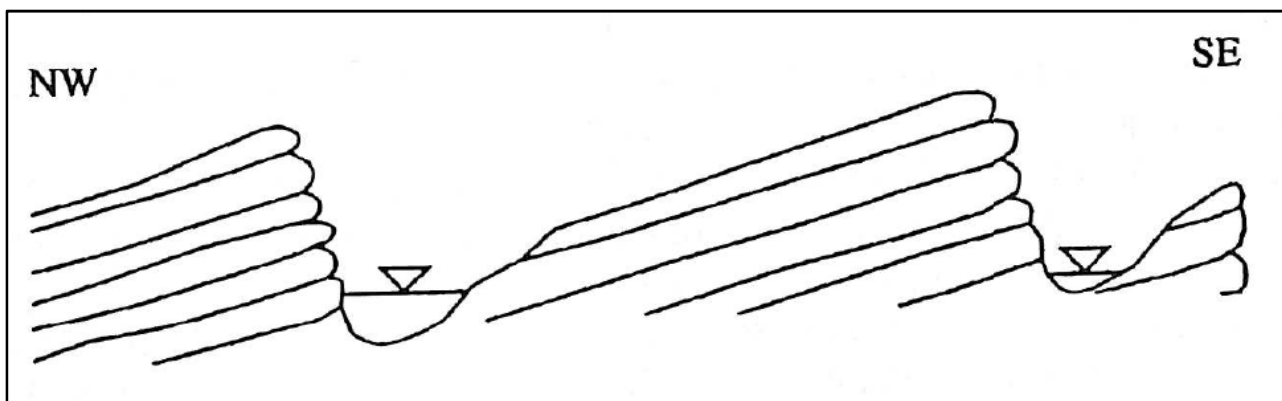


Figura 4. Morfologia dei versanti [Forlati et al., 1995].

Localmente essi si presentano fittamente fessurati (Figura 5), soprattutto nelle sequenze stratigrafiche che presentano alternanze tra strati arenacei più rigidi con strati marnosi e sabbiosi più plastici. Questo sistema di fessurazioni alternate a livelli più plastici favorisce l'infiltrazione e la circolazione dell'acqua nell'acquifero, e l'imbibizione dei corpi marnosi, spesso sedi della superficie di scivolamento.

Quanto descritto, in concomitanza di copiose e continue precipitazioni piovose, induce a fenomeni d'instabilità dei pendii, che si manifestano sotto forma di scivolamenti planari su versanti debolmente inclinati con stratificazione a franapoggio (Foto 4).

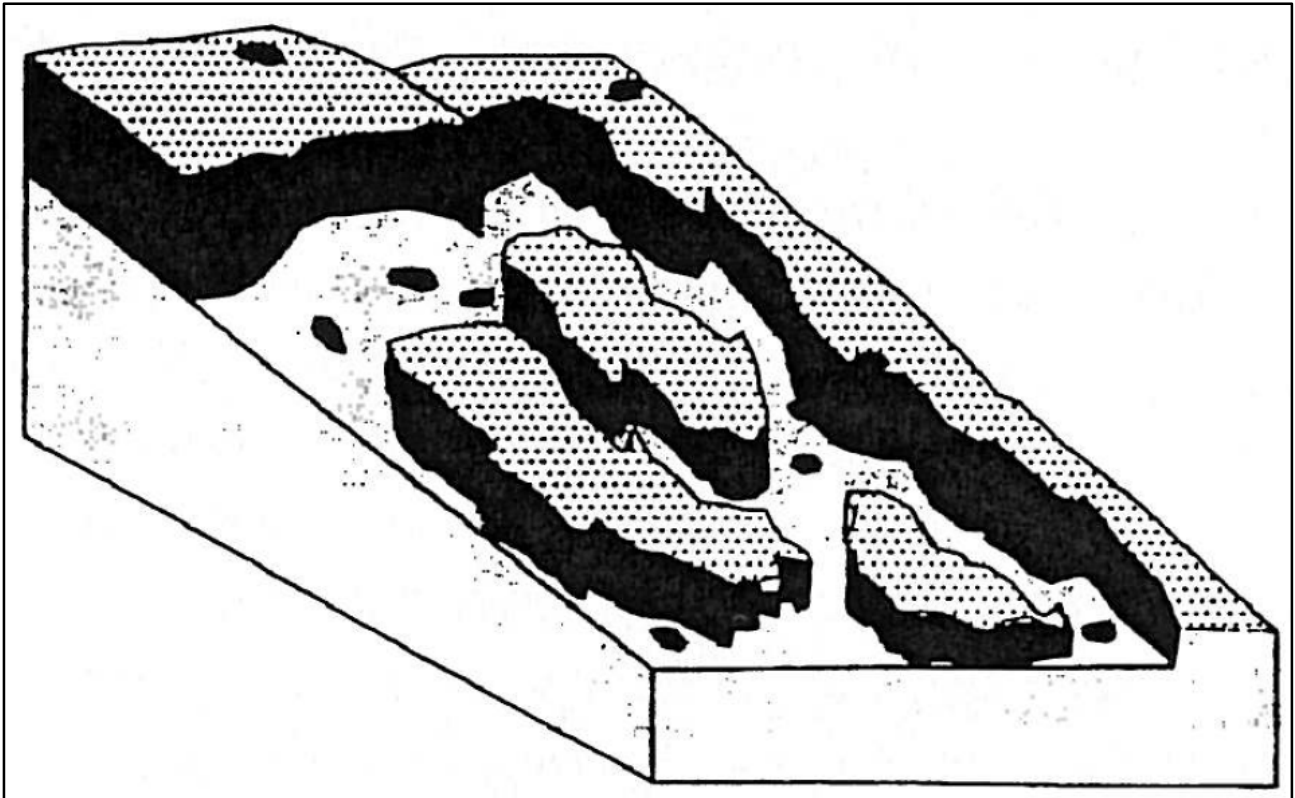


Figura 5. Schema di scivolamento planare delle Langhe [Forlati et al., 1995].

### 3.3.2 Caratteristiche idrogeologiche

La coltre superficiale costituisce una “spugna naturale” nei riguardi delle precipitazioni meteoriche che, a causa della modesta pendenza dei versanti, tendono ad infiltrarsi piuttosto che a defluire, e raggiungere livelli profondi lungo sistemi articolati di fratture, anche orizzontali. L’infiltrazione verso il basso si riduce, si arresta, devia, laddove l’acqua incontra livelli impermeabili. La direzione di deflusso dell’acqua infiltrata è influenzata anche dalla presenza di corsi d’acqua nelle valli che drenano gli accumuli idrici nelle rocce e nei terreni [Chiappone, 1999].

L’infiltrazione avviene anche per fessurazione. L’azione chimico – fisica delle acque di precipitazione influenza la circolazione subsuperficiale con fenomeni di dissoluzione e precipitazione.

La circolazione idrica sotterranea è evidenziata inoltre da inghiottitoi visibili in superficie, da materiali provenienti dalla superficie rinvenuti più in profondità lungo le

superfici di frattura, da patine di ossidazione rilevate sia in superficie che lungo i carotaggi, e da venute d'acqua in corrispondenza di giunti di strato e fratture [Chiappone, 1999].

Analisi isotopiche sui carbonati di precipitazione prelevati lungo i piani di strato, hanno mostrato che essi derivano da soluzioni di acque superficiali di origine meteorica [Forlati e Piana, 1998; Simeoni, 1998].

La risposta degli acquiferi agli eventi meteorici ravvicinati è di poche ore, mentre può raggiungere le 30 ore dopo lunghi periodi siccitosi. Durante l'estate o all'inizio dell'autunno, precipitazioni intense ma di breve durata causano variazioni piezometriche molto modeste a causa dell'elevata evapotraspirazione e del potere assorbente della coltre tendenzialmente asciutta. Se le precipitazioni sono cospicue, i livelli idrici aumentano di diversi metri in poco tempo (20 – 70 ore). Nel periodo invernale e primaverile, gli apporti meteorici provocano pulsazioni della falda di breve durata [Chiappone, 1999].

Si rileva un aumento progressivo della mineralizzazione durante il periodo estivo a causa della lenta circolazione [Chiappone, 1999].

### 3.3.3 Caratteristiche degli scivolamenti planari delle Langhe

A seguito delle precipitazioni del 1994, nelle Langhe sono stati individuati circa 800 casi di scivolamento planare in un'area di 450 kmq; alcuni di neoformazione, altri sono riattivazioni di precedenti fenomeni [Simeoni, 1998].

In letteratura sono presenti numerosi studi, tra cui quelli dell'Università degli Studi di Torino, della Regione Piemonte, di Simeoni, di Chiappone, di Govi e Sorzana, solo per citarne alcuni tra i più significativi. Se ne riporta una sintesi.

Gli scivolamenti planari delle Langhe piemontesi si verificano periodicamente e sono la tipologia di eventi gravitativi naturali che si registra con maggior frequenza.

La gran parte degli scivolamenti planari avviene su versanti già interessati in passato da altri fenomeni analoghi.

Le cause predisponenti sono:

- l'alternanza di formazioni marnoso – siltose con formazioni arenaceo – sabbiose;

- stratificazione isoclinale a franapoggio con inclinazione uguale o inferiore a quella del pendio;
- la presenza di sistemi di discontinuità che favoriscono l'infiltrazione di acqua nel sottosuolo, e quindi l'ingenerarsi di processi di alterazione, trasformazione, dissoluzione e neoformazione mineralogica.

La gran parte degli scivolamenti planari presenta quattro sistemi di discontinuità tra loro coordinati:

- le discontinuità planari, future superfici di scivolamento (piani di strato, superfici tettoniche, discontinuità stratigrafiche, superfici di sedimentazione, ecc.);
- due sistemi che svincolano il corpo di frana lateralmente;
- un sistema che svincola il corpo di frana a monte, generalmente situato a valle della cresta del pendio.

Solitamente, il corpo di frana è poi liberato al piede dallo scalzamento operato dai corsi d'acqua.

Una frana che si mobilita per scivolamento planare passa attraverso 3 fasi evolutive:

1. prima fase: fase di preparazione anche decennale con la formazione di fessurazioni spesso ben sviluppate in profondità nelle parti superiori del dissesto, e di depressioni e rigonfiamenti nelle parti medie ed inferiori del pendio;
2. seconda fase: fase di collasso del pendio o di uno dei suoi settori. Il suo sviluppo dimensionale medio registra una lunghezza di 70 – 120 m, una larghezza di 50 – 120 metri. La velocità di traslazione è stimata da 0,5 m/h ad alcune centinaia di m/h. La durata dell'evento va da pochi minuti per i fenomeni più modesti ad alcune ore per quelli più estesi. La dislocazione può interessare un blocco unico che si mantiene integro anche dopo il collasso, ovvero più zolle disarticolate con volumi da migliaia a centinaia di migliaia di metri cubi di terreno che scivolano integre anche dal punto di vista giaciturale, soprattutto per piccole traslazioni. Lo scivolamento avviene lungo superfici di debolezza pregresse aventi un'inclinazione debole ( $8^{\circ}$  –  $14^{\circ}$ ) posti a franapoggio rispetto al pendio, spesso coincidenti con i piani di discontinuità;
3. terza fase: movimenti di assestamento che determinano l'agglomerazione delle zolle formatesi nella fase precedente, e che conduce anche in tempi relativamente brevi alla formazione di una copertura detritica che occlude la superficie di scivolamento.

La distribuzione temporale delle frane per scivolamento planare avvenute nel periodo 1860 – 1994, ricavata dal Sistema Informativo Geologico della Regione Piemonte, indica come nel 70% dei casi, la frequenza di eventi idrometeorologici che hanno innescato fenomeni franosi di un certo rilievo, seppur in differenti sezioni delle Langhe e con diversa distribuzione spaziale, è dell'ordine dei tre anni.

La superficie di scivolamento è nel 58,3% dei casi a meno di 5 m di profondità, e nell'1,5% dei casi a più di 15 m di profondità. Lo spessore del livello destrutturato è compreso tra i 10 ed i 40 mm. I movimenti traslazionali quindi sono riferibili a due categorie differenti:

- 1) movimenti superficiali, generalmente molto rapidi. Essi si sviluppano generalmente nei soli materiali quaternari, materiali che testimoniano la disgregazione eluvio-colluviale del sottostante substrato;
- 2) movimenti profondi, caratterizzati spesso da un'evoluzione molto lenta. Essi interessano in particolar modo il substrato rappresentato da rocce sedimentarie stratificate di età terziaria e costituite in prevalenza da continue alternanze di marne ed arenarie, anche con parziale riattivazione di antichi volumi di frana.

I valori dei parametri geotecnici ricavati da back – analysis per gli ammassi rocciosi [Chiappone, 1999] sono i seguenti:

- coesione ( $c'$ ): 80 kPa;
- angolo di attrito interno ( $\phi'$ ): 35°.

Tali valori devono essere considerati come minimi, al di sotto dei quali si pensa non si debba scendere affinché non si raggiungano condizioni critiche di rottura all'interno dell'ammasso roccioso.

I valori dei parametri geotecnici ricavati da prove di taglio diretto per i terreni marnosi [Chiappone, 1999, Tab. 4.2, caso E] sono i seguenti:

- coesione ( $c'$ ): 0 kPa;
- angolo di attrito interno ( $\phi'$ ): 19°.

Tali valori devono essere considerati come minimi, al di sotto dei quali si pensa non si debba scendere affinché non si raggiungano condizioni critiche di rottura del terreno.

Entrambe queste considerazioni contraddicono quanto osservato in realtà: si registra una drastica riduzione dei valori delle caratteristiche geotecniche di resistenza al taglio.

A seguito degli studi condotti [Chiappone, 1999], analizzando più di 26 frane mediante il metodo dell'equilibrio limite, è stato possibile giustificare solamente alcuni di questi movimenti, e considerando condizioni di completa saturazione dei giunti abbinati a valori di parametri di resistenza ultima ricavati dall'interpolazione dei valori minimi delle prove di taglio.

#### 3.3.4 L'evento alluvionale del novembre 1994 (dati di letteratura)

In Piemonte, l'autunno del 1994 è stato caratterizzato da una particolare instabilità meteorologica tra la seconda metà di ottobre e la prima decade di novembre. La regione è stata interessata da precipitazioni continue sia sotto forma di pioggia, che sotto forma di neve e nevischio. Dalla fine di ottobre, l'aumento delle temperature dell'aria ha favorito lo scioglimento delle nevi.

Tra il 4 ed il 6 novembre 1994, il bacino del Fiume Tanaro è stato interessato da un eccezionale evento meteorologico che ha portato un'altezza di pioggia cumulata dai 200 ai 300 mm di pioggia in 36 ore, con picchi di 30 – 40 mm/h [Simeoni, 1998].

Dai dati delle stazioni pluviometriche più prossime ai siti di scivolamento, è stata quantificata l'altezza di pioggia cumulata media necessaria affinché un fenomeno di scivolamento si verifici: 100 mm [Chiappone, 1999].

La quantità di precipitazione significativa ai fini di una caratterizzazione dell'evento è risultata essere quella dei 60 giorni antecedenti [Chiappone, 1999].

Questi due fattori si completano e si integrano vicendevolmente, rivestendo un'uguale importanza nel verificarsi del fenomeno [Chiappone, 1999].

## 4. ARGILLE E MINERALOGIA (cenni)

Dal punto di vista mineralogico, col termine di *argilla* si considerano i minerali appartenenti alla categoria mineralogica dei fillosilicati, cioè silicati caratterizzati dalla

tipica morfologia cristallina planare a fogli sovrapposti. Il contributo dei fillosilicati al comportamento dell'argilla dipende dalla tipologia dei fillosilicati, dal loro assortimento, dal contenuto in acqua, dagli ioni presenti in soluzione, dalla fabric, ecc.

Dal punto di vista geotecnico, col termine *argilla* si intende un terreno costituito da particelle di dimensioni inferiori ai 2  $\mu\text{m}$ . Rientrano in tale definizione particelle quali il quarzo, la calcite, i feldspati, i fillosilicati, gli ossidi e zeoliti, ecc., ma anche componenti amorfi (ossidiana), e quasi-cristalli. Tutti i costituenti contribuiscono alle proprietà

dell'argilla quali la plasticità, la coesione, l'angolo d'attrito interno, ecc.

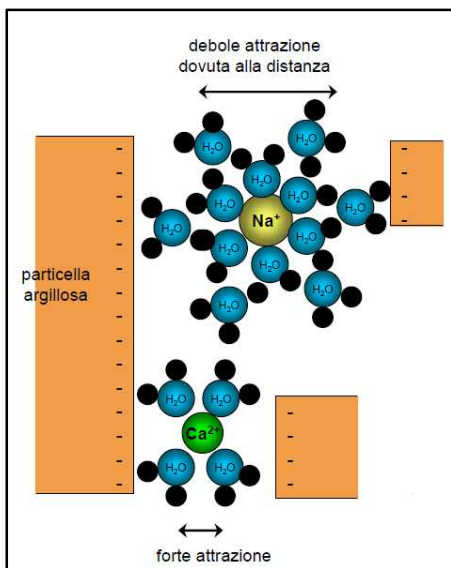


Figura 6. Gusci di idratazione [Riboli, 2014].

Si pone l'attenzione sulle smectiti, fillosilicati che presentano un deficit strutturale di carica positiva, e che tendono quindi a compensare tale deficit richiamando ioni metallici e molecole d'acqua dalle soluzioni acquose sia all'interno del reticolo cristallino, sia al suo esterno (doppio strato diffuso o elettrico o di Stern – Gouy).

L'ampiezza del doppio strato diffuso (Figura 6), influenza notevolmente il comportamento delle argille.

Quando due particelle di argilla si avvicinano tra loro, i rispettivi strati di Gouy tendono a farle allontanare, favorendo lo scorrimento reciproco delle stesse, e quindi la riduzione dei valori di resistenza meccanica.

Lo spessore del guscio di idratazione dipende dalla carica del catione che viene circondato; intorno a  $\text{Na}^+$  sarà maggiore che non attorno a  $\text{Mg}^{+2}$  o  $\text{Ca}^{+2}$  a causa della sua capacità di coordinazione maggiore. Lo ione  $\text{Ca}^{+2}$  si presenta decisamente meno idratato dello ione  $\text{Na}^+$ , e pertanto la distanza tra le particelle diminuisce e l'attrazione è maggiore (Figura 6).

A causa della debole forza di legame che li uniscono all'impalcatura cristallina, i cationi possono essere allontanati e sostituiti da altri cationi, che, proprio per questo motivo, sono chiamati cationi di scambio.

Vengono riportati in Tabella 1 alcuni casi di ordine di selettività.

**Tabella 1.**  
**Ordine di selettività dei cationi.**

Cationi Monovalenti	$Rb^+ > Cs^+ > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > H^+ > Li^+$
Cationi Bivalenti	$Ba^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Hg^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+}$
Serie Mista	$Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > NH_4^+ > Na^+$
Serie Completa	$Ba^{2+} > Ca^{2+} > Ni^{2+} > Cu^{2+} > Mg^{2+} > Ag^+ > Rb^+ > Cs^+ > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > H^+ > Li^+$

Per *fabric* o microtessitura si intende l'arrangiamento spaziale reciproco delle particelle solide in relazione anche alle dimensioni e alle forme dei vuoti. Essa governa il comportamento meccanico ed idraulico dei terreni.

Le sollecitazioni meccaniche (di carico e/o di stress orientato) ed idriche (cicli di essiccazione ed idratazione) cui sia stato o venga sottoposto il terreno, possono modificare l'arrangiamento spaziale degli aggregati, arrivando anche alla distruzione / ricostruzione totale della *fabric* originaria [Simeoni, 1998] secondo il modello faccia – faccia, in cui le facce opposte di ciascun cristallo tendono a scivolare le une rispetto alle altre producendo così un calo dei valori di resistenza al taglio del terreno argilloso.

La percentuale della componente carbonatica media delle marne delle Langhe è del 22,2 % (Grafico 1), mentre nel terreno presente in corrispondenza degli scivolamenti planari è stata rilevata una percentuale media di carbonato di calcio inferiore [Regione Piemonte, 1998, 6.3].

Diversi studi hanno evidenziato la presenza di cristalli di  $CaCO_3$  di neoformazione, micritici, post sedimentari, formati dalla precipitazione da soluzione soprassatura a seguito dei fenomeni di dissoluzione della componente carbonatica delle marne [Forlati e Piana, 1998; Simeoni, 1998; Veniale et al., 2000].

Tra gli altri fattori, i fenomeni di dissoluzione e precipitazione del carbonato di calcio nel terreno sono governati dal pH della soluzione con cui viene a contatto: a parità di condizioni, una soluzione acida ne induce la dissoluzione, mentre una soluzione alcalina ne induce la precipitazione.



## 5 LA SPERIMENTAZIONE

Per la verifica dell'obiettivo, sono state effettuate due sperimentazioni presso la struttura AIPo di Boretto (RE):

- 1) una in laboratorio su campioni di terreno coesivo saturo;
- 2) una su modello fisico di versante costituito dal medesimo terreno insaturo, diviso in due settori (settore trattato con il campo elettrico e settore non trattato con il campo elettrico).

### 5.1 Il terreno su cui è stata effettuata la ricerca

L'utilizzo di terreno prelevato in sito non risultava facilmente realizzabile sia a causa della risistemazione, in molti casi, dei dissesti, sia a causa dei necessari campionamenti diffusi, numerosi, e profondi, in quanto il livello del terreno di interesse per la ricerca si trova in spessori di 10 – 40 mm.

È stato utilizzato il Limo di Viadana perché molto simile dal punto di vista granulometrico, mineralogico, del comportamento meccanico, della caratterizzazione geotecnica, del contenuto in carbonati e del valore di blu di metilene, ai terreni caratterizzati e documentati presenti sulla superficie di scivolamento [AA.VV. AIPo; Airoldi et al., 2008]. Si è preso come riferimento il caso di Monastero Bormida, scivolamento di blocchi di marna argillosa limosa, con piano di scivolamento a –2 metri di profondità.

Una volta asportato il primo metro di terreno, ad una profondità compresa tra – 1,0 e – 1,5 metri dal p.c., lungo una fascia di circa sei metri, sono stati prelevati circa 8 metri cubi di terreno, poi stoccati presso le disponibilità della sede AIPo di Boretto (RE).

Si tratta di un deposito terrazzato in evoluzione (Olocene – attuale) di materiale coesivo in area golenale (Foto 2 e Foto 3) rilevabile sotto un deposito superficiale di sabbie fini e finissime, attribuibile alle "Alternanze di limi, argille e sabbie di argine distale e rotta fluviale", costituiti da "limi, limi da argillosi a debolmente argillosi, argille limose, sabbie finissime limose. Morfologia scarsamente rilevata. I depositi di spessore da 1 a 3

metri, fanno transizione graduale ai depositi di piana inondabile” [Progetto CARG, Foglio n.182, Guastalla].



Foto 2. Ubicazione del luogo di prelievo del terreno utilizzato nella sperimentazione.



Foto 3. Ingrandimento della Foto 2.

In Tabella 3 e Tabella 4 si riporta la comparazione tra alcuni parametri del terreno utilizzato per questa ricerca (Limo di Viadana), quelli del medesimo terreno rilevato in un altro lavoro [Airoldi et al., 2008], e quelli del terreno prelevato in corrispondenza dello scivolamento planare di Monastero Bormida [Simeoni, 1998].

Sono presenti le smectiti, minerali che hanno la proprietà di variare il loro volume in funzione della loro idratazione.

Il VB (Valore di Blu di Metilene), indicatore semiquantitativo del potenziale di rigonfiamento di un terreno coesivo, attribuisce (Tabella 2) al terreno in esame un potenziale di rigonfiamento “medio” [Meisina, 2000].

**Tabella 2.**

**Relazione tra il VB, l'IP, la pressione di rigonfiamento ed il potenziale di rigonfiamento / ritiro [Meisina, 2000].**

VB gr/100 gr di terreno	IP	Pressione di rigonfiamento	Potenziale di rigonfiamento / ritiro
< 2,5	< 12	< 100 kPa	Basso
2,5 – 4,5	12 – 35	100 – 300 kPa	Medio
4,5 – 9,0	35 – 45	300 – 500 kPa	Alto
> 9,0	> 45	> 500 kPa	Molto alto

**Tabella 3.**

**Comparazione tra i Limiti di Atterberg del terreno presente sulla superficie di scivolamento del movimento gravitativo di Monastero Bormida ed il Limo di Viadana utilizzato in questa ricerca.**

	MONASTERO BORMIDA*	VIADANA
Limite liquido (LL)	41,20%	31,45%
Limite plastico (LP)	28,70%	21,99%
Indice di plasticità (Ip)	12,50%	9,46%

\* Valori riferiti al terreno presente sulla superficie di scivolamento [Chiappone, 1999].

Tabella 4.

Comparazione tra alcuni parametri del Limo di Viadana utilizzato per questa ricerca [Gabrieli et al., 2008; questo studio], e quelli del terreno prelevato in corrispondenza dello scivolamento planare di Monastero Bormida [Simeoni, 1998].

	GABRIELI et al, 2008	QUESTO STUDIO	MONASTERO BORMIDA*
Granulometria	Argilla: circa 30% Limo: circa 70 % Sabbia: – Ghiaia: –	Argilla: 13% Limo: 74% Sabbia: 13% Ghiaia: –	Argilla: 24% Limo: 62% Sabbia: 13% Ghiaia: 1%
Peso specifico (gr/cm <sup>3</sup> )	2,74	2,70	2,74
Coesione (kPa)	3 **	19	17
Angolo di resistenza al taglio ( $\phi^\circ$ )	29°**	30°	26°
Minerali	Quarzo Carbonati Caolino Smectiti Clorite Feldspati Illite – Mica	–	Quarzo Carbonati Caolino Smectiti Clorite Feldspati Mica Plagioclassi
Carbonati	15%	21%	Valor medio marne Langhe: 22% 4% (R) *** 15% (O) ***
Valore di Blu (ml/100 gr)	–	2,70	2,67

\* valori rilevati sulla superficie di scivolamento [Simeoni, 1998].

\*\* da tesi di laurea specialistica sullo stesso terreno [Caruso, 2002].

\*\*\* vedi Figura 1.

Si riporta l'analisi diffrattometrica del terreno prelevato sulla superficie di scivolamento del movimento gravitativo di Monastero Bormida (Figura 7) [Chiappone, 1999], e del limo di Viadana (Figura 8) [Gabrieli et al., 2008].

In sintesi, i terreni risultano tra loro simili per quanto riguarda la granulometria, la densità, la coesione, l'angolo di attrito interno, l'assortimento mineralogico, i limiti di Atterberg, il contenuto in carbonati, ed il valore di blu di metilene.

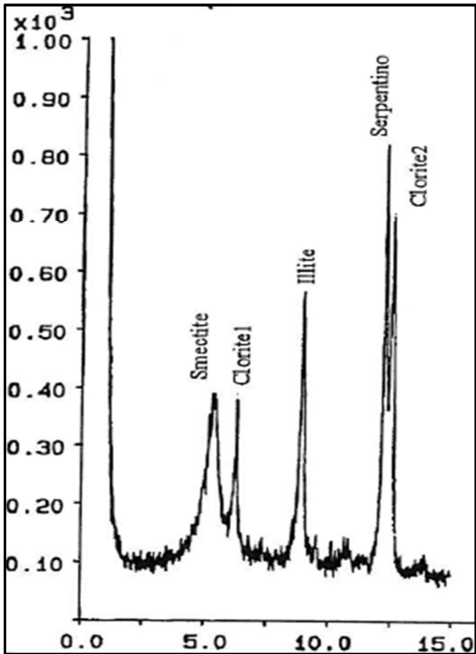


Figura 7. XRD del terreno prelevato sulla superficie di scivolamento del movimento gravitativo di Monastero Bormida [Chiappone, 1999].

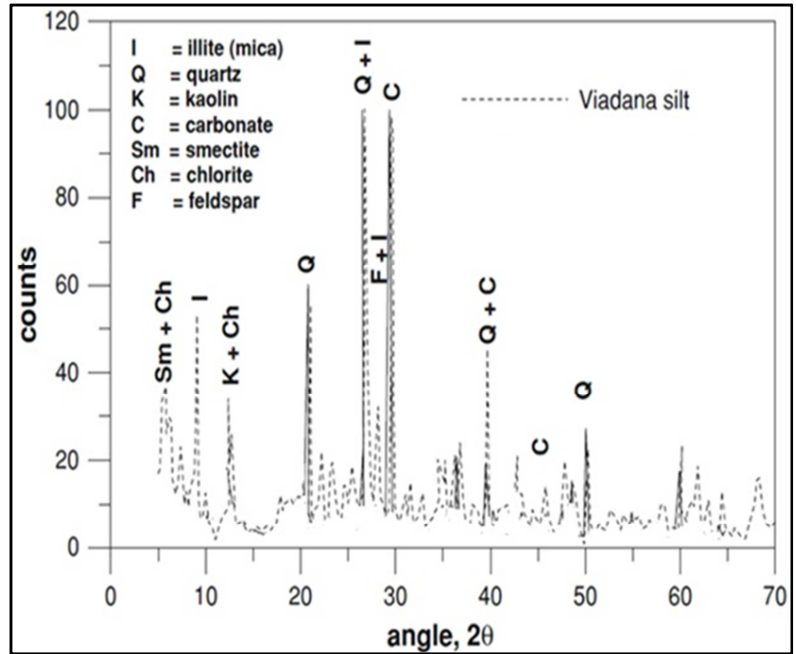


Figura 8. XRD del limo di Viadana [Gabrieli et al., 2008].



Foto 4. Scivolamento traslazionale a Monastero Bormida [Su gentile concessione della Regione Piemonte, 1994].

## 5.2 Procedura sperimentale in laboratorio

Sono state previste due fasi in laboratorio:

- Fase 1: caratterizzazione del terreno con 3 tenori di carbonati differenti per valutare l'influenza del CaCO<sub>3</sub> sui parametri individuati;
  - Fase 2: utilizzo dei campi elettrici con basse differenze di potenziale per indurre:
    - la precipitazione del CaCO<sub>3</sub>;
    - la riduzione del potenziale di rigonfiamento dei minerali argillosi espandibili;
    - la riduzione del contenuto in acqua del terreno;
- e successivo svolgimento delle analoghe analisi della Fase 1 per confrontarne i risultati.

Nel corso della Fase 1, sui terreni con tre tenori diversi in carbonati, sono state svolte le seguenti prove. Si riportano le norme seguite per il loro svolgimento:

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| - contenuto d'acqua        | UNI CEN ISO-TS 17892-1;                         |
| - peso specifico dei grani | CNR – UNI 10013                                 |
| - analisi granulometrica   | UNI CEN ISO-TS 17892-4 (solo terreno naturale); |
| - prove di taglio diretto  | UNI CEN ISO-TS 17892-10;                        |
| - limiti di Atterberg      | UNI CEN ISO-TS 17892-12;                        |
| - contenuto di carbonati   | D.M. n.248 del 13.09.1999;                      |
| - misurazione del pH       | D.M. n.248 del 13.09.1999 *;                    |
| - prova al blu di metilene | UNI EN 933-09-2009;                             |
| - Optimum Proctor          | UNI EN 13286-2 (solo su terreno naturale).      |

\* Nella Fase 2 e nella sperimentazione su modello fisico, è stato utilizzato uno strip indicator.

### 5.2.1 Procedura sperimentale in laboratorio – Risultati della Fase 1

Il terreno naturale utilizzato è caratterizzato da un contenuto in carbonati del 21%. Il terreno è stato sottoposto a due trattamenti differenti al fine di modificarne il contenuto:

- per la riduzione dei carbonati, mediante lavaggio con acido cloridrico (un bagno con circa 770 ml di HCl al 12%, e successivi 4 lavaggi con acqua distillata) di 1,9 kg di terreno secco e successiva essiccazione in forno ventilato a 40° C per 24 ore; il contenuto di carbonati misurato dopo il trattamento è stato pari al 12%;
- per l'incremento dei carbonati, mediante aggiunta di 133 gr di CaCO<sub>3</sub> puro in polvere a 1,9 kg di terreno secco e successiva essiccazione in forno ventilato a 40° C per 24 ore; il contenuto di carbonati misurato dopo l'aggiunta è stato del 28%.

Le prove elencate sono state eseguite, a seconda degli scopi, su:

- n.93 campioni di terreno naturale;
- n.61 campioni di terreno impoverito in carbonati (12%);
- n.77 campioni di terreno arricchito in CaCO<sub>3</sub> (28%).

#### 5.2.1.1 Analisi granulometrica (solo su terreno naturale)

Le analisi granulometriche sono state eseguite con setacciatura per via umida fino al crivello da 0.075 mm, e poi per sedimentazione. Il Grafico 3 riporta l'analisi media che si è presa come riferimento. Il peso del campione è di 302,9 gr. Si è utilizzato come antiflocculante l'esametafosfato di sodio nella misura di 40 gr/l.

Il terreno, secondo le raccomandazioni A.G.I., è un limo (74%) argilloso (13%) sabbioso (13%).

#### 5.2.1.2 Determinazione del peso specifico dei grani

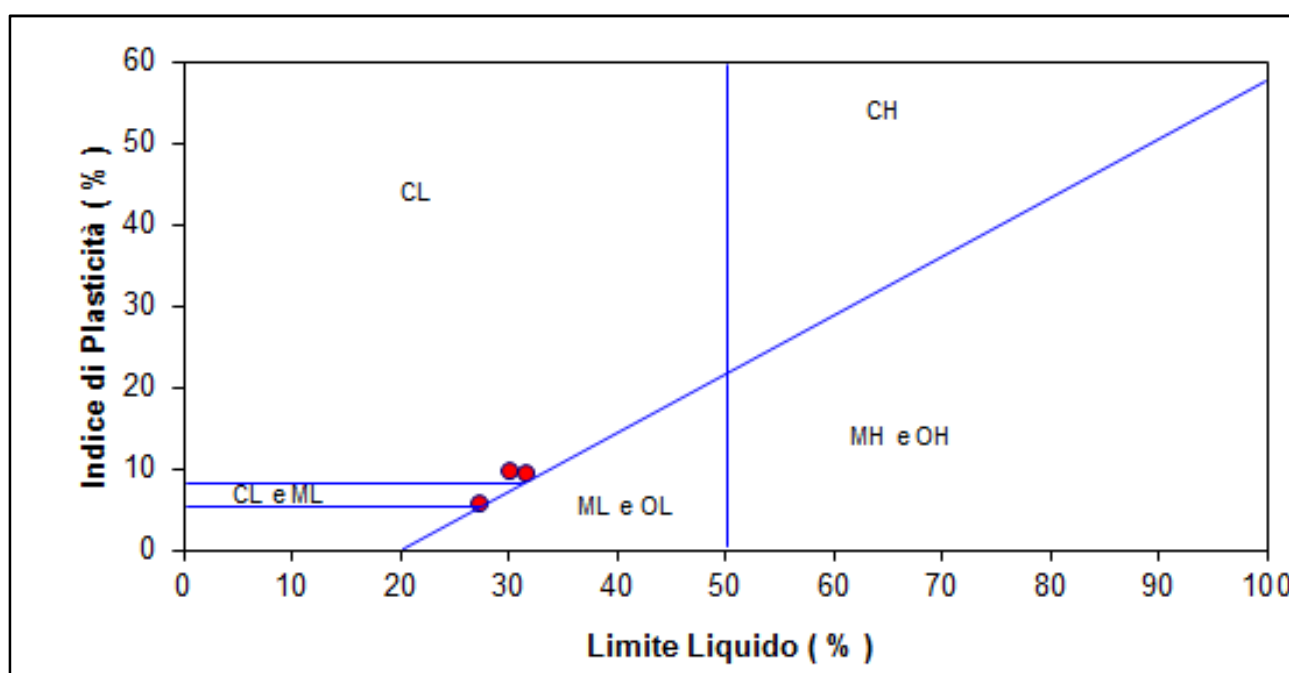
Per lo svolgimento delle misurazioni di questo parametro per i tre diversi tenori in carbonati, è stato usato del terreno secco asciugato in forno a 40°C per 24 h.





**Tabella 6.**  
**Risultati sui Limiti di Atterberg.**

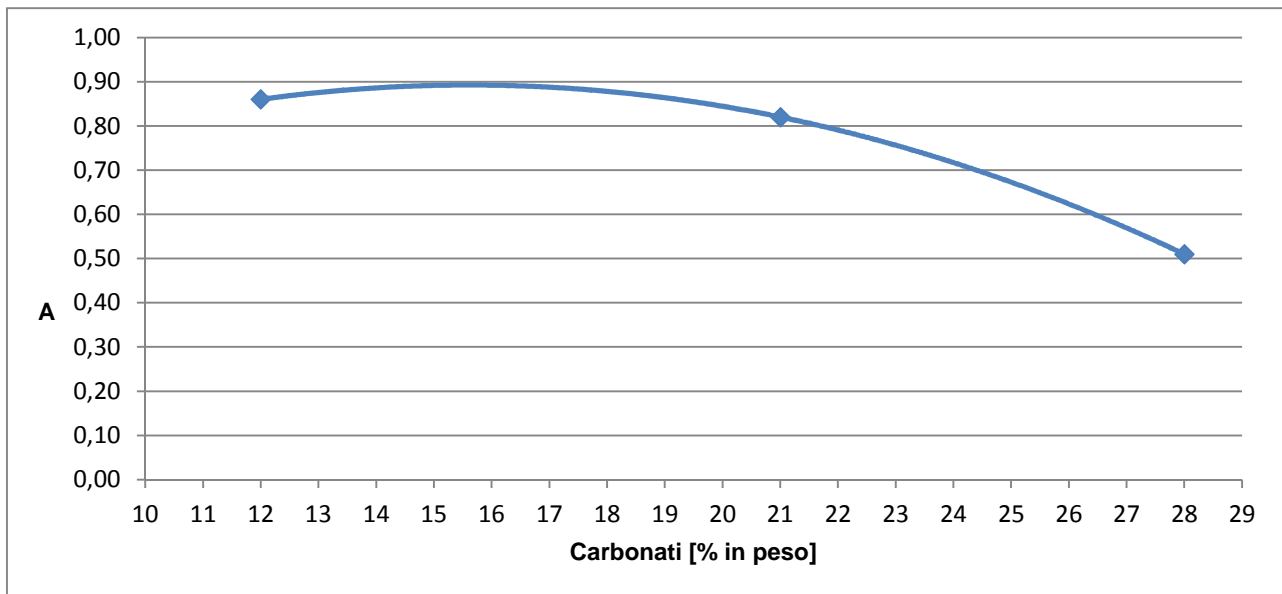
Terreno	LL	LP	IP	A
Terreno decarbonatato (carbonati: 12%)	29,90	20,00	9,90	0,86 argille mediamente attive
Terreno naturale (carbonati: 21%)	31,45	21,99	9,46	0,82 argille mediamente attive
Terreno carbonatato (carbonati: 28%)	27,20	21,35	5,85	0,51 argille attive



**Legenda**

- ML Limi inorganici, limi argillosi, sabbie molto fini limose
- CL Argille inorganiche di media-bassa plasticità; argille limose sabbiose o ghiaiose
- OL Limi organici e argille; limi organici di bassa plasticità
- MH Limi inorganici, limi argillosi
- CH Argille inorganiche di alta plasticità
- OH Argille organiche e argille limose di media-alta plasticità

**Grafico 4. Classificazione secondo la Carta di Plasticità di Casagrande.**



**Grafico 5. Attività colloidale VS Contenuto in carbonati.**

#### 5.2.1.4 Misurazione del contenuto di carbonati nei campioni

Si è proceduto, per ogni ciclo di misurazione, all'individuazione della retta di taratura, con l'ausilio di un termometro digitale con precisione al decimo di grado centigrado, e di un barometro analogico. Si riporta in Grafico 6 un caso.

Tale misurazione è stata eseguita anche al termine delle operazioni di decarbonatazione e carbonatazione.

Sebbene la procedura seguita sia stata quella prevista dalla norma, si è preferito usare 0,3 gr di terreno invece degli 0,5 gr prescritti per terreni con tenore in carbonati maggiore di 80 gr/kg ed HCl con diluizione al 12%.

Si evidenzia che al termine di ciascuna misurazione eseguita sui terreni, è stato rilevato uno sgradevole odore verosimilmente dovuto alla produzione di anidride solforosa.

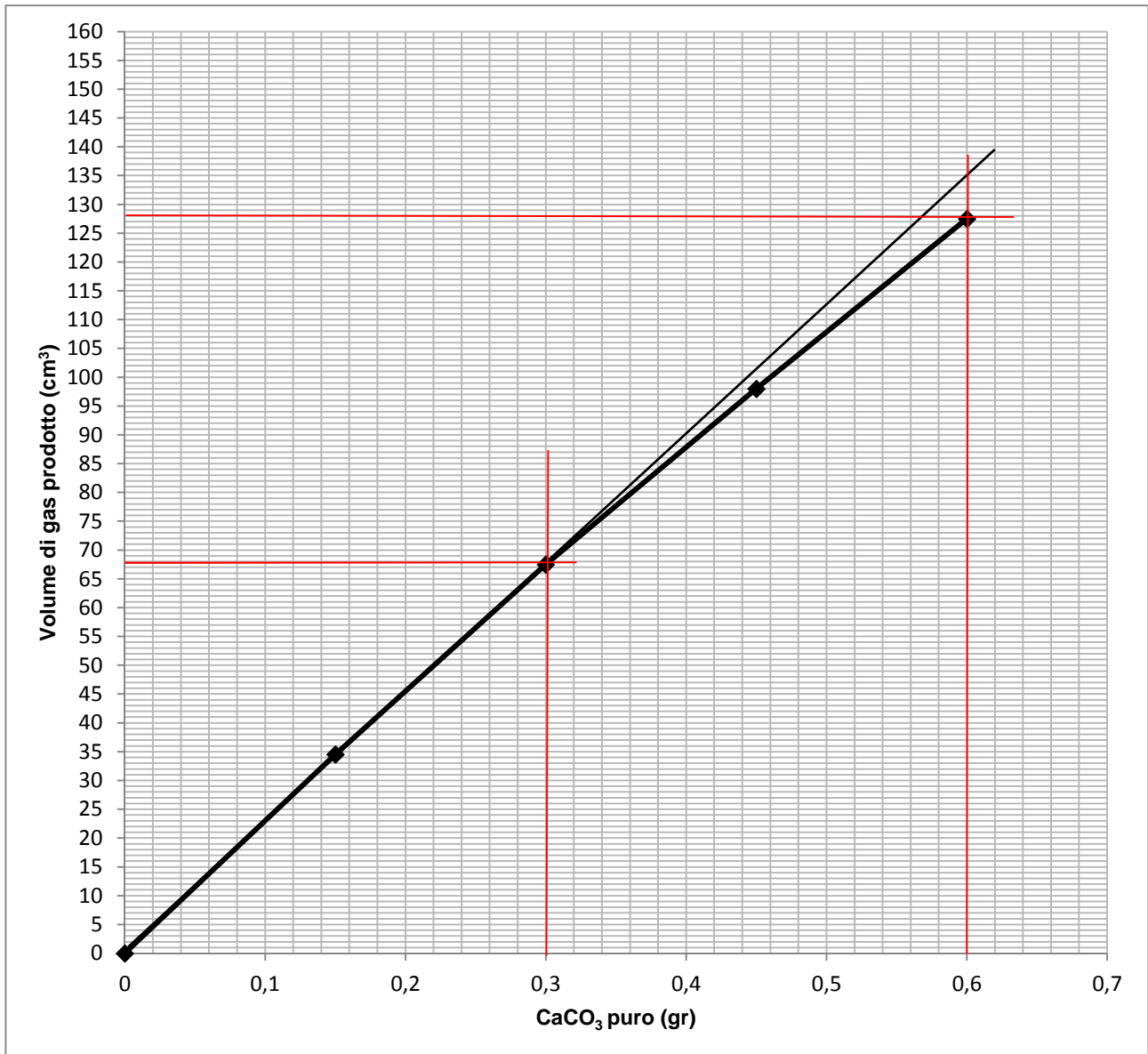


Grafico 6. Retta di taratura per la misurazione del contenuto in carbonati.

#### 5.2.1.5 Prova al Blu di Metilene

La prova al Blu di Metilene permette di avere indicazioni indirette semiquantitative sul potenziale di rigonfiamento dei terreni coesivi.

Essa consiste nel misurare il quantitativo di colorante (soluzione di 10 gr/l) necessario per saturare per adsorbimento i minerali con  $\varnothing \leq 2$  mm. Rapportando il quantitativo di colorante (Valore di Blu) col peso secco del terreno, è possibile avere una

stima qualitativa del potenziale di rigonfiamento del terreno analizzato (Tabella 2), e dei riferimenti numerici per le comparazioni.

**Tabella 7.**

**Quadro riassuntivo della misurazione del VB in funzione del contenuto in carbonati.**

Terreno		Peso (gr)	Colorante utilizzato (ml)	Valore di Blu (VB) = Colorante (ml) / peso secco (gr)	VB medio
Terreno decarbonatato (12% di carbonati)	Campione A	30	85	2,8	2,8
	Campione B	30	85	2,8	
Terreno naturale (21% di carbonati)	Campione A	30	80	2,7	2,7
	Campione B	30	80	2,7	
Terreno carbonatato (28% di carbonati)	Campione A	30	75	2,5	2,5
	Campione B	30	75	2,5	

#### 5.2.1.6 Misurazione del pH

La misurazione del pH del terreno con tre tenori diversi di carbonati è stata eseguita secondo la norma specifica, e confrontata con la misurazione tramite strip indicator. Verificata la sostanziale accordanza tra le due metodologie, si è quindi poi utilizzata la seconda metodologia nella Fase 2 e nella sperimentazione su modello fisico.

Per la prima metodologia, sono stati utilizzati 10 gr di terreno, immessi in un becher da 100 ml, cui sono stati aggiunti 50 ml di soluzione 0,01 mol di CaCl<sub>2</sub> e messi in agitazione a 400 giri / min per due ore. Al termine, dopo sedimentazione di alcuni minuti, si è fatta la lettura del pH.

Tabella 8.

Risultati della misurazione del pH dei terreni con tre tenori diversi di carbonati.

Terreno	pH
Terreno decarbonatato (carbonati: 12%)	7,40
Terreno naturale (carbonati: 21%)	8,46
Terreno carbonatato (carbonati: 28%)	8,40

#### 5.2.1.7 Individuazione dell'Optimum Proctor (solo su terreno naturale)

Consiste nell'individuare la coppia di valori, umidità del terreno ( $W$ ) e peso di volume secco del terreno ( $\gamma_d$ ), per arrivare alla costipazione ottimale del terreno (in condizioni di energia predefinite dalla norma CNR – UNI 69). In corrispondenza di detti valori, il terreno ha i suoi valori migliori in termini di coesione e resistenza al taglio.

Nel caso specifico, in funzione della tipologia di terreno, la prova è stata svolta in conformità alla norma CNR – UNI 69 con “metodo Standard”, equivalente ad un'energia di compattazione pari a  $6,05 \text{ kg cm/cm}^3$ , ovvero  $0,6 \text{ MJ/m}^3$ .

Sono state preparate quattro teglie di grosse dimensioni colme di terreno con diversi valori di umidità. Ai fini di una precisa determinazione dell'OP, si è proceduto all'effettuazione di 5 curve. Si riporta ne un esempio in appendice 9.1 (Tabella 24 e Grafico 34).

Dalle curve sperimentali, è stato ricavato l'abbinamento umidità – densità secca (Optimum Proctor) come di seguito:

- $W = 17\%$ ;
- $\gamma_d = 1,69 \text{ g/cm}^3$ .

Su questi valori è stato poi determinato il peso di volume umido per lo svolgimento delle prove di taglio:  $2,04 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.2.1.8 Prove di taglio diretto

Sono state eseguite prove di taglio diretto sul terreno con tre tenori in carbonati. La macchina utilizzata è una MATEST, modello S280.

I terreni sono stati idratati come da Optimum Proctor e costipati nella fustella anulare propria della scatola di taglio, avente le seguenti caratteristiche:

- altezza anello: 2,3 cm;
- diametro interno anello: 6,0 cm.

Dopo l'allocazione del campione di terreno nella scatola di taglio, è stata eseguita la consolidazione di ciascun campione per 24 ore. Il termine della consolidazione primaria è stimato e misurato nell'ordine dell'ora.

La velocità di esecuzione della prova è stata di 0,02 mm/min, ed è stata ricavata dalla seguente relazione:  $v = S_f / T_f$  dove  $S_f$  è lo spostamento orizzontale stimato a rottura,  $T_f$  è il tempo a rottura calcolato come  $12,7 \times T_{100}$  (UNI 17892 – 10).

Per la determinazione dell'angolo di attrito interno ( $\phi$ ) e della coesione ( $c'$ ), sono state eseguite tre prove di taglio per ciascun set, con i seguenti gradini di consolidazione e di carico: 106,2 kPa, 176,9 kPa e 283,1 kPa.

Si riporta un caso – tipo di consolidazione relativa al terreno naturale, in condizioni di OP con carico di consolidazione e di taglio di 283,1 kPa (Grafico 7).

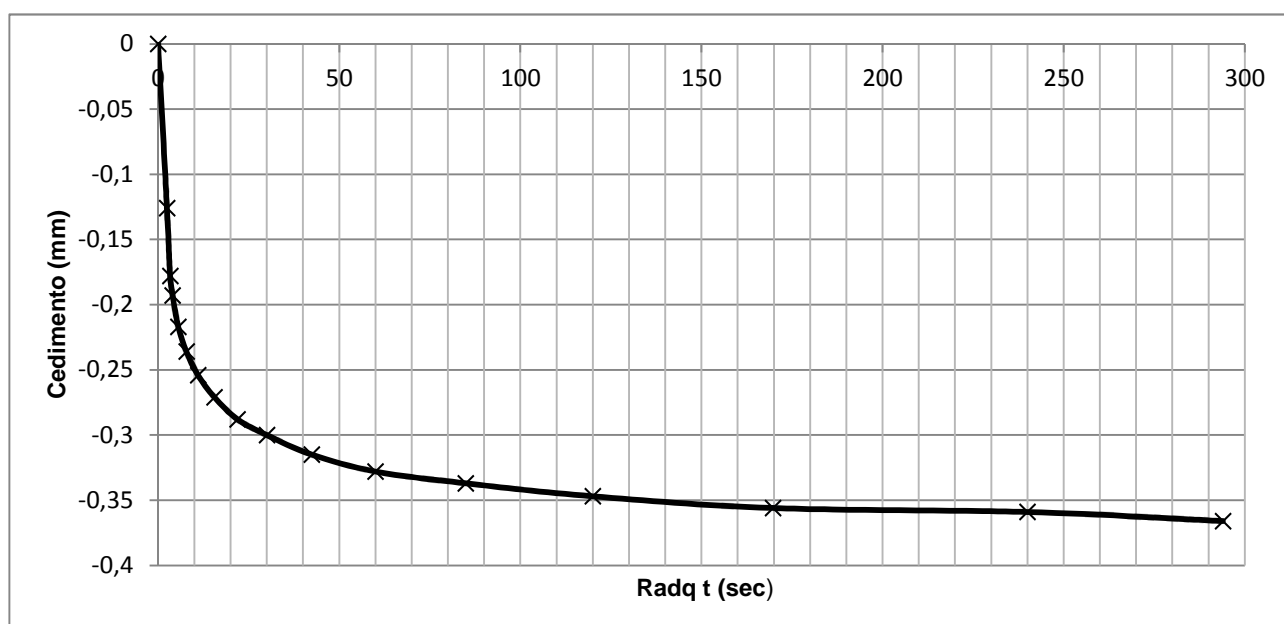


Grafico 7. Esempio di curva di consolidazione con  $\sigma_v = 283,1$  kPa.

Al termine di ciascuna terna di prove, sono state eseguite le relative elaborazioni su foglio di calcolo. Si riportano in appendice 9.2 gli involucri di rottura del terreno decarbonatato, di quello naturale ricostituito in condizioni di OP, e di quello carbonatato.

Trattandosi di terreno ricostituito (prelievo da cumulo) e non selezionato, si è reputato affidabile l'involucro di rottura con un  $R^2$  di almeno il 97%.

In Tabella 9 e in Tabella 10 si riporta la sintesi dei risultati.

**Tabella 9.**

**Valori di angolo di attrito interno ( $\varphi$ ) e di coesione ( $c'$ ) per il terreno con tre valori di carbonati.**

	$\varphi$ (°)	$c'$ (kPa)
Terreno decarbonatato (12% di carbonati)	16,77	52,75
Terreno naturale (21% di carbonati)	30,12	18,91
Terreno carbonatato (28% di carbonati)	38,88	31,15

**Tabella 10.**

**Quadro riassuntivo degli sforzi di taglio di picco in funzione di tre gradini di pressione di consolidazione.**

Sforzo di taglio di picco ( $\tau$ , kPa)			
Pressione di consolidazione	Terreno decarbonatato	Terreno naturale	Terreno carbonatato
106,2 kPa	82,41	80,64	119,19
176,9 kPa	109,99	121,31	169,76
283,1 kPa	136,52	183,21	261,01

5.2.1.9 Quadro riassuntivo della caratterizzazione preliminare del terreno con tre tenori di carbonati – Fase 1

Tabella 11.

Quadro riassuntivo della caratterizzazione preliminare del terreno con tre tenori di carbonati

	TERRENO DECARBONATATO	TERRENO NATURALE	TERRENO CARBONATATO
Analisi granulometrica	-	Limo (74%) sabbioso (13%) argilloso (13%)	-
Umidità naturale $w_n$ (%)	-	25%	-
Peso specifico ( $g/cm^3$ )	2,74	2,70	2,68
pH	7,40	8,46	8,40
Valore di Blu (ml/100 g)	2,8	2,7	2,5
Contenuto in carbonati (%)	12%	21%	28%
Limiti di Atterberg (%)	LL: 29,90 LP: 20,00 Ip: 9,90	LL: 31,45 LP: 21,99 Ip: 9,46	LL: 27,20 LP: 21,35 Ip: 5,85
Optimum Proctor	-	$\gamma_d$ : 1,69 $g/cm^3$ w: 17%	-
Coesione (kPa)	c = 52,7	c = 19,0	c = 30,0
Angolo di resistenza al taglio (°)	$\varphi = 16,8^\circ$	$\varphi = 30,1^\circ$	$\varphi = 39,2^\circ$



## 5.2.2 Procedura sperimentale in laboratorio – Risultati della Fase 2

Nel corso della Fase 2 è stato svolto il trattamento con i campi elettrici a bassa intensità di campo su campioni di terreno naturale. Questi sono stati inseriti in apparecchiature appositamente costruite. Lo schema dell'apparecchiatura di laboratorio utilizzato è simile a quello riportato Figura 9 [Airoldi et al., 2009].

Ess è costituito da un cilindro in plexiglas ( $\varnothing$  interno = 90 mm) contenente il terreno saturo d'acqua da trattare. Alle estremità del cilindro sono posizionati 2 serbatoi contenenti il fluido di permeazione e gli elettrodi in grafite (Foto 5b). Ciascun serbatoio è dotato di uno sfiatatoio per permettere la fuoriuscita dei gas prodotti dall'idrolisi. Il terreno è separato dai serbatoi mediante rispettivamente carta da filtro ed un filtro poroso rigido (Foto 5a), impermeabilizzato nel suo settore superiore (Figura 10 e Foto 6) per evitare che i gas sviluppatasi nei serbatoi potessero venire a contatto col terreno. Questi elementi consentono di mantenere la connessione idraulica di tutto il sistema: l'acqua in ingresso proveniente dalla zona anodica ha la possibilità di attraversare tutto il sistema e defluire verso la zona di uscita (serbatoio catodico). Il sistema è stato attrezzato con un contenitore riempito di acqua collegato con il serbatoio anodico in modo da garantire il continuo rifornimento idrico (Figura 10).

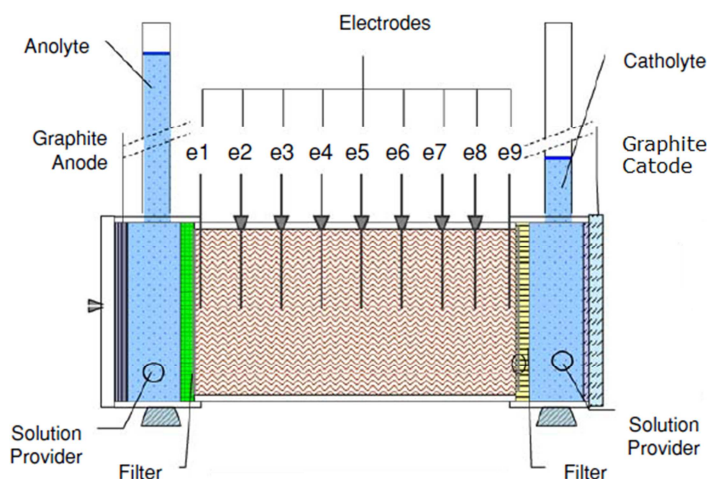
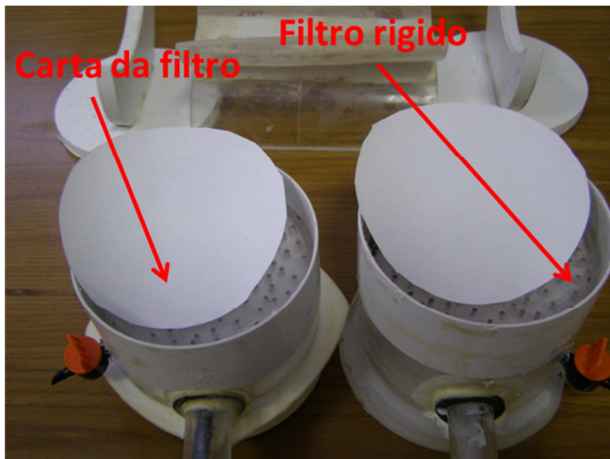


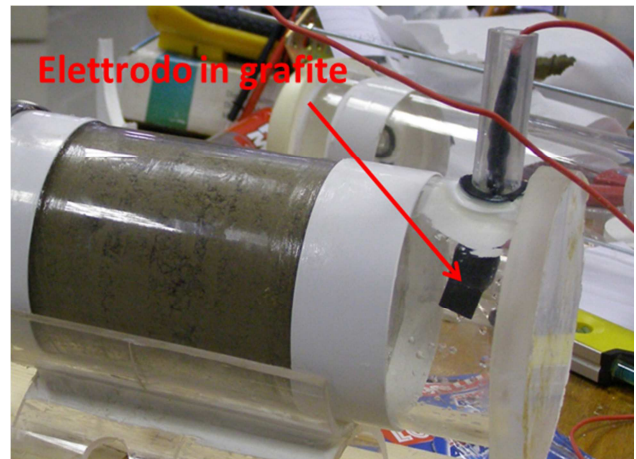
Figura 9. Modello di apparecchiatura realizzata [Airoldi et al., 2009].

I due elettrodi sono collegati ad un alimentatore stabilizzato attrezzato con un milliamperometro, che fornisce corrente continua.

Sono state costruite apparecchiature lunghe 15 cm e 27 cm, ed eseguite 11 prove complessive: una di taratura e prova, e 10 di svolgimento della sperimentazione.



a



b

Foto 5. a) i due serbatoi con i rispettivi filtri. b) uno dei due elettrodi in grafite.

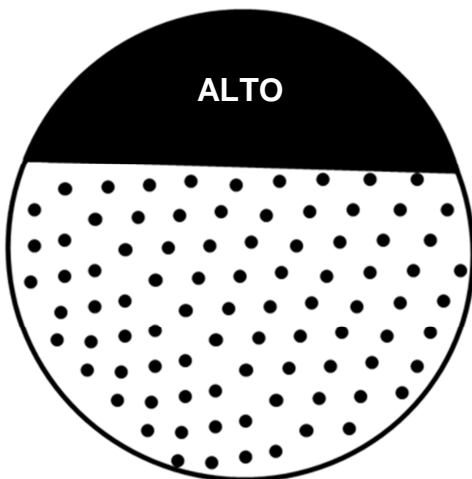


Figura 10. Schema di filtro rigido.

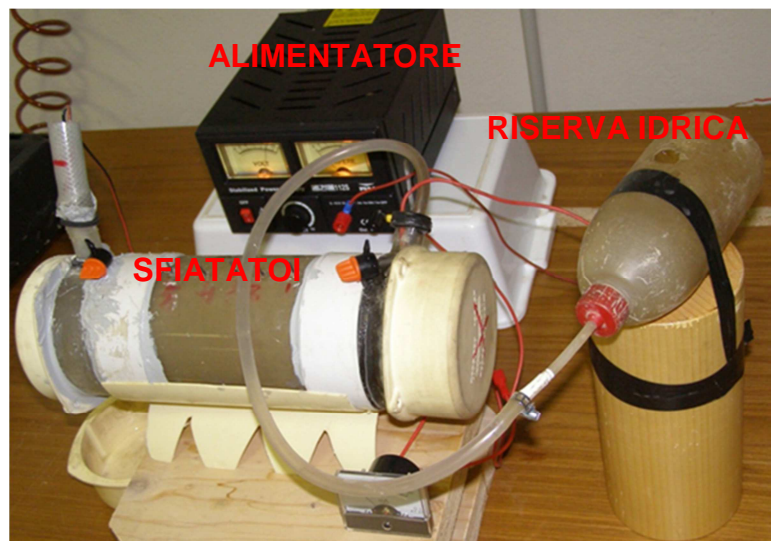


Foto 6. Una delle apparecchiature realizzate.

Nella preparazione dei campioni da sottoporre a trattamento, si è provveduto alla sua saturazione mediante bagno e rimescolamento per almeno 5 giorni, ed alla misura del contenuto d'acqua prima della sua allocazione. In Tabella 12 si riporta il quadro riassuntivo delle prove eseguite.

Per le prove del "QUADRO A" e di quelle per la verifica dell'interazione con l'acqua piovana del "QUADRO B", al termine dell'inserimento del terreno nel cilindro, il contenuto d'acqua era superiore al Limite Liquido (condizioni di saturazione), in particolare compreso tra il 44% ed il 50%. Una volta inserito nel cilindro di plexiglass, si è provveduto ad allontanare l'acqua in eccesso segregata, ad apportare ulteriore terreno, ed ad omogeneizzare il campione.

**Tabella 12.**  
**Quadro delle prove eseguite.**

QUADRO A		DURATA DEL TRATTAMENTO		
		15 giorni	30 giorni	60 giorni
Intensità del campo	0,1 V/cm	n.1	n.1	n.1
	1,0 V/cm	n.1	n.1	---
QUADRO B		VARIABILE		
		Interazione con acqua piovana	Conducibilità terreno insaturo	
Intensità del campo: 0,1 V/cm Durata del trattamento: 60 giorni		n.2	n.3	

Per le tre prove della verifica della conducibilità del terreno insaturo, il contenuto d'acqua era del 19%.

In vista di una ipotetica applicazione in sito, come fluido di permeazione è stata utilizzata l'acqua della rete acquedottistica domestica di cui vengono riportati (Tabella 13) alcuni parametri ed i relativi valori, per il periodo di effettuazione della sperimentazione. L'analisi completa è riportata negli allegati.

**Tabella 13.**  
**Principali indicatori e relativi valori dell'acqua utilizzata.**

pH	7,4
Durezza (F°, valor medio)	34,3
Conducibilità (µS/cm)	747

Durante il periodo di trattamento è stata misurata la differenza di potenziale e l'intensità di corrente.

Al termine del trattamento, i parametri del terreno rilevati sono i seguenti:

- contenuto d'acqua;

- pH;
- contenuto in carbonati;
- Valore del Blu di Metilene;
- resistenza al taglio di picco per i tre valori di pressione di consolidazione.

Ciascun campione, al termine del trattamento, è stato repentinamente suddiviso ed isolato in 4 settori stagni (Figura 11), da analizzare separatamente. Ciò ha permesso di valutare la variazione dei parametri sopra elencati all'interno del terreno.



Figura 11. Suddivisione del campione al termine del trattamento.

Su tutti i campioni trattati è stata osservata:

- la fuoriuscita di acqua torbida biancastra dal serbatoio catodico (Foto 7a);
- la presenza di acqua torbida nerastra nel serbatoio anodico (Foto 7b);
- l'idrolisi (formazione di ossigeno molecolare gassoso all'anodo, e di idrogeno molecolare gassoso al catodo);
- la maggiore consistenza del terreno catodico rispetto a quello molto plastico anodico (Foto 8).

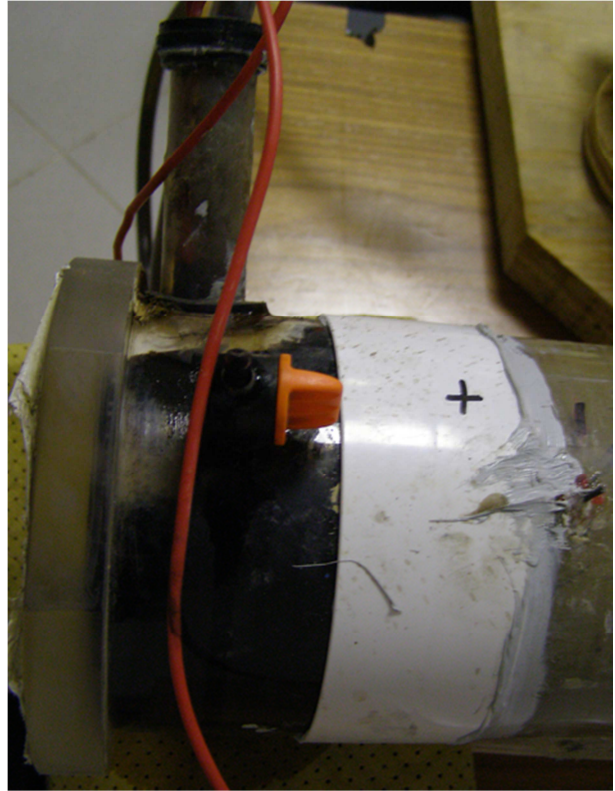
Una volta terminato il trattamento, in tutti i campioni sono stati eliminati i primi 5 mm in testa ed in coda al campione, ed il terreno in aderenza al cilindro in plexiglass.

Il terreno da sottoporre a taglio diretto è stato prelevato per infissione dell'anello di prelievo campioni della scatola di taglio.

Si riporta in appendice 9.3 la descrizione, le osservazioni, le misurazioni dei parametri, grafici e tabelle inerenti ciascun campione analizzato. In Tabella 14 è riportato il quadro riassuntivo di tutti i dati rilevati per ciascun campione.



a



b

Foto 7. a) acqua torbida biancastra serbatoio catodico; b) acqua torbida nerastra serbatoio anodico.



a



b

Foto 8. Maggiore consistenza del terreno catodico (a) rispetto a quello anodico (b) dopo il trattamento.

Tabella 14. Risultati della Fase 2.

Quadro A

Campione	Settore	Parametro		Parametro		Parametro		Parametro		Parametro	
		W (%)	Media	pH	Media	Carbonati (%)	Media	V/B (ml/gr)	Media	T di picco (KPa) - 283 KPa	Media
EO-15g-15V-prova-iniziale	AA	34	29%	8,5	8,3	22%	22%	2,8	2,7	167	145
	AC	28		8,0		22%		2,7		94	
	CA	26		8,0		21%		2,7		148	
	CC	27		8,5		23%		2,7		172	
EO-15g-15V	AA	29	32%	8,0	8,1	25%	24%	3,1	2,8	181	179
	AC	33		8,0		22%		3,0		164	
	CA	35		8,0		25%		2,7		179	
	CC	30		8,5		25%		2,4		192	
EO-15g-3V	AA	29	32%	8,0	8,0	22%	22%	2,7	2,7	167	156
	AC	33		8,0		21%		2,7		133	
	CA	32		8,0		23%		2,7		177	
	CC	33		8,0		23%		2,7		146	
EO-30g-27V	AA	34	33%	8,0	8,1	26%	27%	2,5	2,4	158	170
	AC	32		8,0		28%		2,5		143	
	CA	33		8,0		27%		2,5		194	
	CC	33		8,5		28%		2,2		185	
EO-30g-5V	AA	34	32%	8,0	8,0	21%	22%	2,7	2,7	166	161
	AC	34		8,0		21%		2,7		161	
	CA	27		8,0		23%		2,6		160	
	CC	31		8,0		23%		2,6		158	

EO-60g- 5V	AA	32	32%	7,3	7,7	21%	24%	2,8	2,5	205	197
	AC	32		7,8		22%		2,5		204	
	CA	31		7,8		26%		2,5		199	
	CC	33		8,0		25%		2,3		180	

Quadro B

Campione	Settore	Parametro		Parametro		Parametro		Parametro		Parametro	
		W (%)	Media	pH	Media	Carbonati (%)	Media	VB (ml/gr)	Media	t di picco (KPa) - 176 KPa	Media
EO-60g- 3V- rainwater1	AA	29	29%	8,0	8,0	21%	21%	2,7	2,7	72	74
	AC	29		8,0		21%		2,7		56	
	CA	29		8,0		22%		2,7		93	
	CC	29		8,0		21%		2,5		73	
EO-60g- 3V- rainwater2	AA	29	29%	8,0	8,0	20%	22%	2,7	2,6	61	69
	AC	29		8,0		23%		2,6		57	
	CA	29		8,0		23%		2,6		94	
	CC	30		8,0		22%		2,5		65	

Quadro C

Campione	Settore	Parametro		Parametro	
		$\Phi$ (°)	Media	c' (kPa)	Media
EO-30g-27V	AA	28°	30°	7,5 kPa	7,0 kPa
	AC	25°		14,9 kPa	
	CA	35°		0 kPa	
	CC	32°		5,6 kPa	
EO-30g-5V	AA	30°	29°	0 kPa	5,0 kPa
	AC	28°		12,7 kPa	
	CA	28°		7,3 kPa	
	CC	29°		0 kPa	
EO-60g-5V	AA	36°	35°	0,6 kPa	1,7 kPa
	AC	37°		0 kPa	
	CA	35°		0 kPa	
	CC	31°		6,3 kPa	

Quadro D

Campione	Assorbimenti elettrici (mA)
EO-15g-15V-prova-iniziale	3,32
EO-15g-15V	6,93
EO-15g-3V	3,30
EO-30g-27V	9,08
EO-30g-5V	1,41
EO-60g-5V	1,04
EO-60g-3V-rainwater1	0,23
EO-60g-3V-rainwater2	0,05



## 5.2.3 Analisi dei risultati laboratoriali

### 5.2.3.1 Fase 1

I risultati della Fase 1 indicano che all'aumentare del contenuto in carbonati

- diminuiscono i valori di peso specifico dei grani (Grafico 8), Indice di Plasticità (Grafico 9) e Valore di Blu di metilene (Grafico 10);

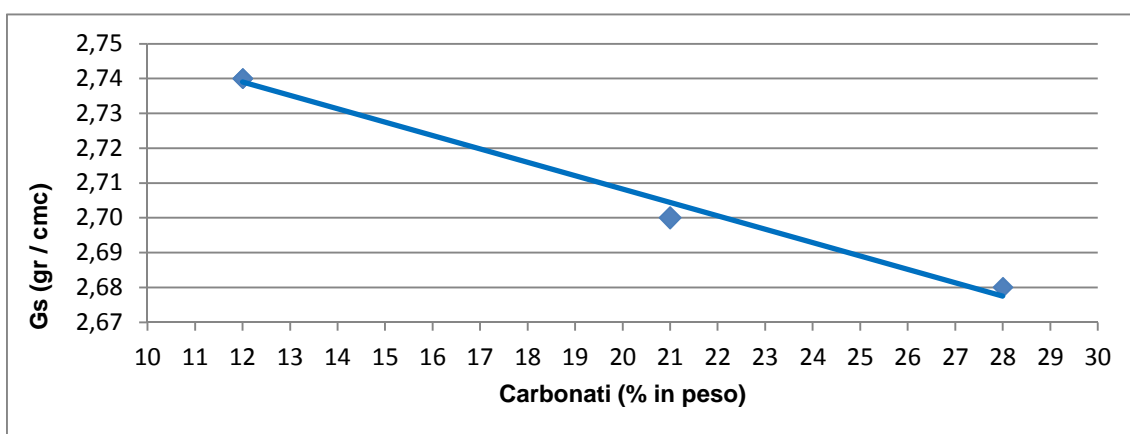


Grafico 8. Peso specifico dei grani VS Contenuto in carbonati.

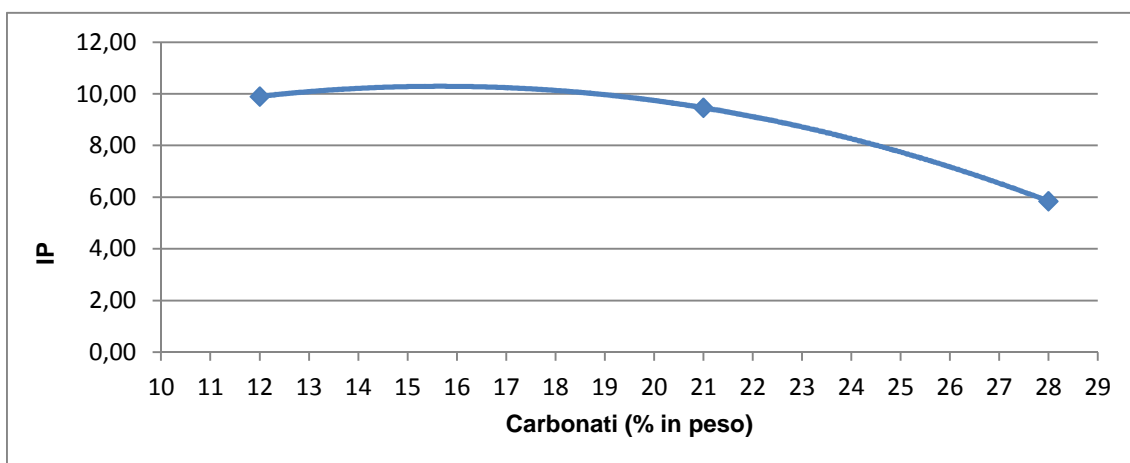


Grafico 9. Indice di Plasticità VS Contenuto in carbonati.

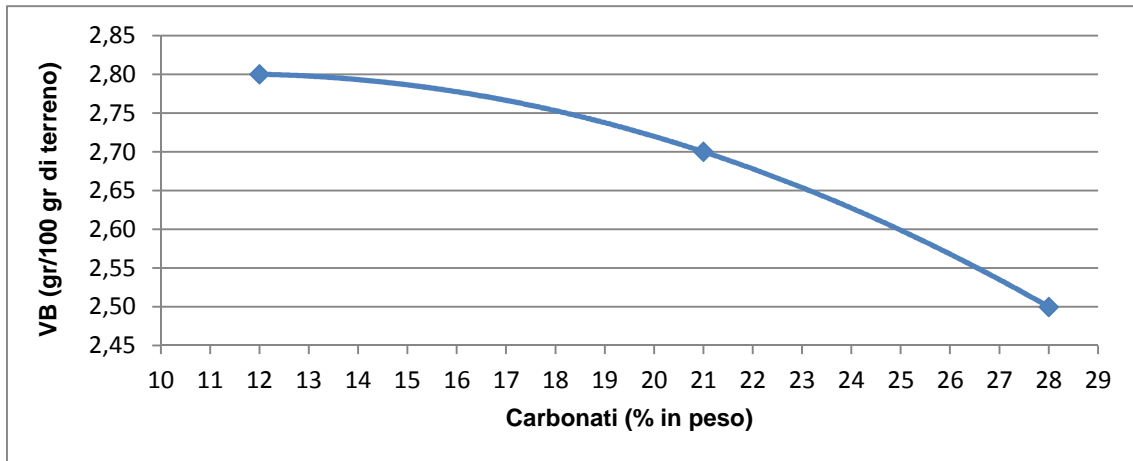


Grafico 10. Valore di Blu di metilene VS Contenuto in carbonati.

- aumenta la resistenza di picco al taglio a parità di pressione di consolidazione (Grafico 11), e l'angolo ( $\phi$ ) di resistenza al taglio (Grafico 12);

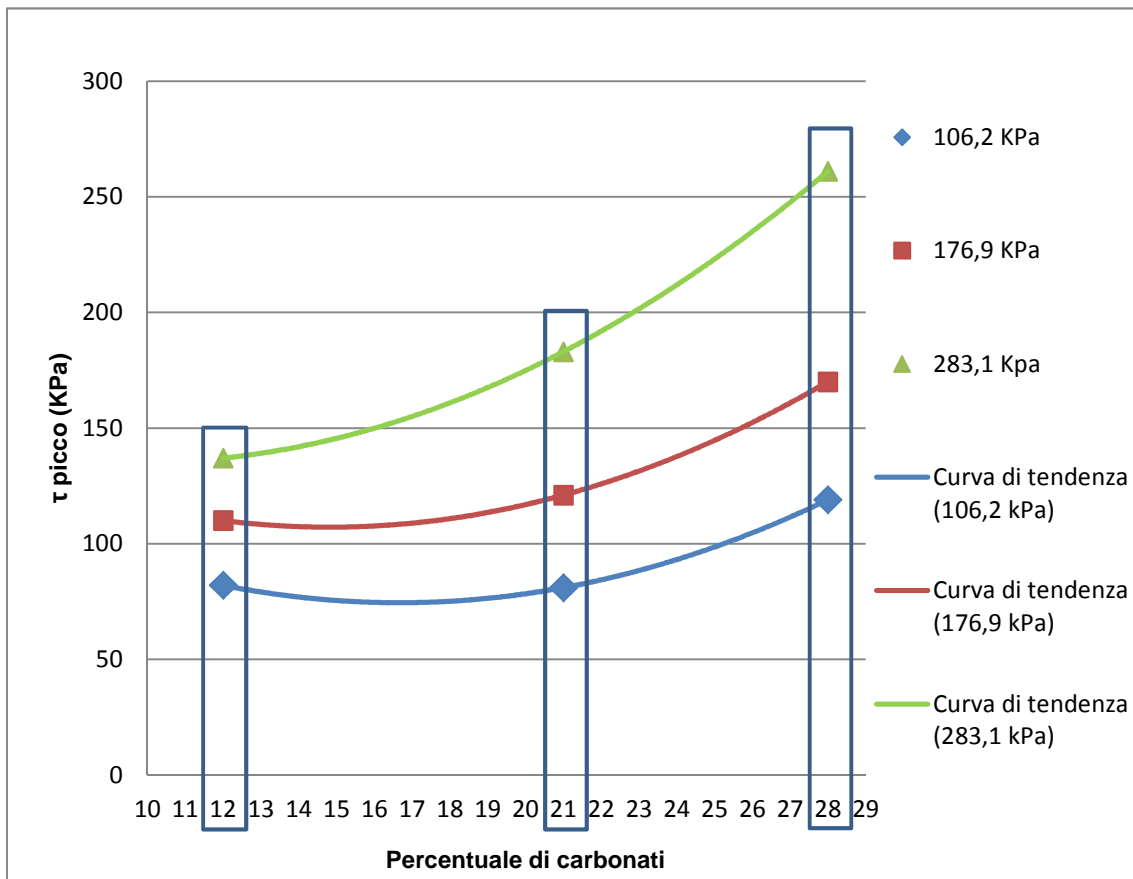


Grafico 11. Correlazione  $\tau$  di picco VS Contenuto in carbonati (%).

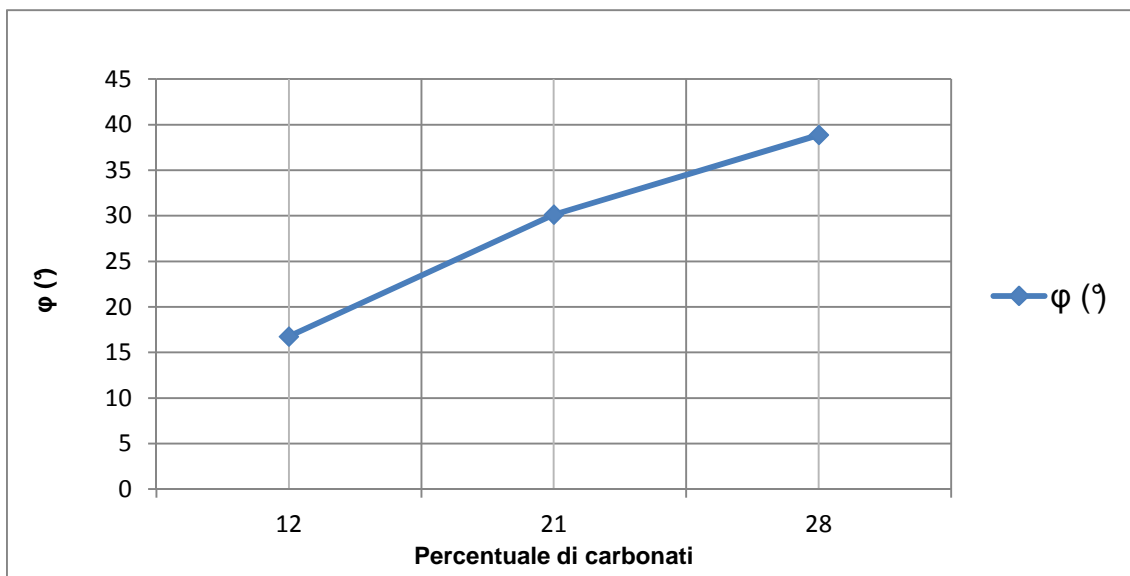


Grafico 12.  $\varphi$  (°) VS Contenuto in carbonati (%).

- il pH rimane sostanzialmente costante (Grafico 13).

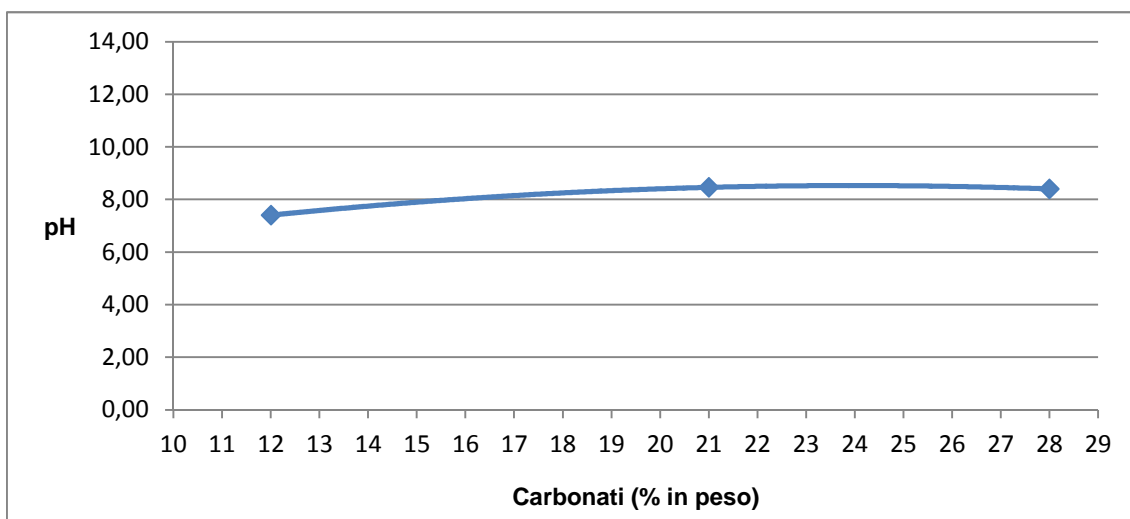


Grafico 13. pH VS Contenuto in carbonati (%).

### 5.2.3.2 Fase 2

I risultati della Fase 2 indicano che

1. gli assorbimenti elettrici con basse densità di campo in funzione del tempo mostrano un trend generale di aumento col tempo, in particolare, dopo la prima settimana di trattamento (Grafico 14 e Grafico 15). Correlazioni contrastanti per gli assorbimenti con alte densità di campo in funzione del tempo (Grafico 42 e Grafico 51);

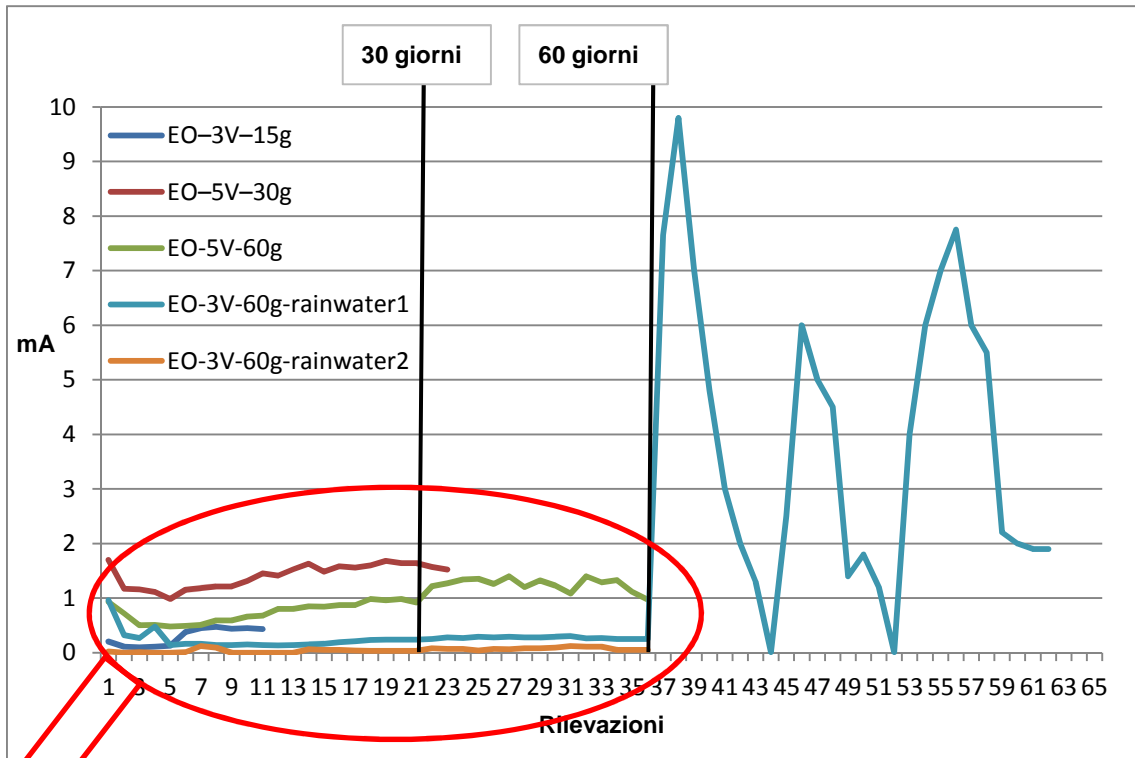


Grafico 14. Assorbimenti elettrici (mA) con bassa densità di campo VS Rilevazioni.

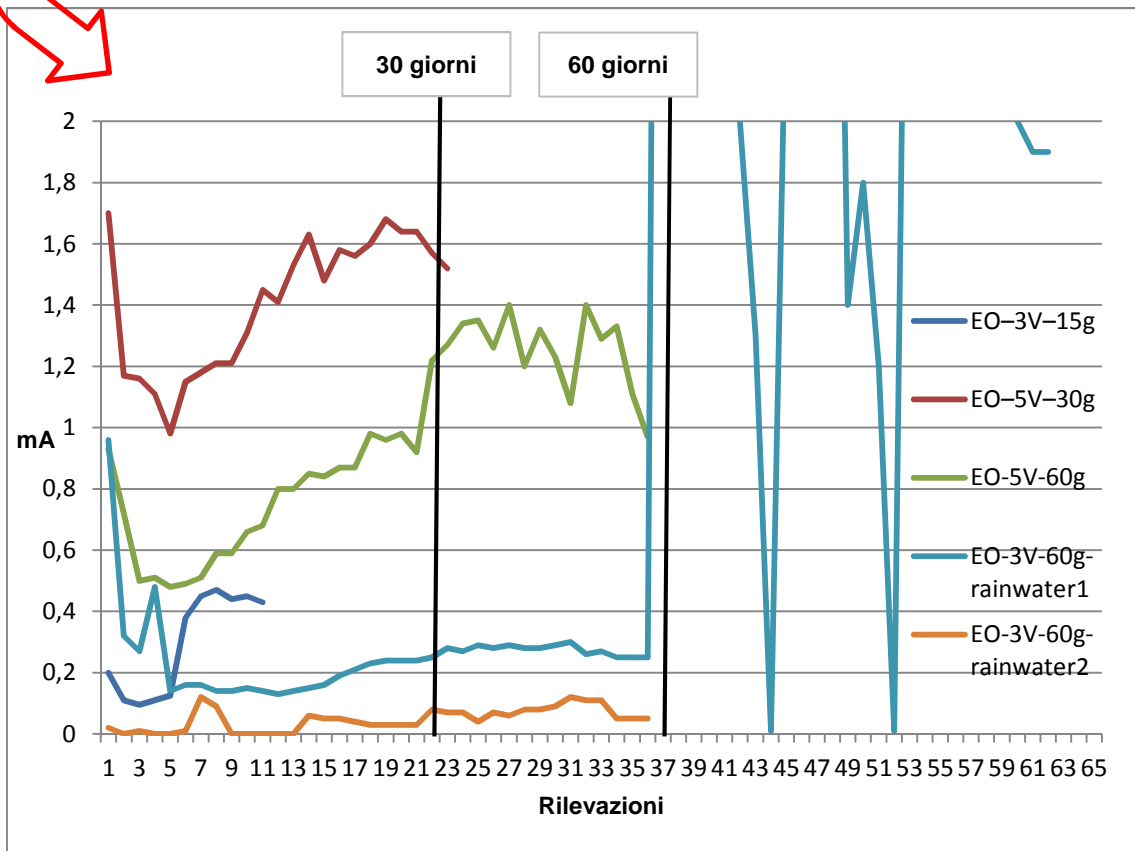


Grafico 15. Assorbimenti elettrici (mA) con bassa densità di campo VS Rilevazioni. Ingrandimento della figura precedente.

2. il pH del terreno entro ciascun campione è pressoché costante. Dalla Tabella 15 si rileva l'incremento medio del pH in funzione dei settori del campione, il cui ambiente alcalino favorisce la precipitazione di agenti cementificanti come il  $\text{CaCO}_3$ ;

**Tabella 15.**  
**pH VS Settori Campioni VS Tempo di Trattamento VS Densità di campo.**

Settori	EO-15g-15V-prova-iniziale	EO-15g-15V	EO-15g-3V	EO-30g-27V	EO-30g-5V	EO-60g-5V	EO-60g-3V-rainwater1	EO-60g-3V-rainwater2	Media
AA	8,5	8,0	8,0	8,0	8,0	7,5	8,0	8,0	8,0
AC	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
CA	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
CC	8,3	8,5	8,0	8,5	8,0	8,0	8,0	8,0	8,2
<b>Media</b>	<b>8,2</b>	<b>8,1</b>	<b>8,0</b>	<b>8,1</b>	<b>8,0</b>	<b>7,9</b>	<b>8,0</b>	<b>8,0</b>	<b>8,0</b>
pH terreno decarbonatato: 7,40 - pH terreno naturale: 8,46 - pH terreno carbonatato: 8,40									

3. il Valore di Blu di metilene (VB), a seguito del trattamento, diminuisce sia come valor medio generale dal 2,7 del terreno naturale al 2,6, sia in funzione del settore del campione, sia in funzione della durata del trattamento, che della densità di campo (Grafico 16, Grafico 17 e Tabella 16). Per i campioni EO-60g-3V-15cm-rainwater1 e EO-60g-3V-15cm-rainwater2, si rileva che mediamente, il VB tende ai valori pretrattamento;

4. il contenuto d'acqua (W), nei suoi valori medi, si allinea tra il 32% ed i 33% (Tabella 17) indipendentemente dalla densità di campo e dalla durata del trattamento. I suddetti valori sono inferiori a quelli di costituzione del campione ( $W > LL$ ). Diversa considerazione per i due campioni sottoposti ad acqua piovana poiché soggetti ad asciugatura e reidratazione post-trattamento, e per la prova iniziale che ha subito un processo di allocazione e trattamento diverso dagli altri;

5. il contenuto di carbonati, in generale, aumenta sia in funzione della durata del trattamento, che della densità di campo (Tabella 18 e Grafico 20). L'interazione tra l'acqua piovana ed il campione trattato, asciugato e sottoposto ad idratazione con acqua piovana, ha ridotto il contenuto del terreno in carbonati, ma non lo ha portato al di

sotto del contenuto naturale. Si riporta il Grafico 18 e il Grafico 19 sull'utilizzo di basse ed alte densità di campo in terreni coesivi saturi per diverse durate di trattamento;

6. le prove di taglio diretto effettuate (Tabella 19) hanno evidenziato l'incremento del 16,7% del valore medio dell'angolo di attrito interno (Tabella 19, Fase 1 e Fase 2 Sezione C) per il campione trattato con bassa densità di campo e per 60 giorni (EO-60g-5V-27cm).

I due campioni trattati per 15 giorni con basse ed alte densità di campo hanno mostrato un peggioramento (-8,6%) dei valori medi di resistenza al taglio per la medesima pressione di consolidazione (283,1 kPa) rispetto al terreno naturale non trattato.

I due campioni EO-60g-3V-15cm-rainwater1 e EO-60g-3V-15cm-rainwater2 hanno mostrato che gli sforzi di resistenza al taglio sono stati sempre inferiori agli analoghi sforzi registrati per tutti gli altri campioni analizzati. In particolare, per il settore CA il calo medio è stato del 22% rispetto al valor medio (120,36 kPa) mentre per gli altri settori il calo medio è compreso tra il 42% ed il 55%.

In previsione di una eventuale applicazione in sito per il trattamento di un terreno coesivo saturo, si è posta una particolare attenzione ai campioni EO-30g-5V-27cm, EO-60g-5V-27cm, e EO-30g-27V-27cm (Grafico 21). Non si sono considerati i campioni poi idratati con acqua piovana a causa dello scadere dei valori di resistenza. Per questi ultimi, tali valori sono da considerare come ipotesi di previsione di un deterioramento del terreno o come indicatori / conferme di quanto affermato in letteratura [Simeoni, 1998; Chiappone, 1999; Veniale et al., 2002];

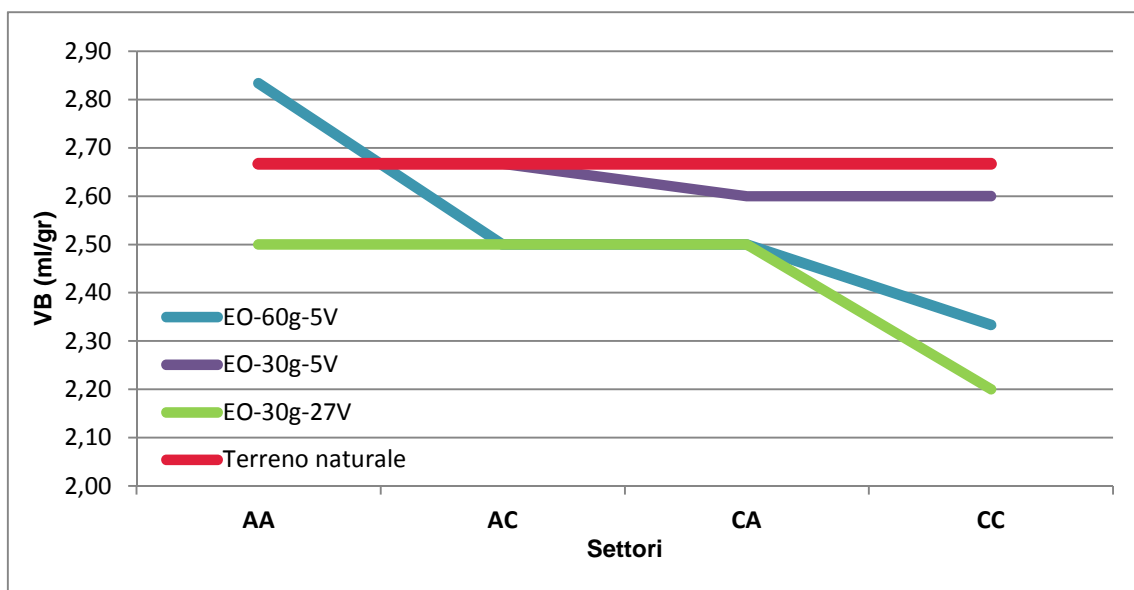


Grafico 16. VB nei campioni più significativi VS Settori del campione.

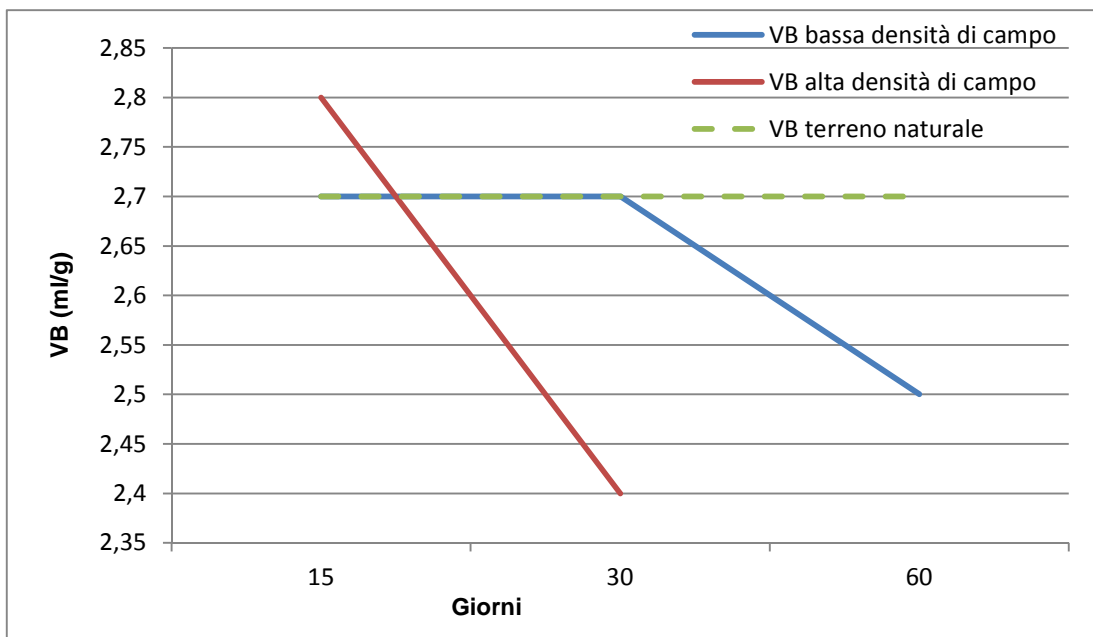


Grafico 17. VB VS Durata del trattamento.

Tabella 16.

VB VS Settori Campioni VS Tempo di Trattamento VS Densità di campo.

Settori	EO-15g-15V-prova-iniziale	EO-15g-15V	EO-15g-3V	EO-30g-27V	EO-30g-5V	EO-60g-5V	EO-60g-3V-rainwater1	EO-60g-3V-rainwater2	Media
AA	2,8	3,1	2,7	2,5	2,7	2,8	2,7	2,7	2,8
AC	2,7	3,0	2,7	2,5	2,7	2,5	2,7	2,6	2,7
CA	2,7	2,7	2,7	2,5	2,6	2,5	2,7	2,6	2,6
CC	2,7	2,4	2,7	2,2	2,6	2,3	2,5	2,5	2,5
Media	2,7	2,8	2,7	2,4	2,7	2,5	2,7	2,6	2,6
VB terreno decarbonatato: 2,8 - VB terreno naturale: 2,7 - VB terreno carbonatato: 2,5									
<b>In viola:</b> dati dalla prova iniziale.									
<b>In verde:</b> dati dal trattamento per 15 giorni e 30 giorni ad alta densità di campo.									
<b>In nero:</b> dati dal trattamento per 15, 30 e 60 giorni a bassa densità di campo.									
<b>In azzurro:</b> dati dai campioni trattati per 60 giorni a bassa tensione, sottoposti a dewatering e poi reidratati con acqua piovana.									

**Tabella 17.**

**W VS Settori Campioni VS Tempo di Trattamento VS Densità di campo.**

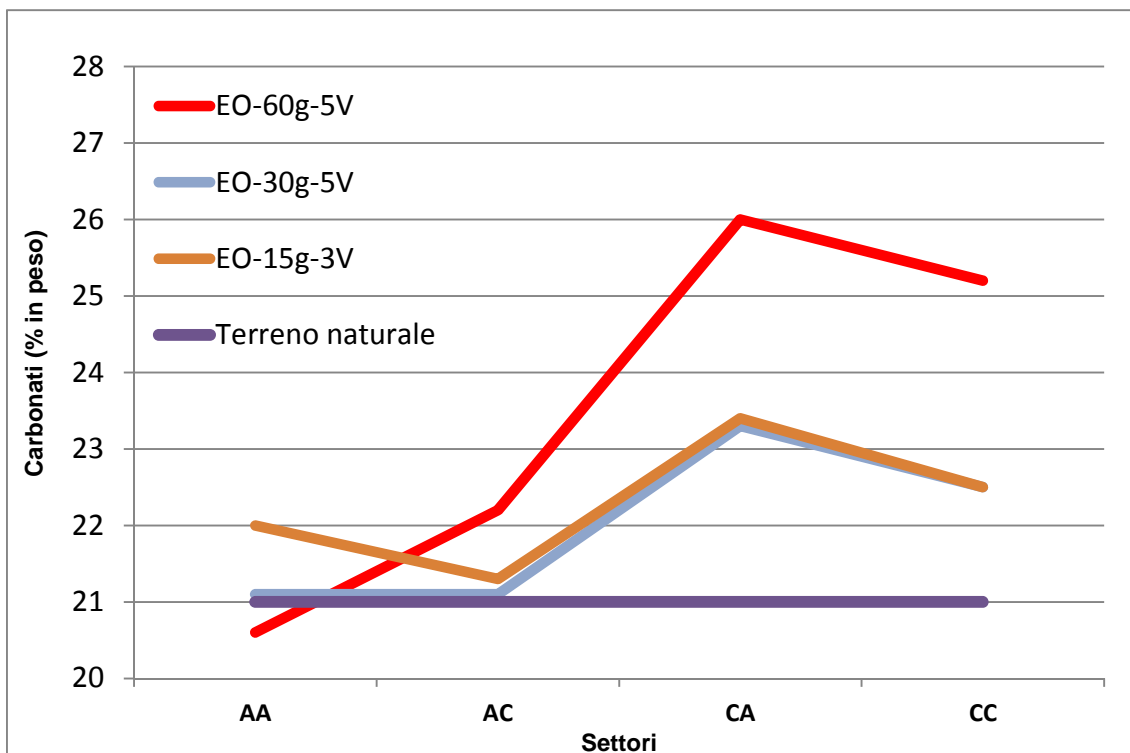
Settori	EO-15g -15V- prova- iniziale	EO-15g- 15V	EO-15g- 3V	EO-30g- 27V	EO-30g- 5V	EO-60g- 5V	EO-60g- 3V- rainwater1	EO-60g- 3V- rainwater2	Media
AA	34	29	29	34	34	32	29	29	31
AC	28	33	33	32	34	32	29	29	31
CA	26	35	32	33	27	31	29	29	30
CC	27	30	33	33	31	33	29	30	31
<b>Media</b>	<b>29</b>	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>29</b>	<b>29</b>	<b>31</b>
W iniziale superiore al Limite Liquido: 44% < W < 50%									

**Tabella 18.**

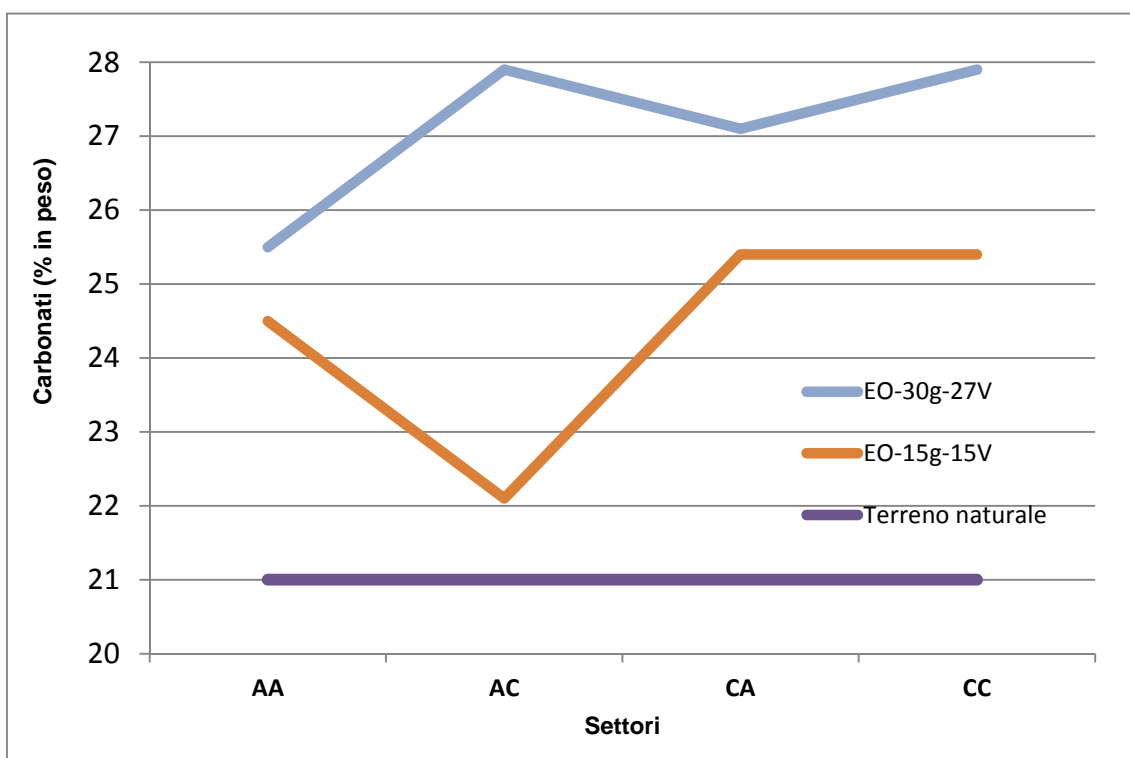
**Carbonati VS Settori Campioni VS Tempo di Trattamento VS Densità di campo.**

Settori	EO-15g -15V- prova- iniziale	EO-15g- 15V	EO-15g- 3V	EO-30g- 27V	EO-30g- 5V	EO-60g- 5V	EO-60g- 3V- rainwater1	EO-60g- 3V- rainwater2	Media
AA	22	25	22	26	21	21	21	21	22
AC	22	22	21	28	21	22	21	26	23
CA	21	25	23	27	23	26	22	24	24
CC	23	25	23	28	23	25	21	23	24
<b>Media</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>22</b>	<b>27</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>21</b>	<b>23</b>	<b>23</b>
Carbonati: 12 % terreno decarbonatato; 21% terreno naturale; 28% terreno carbonatato.									





**Grafico 18. Contenuto di carbonati nei campioni trattati con basse densità di campo elettrico VS Settori del campione.**



**Grafico 19. Contenuto di carbonati nei campioni trattati con alte densità di campo elettrico VS Settori del campione.**

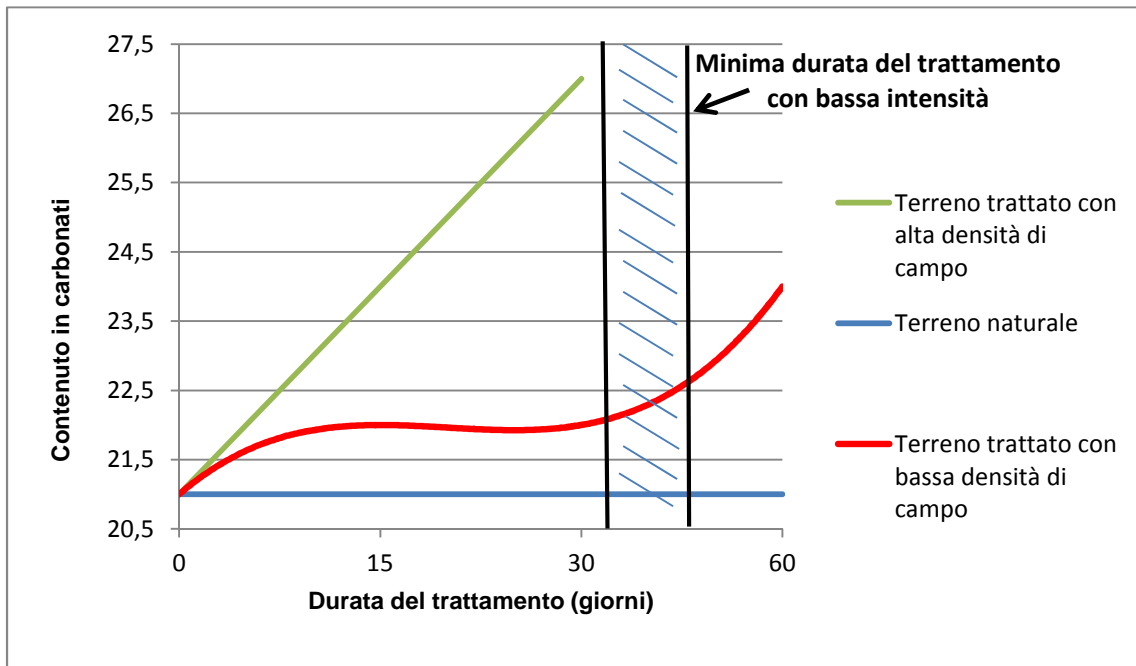


Grafico 20. Confronto tra il trattamento ad alta densità di campo elettrico e quello a bassa densità ai fini della precipitazione dei carbonati.

Tabella 19.

Quadro riassuntivo dei parametri ricavati dalle prove di taglio eseguite.

FASE 1

Parametro	Terreno decarbonatato	Terreno naturale	Terreno carbonatato
$\sigma_v$ : 106,2 kPa	$\tau = 82,41$ kPa	$\tau = 80,64$ kPa	$\tau = 119,19$ kPa
$\sigma_v$ : 176,9 kPa	$\tau = 109,99$ kPa	$\tau = 121,31$ kPa	$\tau = 169,76$ kPa
$\sigma_v$ : 283,1 kPa	$\tau = 136,52$ kPa	$\tau = 183,21$ kPa	$\tau = 261,01$ kPa
Angolo di attrito interno $\varphi$ (°)	16,77°	30,12°	38,88°
Coesione	$c' = 52,75$ kPa	$c' = 18,91$ kPa	$c' = 31,15$ kPa

FASE 2  
Sezione A

Settori	Campioni			Media
	EO-15g-15V- prova-iniziale (283,1 kPa)	EO-15g-15V (283,1 kPa)	EO-15g-3V (283,1 kPa)	
AA	$\tau = 167$ kPa	$\tau = 181$ kPa	$\tau = 167$ kPa	$\tau = 172$ kPa
AC	$\tau = 94$ kPa	$\tau = 164$ kPa	$\tau = 133$ kPa	$\tau = 130$ kPa
CA	$\tau = 148$ kPa	$\tau = 179$ kPa	$\tau = 177$ kPa	$\tau = 168$ kPa
CC	$\tau = 172$ kPa	$\tau = 192$ kPa	$\tau = 146$ kPa	$\tau = 170$ kPa
Media	$\tau = 145$ kPa	$\tau = 179$ kPa	$\tau = 156$ kPa	$\tau = 160$ kPa

Sezione B

Settori	Campioni		Media
	EO-60g-3V-rainwater1 (176,9 kPa)	EO-60g-3V-rainwater2 (176,9 kPa)	
AA	$\tau = 72$ kPa	$\tau = 61$ kPa	$\tau = 66$ kPa
AC	$\tau = 56$ kPa	$\tau = 57$ kPa	$\tau = 56$ kPa
CA	$\tau = 93$ kPa	$\tau = 94$ kPa	$\tau = 94$ kPa
CC	$\tau = 73$ kPa	$\tau = 65$ kPa	$\tau = 69$ kPa
Media	$\tau = 73$ kPa	$\tau = 69$ kPa	$\tau = 71$ kPa

Sezione C

Settori	Campioni			Media
	EO-30g-27V	EO-30g-5V	EO-60g-5V	
AA	$\varphi = 28^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 36^\circ$	$\varphi = 31^\circ$
AC	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 28^\circ$	$\varphi = 37^\circ$	$\varphi = 30^\circ$
CA	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 28^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 33^\circ$
CC	$\varphi = 32^\circ$	$\varphi = 29^\circ$	$\varphi = 31^\circ$	$\varphi = 31^\circ$
Media	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 29^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 31^\circ$

Sezione D

Settori	Campioni			Media
	EO-30g-27V	EO-30g-5V	EO-60g-5V	
AA	$c' = 7,50 \text{ kPa}$	$c' = 0,00 \text{ kPa}$	$c' = 1,0 \text{ kPa}$	$c' = 3 \text{ kPa}$
AC	$c' = 14,94 \text{ kPa}$	$c' = 12,65 \text{ kPa}$	$c' = 0,00 \text{ kPa}$	$c' = 9 \text{ kPa}$
CA	$c' = 0,00 \text{ kPa}$	$c' = 7,28 \text{ kPa}$	$c' = 0,00 \text{ kPa}$	$c' = 2 \text{ kPa}$
CC	$c' = 5,60 \text{ kPa}$	$c' = 0,00 \text{ kPa}$	$c' = 6,0 \text{ kPa}$	$c' = 4 \text{ kPa}$
Media	$c' = 7,0 \text{ kPa}$	$c' = 5,0 \text{ kPa}$	$c' = 2,0 \text{ kPa}$	$c' = 5 \text{ kPa}$

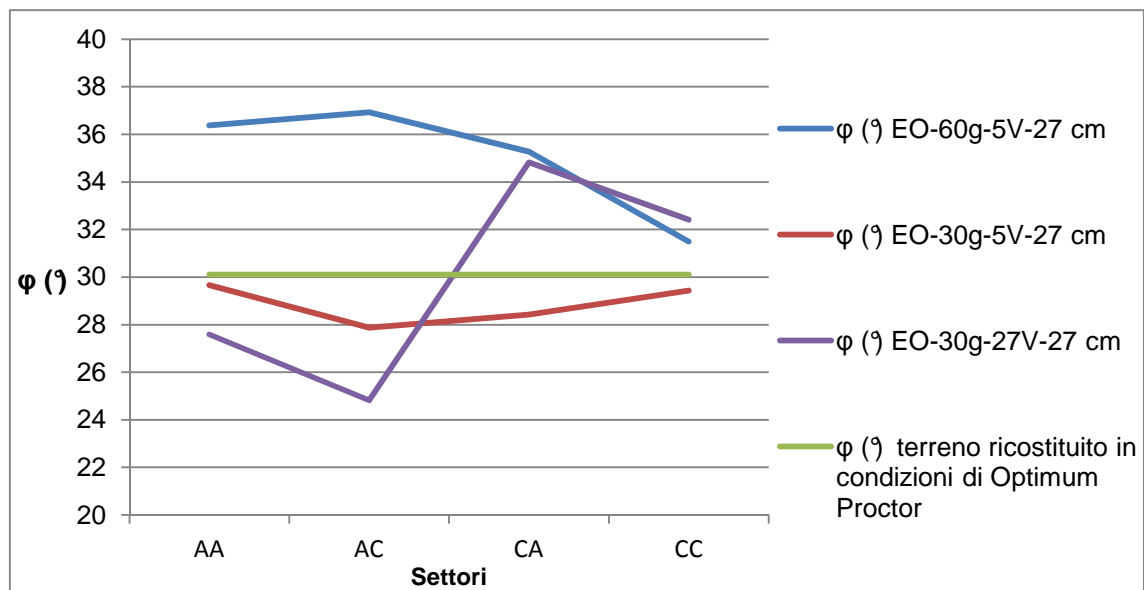


Grafico 21.  $\phi$  (°) VS Settori del campione.

Si riportano tre grafici (Grafico 22, Grafico 23, Grafico 24) in cui è mostrato la variazione dello sforzo di taglio ( $\tau$ ) per le tre diverse pressioni di consolidazione (106,2 kPa – 176,9 kPa – 283,1 kPa), per ciascuno dei quattro settori in cui è stato suddiviso ciascun campione (AA, AC, CA, CC).

Sono stati rapportati gli sforzi di taglio massimi ( $\tau$ ) dei tre campioni presi come riferimento (EO-30g-5V-27cm, EO-60g-5V-27cm, e EO-30g-27V-27cm) col Grafico 11 individuato nella Fase 1 sulla correlazione tra lo sforzo massimo di taglio ( $\tau$ ) per le tre pressioni di consolidazione (106,2 kPa – 176,9 kPa – 283,1 kPa) ed il contenuto di carbonati (Grafico 25, Grafico 26, Grafico 27).

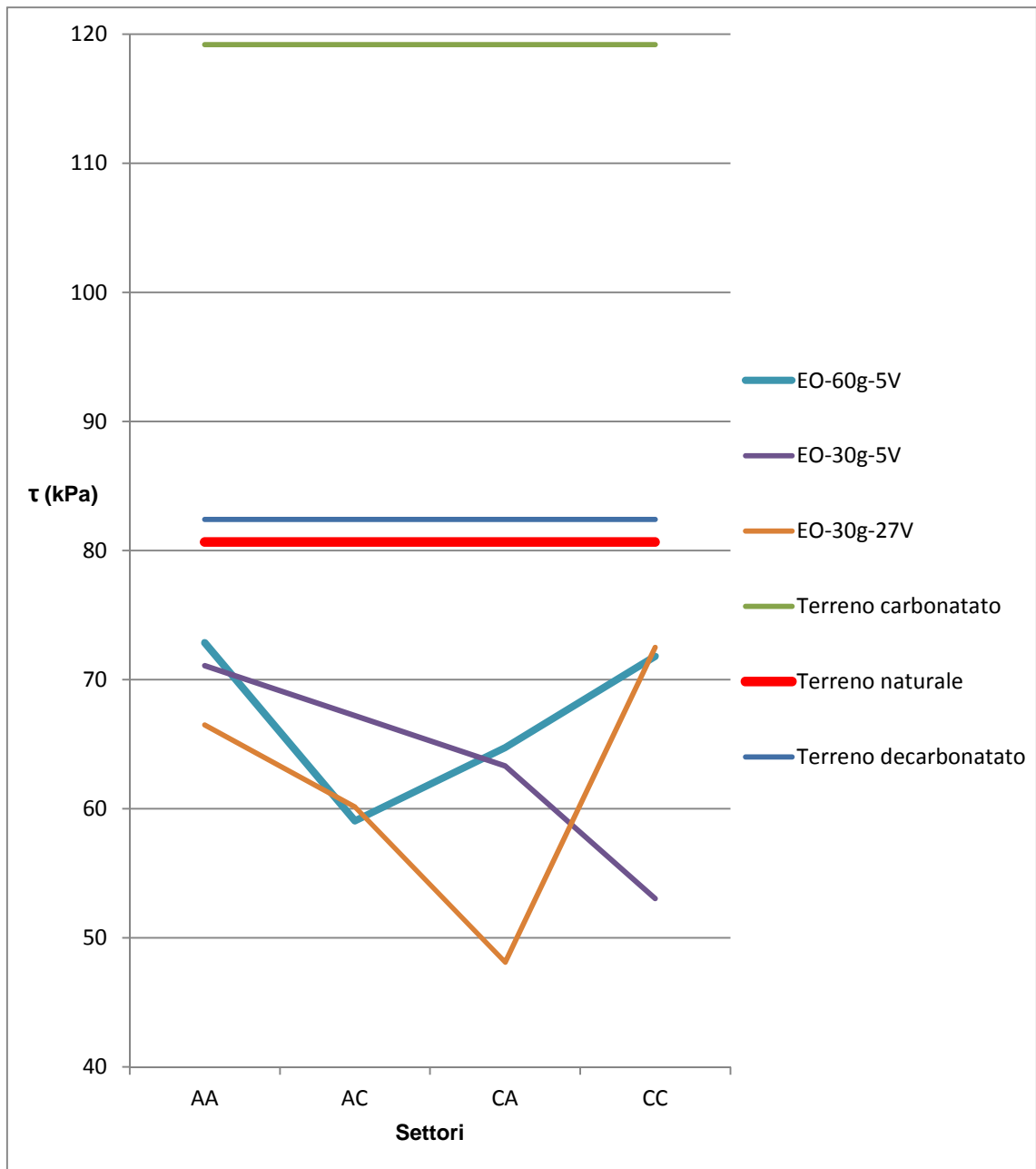


Grafico 22.  $\tau$  di picco con  $\sigma = 106,2$  KPa VS Settori del campione.

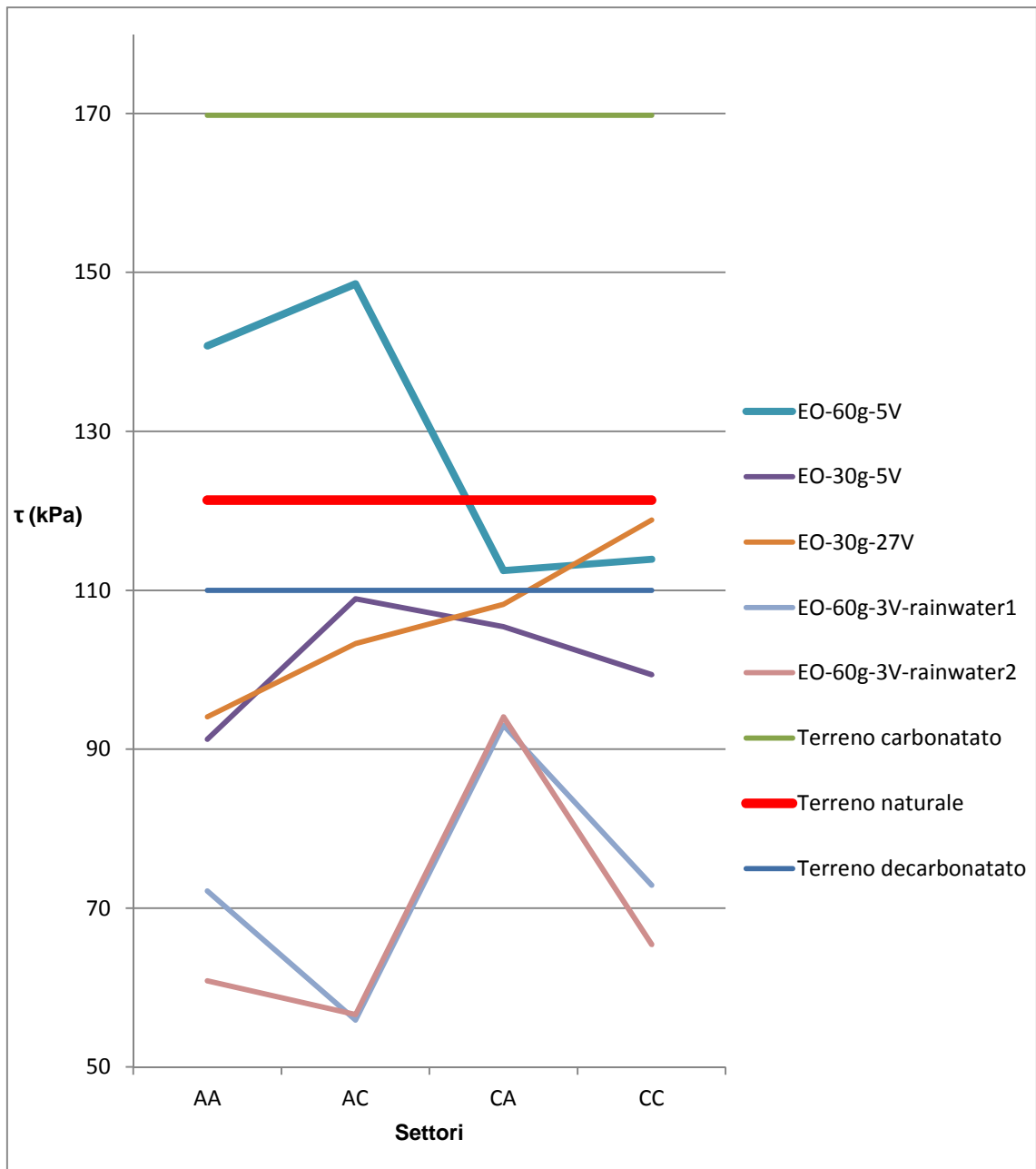


Grafico 23.  $\tau$  di picco con  $\sigma = 176,9$  KPa VS Settori del campione.

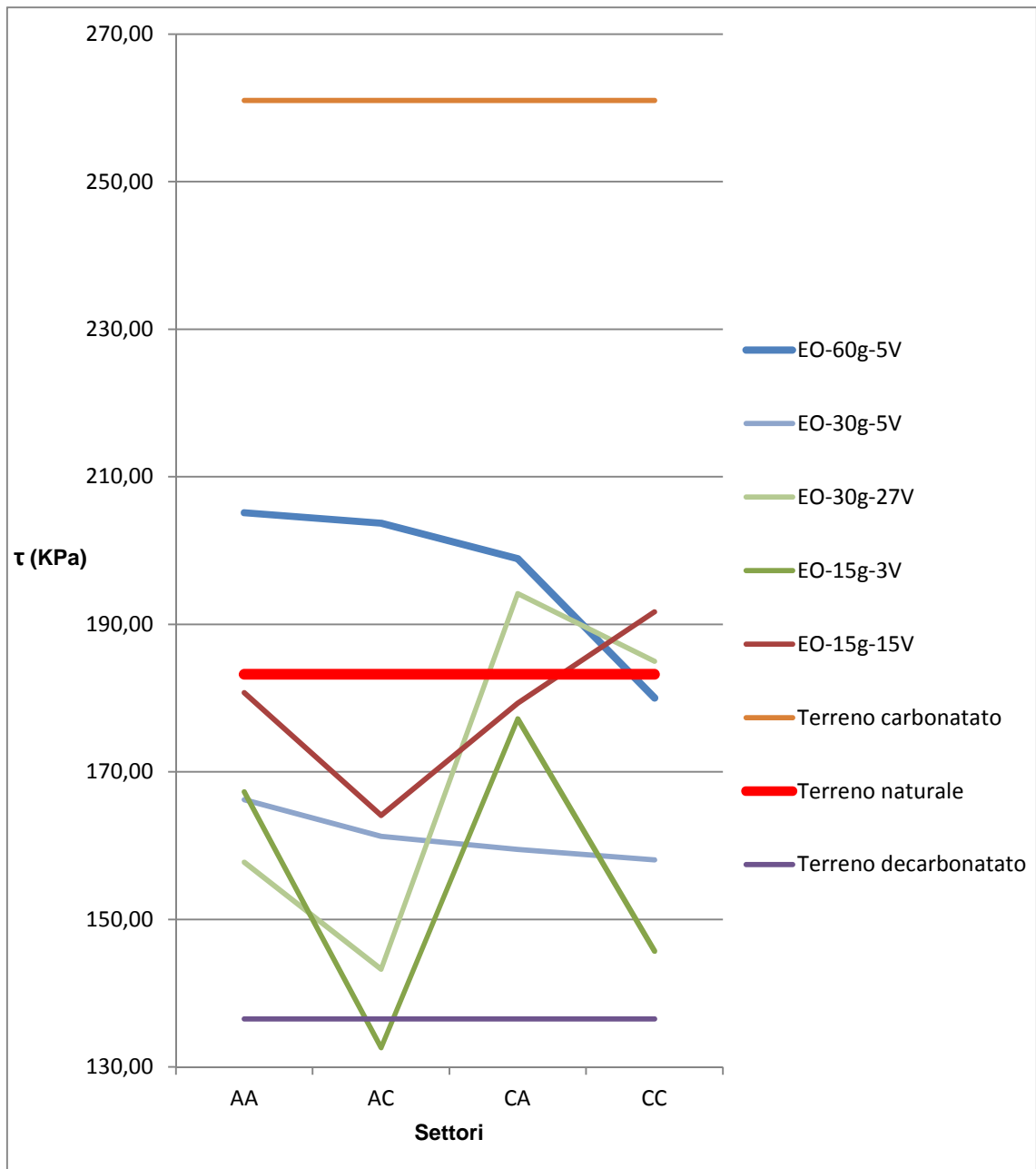


Grafico 24.  $\tau$  di picco con  $\sigma = 283,1$  KPa VS Settori del campione.



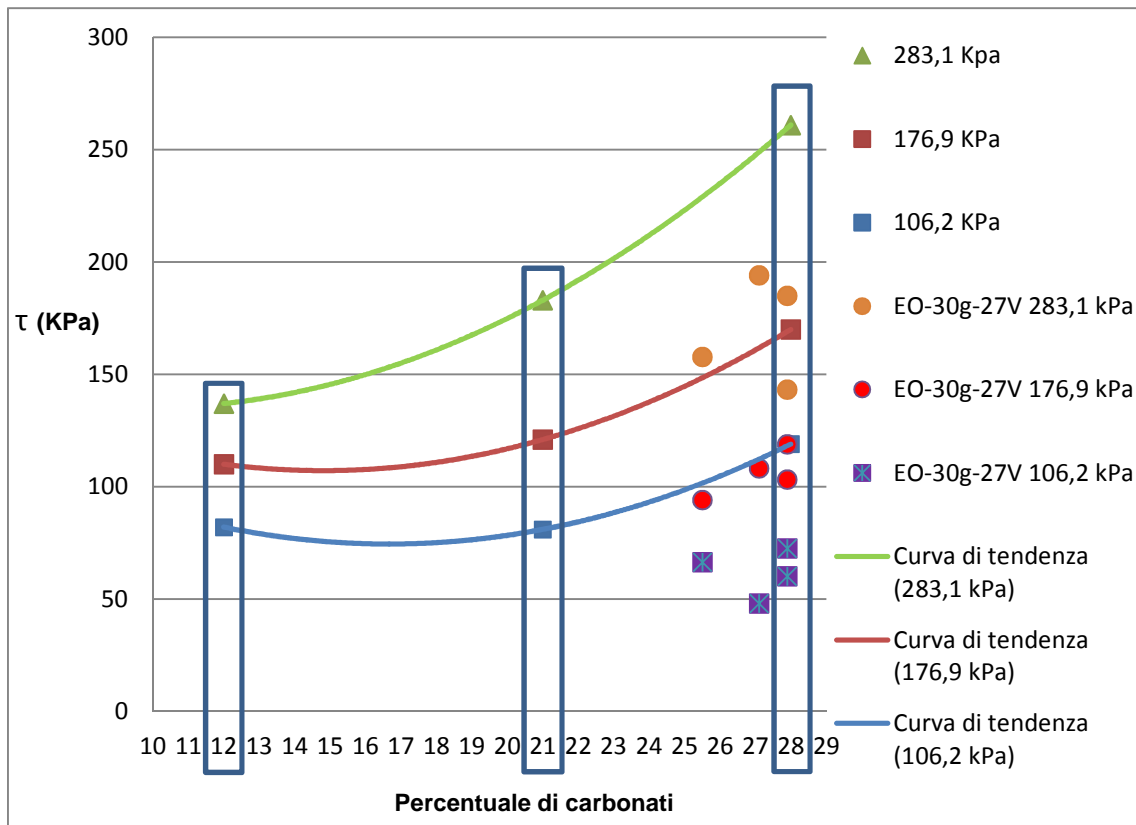


Grafico 25. Correlazione  $\tau$  di picco VS Contenuto in carbonati.

Per il campione EO-30g-27V-27cm, il confronto tra il Grafico 11 di Fase 1 ed i risultati sperimentali, ne evidenzia uno scarto importante. Ciascun gradino di carico ha quattro valori poiché quattro sono i settori di ciascun campione.

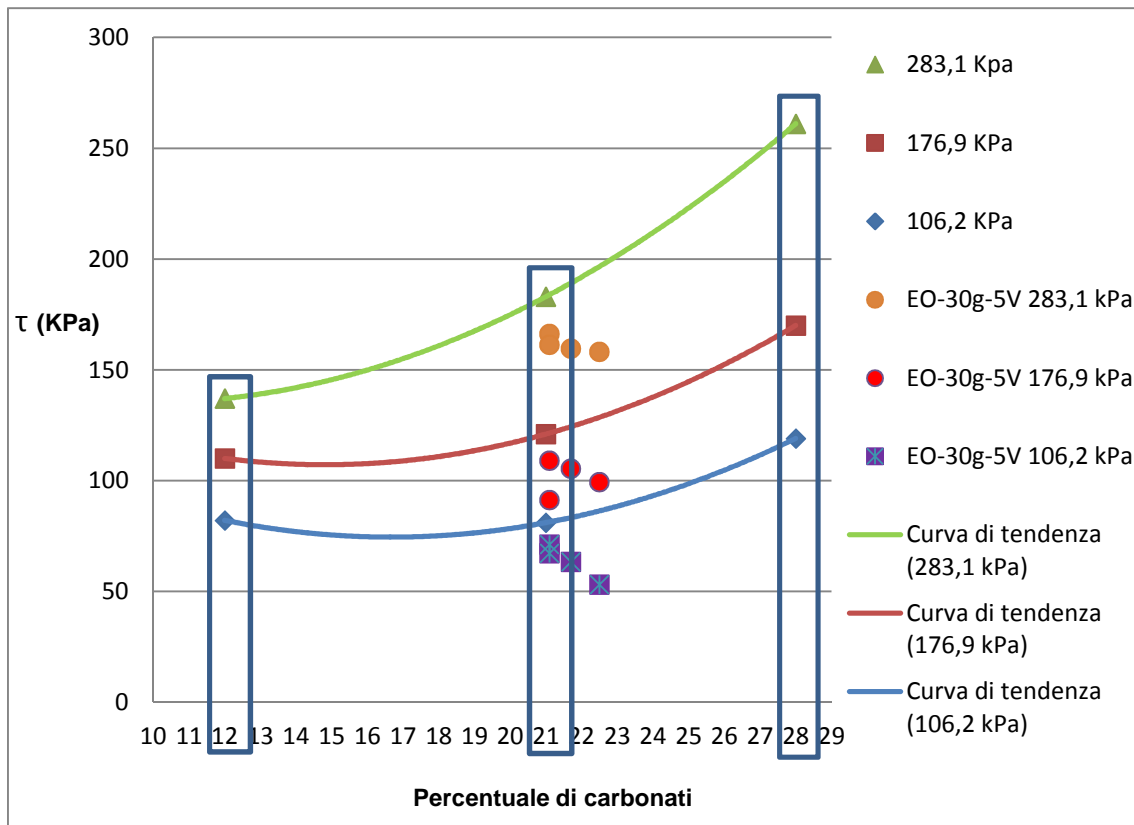


Grafico 26. Correlazione  $\tau$  di picco VS Contenuto in carbonati.

Per il campione EO-30g-5V-27cm, il confronto tra il Grafico 11 di Fase 1 ed i risultati sperimentali, ne evidenzia un minimo scarto a favore del terreno non trattato in condizioni di Optimum Proctor. Ciascun gradino di carico ha quattro valori poiché quattro sono i settori di ciascun campione.

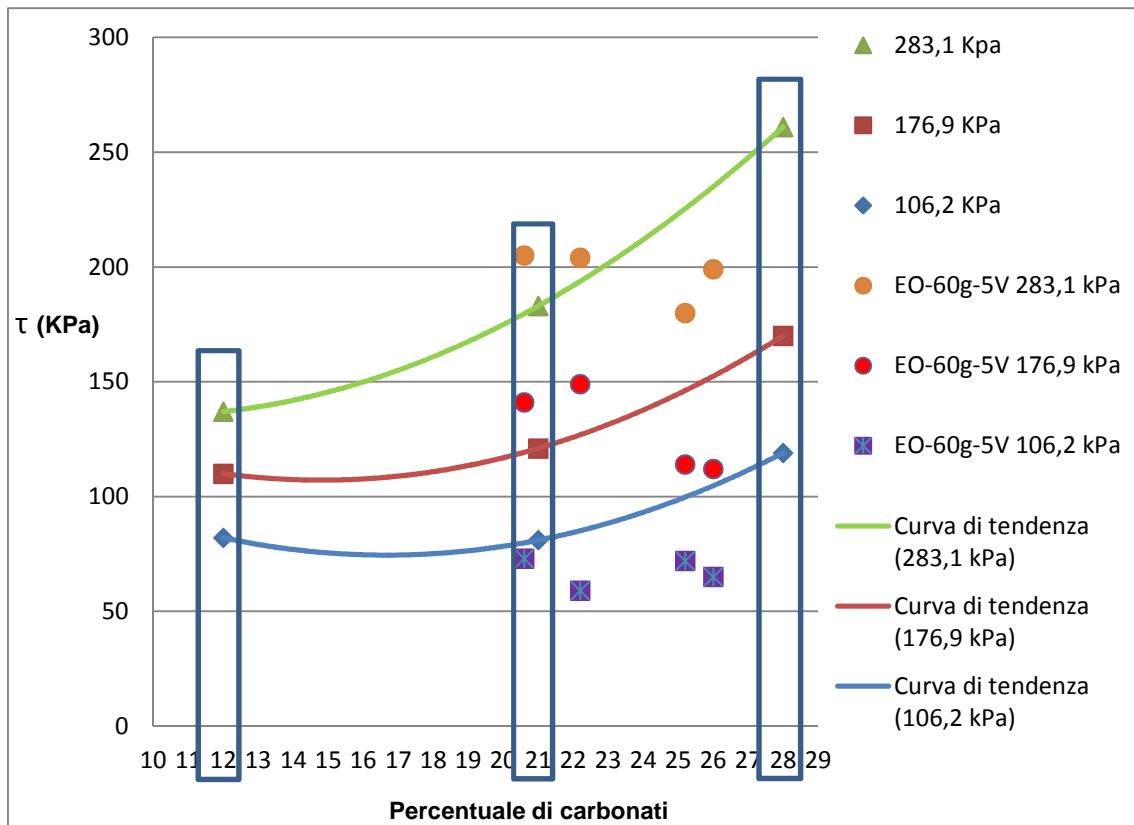


Grafico 27. Correlazione  $\tau$  di picco VS Contenuto in carbonati.

Per il campione EO-60g-5V-27cm, il confronto tra il Grafico 11 di Fase 1 ed i risultati sperimentali, ne evidenzia in generale la corrispondenza. Ciascun gradino di carico ha quattro valori poiché quattro sono i settori di ciascun campione.

È stata effettuata anche una verifica ulteriore dei risultati delle prove di taglio: per i tre campioni EO-30g-5V-27cm, EO-60g-5V-27cm, e EO-30g-27V-27cm sono stati ricavati i valori medi tra i quattro settori di ciascun campione degli sforzi di taglio massimi per ciascuna pressione di consolidazione (Tabella 20). L'angolo di attrito interno che così si ricava per ciascuno dei tre campioni su riportati conferma quanto riportato in Tabella 19, Fase 2, Sezione C riguardo il valore medio di  $\phi$  per ciascun campione.

Tabella 20.

Media degli sforzi di taglio dei tre campioni trattati più significativi per i tre gradini di consolidazione, e risultati delle elaborazioni.

Pressione di consolidazione (kPa)	Settore	Sforzo di taglio campione ( $\tau$ , kPa)		
		EO-30g-27V	EO-30g-5V	EO-60g-5V
283,1	AA	157,74	166,23	205,13
	AC	143,24	161,28	203,72
	CA	194,17	159,51	198,90
	CC	184,97	158,09	180,02
	<b>MEDIA</b>	<b>170,03</b>	<b>161,28</b>	<b>196,94</b>
176,9	AA	94,08	91,25	140,76
	AC	103,27	108,93	148,54
	CA	108,23	105,40	112,47
	CC	118,84	99,38	113,88
	<b>MEDIA</b>	<b>106,11</b>	<b>101,24</b>	<b>128,91</b>
106,2	AA	66,49	71,09	72,86
	AC	60,13	67,20	59,06
	CA	48,10	63,31	64,72
	CC	72,50	53,05	71,80
	<b>MEDIA</b>	<b>61,81</b>	<b>63,66</b>	<b>67,11</b>
$\phi$ medio ( $^\circ$ ), $c' = 0$		31 $^\circ$	29 $^\circ$	<b>35<math>^\circ</math></b>

### 5.2.3.3 Correlazioni tra le variabili considerate

Analizzando i dati ricavati nella sperimentazione in laboratorio, è stato possibile rilevare alcune correlazioni tra le variabili prese in considerazione.

#### 5.2.3.3.1 Correlazione tra il pH ed il VB

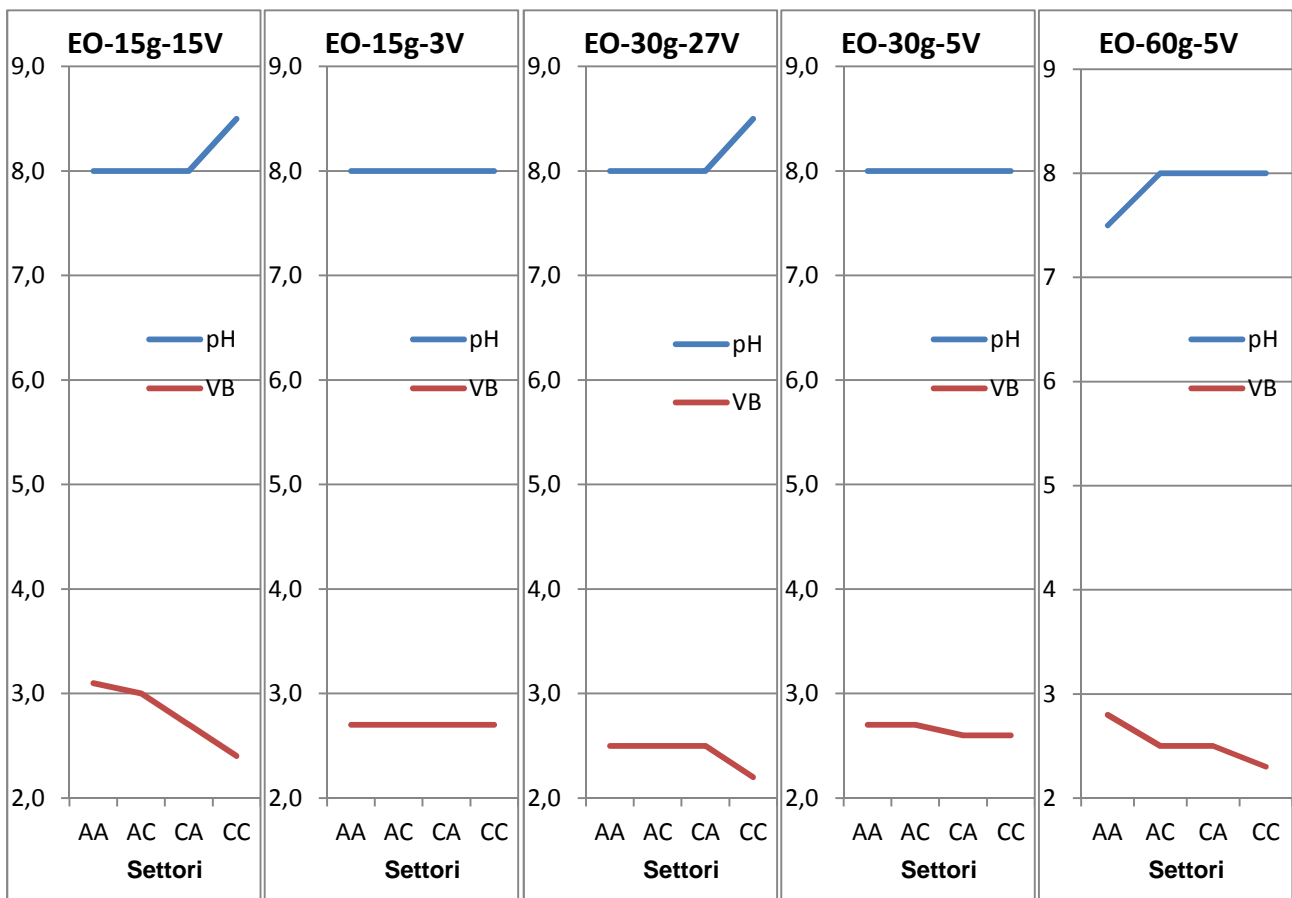


Grafico 28. pH e VB VS Settori del campione.

Analizzando il Grafico 28, si rileva che con il trattamento, in generale, all'incremento dell'uno non corrisponde l'incremento dell'altro e viceversa.

### 5.2.3.3.2 Correlazione tra il contenuto finale di acqua (W) ed i carbonati nel settore

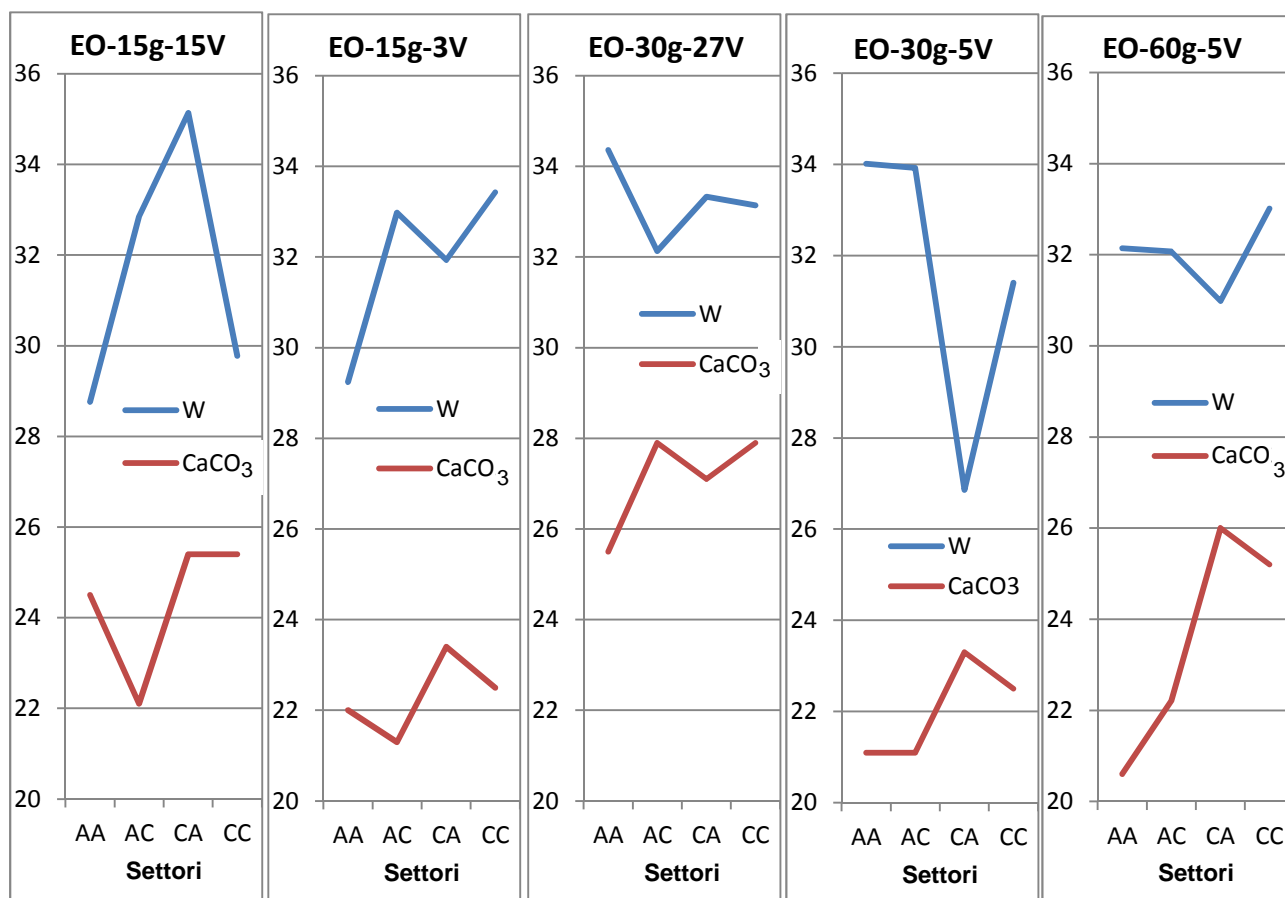
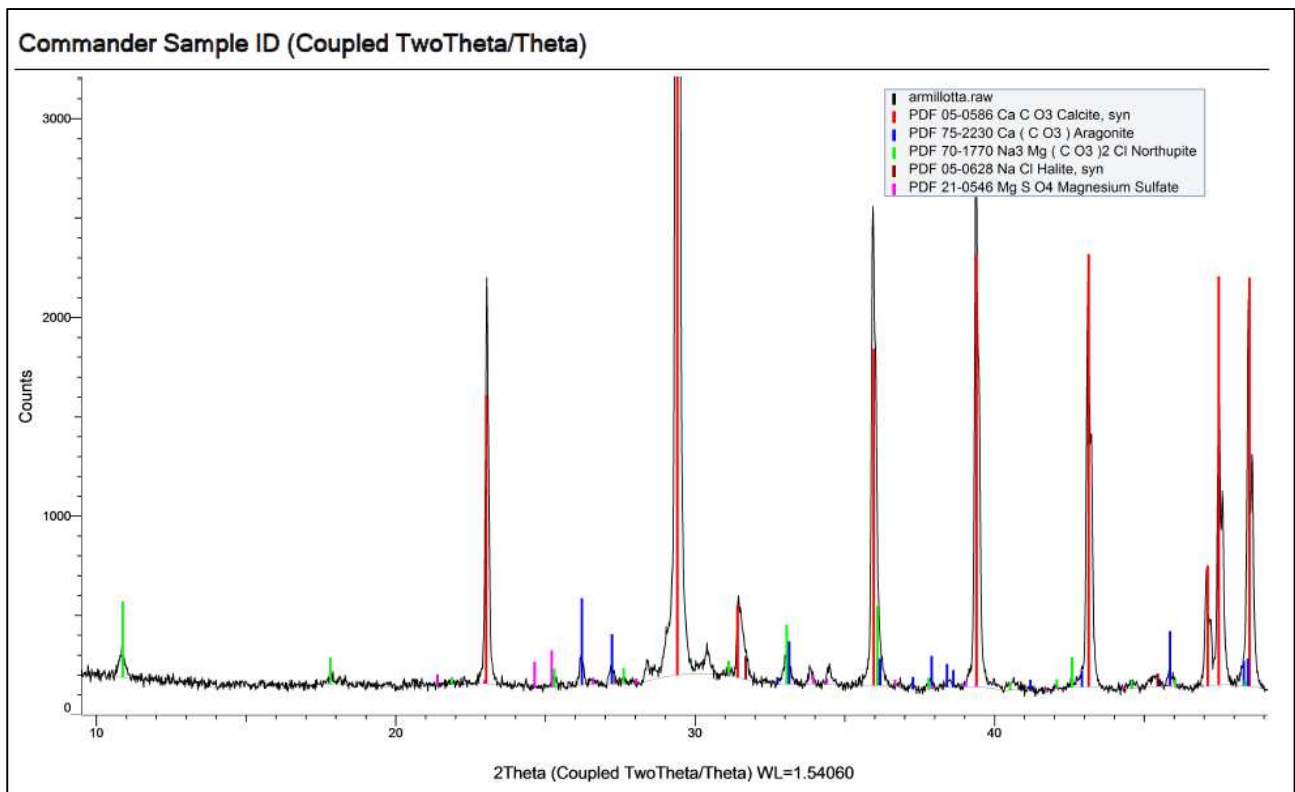


Grafico 29. Umidità (W) e Contenuto di carbonati VS Settori del campione.

Analizzando il Grafico 29, si rileva che il trattamento induce in generale la riduzione del contenuto d'acqua (W) laddove si registra l'incremento nel contenuto di carbonati e viceversa.

Si evidenzia che per tutti e tre i campioni sottoposti a trattamento con basse intensità di campo, in prossimità del settore CC si registra un calo del contenuto in carbonati rispetto al settore CA. È stato raccolto il fluido catodico dal serbatoio al termine del trattamento del campione EO-60g-3V-15cm-rainwater2. Il precipitato è stato sottoposto ad una XRD i cui risultati sono riportati in Figura 12.



**Figura 12. XRD precipitato del fluido catodico.**

Si rileva la presenza di minerali come l'aragonite, la calcite e la northupite. Quest'ultima precipita in condizioni iperaline. Il calo della percentuale di carbonati nel settore CC dei campioni trattati con basse intensità di campo potrebbe avere spiegazione in un ambiente con condizioni fortemente alcaline.

#### 5.2.3.3.3 Correlazione tra la durata del trattamento, il contenuto in carbonati, l'angolo di resistenza al taglio, ed il potenziale di rigonfiamento del terreno coesivo

All'aumentare della durata del trattamento con campi elettrici a bassa densità, si rileva l'aumento del contenuto in carbonati e dell'angolo di resistenza al taglio, e la riduzione del potenziale di rigonfiamento dei minerali argillosi. A tal proposito, vedasi la Tabella 21.

Tabella 21.

Correlazione tra la durata del trattamento, il contenuto in carbonati, il valore dell'angolo di resistenza al taglio ed il potenziale di rigonfiamento del terreno. Tra parentesi, il valore del terreno non trattato.

TRATTAMENTO	CONTENUTO IN CARBONATI (%)	ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO ( $\phi$ )	VB (ml/g)
EO-15g-3V-15cm	22% (21%)	–	2,7 (2,7)
EO-30g-5V-27cm	22% (21%)	29° (30°)	2,7 (2,7)
EO-60g-5V-27cm	24% (21%)	35° (30°)	2,5 (2,7)

#### 5.2.4 Sintesi dei risultati della sperimentazione in laboratorio

I risultati della Fase 1 indicano che

1. i valori di peso specifico dei grani, indice di plasticità (IP) e Valore di Blu (VB) diminuiscono all'aumentare del contenuto in carbonati;
2. l'angolo di resistenza al taglio ( $\phi$ ) aumenta con il tenore di carbonati;
3. le resistenze al taglio di picco del terreno ( $\tau$ ), a parità di carico di consolidazione, aumentano all'aumentare del contenuto in carbonati.

I risultati della Fase 2 mostrano

1. un valore del pH di circa 8 pressoché costante all'interno del campione, che favorisce la precipitazione di agenti cementificanti;
2. un aumento nel contenuto in carbonati in tutti i campioni indipendentemente dalla durata. In particolare, il contenuto in carbonati, a seguito del trattamento a bassa intensità di campo, inizia ad aumentare tra i 30 ed i 60 giorni di trattamento. Questo incremento è significativo per il trattamento durato 60 giorni;
3. una generale riduzione del potenziale di rigonfiamento del terreno (VB), in particolare per il campione EO-30g-27V, e per il campione EO-60g-5V;



4. i valori del contenuto d'acqua al termine del trattamento, indipendentemente dalla durata e dall'intensità del campo elettrico, assumono valori analoghi (32% – 33%), inferiori a quelli di costituzione del campione ( $W > LL$ ). Il mantenimento di questo valore costante nel tempo permette il protrarsi nel tempo del trattamento (almeno fino alla durata massima delle prove eseguite), e favorisce la stabilità del terreno anche di fronte a potenziali eccessi di acqua;
5. nel caso di trattamento durato 60 giorni, che i valori dell'angolo di resistenza al taglio ( $\phi$ ) del campione trattato sono superiori a quello del terreno naturale in condizioni di Optimum Proctor di almeno il 16%. Nel caso del campione EO–30g–5V, i valori dell'angolo di resistenza al taglio ( $\phi$ ) sono simili a quelli del terreno naturale in condizioni di Optimum Proctor;
6. una correlazione tra il pH ed il VB: in generale all'incremento dell'uno corrisponde il non incremento dell'altro; al decremento dell'uno corrisponde il non decremento dell'altro;
7. una correlazione tra il contenuto d'acqua ( $W$ ) ed il contenuto in carbonati: in generale con la riduzione del contenuto d'acqua ( $W$ ) si registra l'incremento nel contenuto di carbonati e viceversa;
8. una correlazione tra la durata del trattamento, il contenuto in carbonati, il valore dell'angolo di resistenza al taglio ed il potenziale di rigonfiamento del terreno: all'aumentare della durata del trattamento con campi elettrici a bassa densità, si rileva l'aumento del contenuto in carbonati e dell'angolo di resistenza al taglio, e la riduzione del potenziale di rigonfiamento dei minerali argillosi;
9. il calo della percentuale di carbonati nel settore CC dei campioni trattati con basse intensità di campo potrebbe essere causato dall'ambiente fortemente alcalino presente nella zona catodica che favorisce la presenza di altre specie mineralogiche, quali la northupite, a scapito della calcite.

#### 5.2.5 Osservazioni sui risultati

Riguardo i risultati delle prove di taglio dei campioni EO–60g–3V–15cm–rainwater1 e EO–60g–3V–15cm–rainwater2, è possibile ipotizzare delle motivazioni sui valori di taglio particolarmente bassi ed anomali. Una la si trova nella pubblicazione di Veniale et al.

(2000): probabilmente, l'interazione del terreno trattato con l'acqua piovana ha prodotto una parziale corrosione del  $\text{CaCO}_3$  con formazione di gel carbonatico, e riassetamento dei minerali argillosi con una fabric subparallela dei minerali argillosi che ne induce la reciproca repulsione, e la conseguente riduzione della resistenza al taglio. Questa ipotesi suggestiva richiede un ulteriore supplemento di ricerca.

L'interazione tra l'acqua piovana ed i due campioni ha ridotto il contenuto in carbonati del terreno, ma non lo ha portato al di sotto del contenuto naturale.

Ciò in natura sarebbe possibile soltanto in presenza di fenomeni fessurativi subverticali con una estensione tale da permettere all'acqua piovana di raggiungere direttamente la zona di terreno oggetto del trattamento, evitando così la funzione tampone svolta dal suolo.

Anche se molto remota, questa ipotesi potrebbe essere favorita dall'impiego di correnti ad alta densità di campo, anche a causa della forte incidenza del fronte acido che interessa fino al 75% del volume trattato, e che quindi permette la dissoluzione dei carbonati. Si evidenzia il pH alcalino delle acque di falda. Tale circostanza rafforza ulteriormente l'esigenza di optare per trattamenti con bassa densità di campo, come proposto nell'ambito di questa ricerca.

#### 5.2.6 Conclusioni

Dai risultati della Fase1, è possibile affermare che aumentando il contenuto di carbonati nel terreno preso in considerazione, diminuisce il potenziale di rigonfiamento dei minerali argillosi (VB), diminuisce l'intervallo di plasticità del terreno coesivo (IP), migliora il valore dell'angolo di attrito interno del terreno coesivo ( $\phi$ ); in altri termini, i valori dei parametri che afferiscono alla stabilità dei versanti.

Dai risultati della Fase 2, è emerso che nei terreni coesivi saturati con acqua della rete domestica, trattati con i campi elettrici a basse intensità di campo aumenta il contenuto di carbonati nel terreno trattato, diminuisce il potenziale di rigonfiamento dei minerali argillosi (VB) ed il contenuto d'acqua, migliora il valore dell'angolo di attrito interno del terreno coesivo ( $\phi$ ). La diminuzione ed il mantenimento della costanza nel tempo del contenuto d'acqua permette il protrarsi nel tempo del trattamento (almeno fino alla durata

massima delle prove eseguite), e favorisce la stabilità del terreno anche di fronte a potenziali eccessi di acqua. In altri termini, il trattamento del terreno coesivo saturo con basse intensità di campo oltre i 30 – 40 giorni di trattamento favorisce il miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni e quindi la stabilizzazione di un movimento gravitativo in terreni coesivi (soil slip).

L'interazione immediata del terreno trattato con l'acqua piovana, evitando la funzione tampone del terreno naturale, porta

- ad effetti negativi sulle caratteristiche geotecniche dei terreni;
- alla riduzione del contenuto di carbonati.

Queste ultime evidenze sono importanti alla luce degli studi di Simeoni (1998), Chiappone (1999), e di Veniale et al. (2000).

### 5.3 Procedura sperimentale su modello fisico

Per verificare l'efficacia del trattamento di un terreno coesivo con campi elettrici a bassa densità in condizioni simili a quelle reali, si è ritenuto opportuno realizzare un modello fisico che simuli un versante costituito da terreno coesivo omogeneo insaturo.

La sperimentazione su modello fisico è stata svolta in due fasi:

- Fase A: verifica del comportamento di un modello fisico di terreno naturale insaturo omogeneo non trattato (NT) sottoposto a carichi crescenti fino al suo collasso (n.7 prove);
- Fase B: verifica del comportamento di un modello fisico di terreno naturale insaturo omogeneo trattato (T) con corrente continua a basso potenziale (15 volt, circa 0,2 V/cm) per 60 giorni, e poi sottoposto a carichi crescenti fino al suo collasso (n.2 prove).

Ai fini della realizzazione della sperimentazione su modello fisico, sono state effettuate le seguenti operazioni preliminari alla preparazione dei modelli da collassare:

- verifica della conducibilità elettrica su campioni di terreno insaturo con diverso grado di costipazione;
- realizzazione dell'impianto;
- prove di costipazione del terreno utilizzato per il modello fisico.

I dettagli delle su menzionate operazioni preliminari sono riportati in appendice 9.4

### 5.3.1 Realizzazione del modello fisico

Per la realizzazione dei modelli fisici, si è proceduto alla costipazione di strati di terreno di 5 cm di spessore sottoposti ciascuno a 50 rullate (appendice 9.4.4) temporaneamente sostenuti da centine (Foto 9a). Il profilo anteriore del modello è stato poi sagomato. Il collasso è stato indotto per mezzo di un martinetto idraulico del peso di 4,8 kg, poggiante su una piastra di metallo delle dimensioni 30 cm X 30 cm X 1 cm (900 cm<sup>2</sup> di superficie) del peso di 7.060 gr, contrastato in sommità da una putrella (Foto 9b).

Sono stati realizzati complessivamente 11 modelli: 2 di prova, 7 modelli fisici non trattati (NT), e 2 modelli fisici trattati con i campi elettrici a bassa densità (T). Dopo ciascun collasso, il terreno non è mai stato riutilizzato.

Il terreno in attesa di essere adoperato è stato interamente isolato dal pavimento e coperto da teloni di plastica impermeabile (Foto 10a).

Prima di ciascuna apposizione in opera, si è provveduto al rimescolamento parziale del terreno da utilizzare, alla misurazione della sua umidità, alla sua eventuale integrazione con spruzzi di acqua distillata fino al raggiungimento del 19%. Nell'angolo posteriore – destra dell'impianto, è stato apposto un tubo verticale di plexiglass fessurato nella sua parte inferiore per monitorare giornalmente un eventuale accumulo di acqua libera poi mai verificatosi (Foto 26).

Al termine della realizzazione di ciascun modello, si sono lasciati passare alcuni giorni prima di procedere col collasso (Foto 11).

L'intera struttura è sempre stata coperta con teloni impermeabili (Foto 10b), salvo che nei momenti di svolgimento del collasso e delle rilevazioni sui modelli. Si è comunque evitata la formazione superficiale di zone di terreno più asciutto spruzzando un po' d'acqua distillata laddove ce ne fosse bisogno.

È stata svolta la rilevazione degli assorbimenti dei due modelli trattati.



a



b

Foto 9. a) Costipazione del terreno sostenuto da centine; b) Sistema di carico del terreno.



a



b

Foto 10. a) Terreno da utilizzare contenuto e coperto da teloni impermeabili; b) Modello fisico coperto in attesa del collasso.

### 5.3.2 I collassi

La procedura di carico che ha portato al collasso è stata identica per tutti i modelli realizzati. L'applicazione del carico è avvenuta progressivamente secondo la seguente sequenza: 7,0 kPa, 14,0 kPa, 21,0 kPa, 24,4 kPa, 27,9 kPa, 31,4 kPa, 34,9 kPa, 38,4 kPa, 41,9 kPa. Tra un carico ed il suo successivo sono trascorsi uguali intervalli di tempo (un'ora).

Al termine dell'applicazione di ogni gradino di carico è stata realizzata una ripresa fotogrammetrica utilizzando tre punti di presa collocati circa alla medesima distanza dal rilevato, lungo un ipotetico arco di circonferenza, per permettere la ricostruzione tridimensionale della deformazione del rilevato indotta dall'applicazione del singolo livello di carico. Il successivo confronto delle singole deformate ha permesso di apprezzare il progresso delle deformazioni del terreno durante le fasi di carico e di individuare il momento corrispondente al reale collasso del modello.



**Foto 11. Due modelli fisici terminati.**

Dopo il collasso di ciascun modello, con finalità di controllo, è stata determinata l'umidità del terreno ed il peso di volume (Tabella 23).

In particolare, dopo il collasso dei due modelli trattati, è stato prelevato da ciascuno un cospicuo campione di terreno in corrispondenza della superficie di scivolamento per svolgere ulteriori analisi post – trattamento (Tabella 22).

Si riporta in appendice 9.5 una comparazione di due sequenze fotografiche relative ai collassi del Modello fisico NT6, e del Modello fisico T2.

### 5.3.3 Risultati

- Gli assorbimenti di corrente oscillano tra 2,01 e 2,06 mA per circa 0,5 m<sup>3</sup> di terreno trattato (0,06 W/m<sup>3</sup>);
- per il Valore di Blu, il contenuto di carbonati del terreno trattato, ed il pH del terreno trattato, vedasi la Tabella 22;

**Tabella 22.**

**Valori dei parametri del terreno trattato post collasso.**

	VB (ml/g)	CaCO <sub>3</sub> (%)	pH
Modello T1	2,5 (2,7)	23% (21%)	8 (8,46)
Modello T2	2,5 (2,7)	24% (21%)	8 (8,46)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.

- per il contenuto d'acqua, il peso di volume secco, e la pressione di collasso, vedasi la Tabella 23;

**Tabella 23.**

**Valori di umidità e peso di volume secco del terreno non trattato e trattato post collasso dei modelli, e valori delle pressioni di collasso.**

		$\gamma$ secco (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ secco medio (gr/cm <sup>3</sup> )	W (%)	W media (%)	Pressione di collasso	Pressione media di collasso	Pressione di sviluppo del collasso	Pressione media di sviluppo del collasso
FASE A	Modello NT 1	1,40	1,39	19,61	19,44	23,7 kPa	27,3 kPa	32,8 kPa	32,9 kPa
	Modello NT 2	1,29		19,82		29,3 kPa		34,9 kPa	
	Modello NT 3	1,41		19,88		29,3 kPa		34,9 kPa	
	Modello NT 4	1,39		20,70		29,3 kPa		34,9 kPa	
	Modello NT 5	1,44		20,55		30,7 kPa		33,5 kPa	
	Modello NT 6	1,42		17,15		24,4 kPa		31,4 kPa	
	Modello NT 7	1,35		18,38		24,4 kPa		27,9 kPa	
FASE B	Modello T1	1,31	1,31	19,30	19,45	36,3 kPa	37,0 kPa	37,0 kPa	39,5 kPa
	Modello T2	1,30		19,60		37,7 kPa		41,9 kPa	

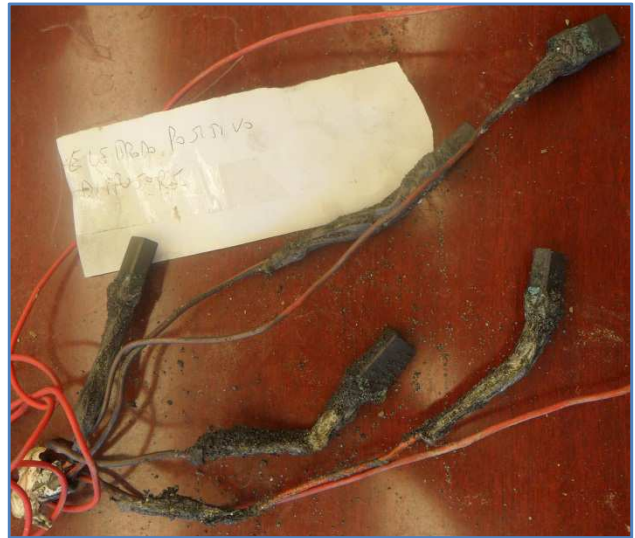
- al termine dei due trattamenti, attorno ai catodi ricoperti da una patina biancastra (Foto 1 e Foto 13a) si è formato un agglomerato di terreno con una percentuale in carbonati del 24% e del 26% (Foto 28, Foto 12);
- sono state elaborate le deformazioni del modello fisico in funzione del carico applicato (Grafico 30, Grafico 31, Grafico 32 e Grafico 33).



Foto 12. Catodi del modello fisico T1.



a



b

Foto 13. a) Ingrandimento della Foto 12; b) anodi del modello fisico T2.



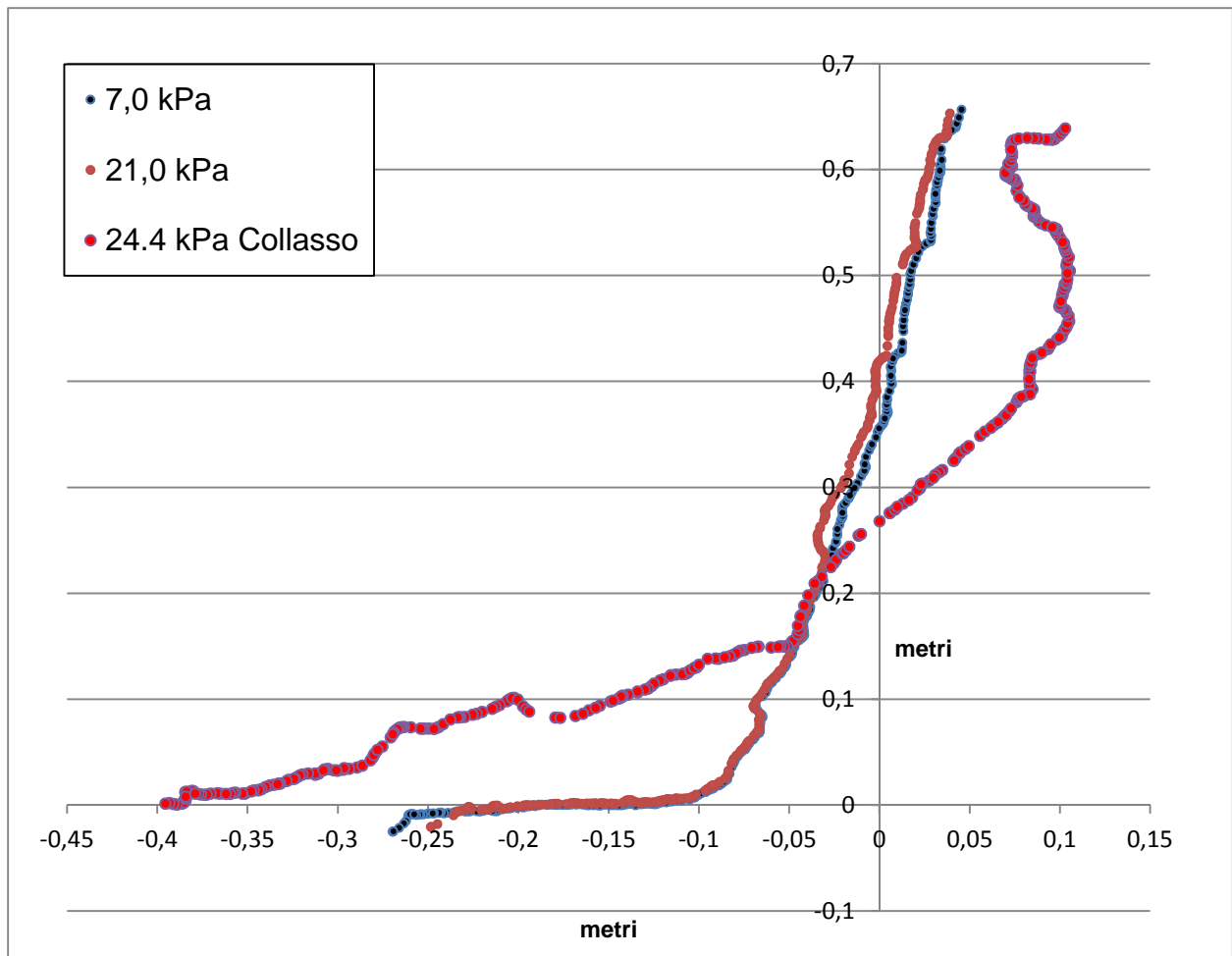


Grafico 30. Deformazioni del Modello fisico NT6.

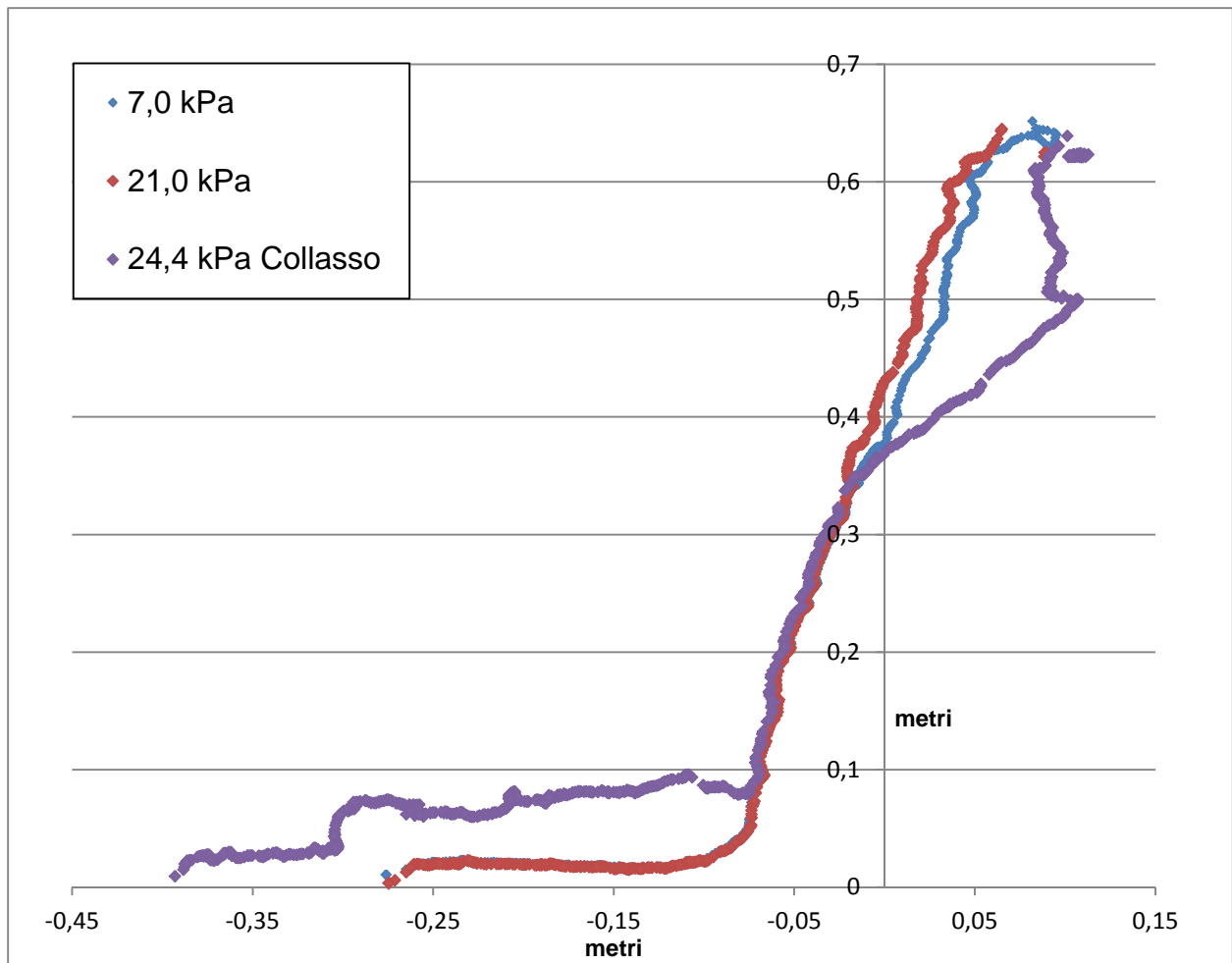


Grafico 31. Deformazioni del Modello fisico NT7.

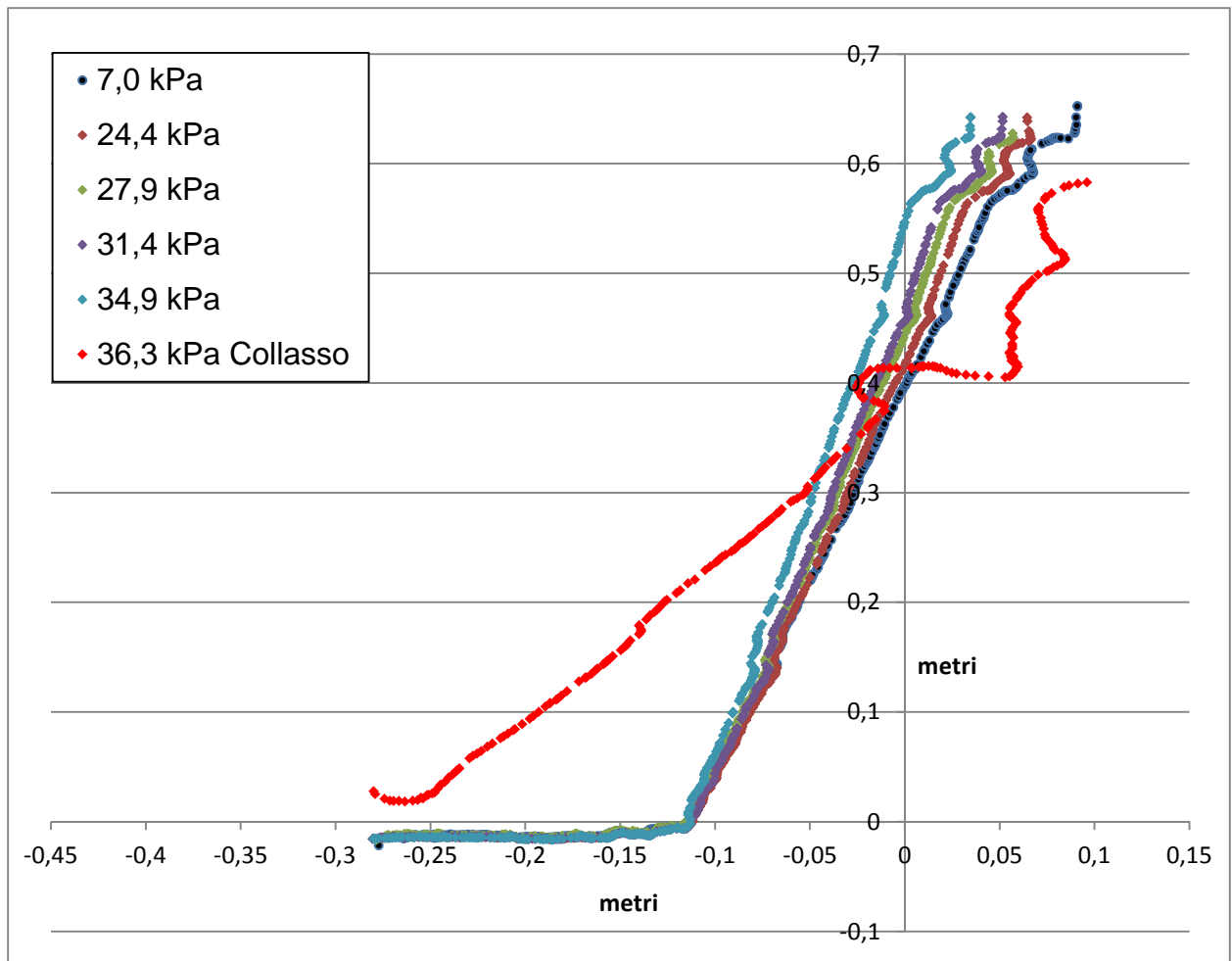


Grafico 32. Deformazioni del Modello fisico T1.

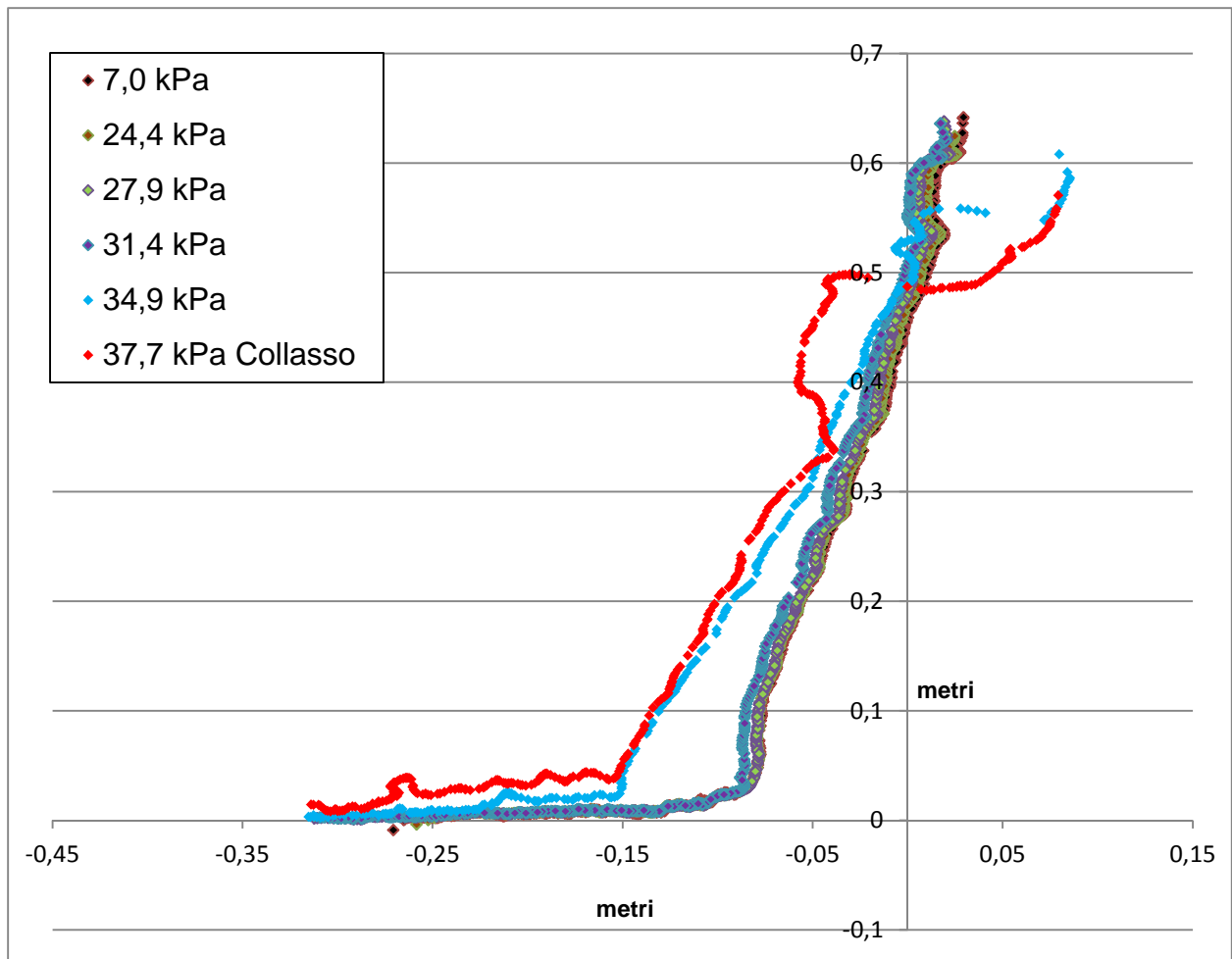


Grafico 33. Deformazioni del Modello fisico T2.

#### 5.3.4 Analisi dei risultati

I risultati indicano che

- l'applicazione del trattamento allo stesso terreno coesivo utilizzato nella sperimentazione laboratoriale in condizioni di non completa saturazione può essere efficace (paragrafo 9.4.2);
- gli assorbimenti di corrente sono molto bassi e possono essere stimati nell'ordine di poco più di  $4 \text{ mA} / \text{m}^3$  di terreno trattato con densità di campo pari a  $0,2 \text{ V/cm}$ ,  $\Delta V = 15 \text{ V}$  ( $0,06 \text{ W/m}^3$ );
- il Valore di Blu, il contenuto in carbonati ed il pH sono in linea con quanto rilevato nel campione di terreno EO-60g-5V-27cm (Tabella 22 e Tabella 32), con valori del VB inferiori ( $-7,5 \%$ ) rispetto a quelli del terreno non trattato;

- il contenuto in carbonati aumenta lungo la superficie di scivolamento del modello fisico sottoposto a trattamento (Tabella 22);
- la pressione di collasso media del modello fisico trattato è risultata essere maggiore di più del 35% rispetto a quella del modello fisico non trattato, ovvero maggiore del 18% nel confronto tra il peggiore valore di collasso del modello fisico trattato ed il migliore valore di collasso del modello fisico non trattato (Tabella 23);
- nel confronto delle deformazioni delle due categorie di modelli fisici, al collasso del NT corrispondono le prime significative deformazioni del T (Grafico 30, Grafico 31, Grafico 32 e Grafico 33);
- nel collasso dei modelli fisici trattati si riscontra la maggiore resistenza alla deformazione orizzontale (Grafico 30, Grafico 31, Grafico 32 e Grafico 33);
- al termine dei due trattamenti, i catodi erano ricoperti da una patina biancastra, con la formazione di un agglomerato di terreno con una percentuale in carbonati del 24% e del 26% (Foto 1 e Foto 13a).

### 5.3.5 Sintesi dei risultati della procedura sperimentale su modello

I risultati della procedura sperimentale su modello indicano che

- anche in un terreno insaturo è possibile applicare correnti elettriche continue con bassa densità di campo;
- i consumi in termini di energia elettrica sono bassi, dell'ordine di 4 mA / m<sup>3</sup>, quindi è ipotizzabile un'alimentazione in sito con pannelli fotovoltaici;
- a seguito del trattamento di un terreno insaturo, il potenziale di rigonfiamento diminuisce;
- il contenuto in carbonati aumenta lungo la superficie di scivolamento;
- nonostante che la costipazione del terreno non trattato sia risultata maggiore del 6,6%, la pressione di collasso media del terreno trattato è risultata essere maggiore di più del 18% rispetto a quella del terreno non trattato.

### 5.3.6 Osservazioni sui risultati

A fronte dei risultati positivi, è opportuno mettere in evidenza che quanto registrato per il trattamento di questo tipo di terreno insaturo, potrebbe avere effetti maggiori e migliori per durate più prolungate, permettendo opportunamente sia la precipitazione degli agenti cementificanti mediante la diffusione di soluzioni ioniche (idratazione con sistemi di periodica immissione di soluzioni), sia il passaggio allo stato solido dei precipitati cementificanti (forte diminuzione del contenuto d'acqua con sistemi di drenaggio).

Un'altra situazione che offre naturalmente queste condizioni, è la stabilizzazione di rilevati arginali soggetti a movimenti gravitativi ove le due condizioni precedentemente riportate sono offerte dai cicli di magra e di piena dei corsi d'acqua.

### 5.3.7 Conclusioni sulla procedura sperimentale su modello fisico

Al termine di questa procedura sperimentale, si può affermare che i modelli di versante costituiti da terreno coesivo insaturo, sottoposti a trattamento con correnti continue a bassa densità di campo per 60 giorni, registrano un miglioramento delle caratteristiche del terreno afferenti alla stabilità dei versanti.

I modesti consumi elettrici permettono, per l'alimentazione del trattamento, l'installazione in sito di impiantistica fotovoltaica.

## 6. CONCLUSIONI DEL PERCORSO DI RICERCA

L'applicazione di correnti elettriche continue a bassa densità di campo (0,1 – 0,2 V/cm) ad un terreno coesivo saturo dopo 30 – 40 giorni di trattamento induce

- la riduzione dell'attività delle smectiti;
- la riduzione e la stabilizzazione del contenuto in acqua;
- la precipitazione di carbonati nel volume di terreno in cui è stato indotto un ambiente alcalino;
- l'aumento dell'angolo di resistenza al taglio.

L'applicazione di correnti elettriche continue a bassa densità di campo (0,2 V/cm) ad un modello fisico costituito dal medesimo terreno coesivo insaturo, dopo 60 giorni di trattamento induce

- la riduzione dell'attività delle smectiti;
- la stabilizzazione del contenuto in acqua;
- la precipitazione di carbonati nel volume di terreno in cui è stato indotto un ambiente alcalino;
- l'aumento dei valori della pressione di collasso;
- l'aumento della resistenza alle deformazioni orizzontali, e quindi il miglioramento della stabilità del versante artificiale omogeneo insaturo.

L'applicazione in sito mostrerebbe evidenti vantaggi rispetto ad altre tecniche, in termini di costi, di praticità, e dei tempi di realizzazione.

I risultati raggiunti con basse densità di campo possono essere raggiunti anche con alte densità di campo, ma senza gli effetti collaterali negativi di queste ultime.

## 7. PROSPETTIVE

Possono essere così elencate:

- verifica dei risultati raggiunti mediante reiterazione della sperimentazione su altre tipologie di terreni coesivi omogenei;
- applicazione in sito su movimenti gravitativi naturali o artificiali di modeste dimensioni e costituiti da terreni omogenei;
- sperimentazione su terreni non omogenei, sia in condizioni di saturazione, che di insaturazione.



## 8. BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. – Documentazione AIPo – Relazione finale sullo studio delle condizioni di stabilità degli argini fluviali e per la definizione di una metodologia progettuale, convenzione tra AIPo, le Università di Parma, Brescia, Roma “La Sapienza”, e Napoli “Federico II”.
- Airoldi F., Jommi C., Musso G., Paglino E. (2009) – Influence of calcite on the electrokinetic treatment of a natural clay – J Appl Electrochem 39, 2227 – 2237.
- Armillotta P. (2000) – Consolidamento e recupero di cedimenti in terreni coesivi mediante elettrosmosi – Workshop di Geofisica “La Geofisica strumento di monitoraggio ambientale”. In “GEOFLUID 2000”, Presidente del Workshop: prof. Vittorio Illiceto, Piacenza 4 – 7 ottobre.
- Armillotta P. (2002) – Recupero parziale mediante elettrosmosi dei cedimenti differenziali di costruzioni adibite a civili abitazioni con stabilizzazione dei loro terreni di fondazione che presentano la componente argillosa attiva – Atti XXI Convegno Nazionale dell’Associazione Geotecnica Italiana, L’Aquila 11 – 14 settembre.
- Asavadorndeja P., Glawe U. (2005) – Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method – Bull. Eng. Geol. Environ, No.64, 237 – 245.
- Barla G., Barbero M., Castelletto M. (1999) – Fenomeni di instabilità per scivolamento planare nella collina torinese – Rivista Italiana di Geotecnica n.2, 5 – 25.
- Biella G., Clari P., De Franco R., Gelati R., Ghibaudo G., Gnaccolini M., Lanza R., Polino R., Ricci B., Rossi P.M. (1992) – Geometrie crostali al nodo Alpi / Appennino; conseguenze sull’evoluzione cinematica dei bacini neogenici – 76<sup>o</sup> Congresso Soc. Geol. It., Firenze, Riassunti, p. 195.
- CARG – Guastalla – Foglio n.182, Regione Emilia Romagna.
- Caruso M. (2002) – Studio della resistenza di un limo costipato mediante prove di taglio diretto con misura di suzione – Tesi di Laurea Magistrale – Politecnico di Milano.
- Cassano E., Anelli L., Fichera R., Capelli V. (1986) – Pianura Padana: interpretazione integrata di dati geofisici e geologici – 73<sup>o</sup> Congr. Soc. Geol. It. pp.1 – 27 Roma, Ed. AGIP, S. Donato Milanese.

- Chang-Yu O., Shao-Chi C., Yi-Guang W. (2009) – On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions – *Applied Clay Science* n.44, 130 – 136.
- Chiappone A. (1999) – Gli scivolamenti planari delle Langhe: uno studio di tipo meccanico e mineralogico per la definizione del modello geotecnico – Tesi di dottorato – Politecnico di Torino.
- Cigagna M. (2006) – Applicazione delle tecniche elettrosmotiche alla consolidazione dei fanghi di risulta dei processi mineralurgici – Tesi di Dottorato di Ricerca in Geingegneria XIX Ciclo – Università degli Studi di Cagliari – Dipartimento di Geingegneria e Tecnologie Ambientali.
- Forlati F., Lancellotta R., Osella A., Scavia C., Veniale F. (1996) – The role of swelling marls in planar slides in the Langhe region – Proc. of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Trondheim, 17 – 21 giugno.
- Forlati F., Piana F. (1998) – Vincoli geologico-strutturali e caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi – Atti del Convegno “Il ruolo della meccanica e dell’ingegneria delle rocce nella protezione del territorio e dell’ambiente” a cura di G. Barla; sesto ciclo di conferenze di meccanica e di ingegneria delle rocce (MIR), Torino 25 – 26 novembre 1998, p.11.
- Gelati R., Gnaccolini M. (1988) – Sequenze deposizionali in un bacino episuturale, nella zona di raccordo tra Alpi ed Appennino settentrionale – Atti Ticinesi di Scienze della Terra, vol.31 (1987/1988), pp. 340 – 350
- Govi M., Sorzana P.F. (1982) – Frane di scivolamento nelle Langhe cuneesi febbraio – marzo 1972, febbraio 1974 – Bollettino dell’Associazione Mineraria Subalpina, Anno XIX, n.1 – 2, 231 – 264.
- Mancini P.(1971) – Stabilizzazione elettrochimica dei terreni interessati dallo scavo di una trincea autostradale – RIG, anno V, n.4 bis, pag. 300.
- Meisina C. (2000) – Predicting swelling/shrinkage potential using the blue methylene method: some examples in italian clayey soils. Proc. Int. Conf. on Geotechnical & geological Engineering Geoeng 2000, Melbourne, 19-24 november 2000.
- O’Bannon C. (1977) – Field study to determine the feasibility of electro-osmotic dewatering of dredged material, Dredged Material Research Program, U.S. Army Engineer District.

- Regione Piemonte (1998) – Eventi alluvionali in Piemonte – Dossier a cura della Direzione Servizi Tecnici e Prevenzione, pagg. 238 – 265.
- Regione Piemonte (1998) – Eventi alluvionali in Piemonte 2 – 6 novembre 1994, 8 luglio 1996, 7 – 10 ottobre 1996 – AA.VV. Torino, p. 415.
- Regione Piemonte (2006) – Langhe Piemontesi – Dossier a cura del centro Regionale per le ricerche territoriali e geologiche, p .3.
- Riboli M. (2014) – Scivolamenti superficiali in formazioni sedimentarie marnose: condizioni di innesco e case histories – Tesi di laurea magistrale – Università degli Studi di Parma – D.I.C.A.T.eA.
- Simeoni L. (1998) – Fenomeni di scivolamento planare nelle Langhe – Tesi di dottorato – Politecnico di Torino.
- Veniale F. (1978) – Consolidazione elettrosmotica e chimica – Atti del Seminario su Consolidamento di terreni e rocce in posto nell'ingegneria civile, Stresa.
- Veniale F., Simeoni L., Rodriguez-Navarro C., Setti M. (2000) – The role of “fabric” and mineralogy in planar sliding processes in marly rocks: investigation using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Environmental-SEM, RIG 2 – 23.
- Wang, N.-W., Jiao, J., Xiu, Y.-J., Zhang, L. (2012) – EFFECT OF ELECTRODE SPACING ON STANDARD ELECTRO-OSMOTIC DEWATERING – Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering – Volume 34, Issue SUPPL., Pages 177 – 181.
- Zhuang, Y.-F., Wang, Z., Chen, L. (2008) – MODEL TEST OF SLOPE REINFORCEMENT THROUGH ELECTRO-OSMOSIS AND ITS NUMERICAL SIMULATION BASED ON ENERGY ANALYSIS METHOD – Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics – Volume 29, Issue 9, September 2008, Pages 2409 – 2414.

## 9. APPENDICE

### 9.1 Dettagli della prova di Optimum Proctor "E" – paragrafo 5.2.1.7

**Tabella 24.**  
**Quadro della prova di Optimum Proctor "E".**

Peso specifico (g/cmc)	2,7		Peso fustella (g)		1861	
A Standard			Volume fustella (cmc)		943	
D Modificato						
Prova		(n.)	1	2	3	4
Peso fustella + terra compattata		(g)	3598	3701	3749	3705
Peso terra compattata		(g)	1737	1840	1888	1844
Peso di volume umido		(g/cmc)	1,84	1,95	2,00	1,96
Capsula		(n.)	1	2	3	4
Peso capsula		(g)	17,42	17,34	17,73	17,75
Peso capsula + terra umida		(g)	54,35	46,04	61,74	73,06
Peso capsula + terra secca		(g)	50,37	42,09	54,44	62,26
Umidità		(%)	12,1	16,0	19,9	24,3
Peso di volume secco		(g/cmc)	1,64	1,68	1,67	1,57
Volume vuoti		(%)	0,52	0,44	0,42	0,47
Saturazione		(%)	95,86	97,29	97,94	98,09
Yd		(g/cmc)	2,01	1,87	1,74	1,62
Umidità		(%)	12,08	15,96	19,89	24,26
Peso di volume secco		(g/cmc)	1,64	1,68	1,67	1,57

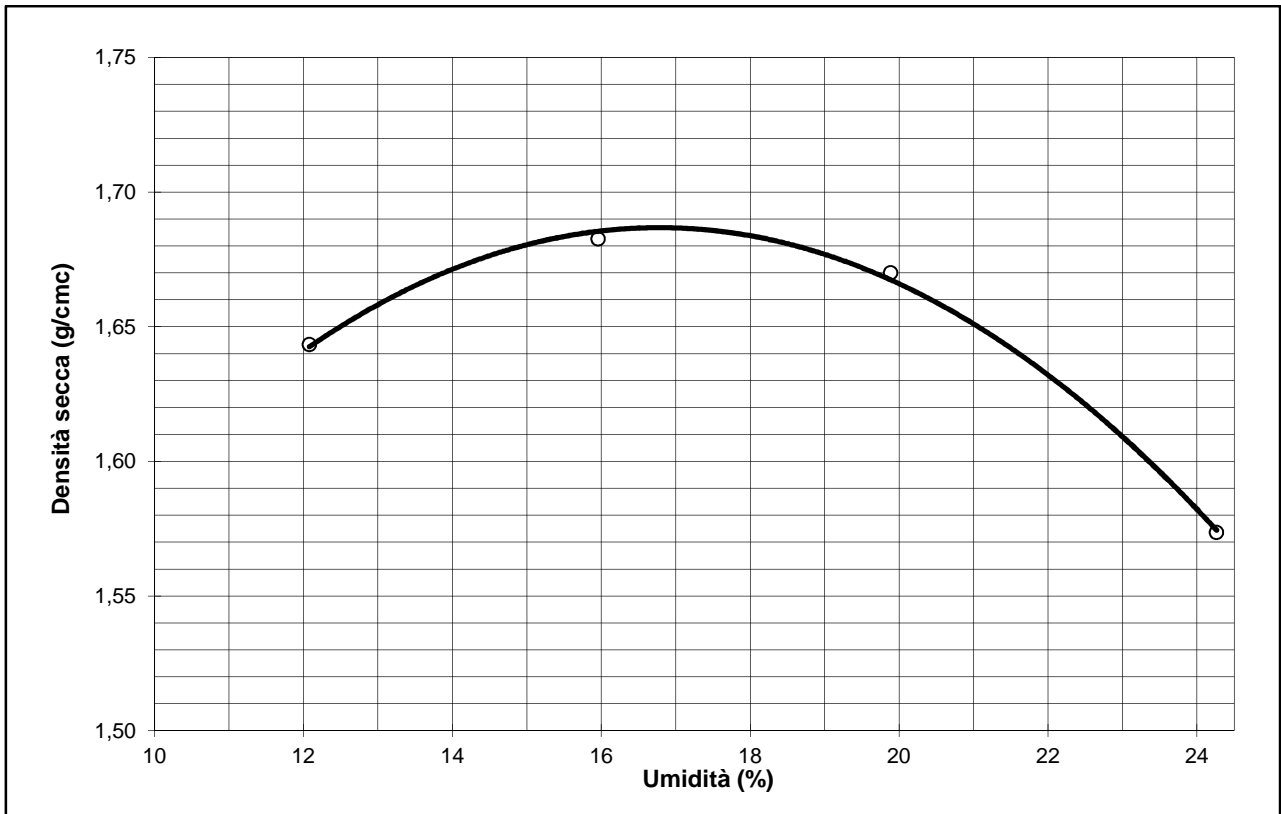


Grafico 34. Curva di costipamento "Proctor E".

9.2 Involuppi di rottura dei terreni – Fase 1 – paragrafo 5.2.1.8

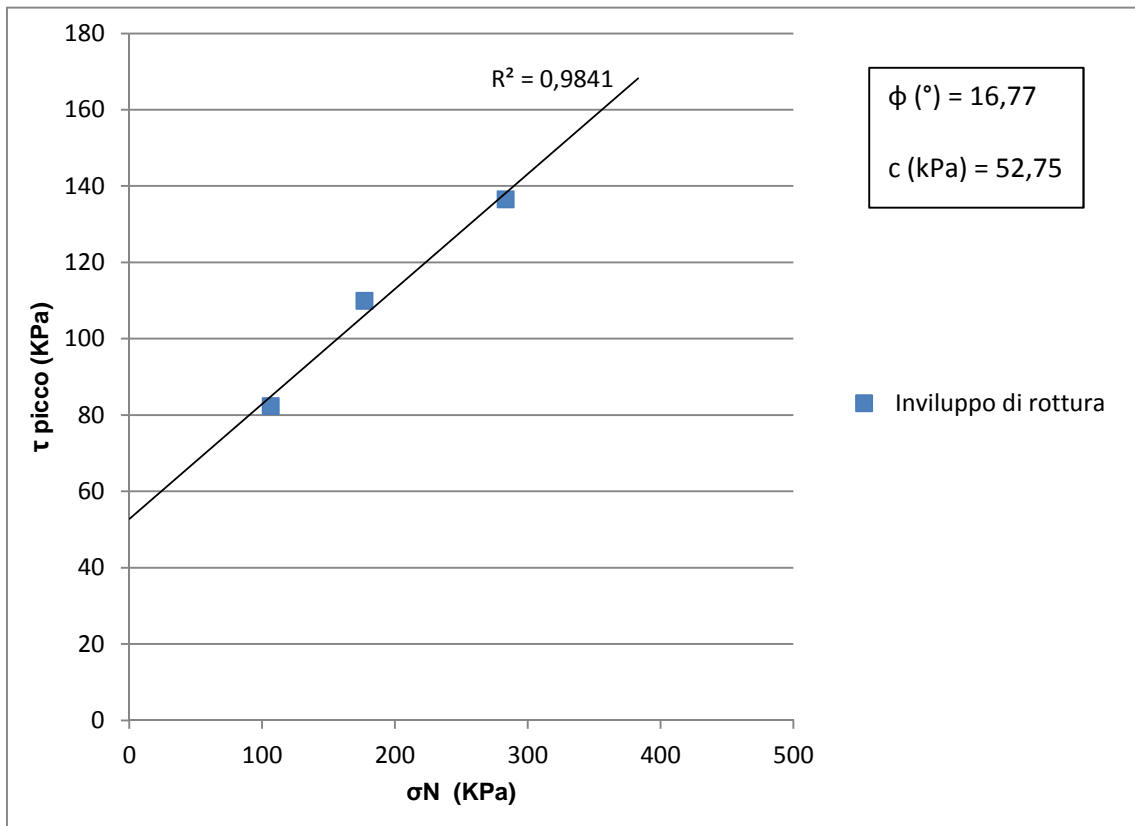


Grafico 35. Involuppo di rottura del terreno decarbonatato.

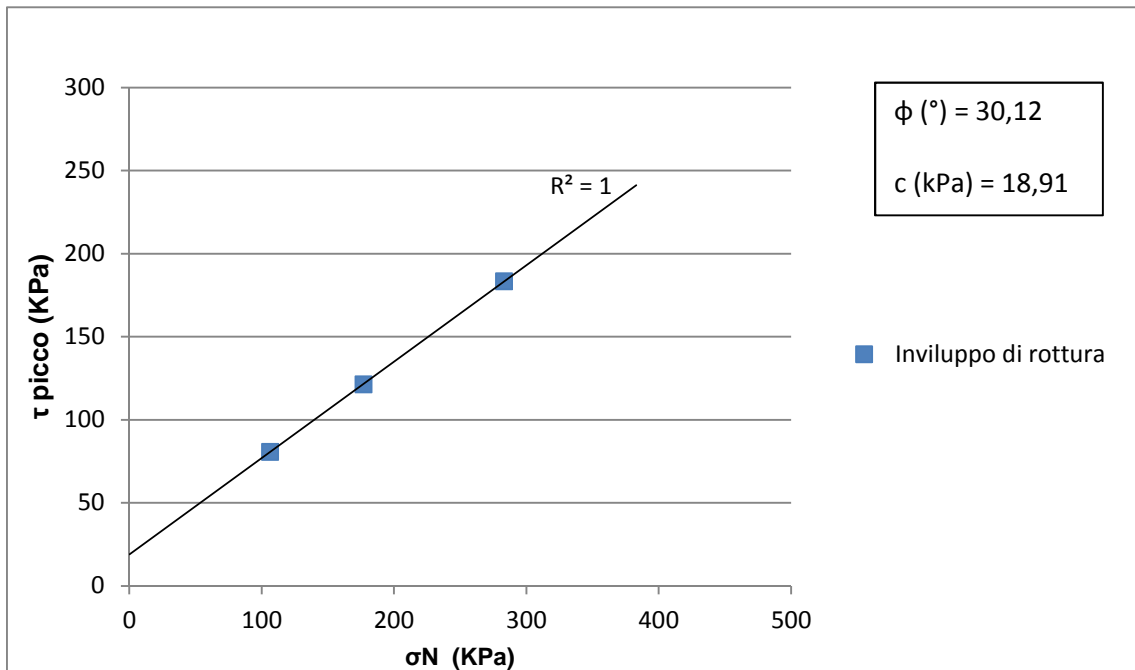


Grafico 36. Involuppo di rottura del terreno naturale.

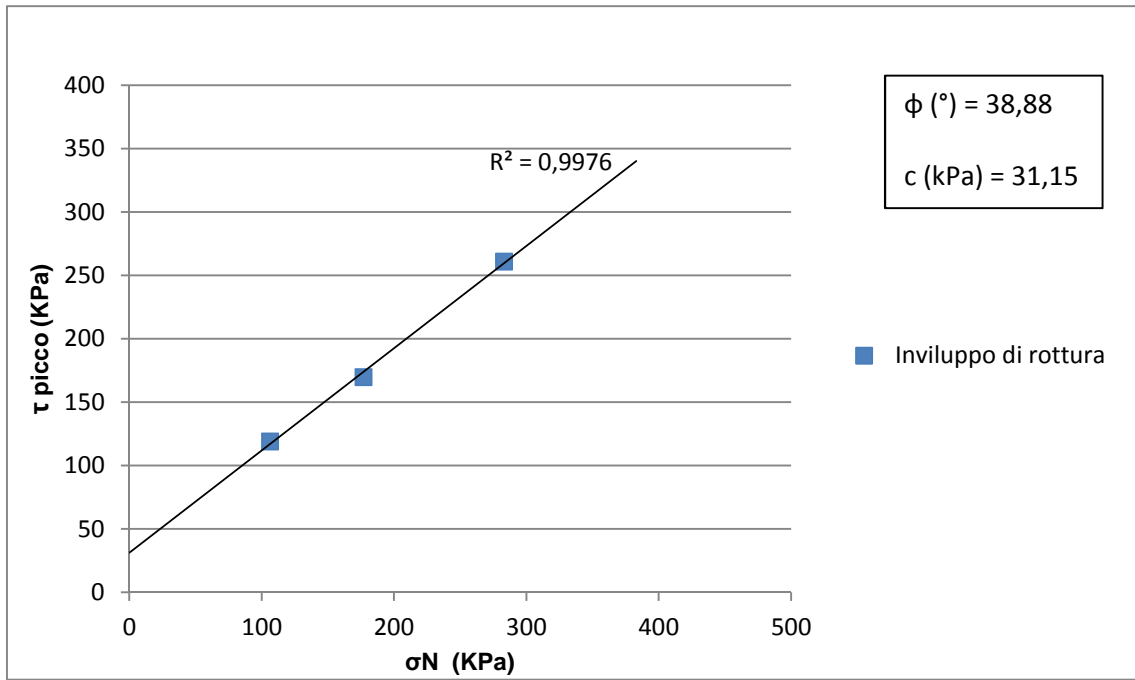


Grafico 37. Inviluppo di rottura del terreno carbonatato.

### 9.3 Dettaglio dei campioni trattati nella Fase 2

#### 9.3.1 Campione EO-15g-15V-15cm-prova-iniziale

Solo questo primo campione è stato allocato in condizioni di Optimum Proctor, e su di esso è stata testata l'apparecchiatura, sulla quale sono poi state apportate migliorie e modifiche. La tensione è stata di 15V per 15 giorni. È stata effettuata una rilevazione al giorno. La lunghezza del campione era di 15 cm.

Il terreno dei settori CC e CA è più consistente, mentre quello del settore AA è molto plastico.

Nell'arco della giornata, con la tensione a 15V, gli assorbimenti variavano anche in intervalli dell'ordine del decimo di ampere; mentre con la tensione a 5V, gli assorbimenti erano stabili.

Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione. L'assorbimento medio è stato di 3,32 mA.

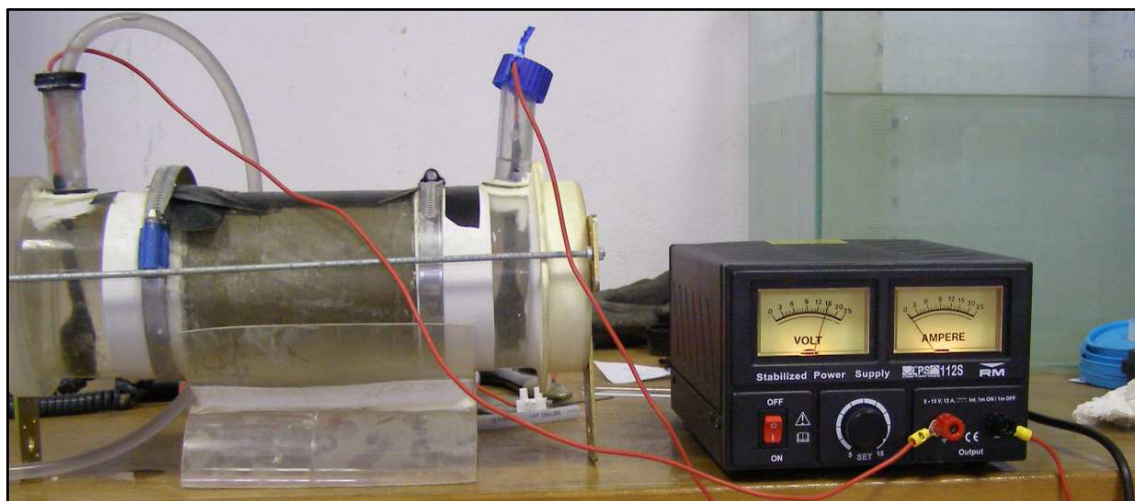


Foto 14. Campione EO-15g-15V-15cm-prova-iniziale.



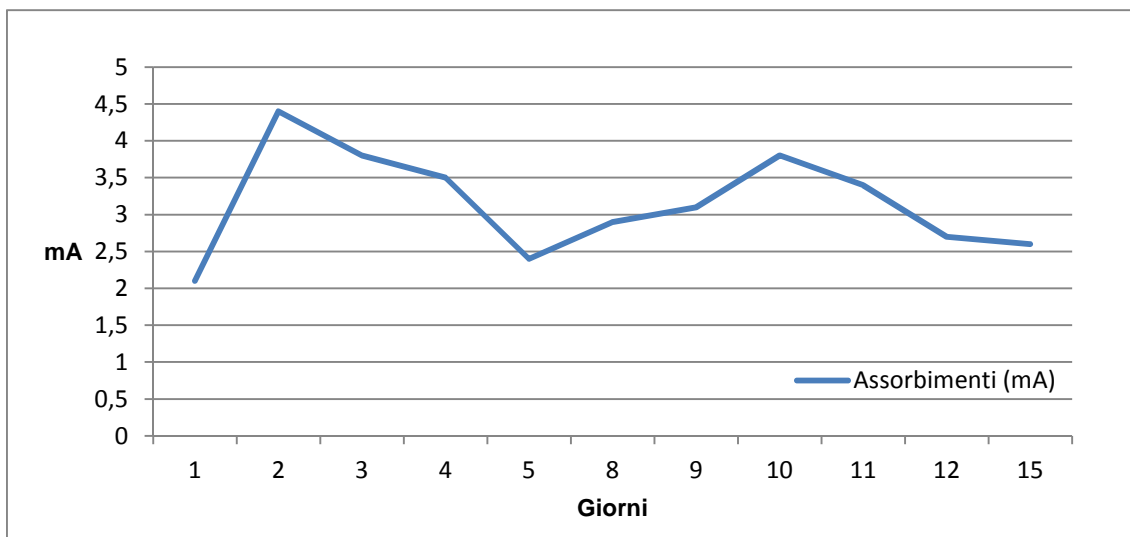


Grafico 38. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (g).

Tabella 25.  
Valori dei parametri.

Settore	Carbonati (%)	W (%)	$\tau$ picco (KPa) a 283,1 kPa	pH	VB
AA	22 (21)	34	167 (183)	8,5 (8,46)	2,8 (2,7)
AC	22 (21)	28	94 (183)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
CA	21 (21)	26	148 (183)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
CC	23 (21)	27	172 (183)	8,5 (8,46)	2,7 (2,7)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.

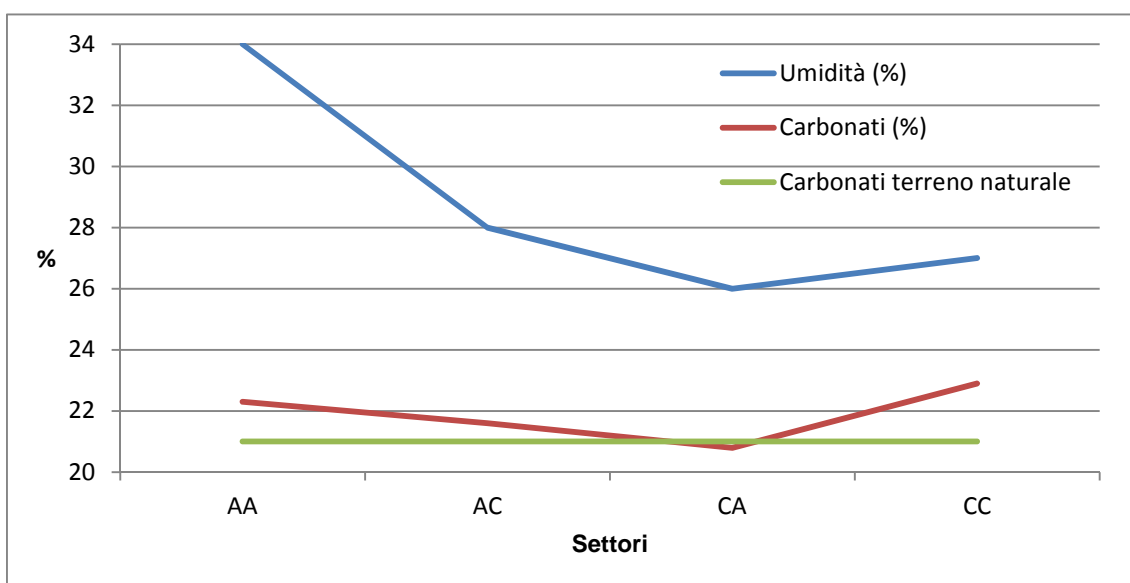


Grafico 39. Umidità e Contenuto di carbonati VS Settori del campione.

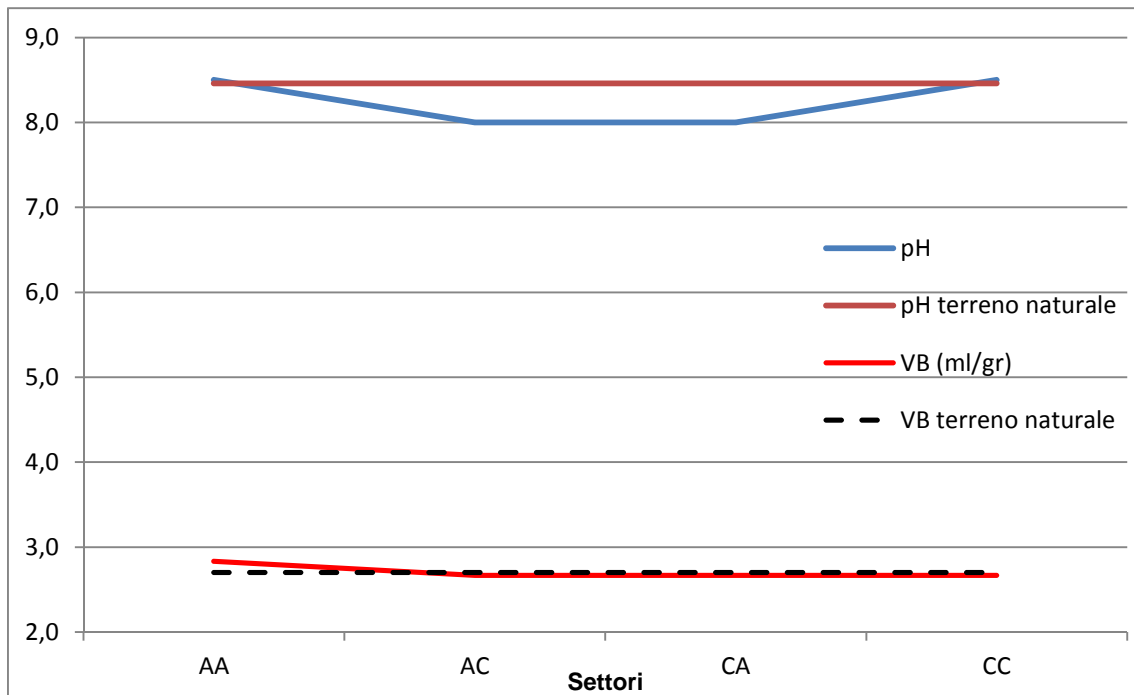


Grafico 40. VB e pH VS Settori del campione.

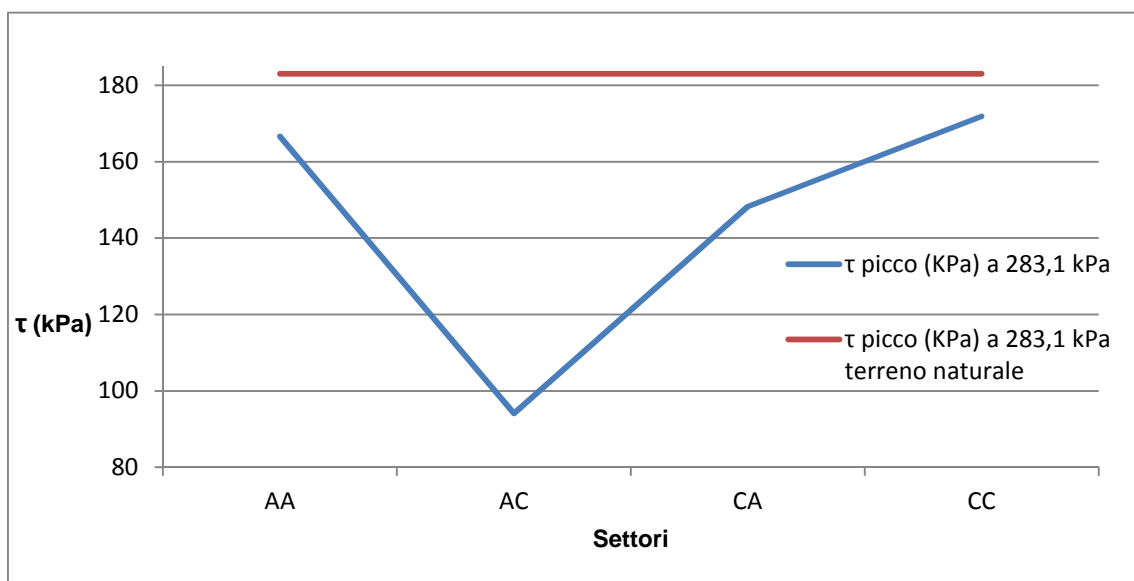


Grafico 41. τ di picco (KPa) a 283,1 kPa VS Settori del campione.

### 9.3.2 Campione EO-15g-15V-15cm

La tensione è stata di 15V per 15 giorni. La lunghezza del campione era di 15 cm. Le misurazioni sono state giornaliere. È stata rilevata la misura di assorbimento di picco,

quella stabilizzata, la controcorrente di picco che quella stabilizzata dopo un breve spegnimento dell'alimentatore.

Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione. L'assorbimento medio è stato di 6,93 mA.

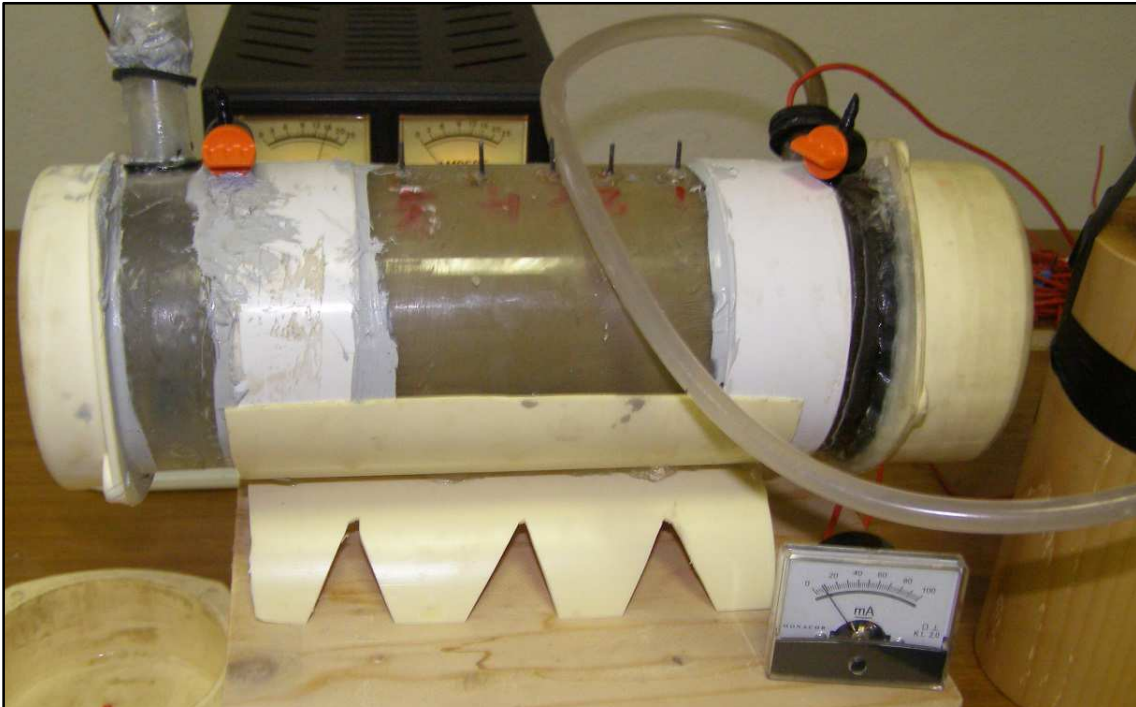


Foto 15. Campione EO-15g-15V-15cm.

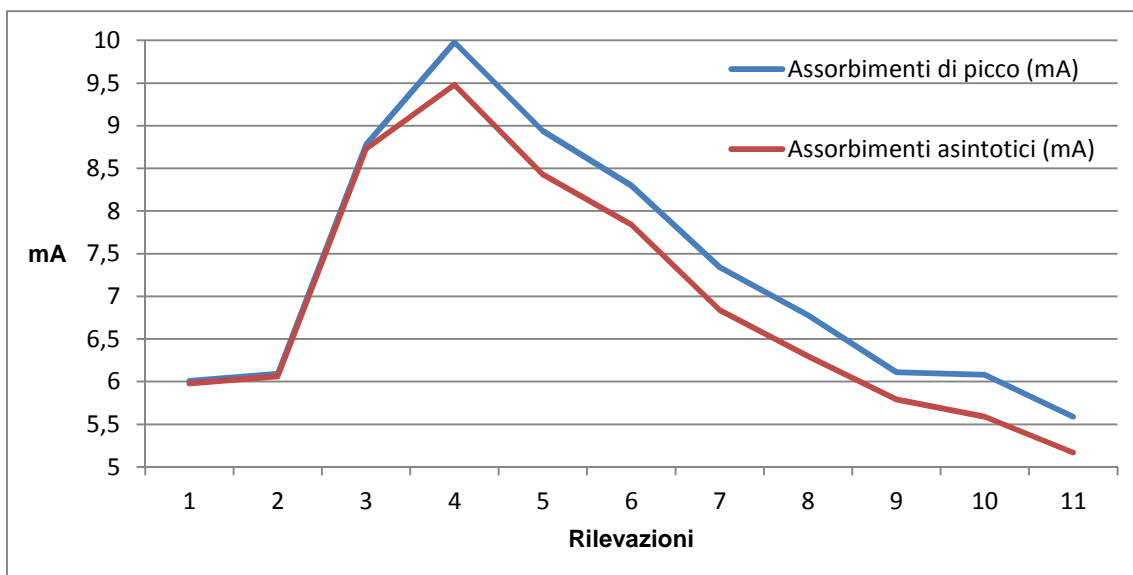


Grafico 42. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (15g, 11 rilevazioni).

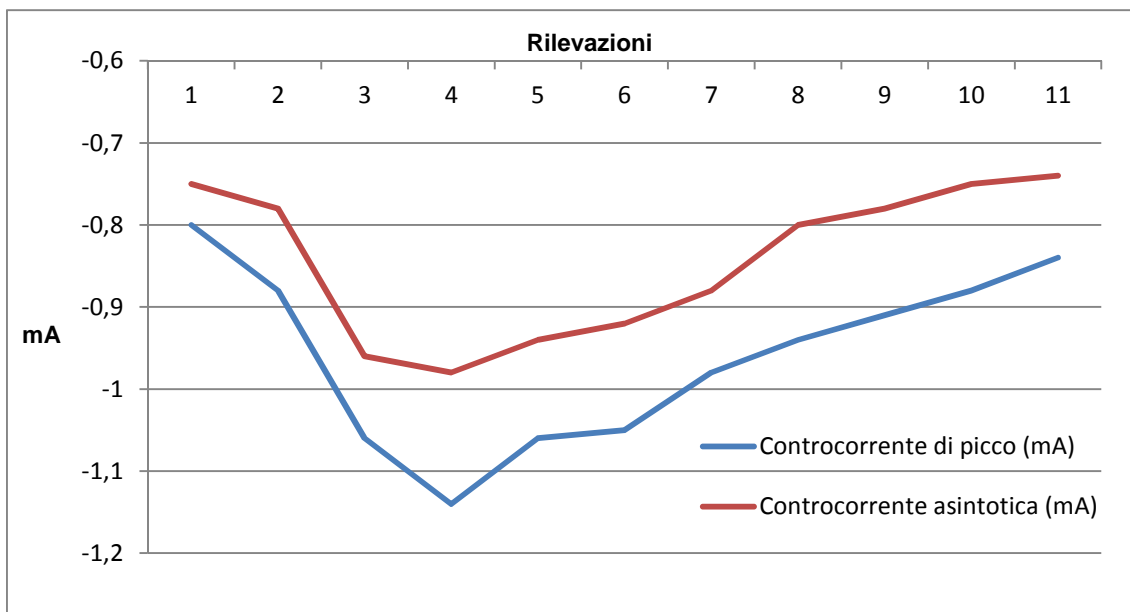


Grafico 43. Controcorrente (mA) VS Tempo (15g, 11 rilevazioni).

Tabella 26.

Valori dei parametri.

Settore	Carbonati (%)	W (%)	$\tau$ picco (KPa) a 283,1 kPa	pH	VB
AA	25 (21)	29	181 (183)	8,0 (8,46)	3,1 (2,7)
AC	22 (21)	33	164 (183)	8,0 (8,46)	3,0 (2,7)
CA	25 (21)	35	179 (183)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
CC	25 (21)	30	192 (183)	8,5 (8,46)	2,4 (2,7)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.

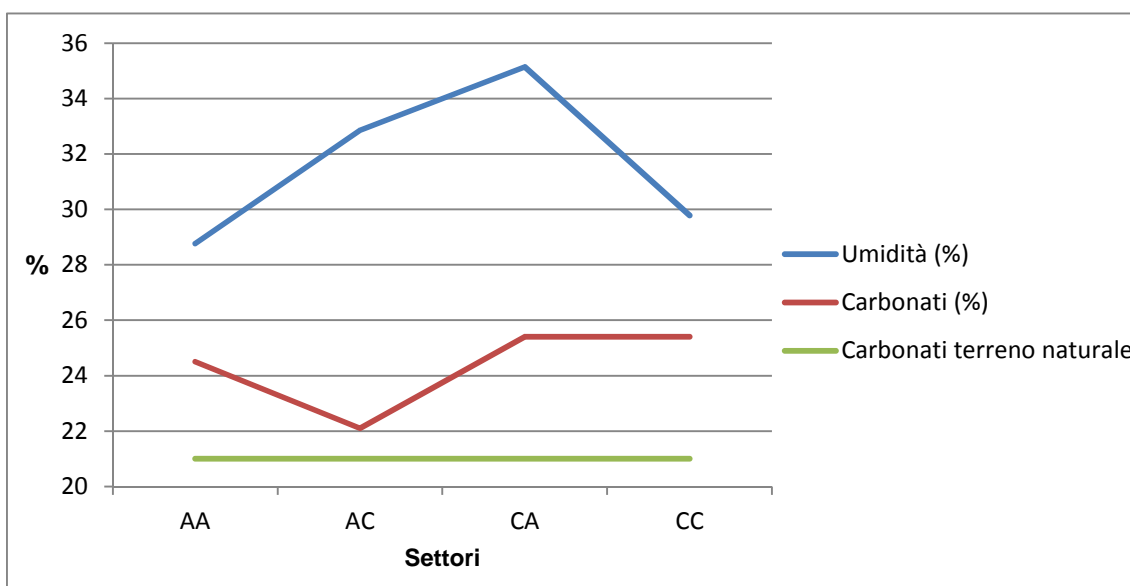


Grafico 44. Umidità e Contenuto di carbonati VS Settori del campione.

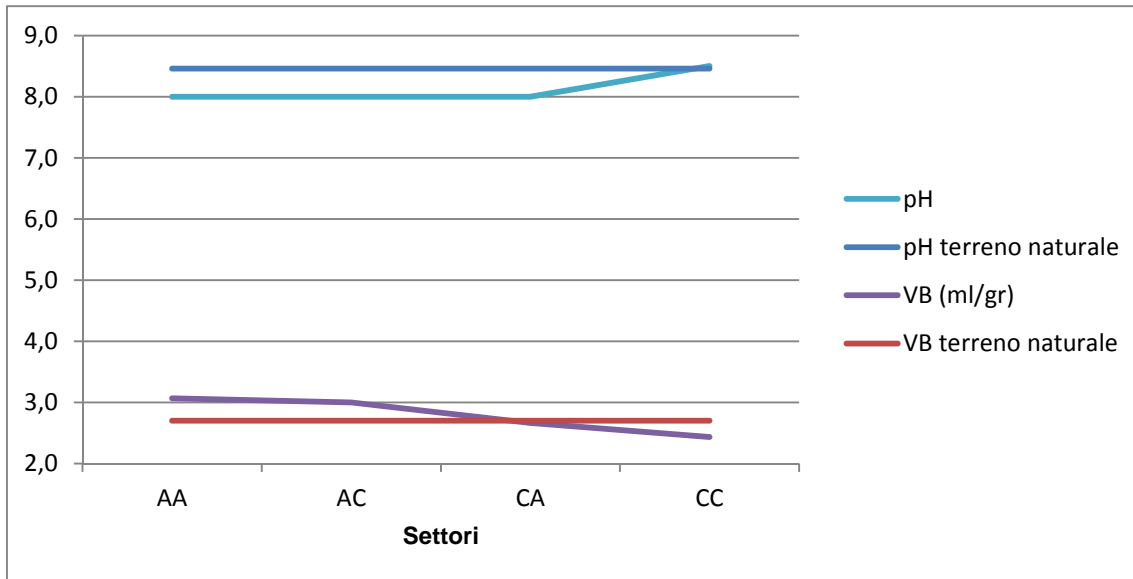


Grafico 45. VB e pH VS Settori del campione.

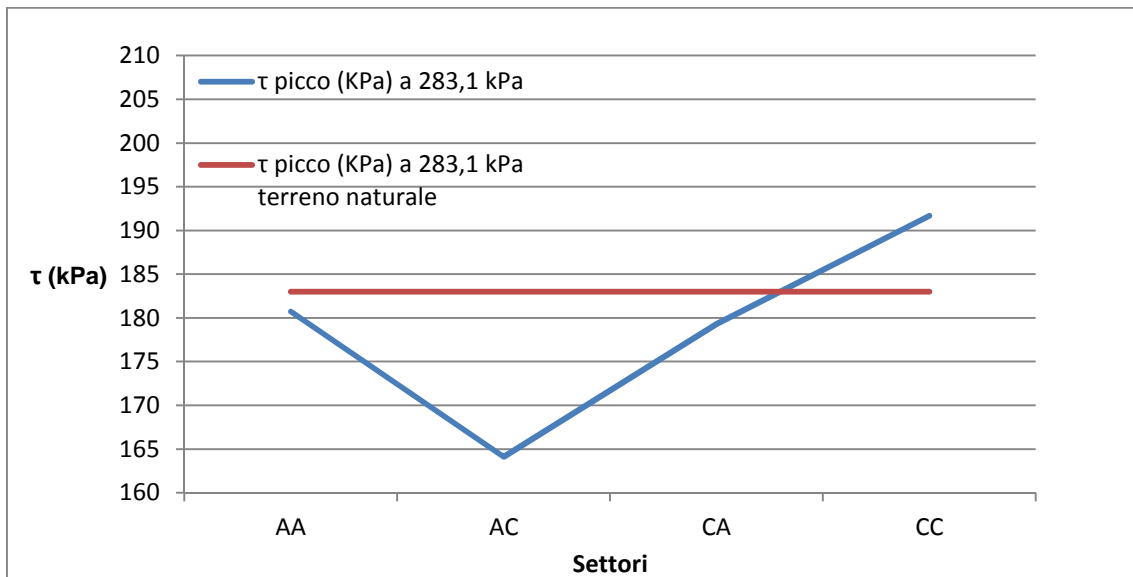


Grafico 46.  $\tau$  di picco (KPa) a 283,1 kPa VS Settori del campione.

### 9.3.3 Campione EO-15g-3V-15cm

La tensione è stata di 3V per 15 giorni. La lunghezza del campione era di 15 cm. Le misurazioni sono state giornaliere. È stata rilevata la misura di assorbimento di corrente.

Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione. L'assorbimento medio è stato di 0,30 mA.

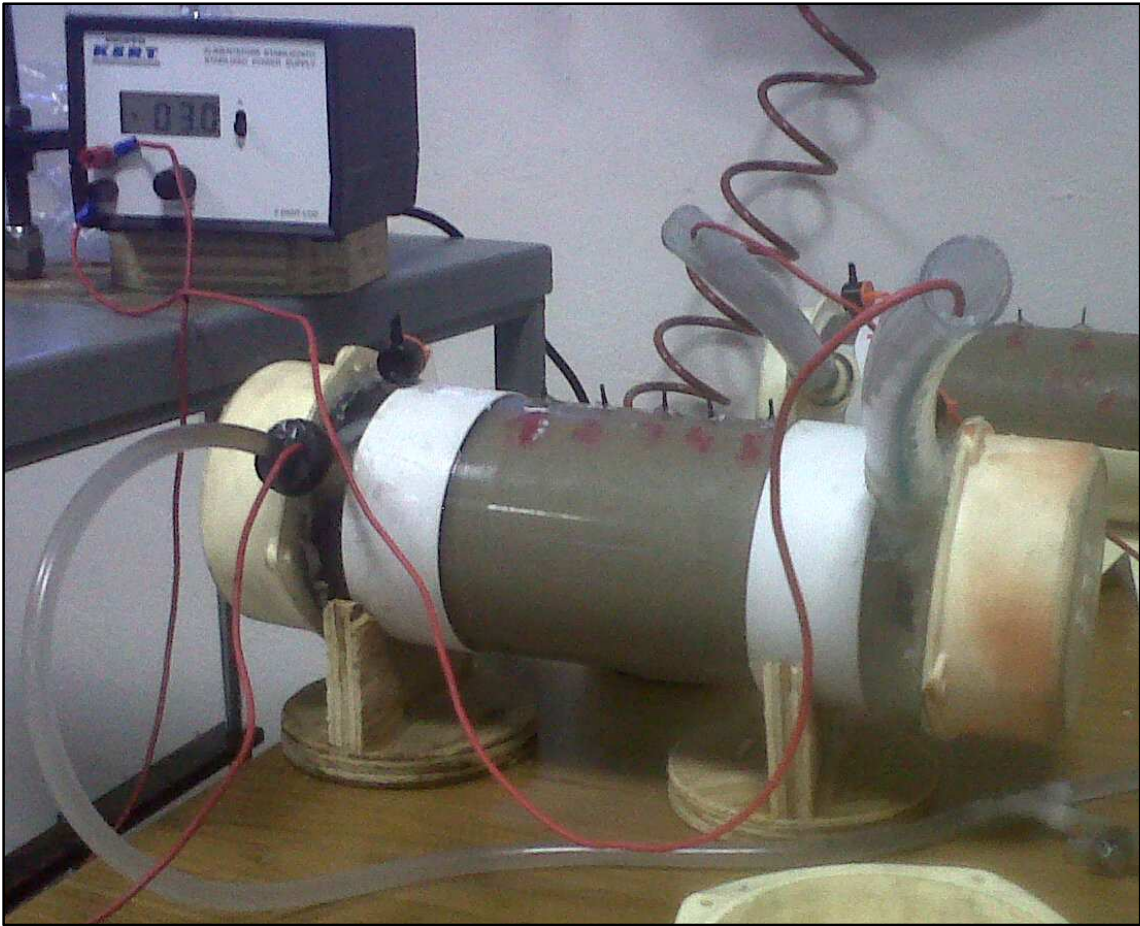


Foto 16. Campione EO-15g-3V-15cm.

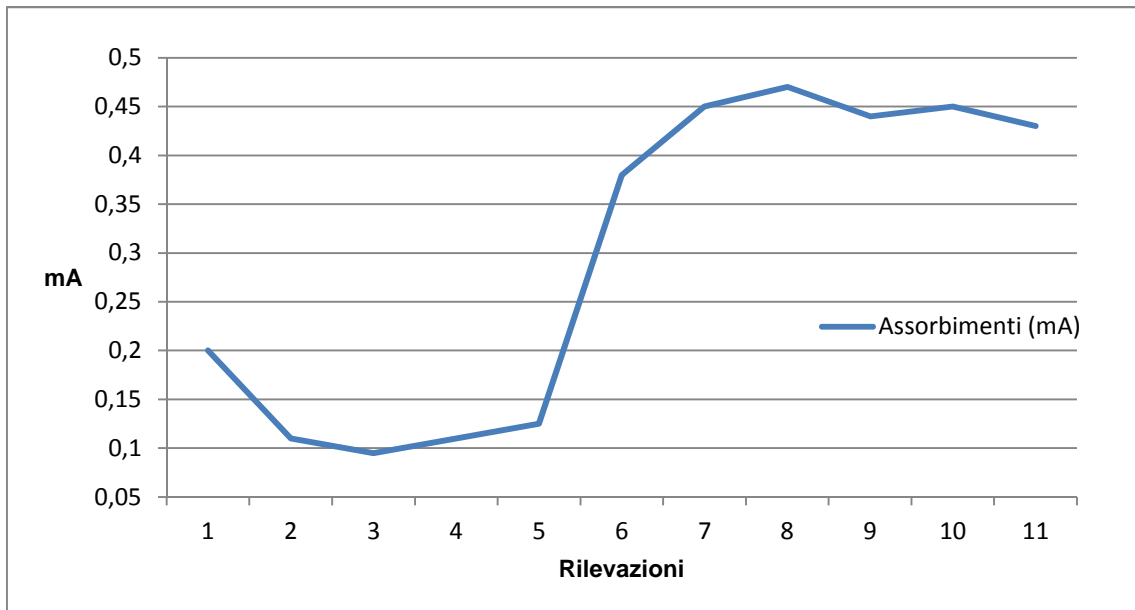
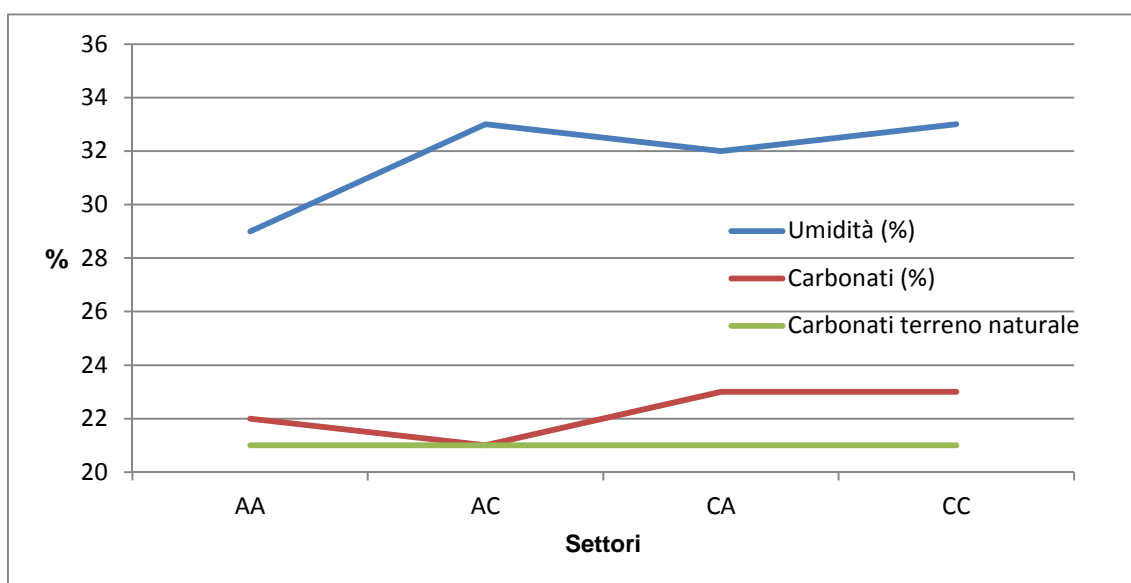


Grafico 47. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (15g, 11 rilevazioni).

**Tabella 27.**  
**Valori dei parametri.**

Settore	Carbonati (%)	W (%)	$\tau$ picco (KPa) a 283,1 kPa	pH	VB
AA	22 (21)	29	167 (183)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
AC	21 (21)	33	133 (183)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
CA	23 (21)	32	177 (183)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
CC	23 (21)	33	146 (183)	8,5 (8,46)	2,7 (2,7)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.



**Grafico 48. Umidità e Contenuto dei carbonati VS Settori del campione.**

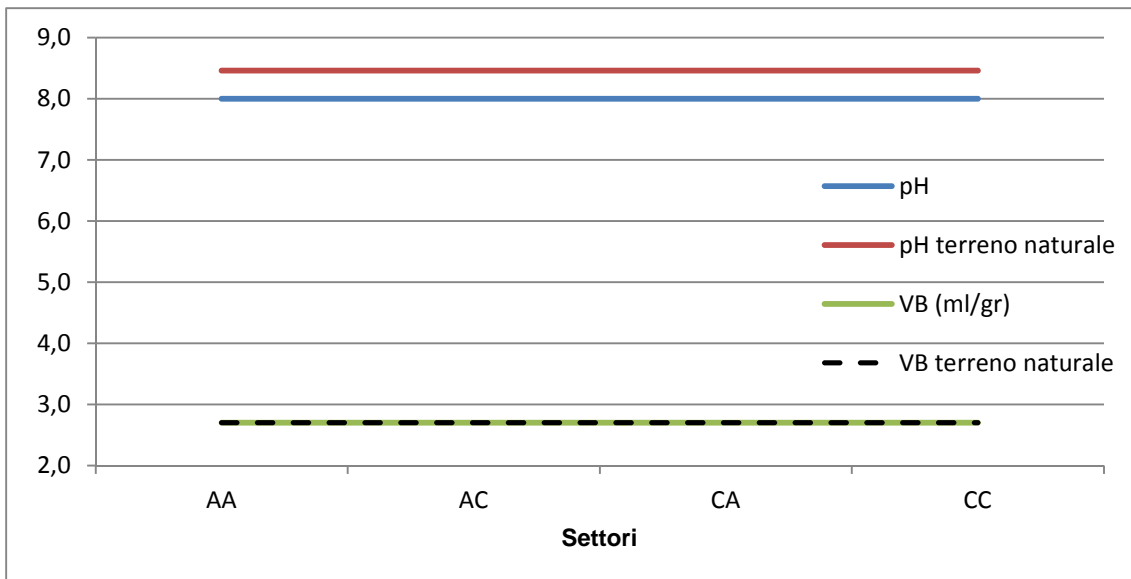


Grafico 49. VB e pH VS Settori del campione.

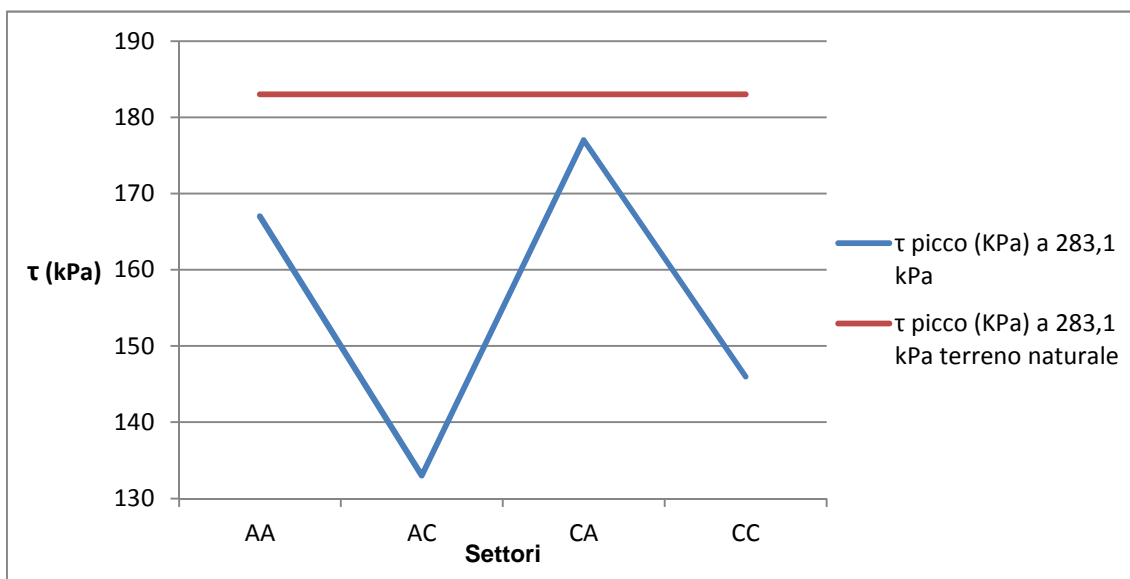


Grafico 50.  $\tau$  di picco (kPa) a 283,1 kPa VS Settori del campione.

#### 9.3.4 Campione EO-30g-27V-27cm

La lunghezza del campione era di 27 cm. Le misurazioni sono state giornaliere. È stata rilevata la misura di assorbimento elettrico di picco e quella stabilizzata. È stata rilevata anche la controcorrente stabilizzata dopo un breve spegnimento dell'alimentatore. Si è formata una vistosa crepa longitudinale e nella parte sommitale del cilindro



orizzontale del campione, dall'anodo verso il catodo col passare dei giorni. Al termine del trattamento, il liquido anodico di colore nero (corrosione dell'elettrodo in grafite) aveva il pH = 2,5 mentre il liquido catodico opaco biancastro aveva il pH > 9.

La tensione è stata di 27V per 30 giorni. L'assorbimento medio è stato di 9,08 mA. Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione.

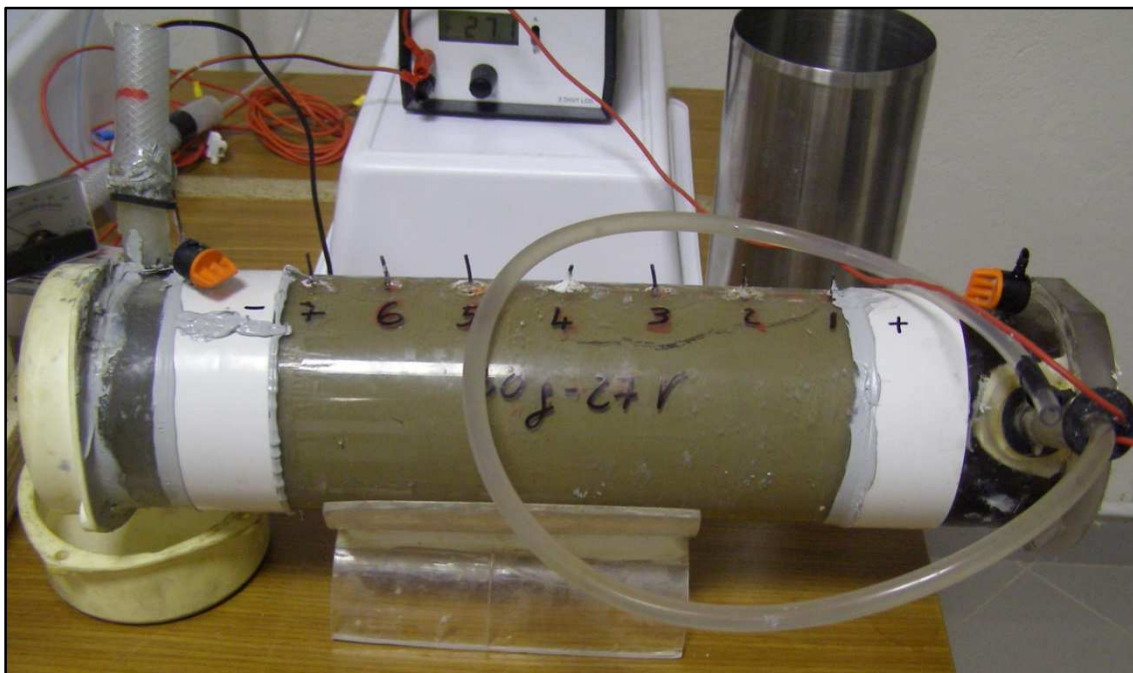


Foto 17. Campione EO-30g-27V-27cm.

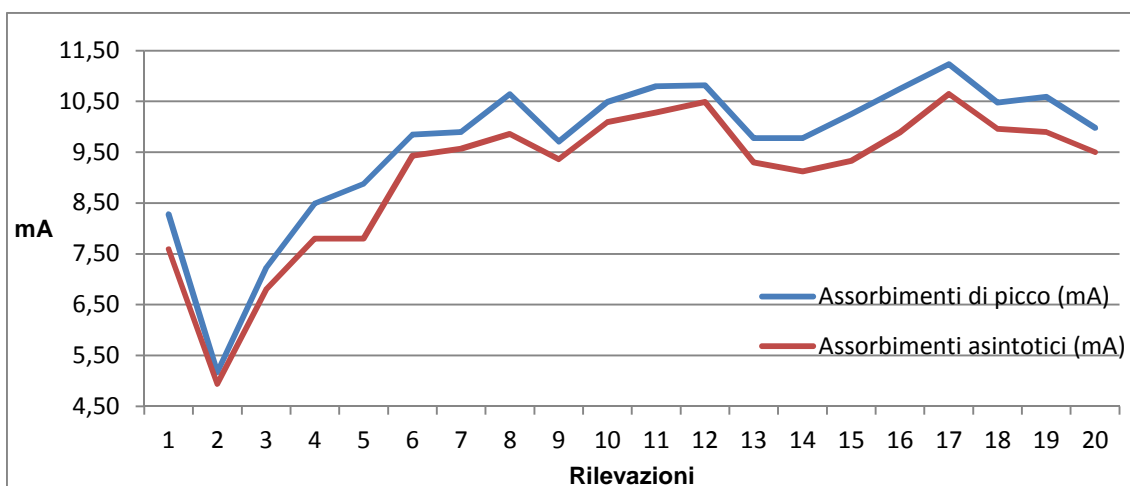


Grafico 51. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (30g, 20rilevazioni).

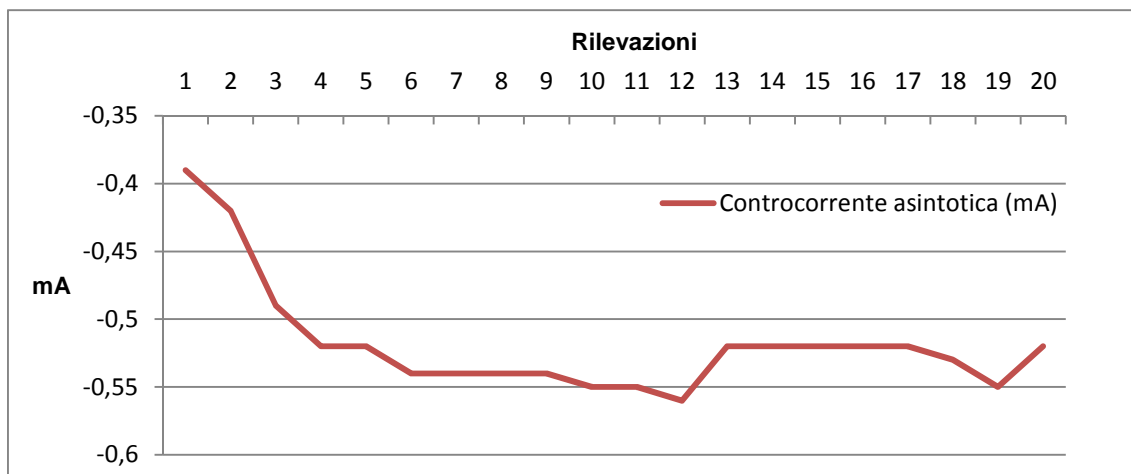


Grafico 52. Controcorrente (mA) VS Tempo (30g, 20 rilevazioni).

Tabella 28.

Valori dei parametri.

Settore	Carbonati (%)	W (%)	pH	VB	$\varphi$ (°)	c' (kPa)
AA	26 (21)	34	8,0 (8,46)	2,5 (2,7)	28 (30)	7,5 (18,9)
AC	28 (21)	32	8,0 (8,46)	2,5 (2,7)	25 (30)	14,9 (18,9)
CA	27 (21)	33	8,0 (8,46)	2,5 (2,7)	35 (30)	0 (18,9)
CC	28 (21)	33	8,5 (8,46)	2,2 (2,7)	32 (30)	5,6 (18,9)

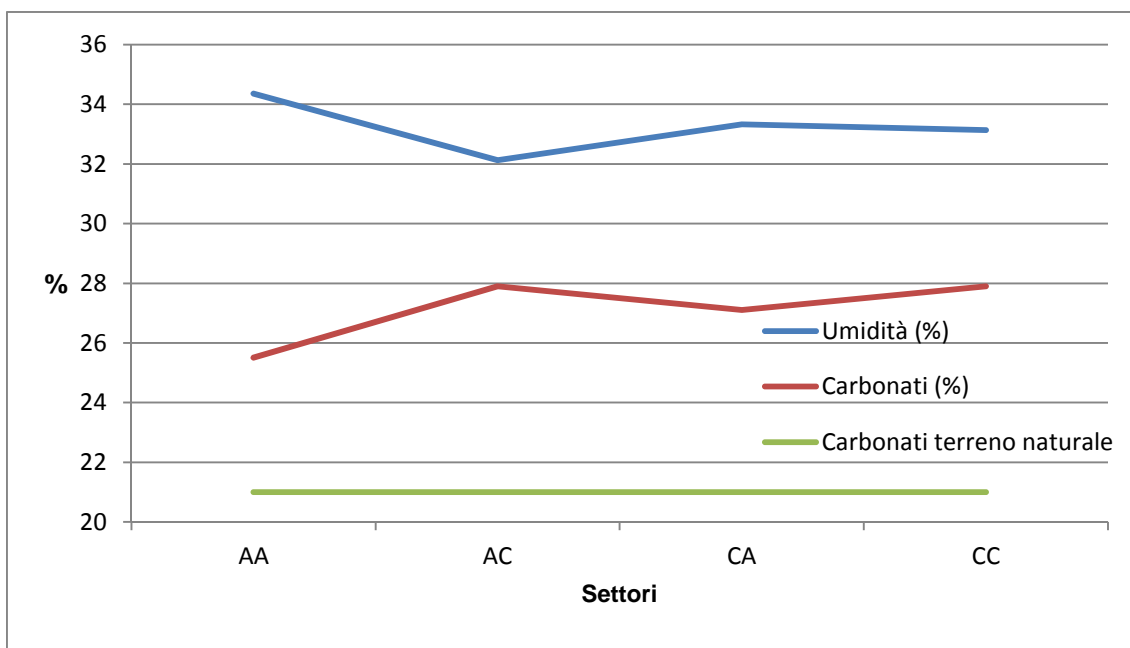
I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.

Per quanto riguarda le prove di taglio, per il settore CA si è imposto il passaggio della retta di interpolazione per l'origine degli assi cartesiani a causa del valore negativo della coesione (-38,76 kPa) nonostante l' $R^2$  originario di 99,9% che ha prodotto un  $\varphi$  come da Tabella 28 ed un  $R^2$  di 97,2%. Il terreno originario infatti, come già riportato in precedenza, è stato dapprima essiccato a 40°C, destrutturato, tritato, omogeneizzato e poi idratato e/o trattato per i diversi scopi, con una coesione quindi pari a zero.

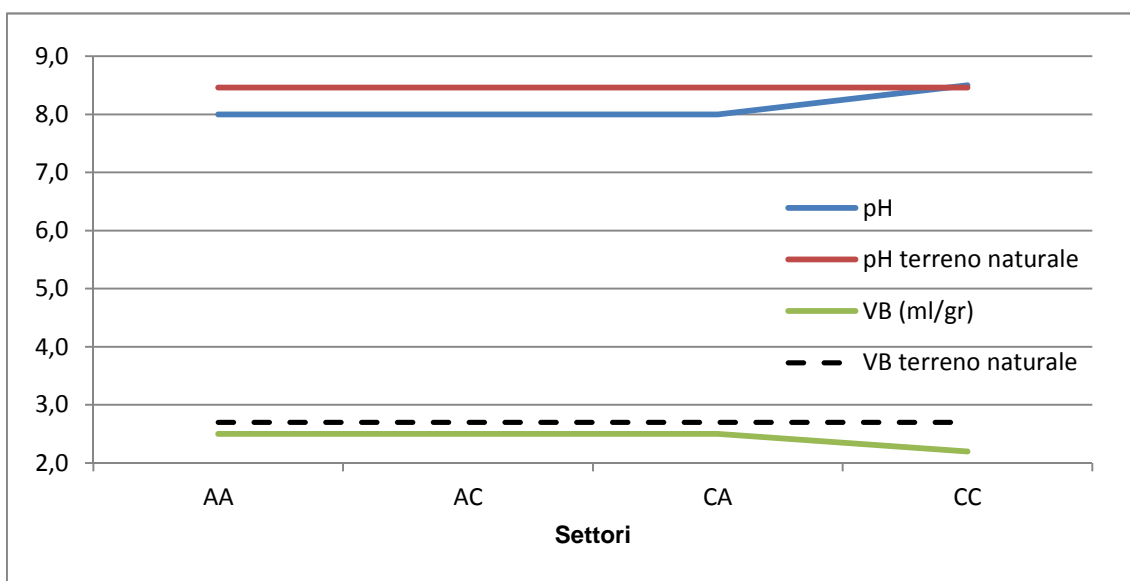
Tabella 29.

Dettaglio degli sforzi di taglio di picco per i tre gradini di consolidazione.

Settore	$\tau$ picco (KPa) a 283,1 kPa	$\tau$ picco (KPa) a 176,9 kPa	$\tau$ picco (KPa) a 106,2 kPa
AA	158 (183)	94 (121)	66 (81)
AC	143 (183)	103 (121)	60 (81)
CA	194 (183)	108 (121)	48 (81)
CC	185 (183)	119 (121)	73 (81)



**Grafico 53. Umidità e Contenuto dei carbonati VS Settori del campione.**



**Grafico 54. VB e pH VS Settori del campione.**

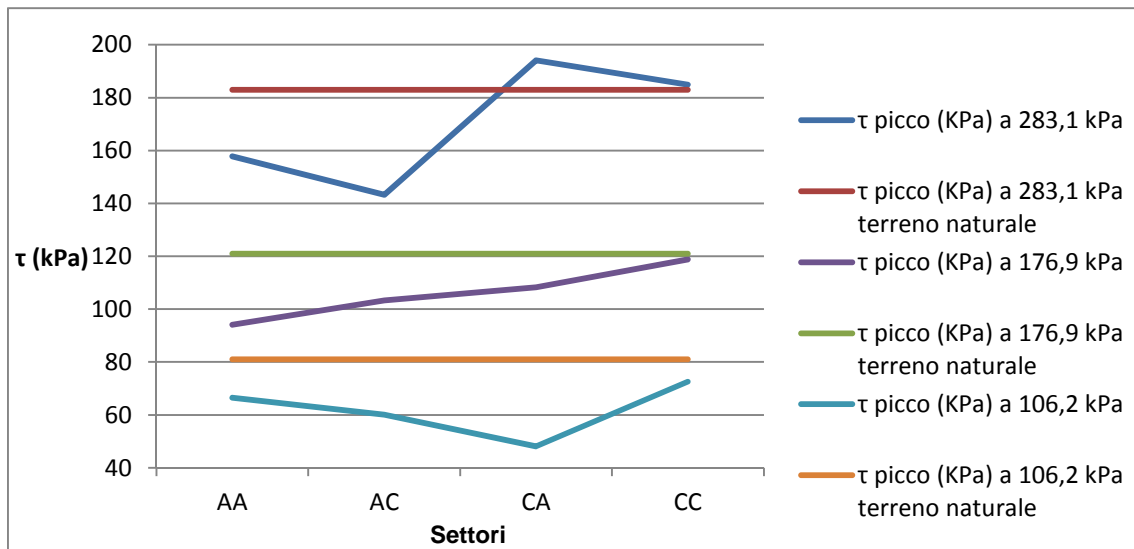


Grafico 55.  $\tau$  di picco (kPa) VS Settori del campione.

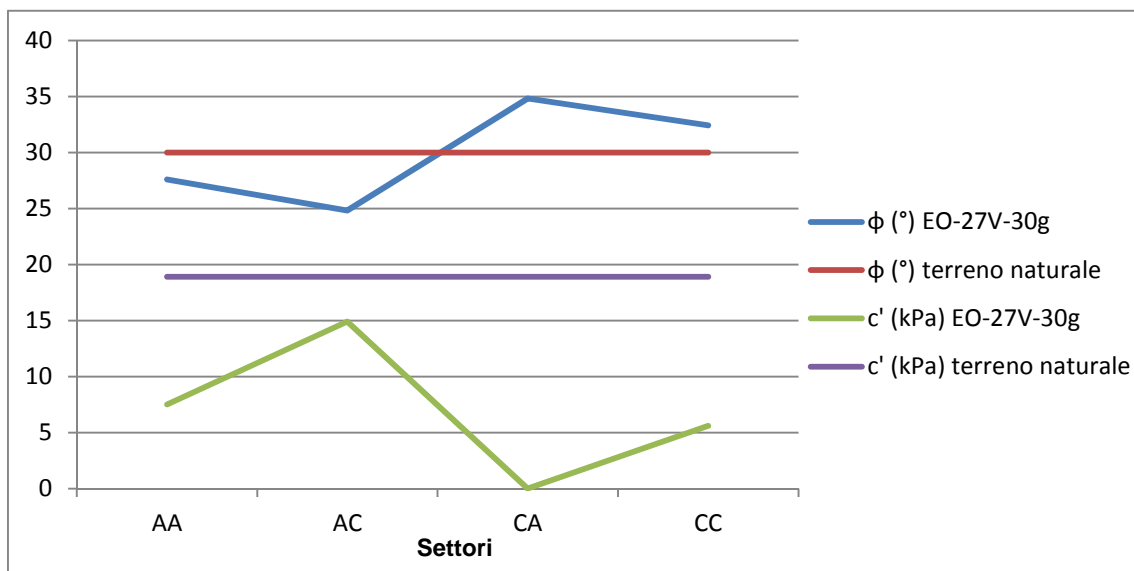


Grafico 56. Angolo di attrito interno  $\phi$  ( $^{\circ}$ ) e Coesione  $c'$  (kPa) VS Settori del campione.

### 9.3.5 Campione EO-30g -5V-27cm

La lunghezza del campione era di 27 cm. Le misurazioni sono state giornaliere. È stata rilevata la misura di assorbimento di corrente. Il flusso di acqua dal catodo non si è mai interrotto.

La tensione è stata di 5V per 30 giorni. L'assorbimento medio è stato di 1,41 mA. Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione.

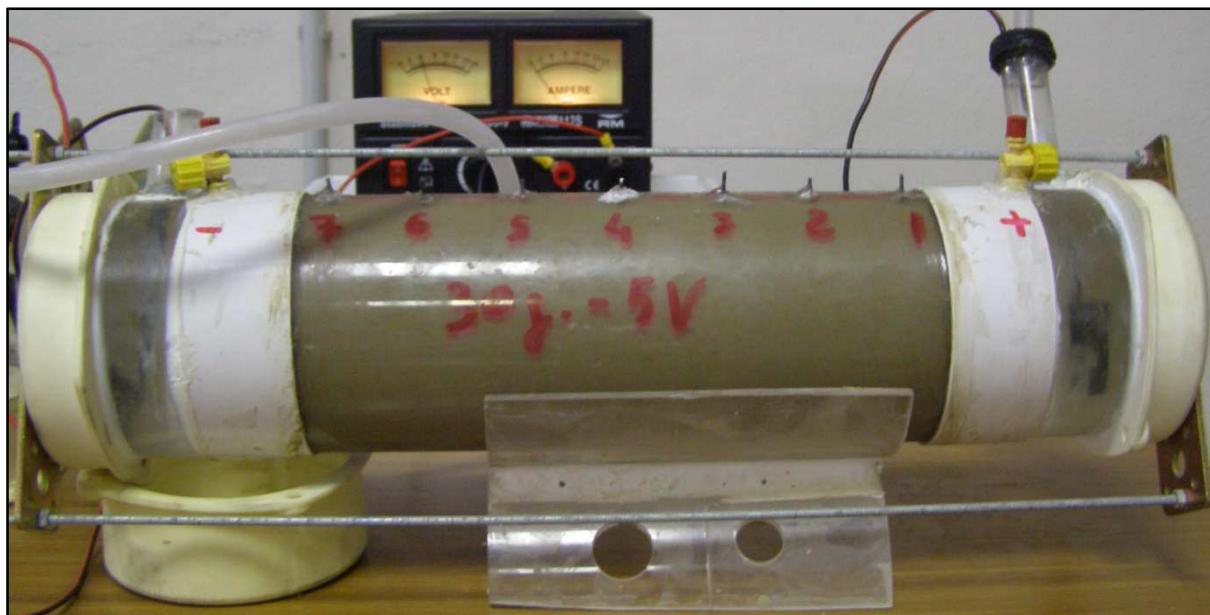


Foto 18. Campione EO-30g-5V-27cm.

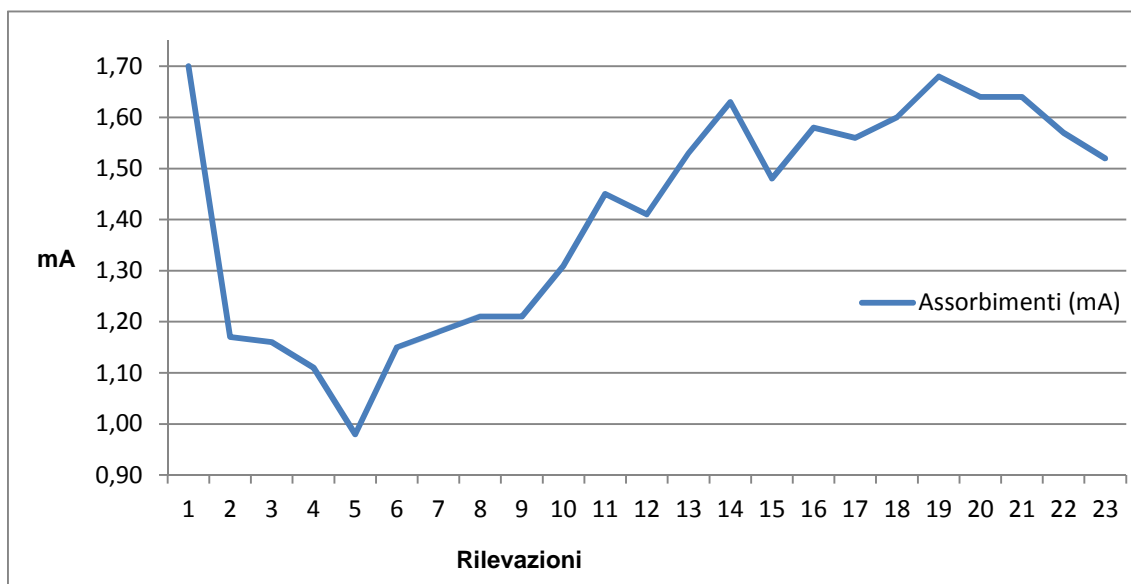


Grafico 57. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (30g, 23 rilevazioni).

Tabella 30.  
Valori dei parametri.

Settore	Carbonati (%)	W (%)	pH	VB	$\phi$ (°)	$c'$ (kPa)
AA	21 (21)	34	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)	30 (30)	0 (18,9)
AC	21 (21)	34	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)	28 (30)	12,7 (18,9)
CA	23 (21)	27	8,0 (8,46)	2,6 (2,7)	28 (30)	7,3 (18,9)
CC	23 (21)	31	8,5 (8,46)	2,6 (2,7)	29 (30)	0 (18,9)

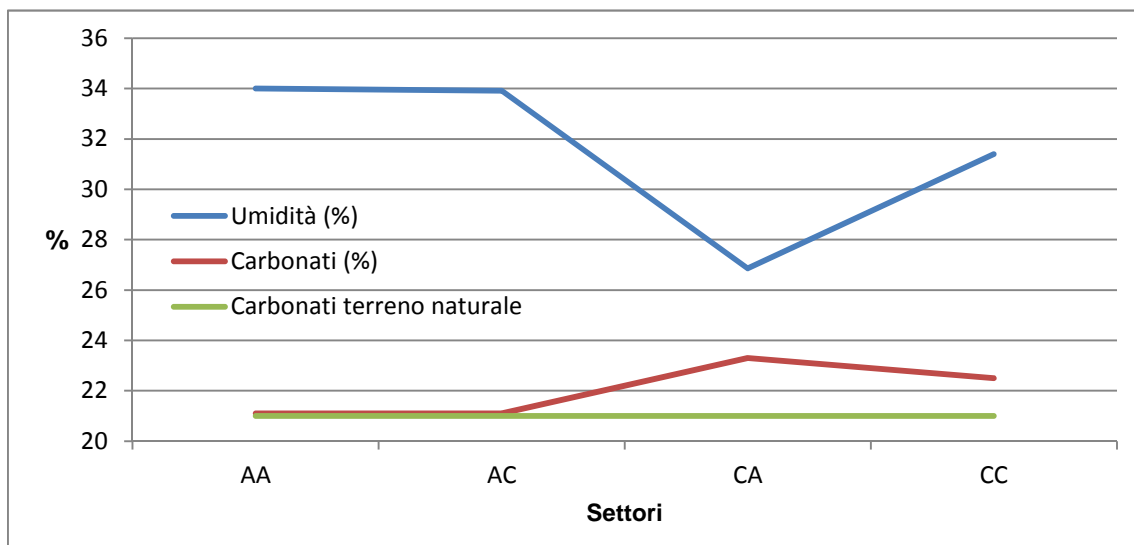
I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.

Per quanto riguarda le prove di taglio, per i settori AA e CC si è imposto il passaggio della retta di interpolazione per l'origine degli assi cartesiani a causa dell' $R^2$  originario rispettivamente di 95,8% e di 93,7% che ha prodotto un  $\phi$  come da Tabella 30 ed un  $R^2$  rispettivamente di 98,4% e di 99,7%. Il terreno originario infatti, come già riportato in precedenza, è stato dapprima essiccato a 40° C, des trutturato, tritato, omogeneizzato e poi idratato e/o trattato per i diversi scopi, con una coesione quindi pari a zero.

**Tabella 31.**

**Dettaglio degli sforzi di taglio di picco per i tre gradini di consolidazione.**

Settore	$\tau$ picco (KPa) a 283,1 kPa	$\tau$ picco (KPa) a 176,9 kPa	$\tau$ picco (KPa) a 106,2 kPa
AA	166 (183)	91 (121)	71 (81)
AC	161 (183)	109 (121)	67 (81)
CA	160 (183)	105 (121)	63 (81)
CC	158 (183)	99 (121)	53 (81)



**Grafico 58. Umidità e Contenuto dei carbonati VS Settori del campione.**

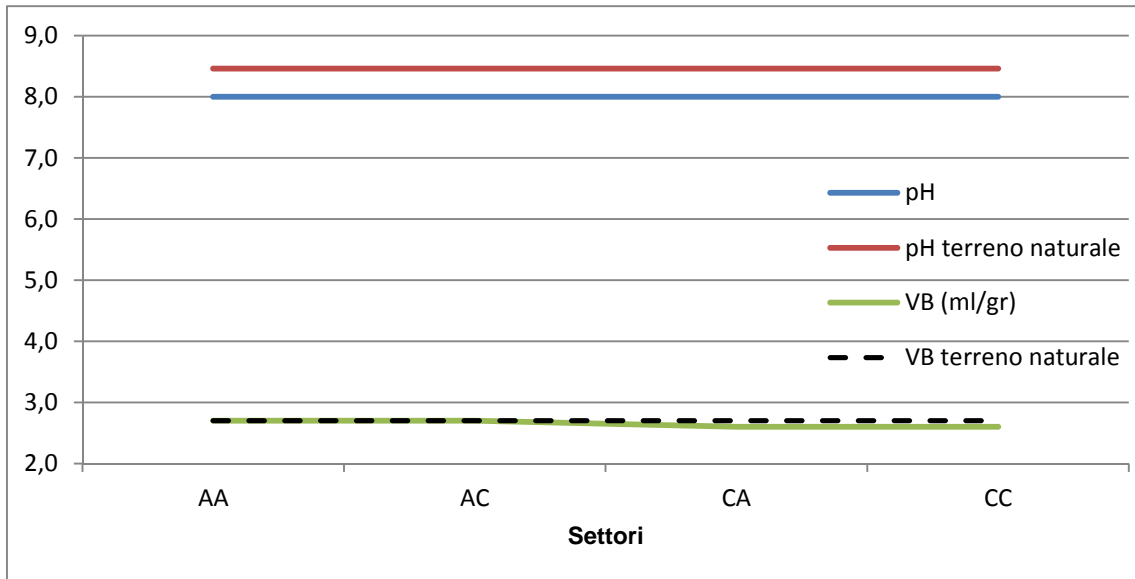


Grafico 59. VB e pH VS Settori del campione.

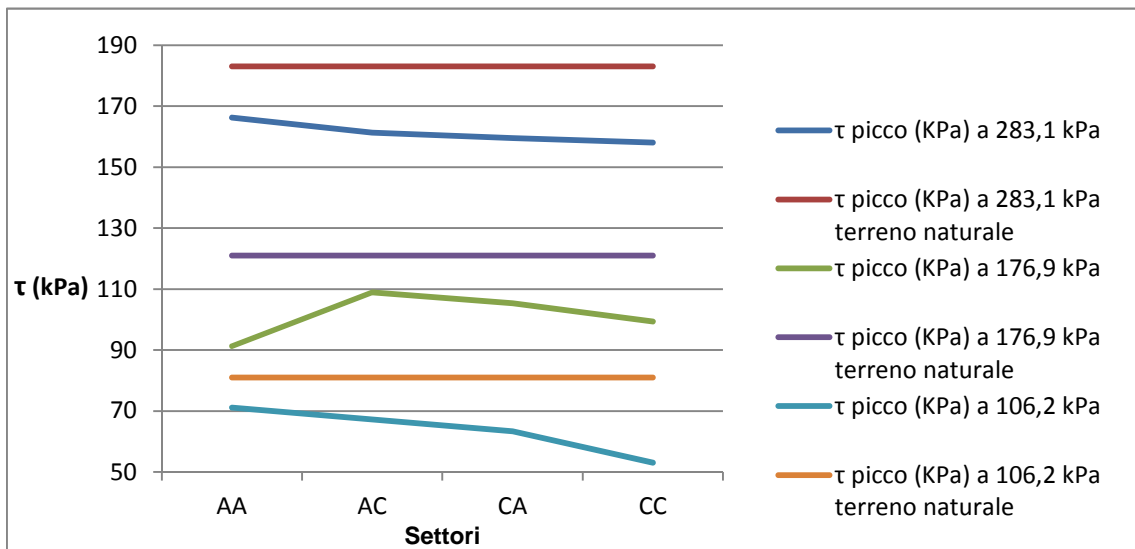
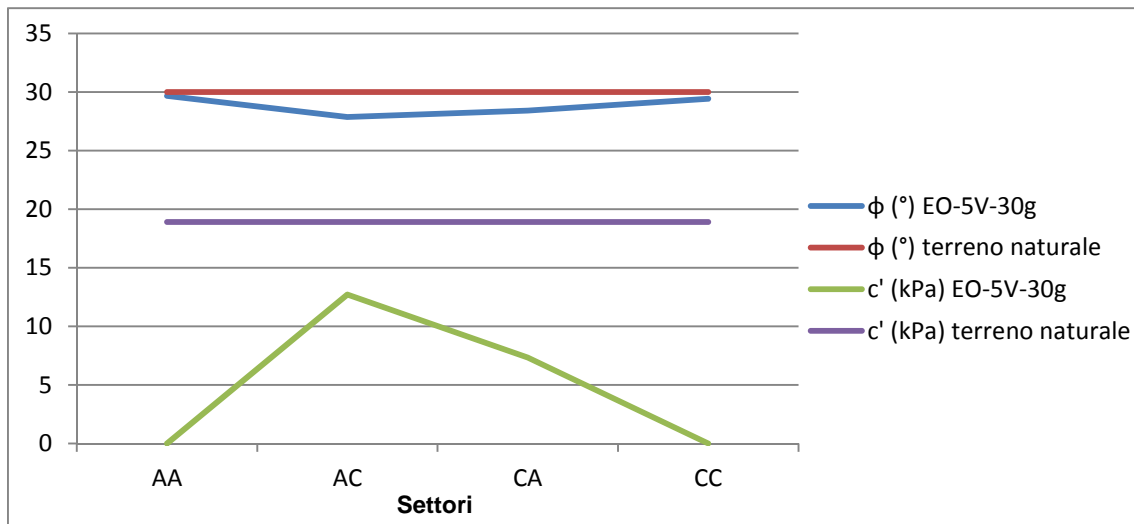


Grafico 60.  $\tau$  di picco (KPa) VS Settori del campione.



**Grafico 61. Angolo di attrito interno  $\phi$  (°) e Coesione  $c'$  (kPa) VS Settori del campione.**

### 9.3.6 Campione EO-60g-5V-27cm

La lunghezza del campione era di 27 cm. Le misurazioni sono state giornaliere. È stata rilevata la misura di assorbimento di corrente. Il flusso di acqua dal catodo non si è mai interrotto.

La tensione è stata di 5V per 60 giorni. L'assorbimento medio è stato di 1,04 mA. Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione.



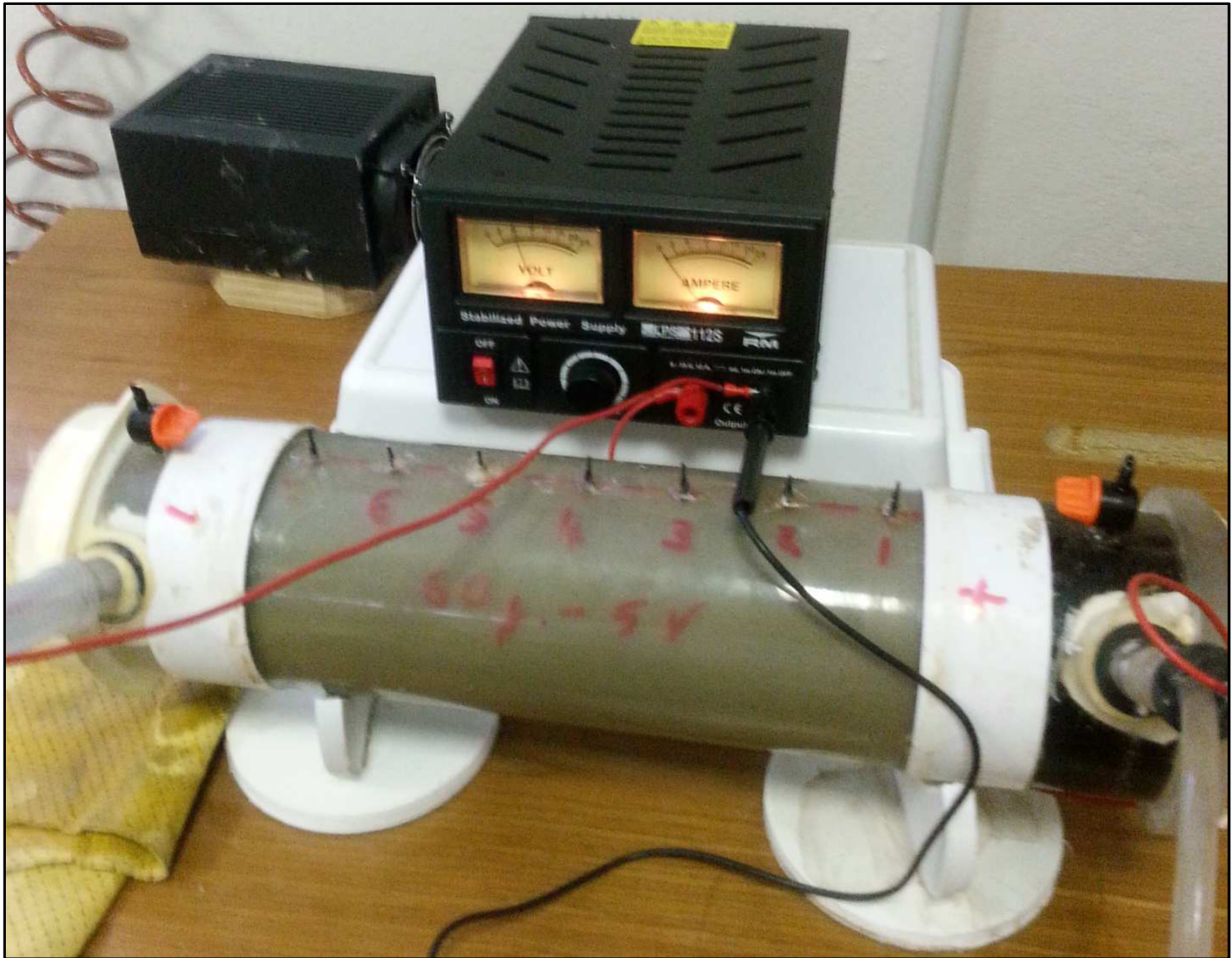


Foto 19. Campione EO-60g-5V-27cm.

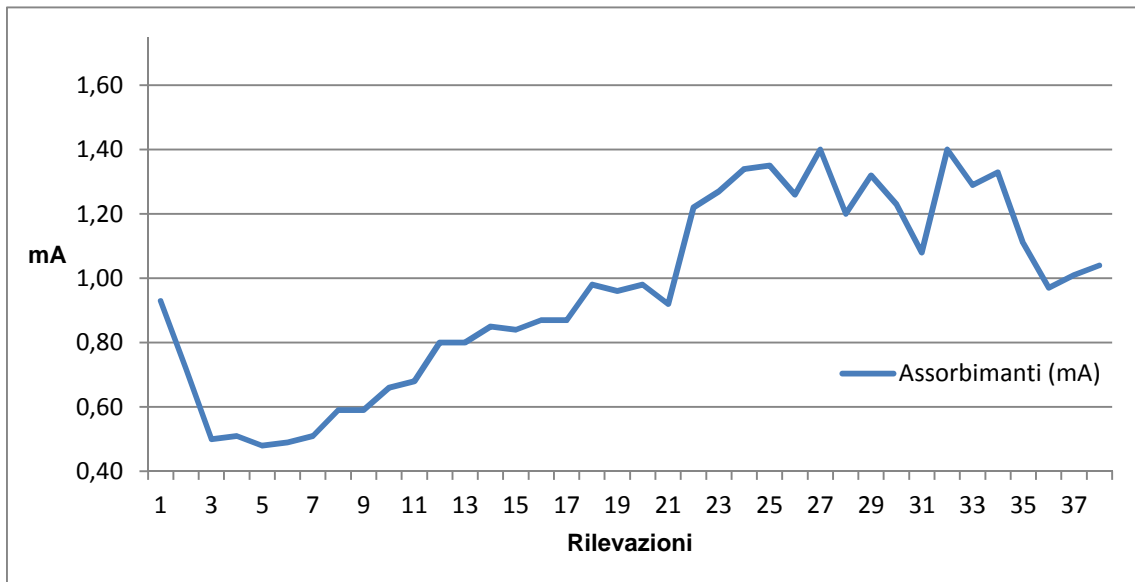


Grafico 62. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (60g, 38 rilevazioni).

**Tabella 32.**  
**Valori dei parametri.**

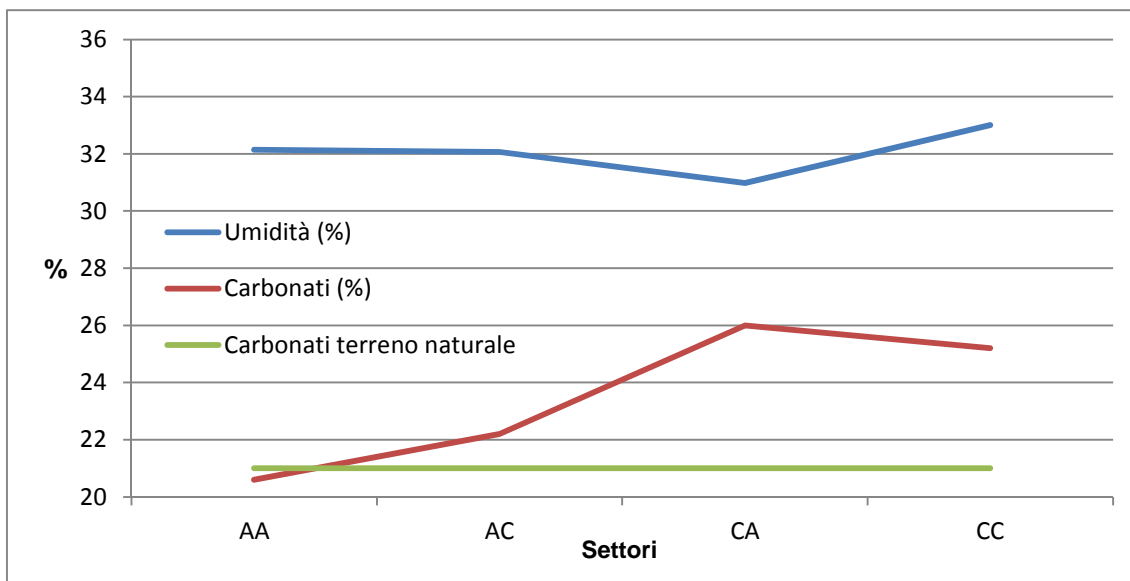
Settore	Carbonati (%)	W (%)	pH	VB	$\varphi$ (°)	c' (kPa)
AA	21 (21)	32	7,3 (8,46)	2,8 (2,7)	36 (30)	0,6 (18,9)
AC	22 (21)	32	7,8 (8,46)	2,5 (2,7)	37 (30)	0 (18,9)
CA	26 (21)	31	7,8 (8,46)	2,5 (2,7)	35 (30)	0 (18,9)
CC	25 (21)	33	8,0 (8,46)	2,3 (2,7)	31 (30)	6,3 (18,9)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.

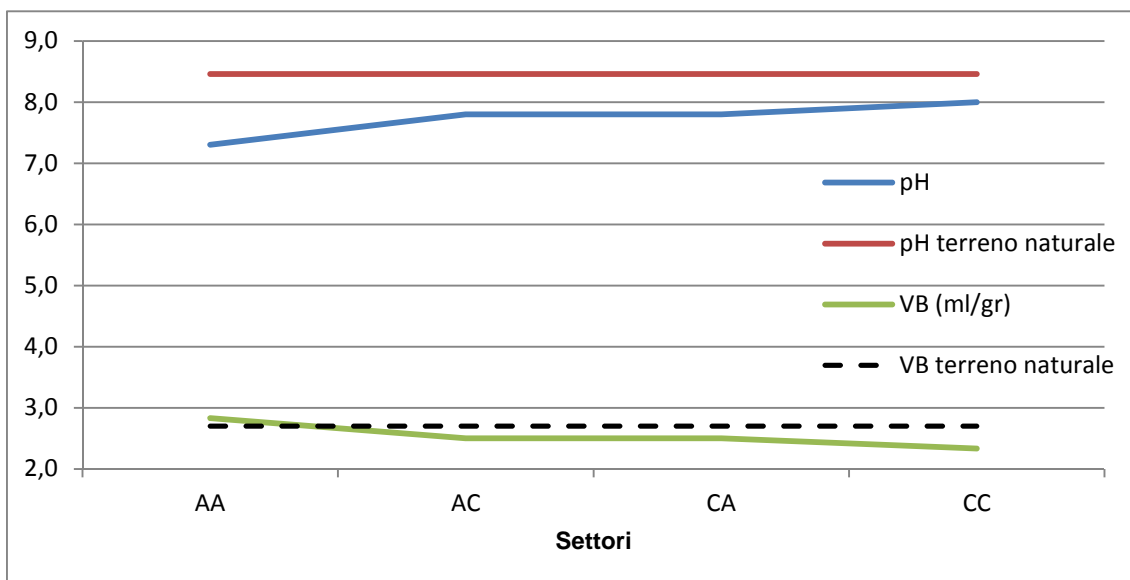
Per quanto riguarda le prove di taglio, per i settori AC e CA si è imposto il passaggio della retta di interpolazione per l'origine degli assi cartesiani a causa dell' $R^2$  originario di 93,8% del settore AC e del valore negativo della coesione per il settore CA nonostante un  $R^2$  di 99,9% che ha prodotto un  $\varphi$  come da Tabella 32 ed un  $R^2$  rispettivamente di 97,1% e di 99,5%. Il terreno originario infatti, come già riportato in precedenza, è stato dapprima essiccato a 40° C, destrutturato, tritato, omogeneizzato e poi idratato e/o trattato per i diversi scopi, con una coesione quindi pari a zero.

**Tabella 33.**  
**Dettaglio degli sforzi di taglio di picco per i tre gradini di consolidazione.**

Settore	$\tau$ picco (KPa) a 283,1 kPa	$\tau$ picco (KPa) a 176,9 kPa	$\tau$ picco (KPa) a 106,2 kPa
AA	205 (183)	141 (121)	73 (81)
AC	204 (183)	149 (121)	59 (81)
CA	199 (183)	112 (121)	65 (81)
CC	180 (183)	114 (121)	72 (81)



**Grafico 63. Umidità e Contenuto dei carbonati VS Settori del campione.**



**Grafico 64. VB e pH VS Settori del campione.**

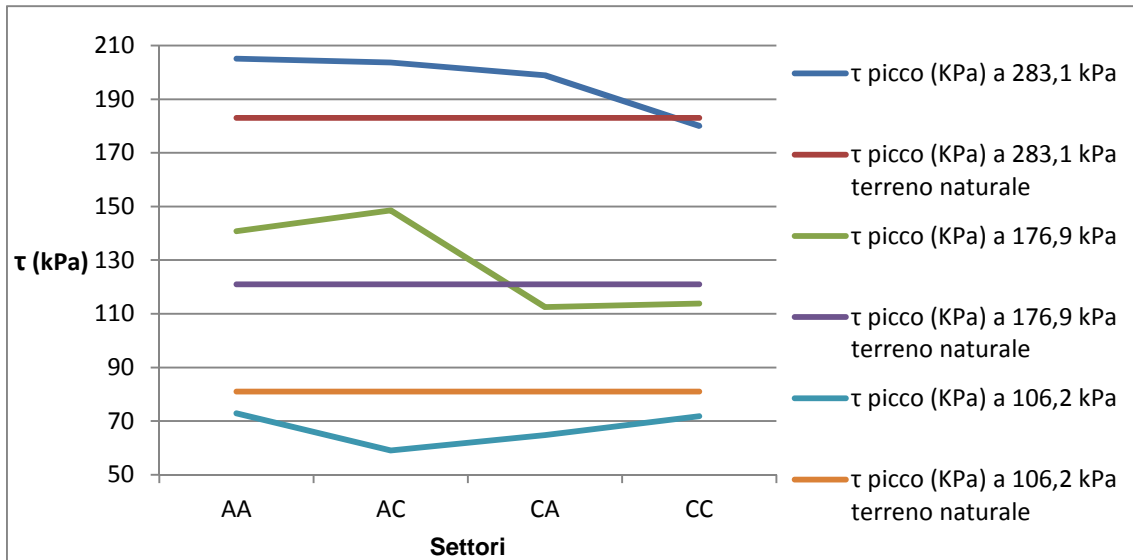


Grafico 65.  $\tau$  di picco (kPa) VS Settori del campione.

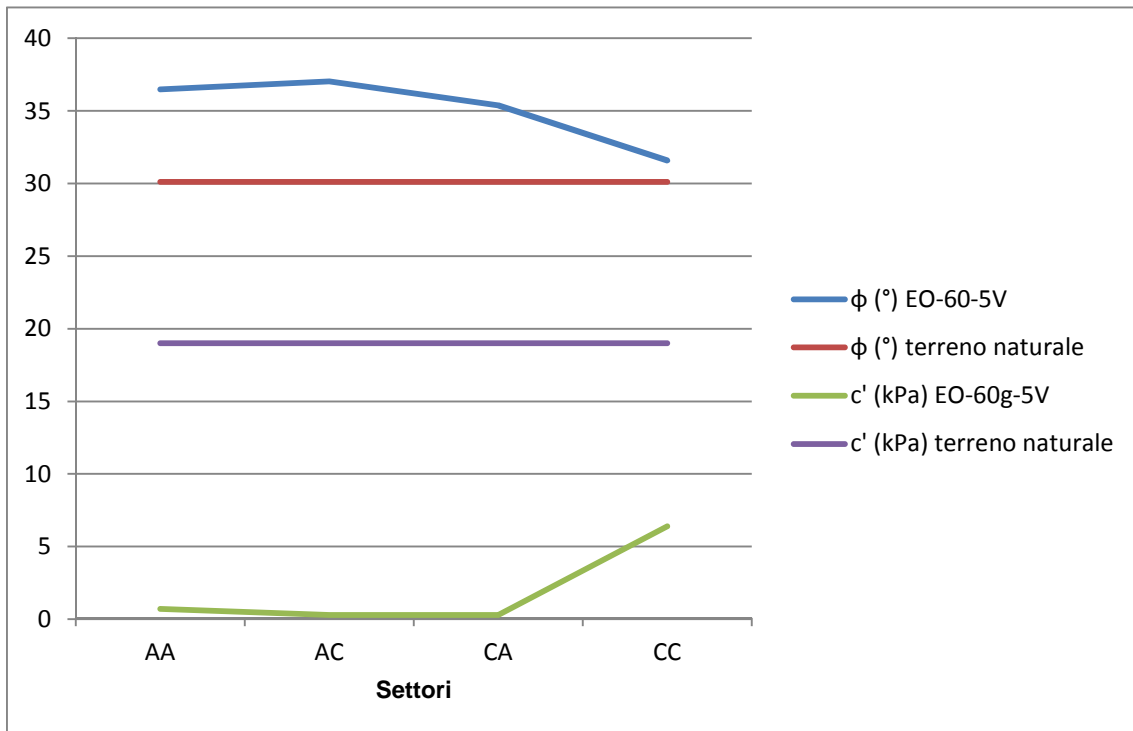


Grafico 66. Angolo di attrito interno  $\phi$  ( $^\circ$ ) e Coesione  $c'$  (kPa) VS Settori del campione.

### 9.3.7 Campione EO-60g-3V-15cm-rainwater1

La lunghezza del campione era di 15 cm. Le misurazioni sono state giornaliere. È stata rilevata la misura di assorbimento di corrente. Il flusso di acqua dal catodo non si è mai interrotto. La finalità di questo campione e del successivo EO-60g-3V-15cm-

rainwater2 è quella di verificare le variazioni della resistenza al taglio del terreno trattato per 60 giorni a bassa tensione dopo interazione con acqua piovana (pH = 5,5) per un quantitativo analogo con quello registrato nella criticità meteorologica del novembre 1994. Allo smontaggio dell'apparecchiatura, l'acqua del serbatoio anodico ha pH = 5,5 mentre quella del serbatoio catodico ha pH > 10.

Dopo il trattamento, il campione è stato messo in posizione verticale. Rimossi i due serbatoi, gli elettrodi di grafite sono stati posizionati ciascuno tra il filtro rigido ed il terreno, per la successiva fase di dewatering con alta densità di campo (1 V/cm) ovvero 15V. Dopo una settimana di trattamento, gli assorbimenti sono arrivati a zero. Il campione si presenta molliccio e bagnato nella parte anodica, ma asciutto, molto consistente nella parte catodica, con evidenti aree biancastre sulla superficie catodica del campione. Una volta arrivati a zero gli assorbimenti, è stato invertito il campo elettrico a parità di densità di campo. Dopo 5 giorni, gli assorbimenti a campo elettrico invertito sono ritornati a zero; è stato quindi rimesso il campo elettrico nel verso originario per quasi tre settimane. Al termine del dewatering, finalizzato a riprodurre la cristallizzazione in sito dei carbonati precipitati col trattamento (stagione asciutta), il terreno è stato giornalmente bagnato con acqua piovana (stagione piovosa). Il quantitativo analogo con quello registrato nella criticità meteorologica del novembre 1994 è stato calcolato dai dati pubblicati nella tesi di dottorato da Chiappone (paragrafo 3.5.1). La criticità meteorologica ha visto piovare complessivamente 600 mm di pioggia (300 mm nei 60 giorni precedenti i primi di novembre 1994, e 300 mm di pioggia massimi durante la criticità). Ipotizzando un trattamento di circa 3 metri di spessore, in linea con i dati riportati sulla profondità di scivolamento dei soil slip nelle Langhe, si ottengono 0,2 cm di pioggia / cm di terreno, ovvero 3 cm di acqua piovana per questo campione lungo 15 cm che, moltiplicati per un'area del campione di 61 cm<sup>2</sup>, portano il volume d'acqua piovana con cui bagnare il terreno a 185 cm<sup>3</sup>. L'acqua piovana è stata poi spruzzata giornalmente sulla superficie catodica del campione posto verticalmente.

Per quanto riguarda le prove di taglio, a differenza di quanto fatto per gli altri campioni di 15 cm di lunghezza in cui si è fatto riferimento a pressioni di consolidazione di 283,1 kPa, si è scelto di effettuare le prove di taglio con pressione di consolidazione di 176,9 kPa.

La tensione è stata di 3V per 60 giorni. L'assorbimento medio è stato di 0,23 mA. Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione.



Foto 20. Campione EO-60g-3V-15cm-rainwater1.



a b c  
**Foto 21. Dewatering: a) posizionamento catodo; b) copertura parte catodica; c) durante il trattamento.**



a b  
**Foto 22. Termine dewatering: a) zona catodica; b) zona anodica.**

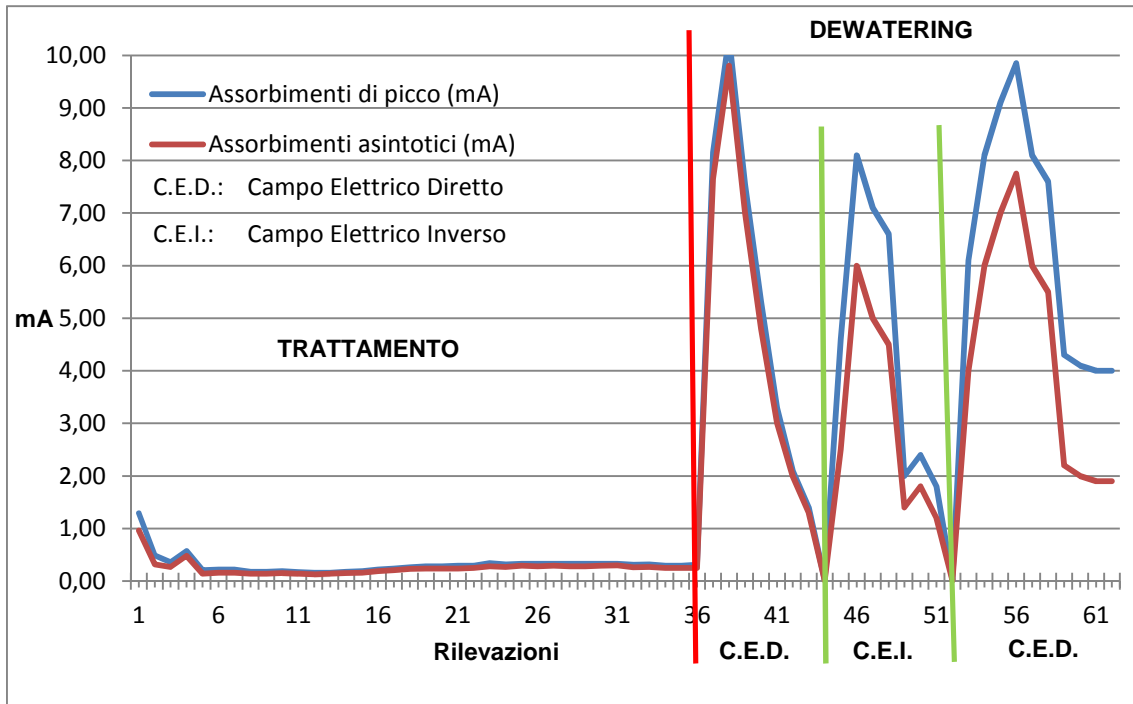


Grafico 67. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (60g di trattamento, 36 rilevazioni + 30g di dewatering, 26 rilevazioni).

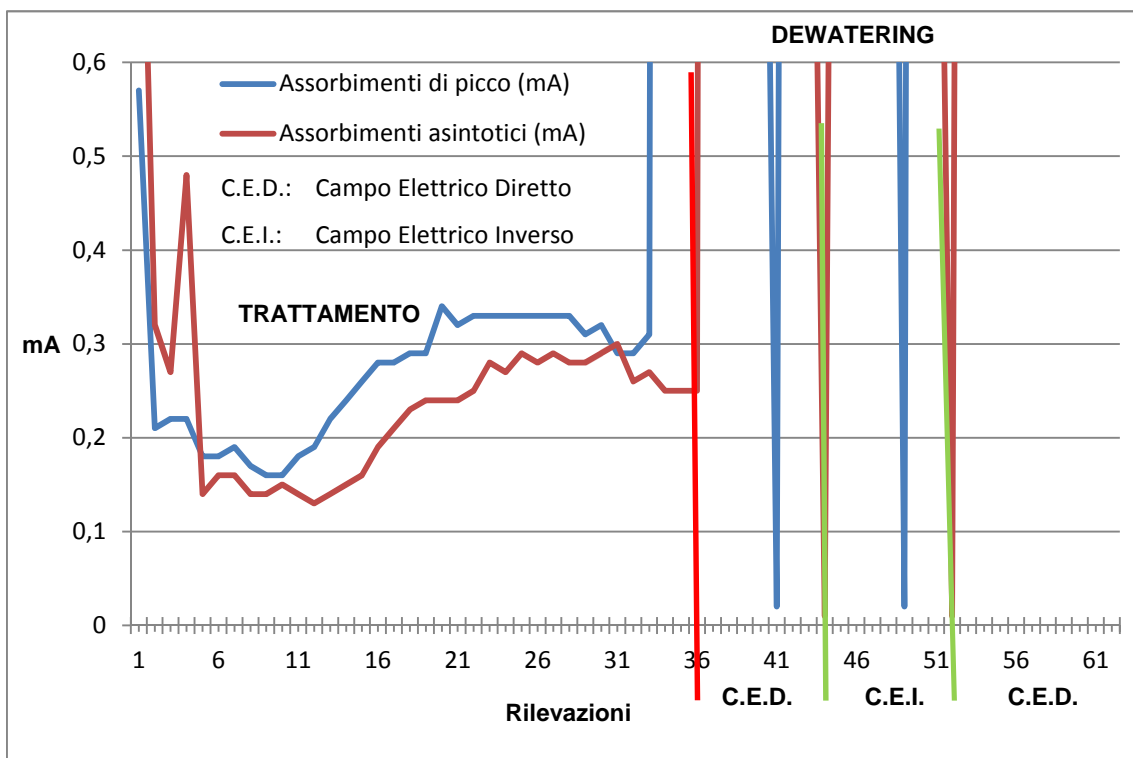


Grafico 68. Ingrandimento del grafico precedente.



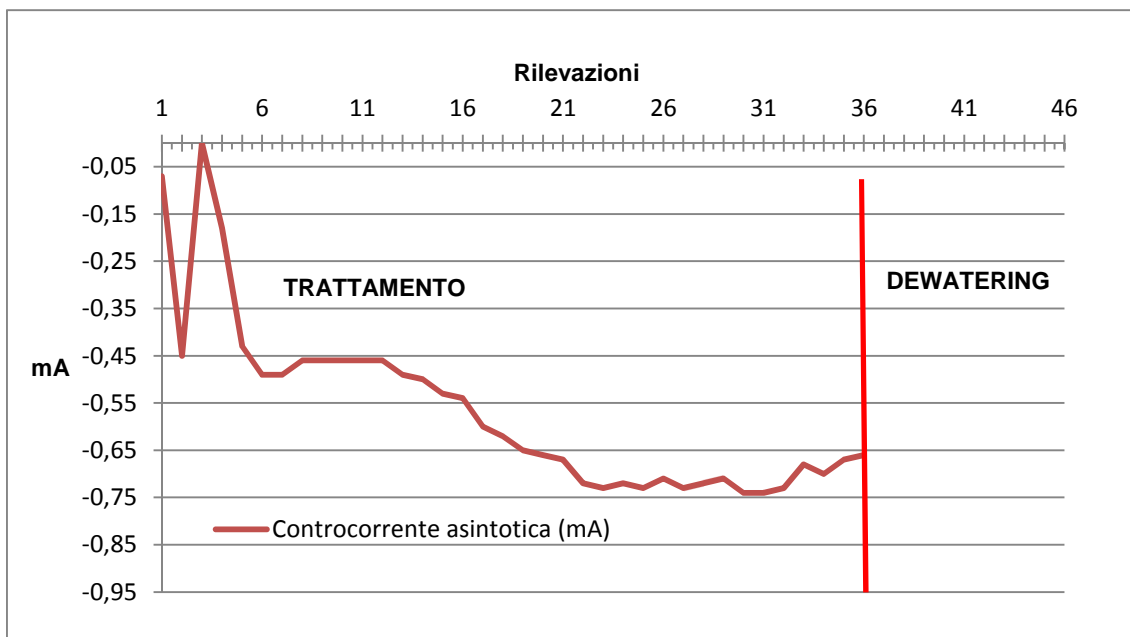
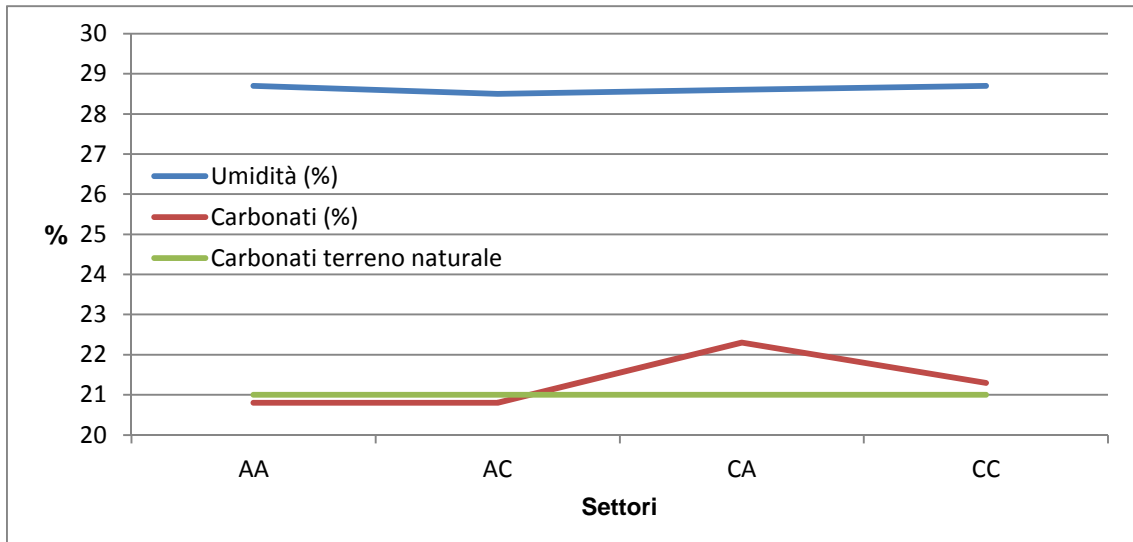


Grafico 69. Controcorrente (mA) VS Tempo (60g).

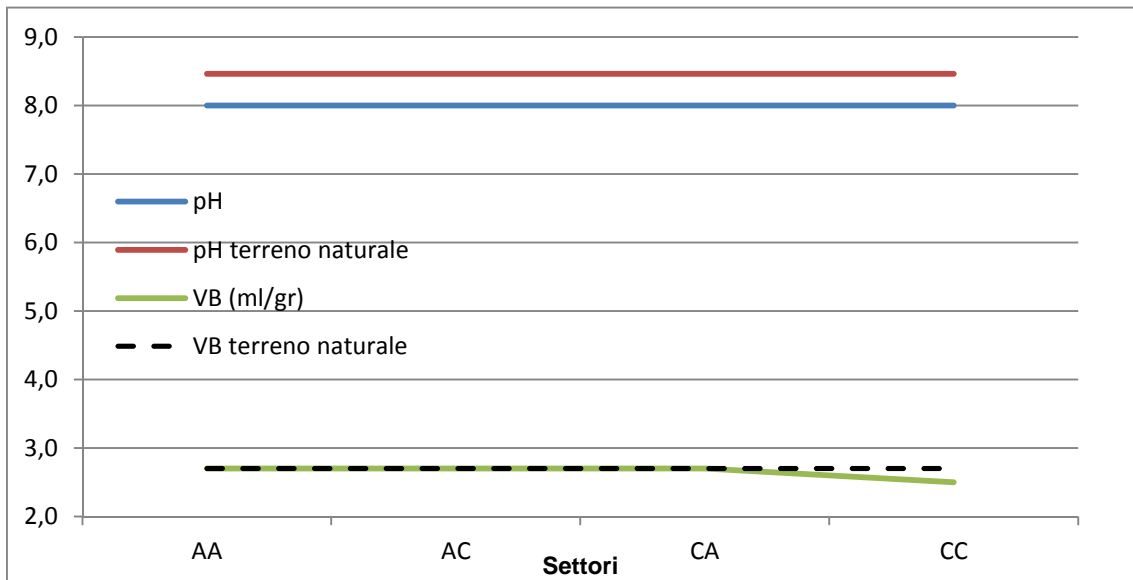
Tabella 34.  
Valori dei parametri.

Settore	Carbonati (%)	W (%)	$\tau$ picco (KPa) a 176,9 kPa	pH	VB
AA	21 (21)	29	72 (121)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
AC	21 (21)	29	56 (121)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
CA	22 (21)	29	93 (121)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
CC	21 (21)	29	73 (121)	8,0 (8,46)	2,5 (2,7)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.



**Grafico 70. Umidità e Contenuto dei carbonati VS Settori del campione.**



**Grafico 71. VB e pH VS Settori del campione.**

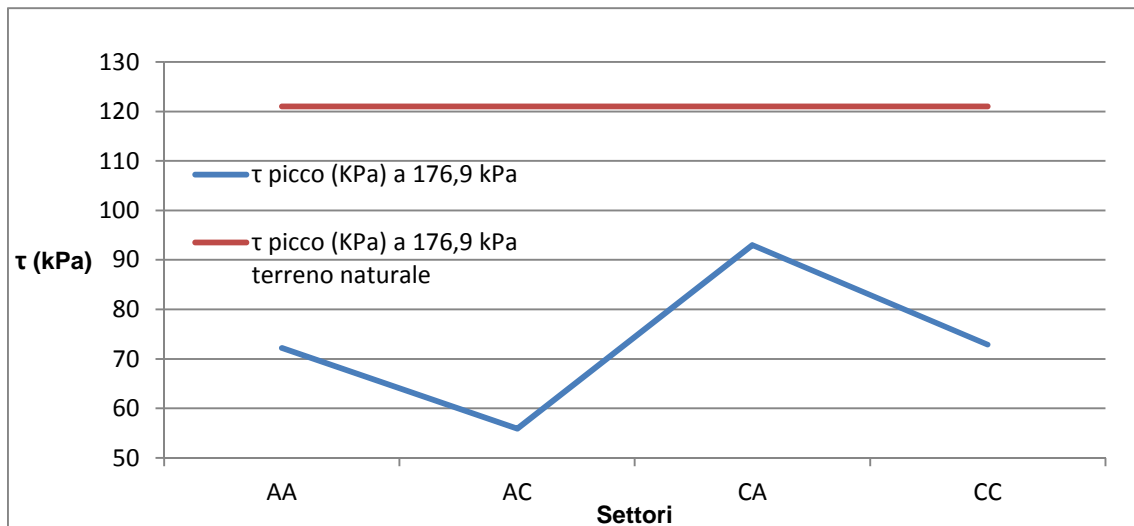


Grafico 72.  $\tau$  di picco (kPa) a 176,9 kPa VS Settori del campione.

### 9.3.8 Campione EO-60g-3V-15cm-rainwater2

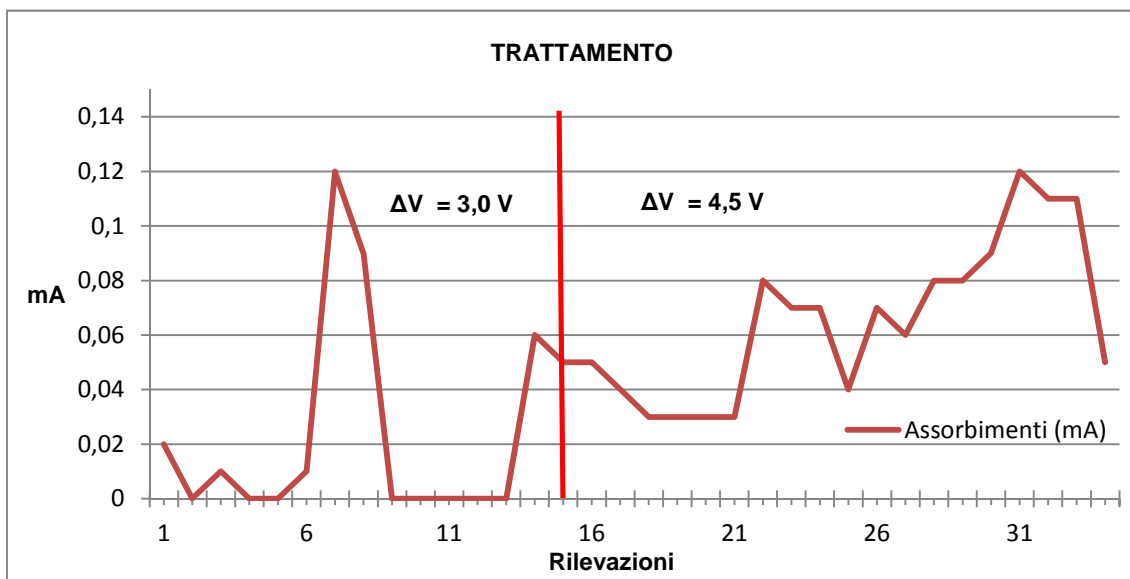
La lunghezza del campione era di 15 cm. Le misurazioni sono state giornaliere. È stata rilevata la misura di assorbimento di corrente. Il flusso di acqua dal catodo non si è mai interrotto. La finalità di questo campione e del precedente EO-60g-3V-15cm-rainwater1 è quella di verificare le variazioni della resistenza al taglio del terreno trattato per 60 giorni a bassa tensione dopo interazione con acqua piovana (pH = 5,5) per un quantitativo analogo con quello registrato nella criticità meteorologica del novembre 1994.

Allo smontaggio dell'apparecchiatura, l'acqua del serbatoio anodico ha pH = 2,5 mentre quella del serbatoio catodico ha pH > 10.

Dopo il trattamento, il campione è stato messo in posizione verticale. Rimossi i due serbatoi, e gli elettrodi. La successiva fase di dewatering è avvenuta per essiccamento naturale per esposizione al sole. Dopo tre giorni, il campione si presenta asciutto.

Per quanto riguarda l'idratazione del campione con acqua piovana e le prove di taglio, sono state seguite le identiche procedure del campione EO-60g-3V-15cm-rainwater1.

La tensione è stata di 3V per 30 giorni, 4,5V per altri 30 giorni perché col primo voltaggio, la corrente era molto vicina allo zero. L'assorbimento medio è stato di 0,05 mA. Si riportano di seguito i risultati del trattamento su questo campione.



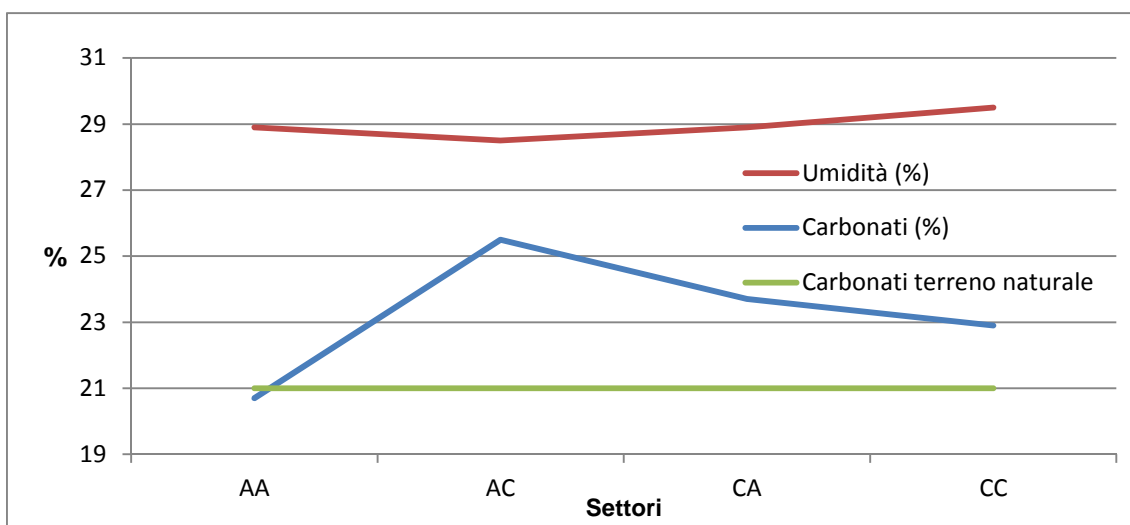
**Grafico 73. Assorbimenti elettrici (mA) VS Tempo (30g di trattamento, 15 rilevazioni con  $\Delta V = 3,0 V$  + 30g di trattamento, 19 rilevazioni con  $\Delta V = 4,5 V$ ).**

**Tabella 35.**

**Valori dei parametri**

Settore	Carbonati (%)	W (%)	$\tau$ picco (KPa) a 176,9 kPa	pH	VB
AA	21 (21)	29	61 (121)	8,0 (8,46)	2,7 (2,7)
AC	26 (21)	29	57 (121)	8,0 (8,46)	2,6 (2,7)
CA	24 (21)	29	94 (121)	8,0 (8,46)	2,6 (2,7)
CC	23 (21)	30	65 (121)	8,0 (8,46)	2,5 (2,7)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.



**Grafico 74. Umidità e Contenuto dei carbonati VS Settori del campione.**

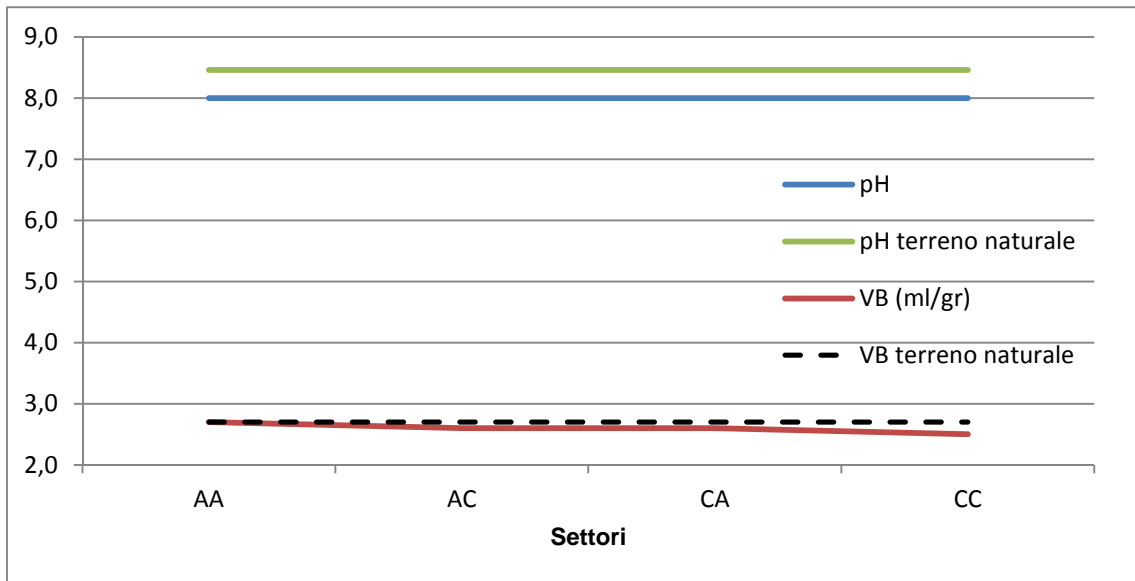


Grafico 75. VB e pH VS Settori del campione.

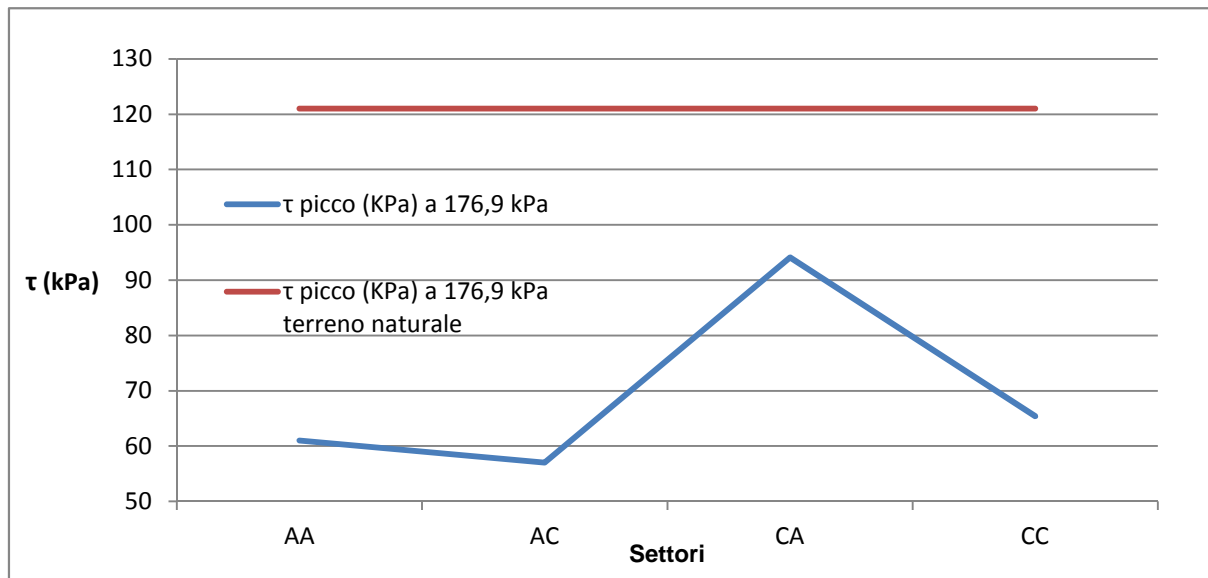


Grafico 76.  $\tau$  di picco (KPa) a 176,9 kPa VS Settori del campione.

## 9.4 Operazioni preliminari alla realizzazione del modello fisico

### 9.4.1 Verifica della conducibilità elettrica su campioni di terreno insaturo con diverso grado di costipazione

Ai fini della verifica della conducibilità elettrica su campioni di terreno insaturo a parità di contenuto d'acqua per il suo successivo trattamento nel modello fisico per 60 giorni, sono stati preparati tre campioni di terreno insaturo tutti con contenuto d'acqua iniziale di  $W = 19\%$  lunghi ciascuno 15 cm e posti tutti in verticale, con serbatoio anodico in basso ma senza il serbatoio catodico. Al terreno è stato applicato un  $\Delta V = 3,0V$ .

Il terreno è in condizioni di insaturazione, e l'acqua del serbatoio anodico posto in basso non è a contatto né col terreno, né col filtro rigido e la carta da filtro interposta. L'anodo è nel serbatoio anodico, mentre il catodo è incassato nella parte superiore e sommitale del campione, coperto da carta da filtro e da un coperchio appoggiato sui bordi superiori del cilindro (Foto 24). Sono stati individuati tre gradi di costipazione:

- A) 1,35 gr/cm<sup>3</sup>;
- B) 1,50 gr/cm<sup>3</sup>;
- C) 1,65 gr/cm<sup>3</sup>.

I tre campioni hanno evidenziato comportamenti alquanto diversi: il campione A ha evidenziato bassa conducibilità (0,23 mA), il campione B ha dimostrato discreta conducibilità (0,28 mA), mentre l'elevata conducibilità del campione C non è stata considerata a causa della diminuzione di volume del terreno registrata dopo 10 giorni di trattamento.

Al termine del trattamento del campione EO-60g-3V-15cm-B-promodello, sono seguite alcune analisi post – trattamento: Tabella 36, Grafico 77, Grafico 78, Grafico 79.



a



b

Foto 23. a) I campioni sottoposti a verifica di conducibilità. b) Il campione EO-60g-3V-15cm-B-promodello.

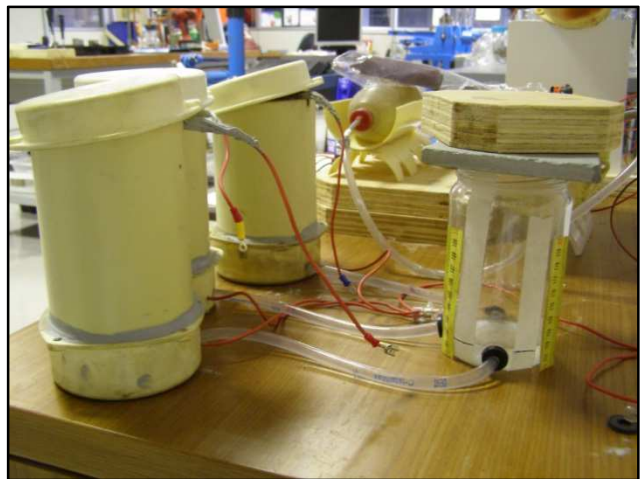


Foto 24. I tre campioni utilizzati per la prova di conducibilità.

#### 9.4.2 Risultati del campione EO-60g-3V-15cm-B-promodello

La media degli assorbimenti per l'intera durata del trattamento è stata di 0,15 mA, quella della prima parte del trattamento (con copertura superiore del campione) è stata di 0,28 mA, quella della seconda parte del trattamento (senza copertura superiore del campione) è stata di 0,08 mA.

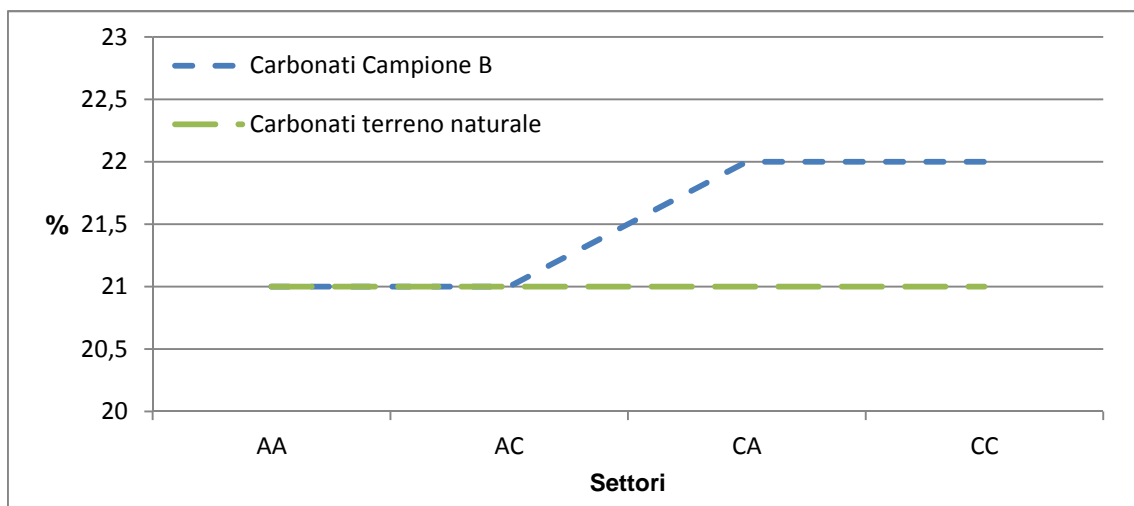


**Grafico 77. Assorbimenti elettrici (mA) del Campione "B" VS Tempo (60g).**

**Tabella 36.**  
**Valori dei parametri.**

Settore	Carbonati (%)	VB	pH	$\tau$ picco (KPa) a 176,9 kPa
AA	21 (21)	2,5 (2,7)	8,0 (8,46)	75 (121)
AC	21 (21)	2,5 (2,7)	8,0 (8,46)	60 (121)
CA	22 (21)	2,5 (2,7)	8,0 (8,46)	64 (121)
CC	22 (21)	2,5 (2,7)	8,0 (8,46)	60 (121)

I valori tra parentesi si riferiscono al terreno naturale.



**Grafico 78. Contenuto in carbonati VS Settori del campione.**



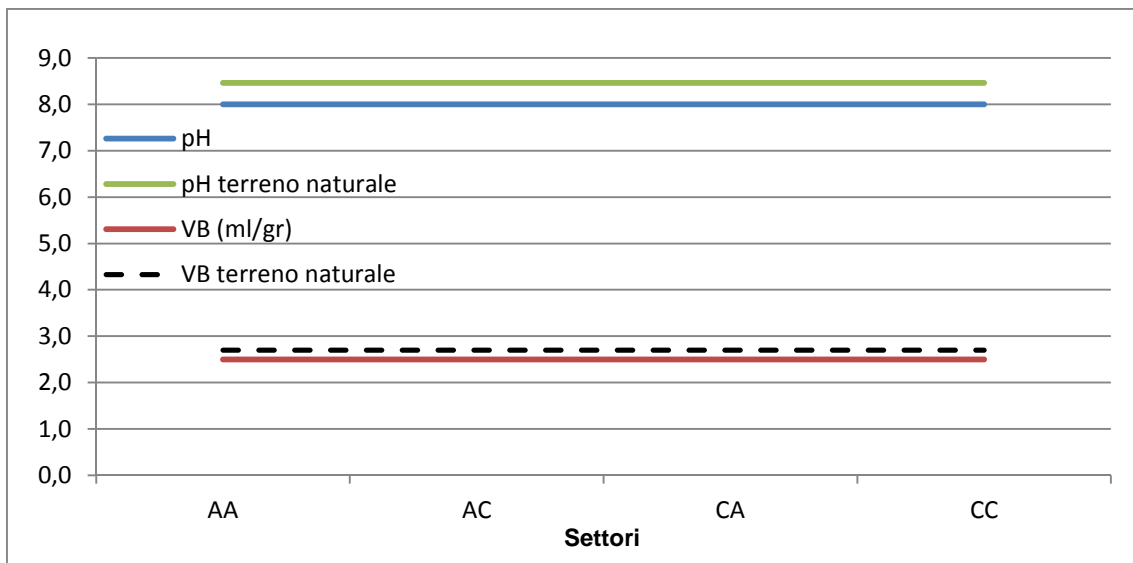


Grafico 79. pH e VB VS Settori del campione.

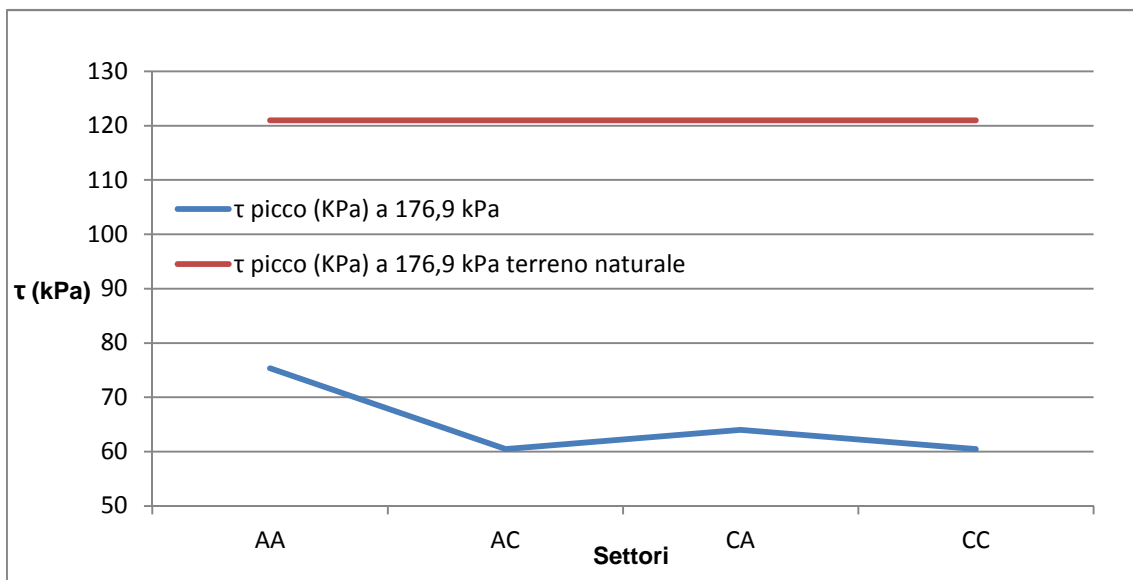


Grafico 80.  $\tau$  picco (KPa) a 176,9 kPa VS Settori del campione.

#### 9.4.3 Realizzazione dell'impianto

Si riportano di seguito i dati del modello fisico. La base del modello è il pavimento in cemento armato del laboratorio di idraulica della sede AIPO di Boretto, le sponde ed il setto divisorio sono costituite da pannelli di legno. In particolare, le sponde sono state rese fisse ed immobili da un telaio di tubi innocenti tassellati nel pavimento come da Foto 25,

Foto 26 e Foto 27. La struttura è stata resa completamente impermeabile mediante la stesa di una doppia mano di catrame, in modo da evitare qualsiasi perdita ed assorbimento di acqua attraverso i limiti esterni del modello.

Sul fondo di ciascun settore è presente un dispersore di acqua, rivestito di geotessile, che ospita l'anodo, costituito da 5 elettrodi. Il retro del fondo è attrezzato con due tubi per fornire acqua ai dispersori. Si è avuta l'accortezza di non permettere mai la tracimazione dell'acqua dal dispersore. Il catodo, costituito da 10 elettrodi, è stato inserito direttamente nel terreno sulla superficie superiore del modello. La distanza tra anodo e catodo è di circa 65 cm. Il sistema è stato alimentato da un erogatore di corrente continua stabilizzata con una differenza di potenziale di 15V. Il modello, diviso in due settori (Trattato e Non Trattato), è sormontato da una putrella ancorata al pavimento (Figura 13, Foto 11).

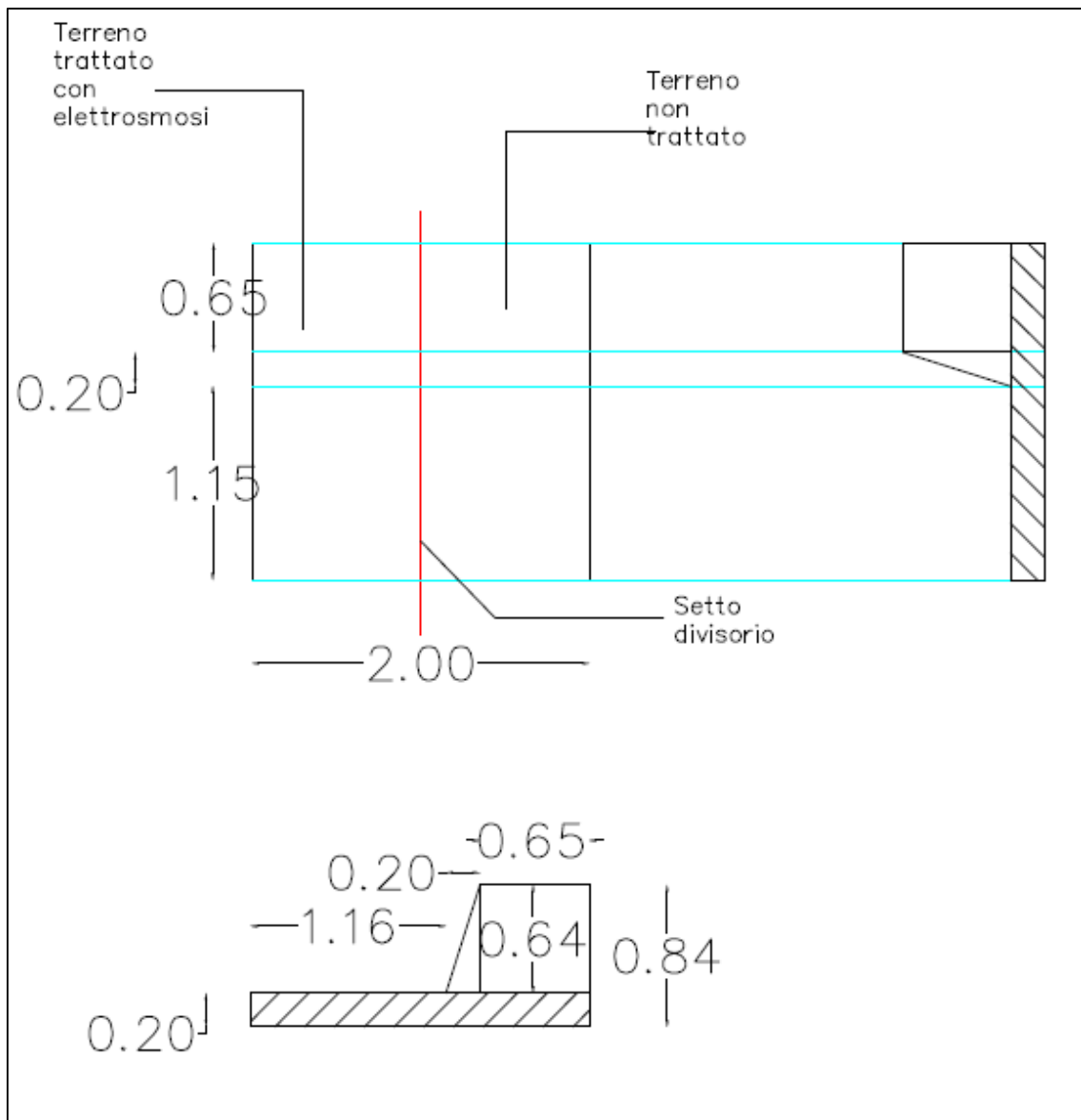


Figura 13. Progetto dell'impianto realizzato. I valori sono espressi in metri.

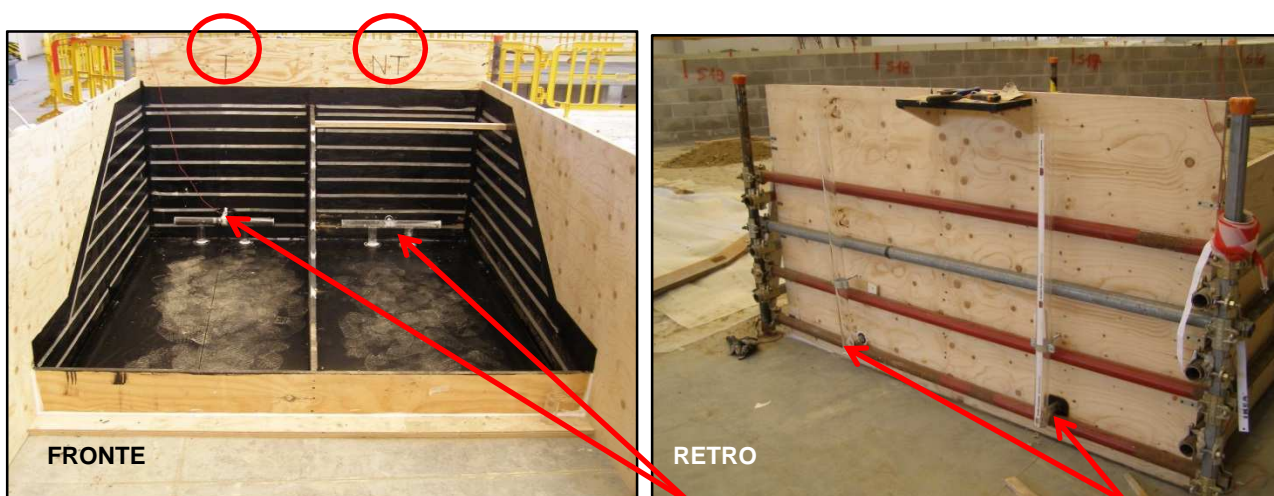


Foto 25. Impianto realizzato. Si evidenziano i diffusori anodici rivestiti di geotessile (Foto 27) ed i tubi per fornire loro acqua.

Foto 26. Retro dell'impianto con l'alimentatore, e parte superiore del modello fisico con i catodi in grafite inseriti direttamente nel terreno. L'ellisse azzurra indica il tubo interamente fessurato di rilevazione di eventuale acqua libera all'interno e sul fondo del modello.

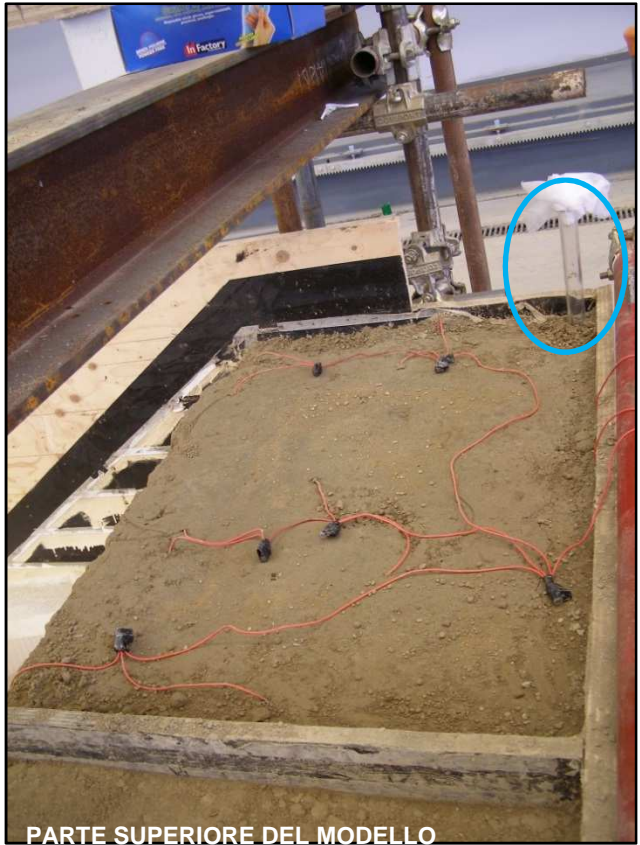
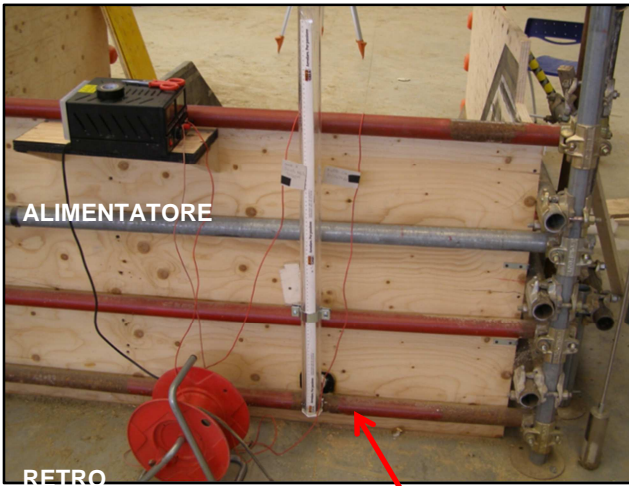


Foto 27. Sistema di alimentazione del diffusore anodico rivestito di geotessile.



Foto 28. Catodi utilizzati per il collasso del modello fisico T2.

#### 9.4.4 Prove di costipazione del terreno utilizzato per il modello fisico



Foto 29. Rullo utilizzato per la costipazione.

È stato appositamente realizzato un rullo (Foto 29) lungo 96 cm, con diametro di 10 cm e del peso complessivo di 31,5 kg, costituito da due tubi coassiali di metallo tra loro riempiti di cemento.

Sono state svolte delle prove di costipazione in strati da 5 cm, con successivo prelievo di un campione di terreno da due zone distinte (zona 1 e zona 2) dello stesso terreno appena costipato. Questa operazione è stata ripetuta per diversi numeri di rullate (Grafico 81).

A seguito dei risultati ottenuti, si è proceduto quindi alla costipazione di strati di 5 cm di spessore sottoposti ciascuno a 50 rullate.

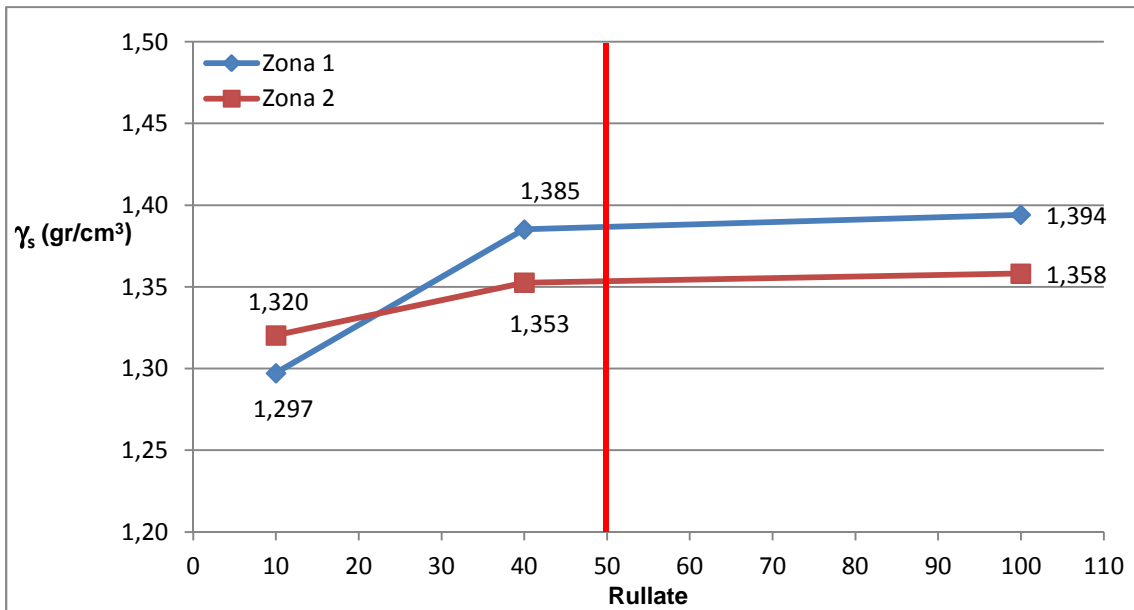


Grafico 81. Prova di costipazione: in ascisse il numero di rullate, in ordinate il peso di volume secco.

9.5 Comparazione di due sequenze fotografiche relative ai collassi del Modello fisico NT6, e del Modello fisico T2.

Modello fisico NT6



Pressione

7,0 kPa

Modello fisico T2



7,0 kPa



Modello fisico NT6



Pressione

14,0 kPa

Modello fisico T2



14,0 kPa

Modello fisico NT6



Pressione

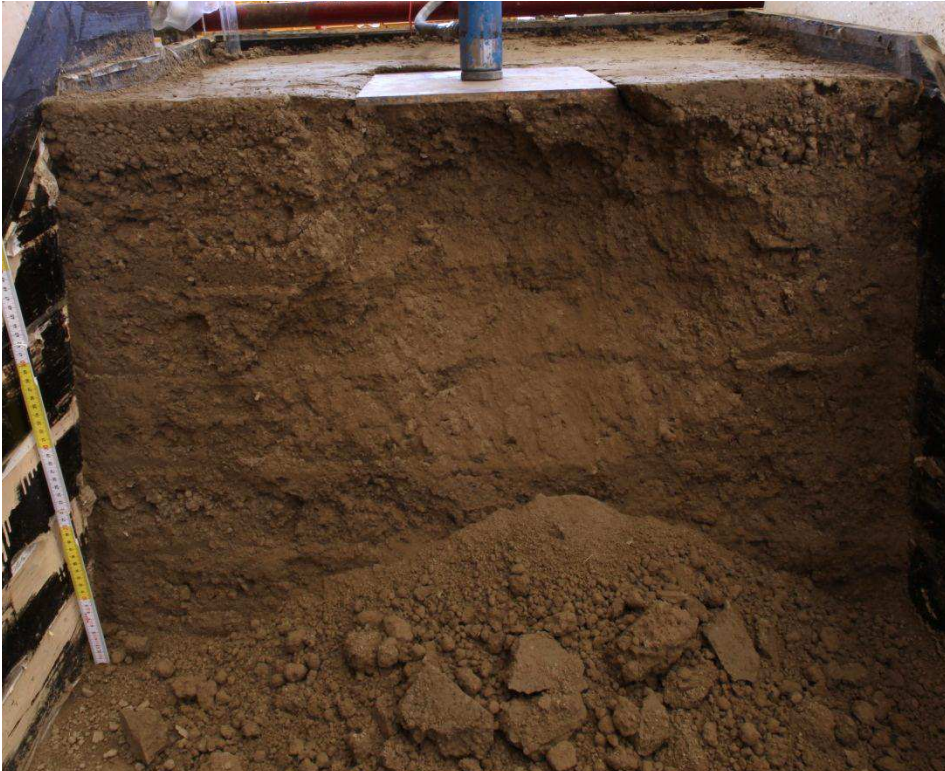
21,0 kPa

Modello fisico T2



21,0 kPa

Modello fisico NT6



Pressione

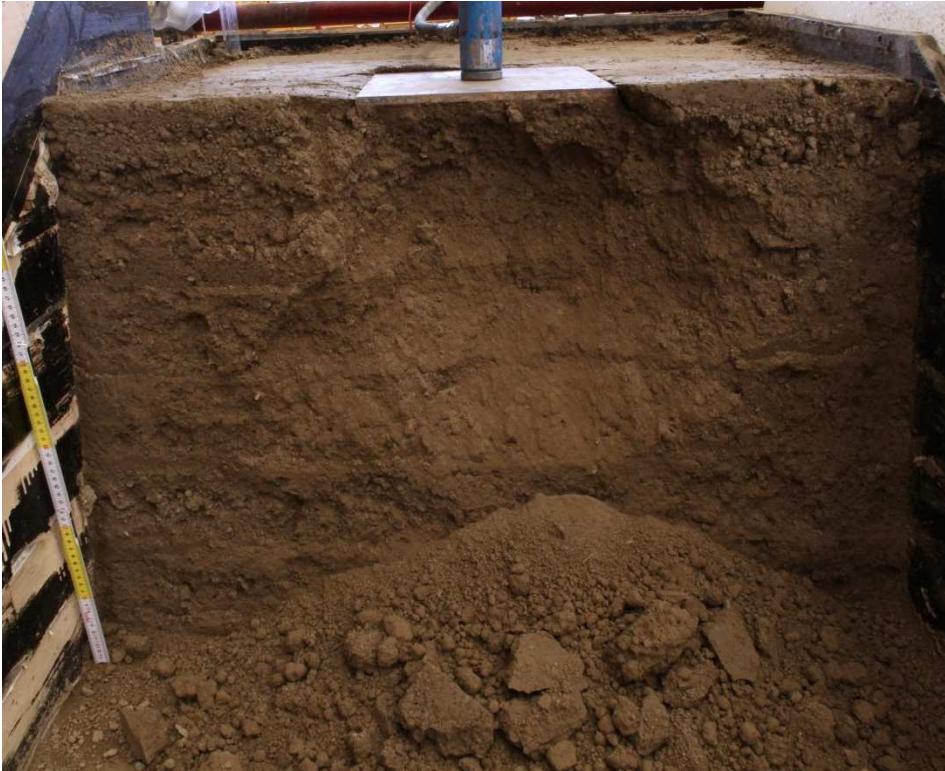
24,4 kPa  
COLLASSO

Modello fisico T2



24,4 kPa

Modello fisico NT6



Pressione

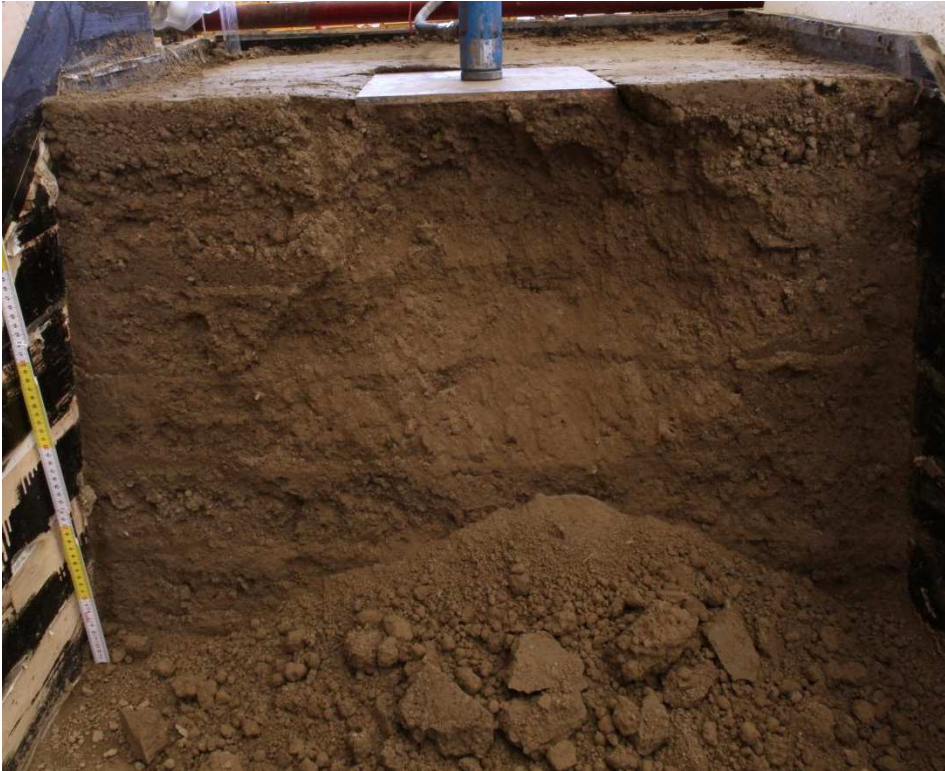
24,4 kPa  
COLLASSO

Modello fisico T2



27,9 kPa

Modello fisico NT6



Pressione

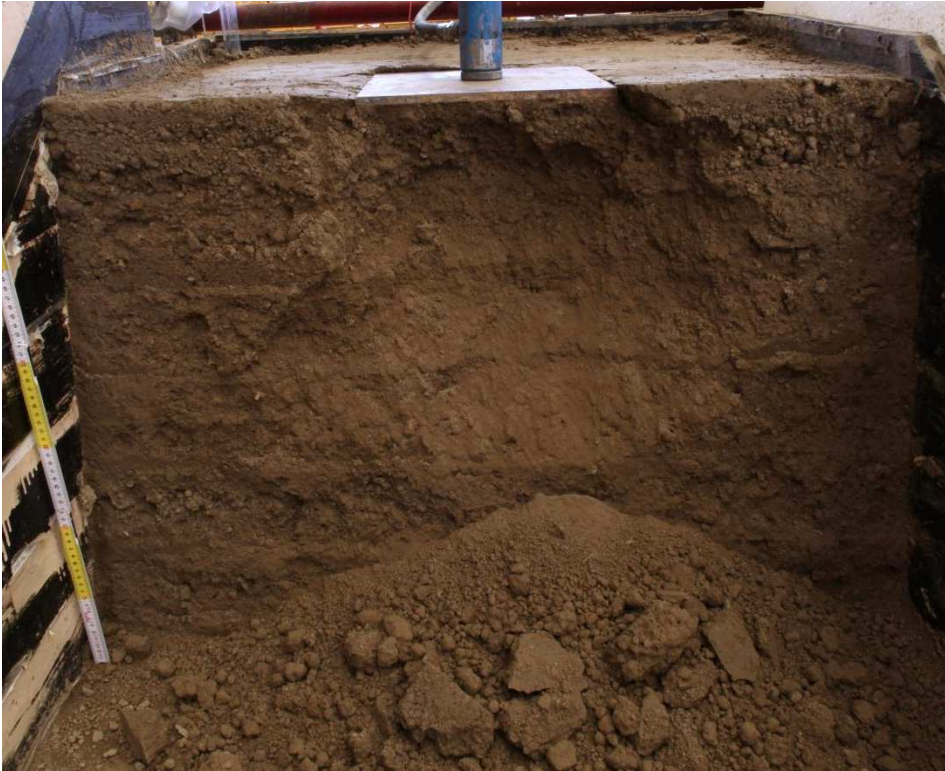
24,4 kPa  
COLLASSO

Modello fisico T2



31,4 kPa

Modello fisico NT6



Pressione

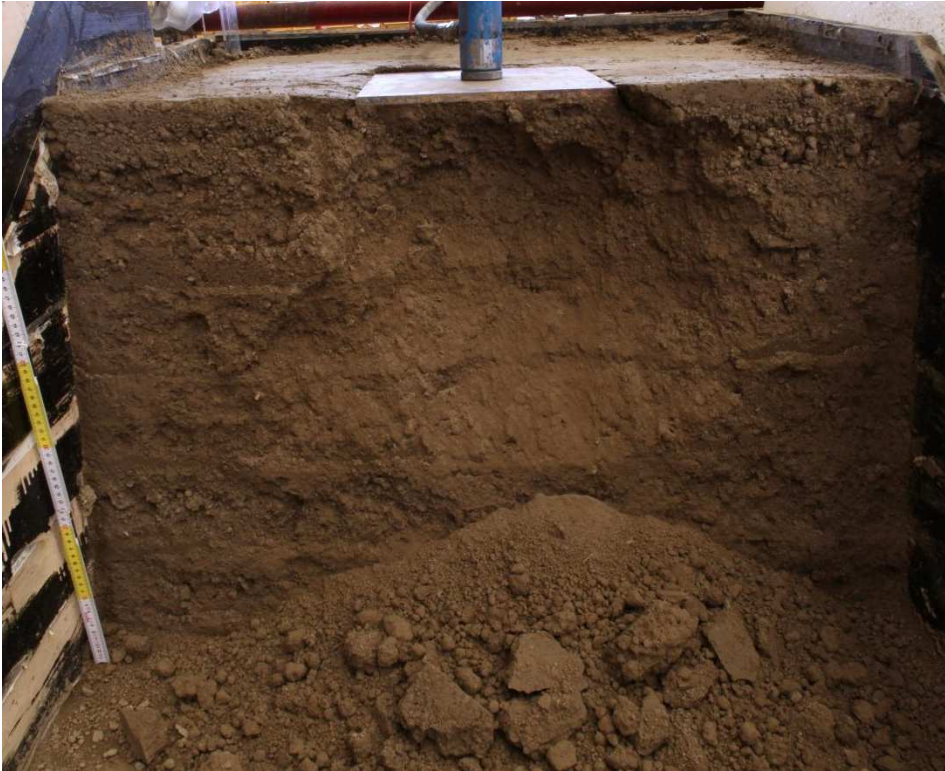
24,4 kPa  
COLLASSO

Modello fisico T2



34,9 kPa

Modello fisico NT6



Pressione

24,4 kPa  
COLLASSO

Modello fisico T2



37,7 kPa

Modello fisico NT6



Pressione

24,4 kPa  
COLLASSO

Modello fisico T2



37,7 kPa  
COLLASSO



10. ALLEGATI – Analisi dell'acqua usata nella procedura sperimentale in laboratorio



Acquedotto di Caprara

Periodo dal 01/07/2013 al 30/09/2014

Parametro	Unità di misura	N° dati	Media	Valore limite*
pH	unita' pH	201	7,4	6,5 - 9,5
Biossido di cloro	mg/l	196	0,13	
Conducibilità	µS/cm	201	747	2500
Alcalinità (totale)	mg/l	59	360,0	
Torbidità	NTU	201	0,44	
Durezza	°F	44	34,3	
Residuo 180°C	mg/l	60	535,5	
Ammonio	mg/l	201	0,00	0,5
Nitriti	mg/l	60	0,000	0,1
Nitrati	mg/l	201	24,1	50
Cloruri	mg/l	201	47,4	250
Fluoruri	mg/l	22	0,02	1,5
Solfati	mg/l	201	46,4	250
Fosforo	mg/l	60	0,0101	
Calcio	mg/l	60	101,233	
Magnesio	mg/l	60	22,1335	
Manganese	µg/l	60	0,934	50
Potassio	mg/l	60	2,246	
Sodio	mg/l	60	33,544	200
Ferro	µg/l	60	11,106	200
Rame	mg/l	22	0,0086	1
Arsenico	µg/l	22	0,11	10
Batteri coliformi a 37°C	MPN/100 ml	201	0	0
Escherichia coli	MPN/100 ml	201	0	0
Enterococchi	UFC/100 ml	60	0	0

\* = valore di parametro indicato dalla legislazione vigente (D.Lgs. 31/2001)

Processi Trattamento Acque  
D.ssa Lorena Meglioli