



UNIVERSITÀ DI PARMA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

Dottorato di Ricerca in
Ingegneria Civile e Architettura

CICLO XXXIII

**Sviluppo e validazione di sistemi di monitoraggio
per il controllo remoto delle opere passive a
protezione del territorio.**

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. Sandro Longo

Tutore:

Chiar.mo Prof. Andrea Segalini

Dottorando:

Ing. Roberto Savi

Anni Accademici 2017/2018 – 2019/2020

“Every instrument on a project should be selected and placed to assist with answering a specific question: if there is no question, there should be no instrument”

John Dunnicliff

SOMMARIO

Lista delle figure.....	7
Lista delle tabelle	14
Lista delle equazioni.....	16
Introduzione.....	18
 Capitolo 1: Rischio frane: valutazione e mitigazione	20
1.1 Definizione di rischio	20
1.2 Classificazione dei movimenti franosi.....	22
1.3 Fenomeni di caduta massi	26
1.3.1 Meccanica della caduta massi	26
1.3.1.1 Zona di distacco	27
1.3.1.2 Zona di propagazione	27
1.3.1.3 Zona di deposito o arresto	29
1.3.2 Fattori scatenanti.....	30
1.3.3 Misure di mitigazione del rischio da caduta massi: opere di difesa	31
1.3.3.1 Rilevati paramassi	33
1.3.3.2 Gallerie paramassi.....	33
1.3.3.3 Barriere paramassi	34
1.4 Fenomeni di debris flow	36
1.4.1 Meccanica delle colate detritiche.....	36
1.4.2 Fattori scatenanti.....	38
1.4.3 Misure di mitigazione del rischio da colate detritiche: opere di difesa	40
1.4.3.1 Briglie frangicolata.....	41
1.4.3.2 Bacino di deposito.....	41
1.4.3.3 Briglie filtranti.....	41
1.4.3.4 Barriere flessibili.....	43
1.4.4 Interazione tra il flusso e le strutture flessibili: accelerazioni sulla rete.....	44
 Capitolo 2: Monitoraggio e stato dell'arte dei sistemi dedicati ai movimenti rapidi	53
2.1 Monitoraggio.....	53
2.1.1 Caratteristiche degli strumenti di monitoraggio.....	53
2.2 Stato dell'arte dei sistemi dedicati al monitoraggio dei fenomeni rapidi.....	55
2.2.1 I Sistemi di monitoraggio nella mitigazione del rischio da caduta massi	55
2.2.1.1 Sistemi di monitoraggio a controllo dell'ammasso roccioso.....	55
2.2.1.2 Sistemi di monitoraggio a controllo delle opere passive.....	59
2.2.2 I Sistemi di monitoraggio nella mitigazione del rischio da colate detritiche	61
2.2.2.1 AWS - Advance Warning system	63
2.2.2.2 EWS - Event Warning Systems.....	67
2.2.2.3 PEWS - Post Event Warning system.....	77

Capitolo 3: Sistema Rockfall Safety Network.....	78
3.1 Descrizione Sistema.....	78
3.1.1 Gestione dei dati	80
3.1.2 Piattaforma di rappresentazione dei dati.....	81
3.2 Sviluppo del Sistema.....	82
3.2.1 Modulo BPM	82
3.2.1.1 Installazione.....	83
3.2.1.2 Sviluppo	84
3.2.1.3 Calibrazione	87
3.2.1.4 Test per valutare l'affidabilità del sistema radio e la dipendenza dei sensori alle variazioni di temperatura.....	93
3.2.2 Cella di carico - Load Link.....	94
3.2.2.1 Progettazione della struttura della cella	94
3.2.2.2 Selezione estensimetri e schema di collegamento	104
3.2.2.3 Calibrazione	114
3.2.3 Dispositivo Trigger Link.....	116
3.2.4 Database MySQL e software di calcolo RSN	118
3.2.5 Piattaforma di rappresentazione web.....	122
Capitolo 4 Caso di studio: Sito pilota di Vobarno.....	124
4.1 Architettura del sistema.....	126
4.2 Attività di monitoraggio	129
4.2.1 Problematiche riscontrate e soluzioni: Sistema di alimentazione fotovoltaico..	129
4.2.2 Problematiche riscontrate e soluzioni: Sistema radio.....	131
4.2.3 Problematiche riscontrate e soluzioni: Sistema Trigger Link.....	134
4.2.4 Problematiche riscontrate e soluzioni: Cella di carico DT0001LL	143
4.3 Risultati dell'attività di monitoraggio	144
4.3.1 RSN Link.....	144
4.3.2 RSN HR Link.....	147
4.3.3 Load Link.....	149
4.4 Conclusioni.....	151
Capitolo 5 Sistema Gflow Safety Network.....	153
5.1 Descrizione sistema	153
5.1.1 Installazione e configurazioni.....	156
5.2 Sviluppo del sistema	158
5.2.1 Modulo Gflow	158
5.2.1.1 Accelerometro ADXL335	162
5.3 Test sul prototipo Gflow	164
5.3.1 Test di valutazione della soglia critica.....	164
5.3.1.1 Definizione soglia critica hardware.....	165
5.3.1.2 Definizione soglia critica software.....	166
5.3.2 Test di valutazione dell'accuratezza del prototipo Gflow nella misura di accelerazioni dinamiche.....	170

5.3.3	Test di valutazione dell'accuratezza dell'accelerometro nell'utilizzo statico	178
5.3.4	Test di valutazione dell'impatto critico	180
5.3.4.1	Risultati test 1 (combinazione di carico CC1)	184
5.3.4.2	Risultati test 2 (combinazione di carico CC2)	186
5.3.4.3	Risultati test 3 (combinazione di carico CC3)	188
5.4	Modulo Eyeflow	190
5.4.1	Test di affidabilità prototipo Eyeflow	191
	Conclusioni	192
	Sviluppi futuri	195
	Bibliografia	196

Lista delle figure

Figura 1.1 Il rischio può essere espresso come il prodotto tra la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione.	21
Figura 1.2 La zonazione del territorio in base al rischio prevede di redigere preliminarmente un inventario delle frane esistenti ed effettuare la zonazione di suscettibilità. Successivamente tramite i dati a disposizione è possibile stilare una mappatura della pericolosità. Infine, conoscendo le caratteristiche degli elementi a rischio, tra cui la loro propensione ai danni causati da un eventuale evento naturale e la loro esposizione, è possibile redigere la zonazione del rischio.	22
Figura 1.3 Durante il fenomeno di caduta massi si possono identificare 3 aree: la zona di distacco dei massi, la zona di transizione e la zona di deposito (Berger et al., 2013).	26
Figura 1.4 Rappresentazione delle quattro principali tipologie di rottura: a) Rottura per scivolamento planare b) Rottura per scivolamento tridimensionale c) Rottura per ribaltamento d) Rottura per scivolamento su superficie circolare, in questo caso il distacco non avviene lungo una determinata discontinuità e il materiale risulta fortemente fratturato (Wyllie e Mah, 2017).	27
Figura 1.5 Tipologie di moto assunte da un masso durante la sua discesa in funzione della pendenza del versante (Dorren, 2003).	28
Figura 1.6 Principio della linea di energia e alcuni angoli da assegnargli suggeriti in letteratura (Jaboyedoff e Labiouse, 2011).	29
Figura 1.7 a) Rete in aderenza b) Rafforzamento corticale (Ferraiolo e Giacchetti, 2016).	32
Figura 1.8 Esempio di rete in aderenza costituita da un duplice strato di rete a doppia torsione e pannelli in fune.	32
Figura 1.9 a) Sistema di mitigazione composto da un vallo accoppiato con un rilevato paramassi sulla cui sommità è prevista l'installazione di una barriera flessibile b) Rilevato paramassi realizzato nelle immediate vicinanze dell'abitato di Cogne (Valle d'Aosta) (Maccaferri, 2009).	33
Figura 1.10 Tipologie di gallerie paramassi (A. Volkwein et al., 2011).	33
Figura 1.11 Modelli di dispositivi frenanti.	35
Figura 1.12 Schema tipo di una barriera paramassi modello RAV_8A realizzata dalla società Incofil Tech S.r.l.	36
Figura 1.13 Ondata di una colata detritica schematizzata (Pierson, 1986).	38
Figura 1.14 Opere di difesa nei debris flow (D'Agostino, 2005).	40
Figura 1.15 a) Bacino di deposito costruito ad Anterselva di mezzo, Bolzano b) Esempio di briglia frangicolata.	41
Figura 1.16 Tipologie di briglie filtranti (Hübl et al, 2005).	42
Figura 1.17 Schema tipo di una rete flessibile (modificata da (Volkwein, 2014)).	43
Figura 1.18 Esempi di barriere flessibili (www.incofil.com – www.geoprodotti.eu).	44
Figura 1.19 Disposizione dell'estensimetro a filo rispetto alla barriera flessibile.	46
Figura 1.20 Deformazione della rete misurata mediante l'impiego di un estensimetro a filo durante le prove (DeNatale et al., 1999).	46
Figura 1.21 Test 1: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.	47
Figura 1.22 Test 2: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.	48

Figura 1.23 Test 3: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.	49
Figura 1.24 Test 4: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.	49
Figura 1.25 Test 5: Accelerazione e allungamento nel tempo, in direzione del flusso, del punto della rete al quale è vincolato l'estensimetro.	50
Figura 1.26 Test 6: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.	51
Figura 2.1 Precisione e accuratezza di uno strumento.	54
Figura 2.2 a) Testa di un estensimetro multibase in cui sono collegate tre basi. Nella fase operativa la barra filettata passante per il foro viene collegata al comparatore elettrico b) Estensimetro elettrico a controllo dell'apertura di una discontinuità.	56
Figura 2.3 Installazione di una cella di carico toroidale ((Sara Grebl, 2007) – www.earthsystem.it).	56
Figura 2.4 a) Radar GBInSAR disposto su un binario (https://www.stanlay.in) b) Stazione totale robotizzata (https://www.topconpositioning.com).	58
Figura 2.5 Dispositivo di misura realizzato dalla società Geoprevent installato su di una barriera paramassi.	60
Figura 2.6 Sistema Spider System prodotto dalla società NESAs.r.l.	60
Figura 2.7 Sistema di monitoraggio Cricky realizzato da IoTrust S.r.l.	61
Figura 2.8 Pluviometro a bascula.	63
Figura 2.9 Pluviometro automatico.	64
Figura 2.10 a) Radar meteorologico installato a Gattatico (RE) b) Sistema radar posizionato sul Monte Settepani (SV)	64
Figura 2.11 Rappresentazione dei dati registrati il giorno 1/05/2020 alle ore 19.20 da diversi radar meteorologici, rappresentati con punti verdi nella mappa (http://www.protezionecivile.gov.it/).	65
Figura 2.12 Esempio di soglia basata sulla misura dell'intensità di pioggia (Arattano e Marchi, 2008).	66
Figura 2.13 Cavi a strappo.	68
Figura 2.14 Esempi di installazione di cavi a strappo.	68
Figura 2.15 Un pendolo installato nel torrente Rotolon in Italia (Cavalli et al., 2013).	69
Figura 2.16 Installazione di un sensore a ultrasuoni.	70
Figura 2.17 Idrogramma dell'evento di colata detritica avvenuto il 26 luglio 1998 presso il sito Rio Acquabona nel comune di Cortina d'Ampezzo, Italia (Genevois et al., 2000).	71
Figura 2.18 Idrogramma dell'evento di colata detritica avvenuto il 17 agosto 1998 presso il sito Rio Acquabona nel comune di Cortina d'Ampezzo, Italia (Genevois et al., 2000).	71
Figura 2.19 Dispositivi radar.	72
Figura 2.20 Esempio di un rilievo laser, la linea verde raffigura il profilo della sezione e la linea rossa il rilievo in corrispondenza del passaggio del flusso.	72
Figura 2.21 Sezione longitudinale di una colata detritica	74
Figura 2.22 Idrogrammi registrati da 3 dispositivi idrometrici disposti lungo il torrente Moscardo durante l'evento di colata detritica avvenuto il 22 giugno 1996 (Arattano e Marchi, 2008).	75

Figura 2.23 a) Piastra a protezione di celle di carico che consentono la misura della forza normale e della forza di taglio alla base dell'alveo (Nagl e Hübl, 2017) b) Celle di carico disposte al di sotto della piastra di protezione (https://www.wsl.ch/).	76
Figura 2.24 Celle di carico disposte nella zona frontale della struttura sperimentale costruita nel torrente Gatria (Nagl e Hübl, 2017).	77
Figura 3.1 Monitoraggio di un montante mediante il sistema Rockfall Safety Network. I sensori RSN Link e RSN Link HR sono posti all'interno di uno scatolare contenente la batteria di alimentazione e la periferica di comunicazione radio. La cella di carico è installata tra il montante e i controventi di monte e viene collegata al modulo BPM mediante un cavo esterno.	79
Figura 3.2 Processo di acquisizione, elaborazione e rappresentazione dei dati nel sistema Rockfall Safety Network.	81
Figura 3.3 I risultati provenienti dal sistema Rockfall Safety Network sono rappresentati in appositi grafici dinamici.	81
Figura 3.4 All'interno del modulo BPM sono poste le schede elettroniche necessarie per l'acquisizione dei dati dal sensore MEMS e dall'ampolla elettrolitica e la periferica radio slave funzionale alla comunicazione dei dati al sistema.	82
Figura 3.5 Modulo BPM e cella di carico estensimetrica.	83
Figura 3.6 Sistema di aggancio modulo BPM.	84
Figura 3.7 Progetto del sistema di collegamento del modulo BPM. a) Sezione trasversale AA b) Sezione longitudinale BB.	84
Figura 3.8 Nell'immagine sono rappresentate le tre principali tipologie di comunicazione radio.	86
Figura 3.9 Scenario tipo di installazione del sistema RSN su di una barriera paramassi. Come si può notare in questo caso lo scambio di dati diretto può avvenire solamente tra il datalogger e i moduli BPM 1 e 2. Le altre comunicazioni dirette sono impedito dalla presenza di ostacoli tra le periferiche. Grazie alla rete Smart Mesh tutti i dispositivi possono comunicare con il datalogger poiché ogni singolo nodo funge da amplificatore e ripetitore del segnale radio.	87
Figura 3.10 Sistema di taratura dei moduli BPM.	87
Figura 3.11 Camera di calibrazione a temperatura controllata.	92
Figura 3.12 Rotazione angolare lungo l'asse x letta dal sensore MEMS e dall'ampolla elettrolitica posti nel modulo BPM DT0002 e temperatura misurata durante il test.	93
Figura 3.13 Esempi di celle di carico a trazione. I primi due modelli consentono di effettuare misure di carico di piccola entità grazie agli intagli presenti nella struttura che ne favoriscono la deformazione.	94
Figura 3.14 Nell'immagine di sinistra viene rappresentata la posizione di installazione della cella di carico sulla barriera. Il dispositivo risente unicamente delle forze di trazione che agiscono sui controventi di monte.	97
Figura 3.15 Diagramma sforzi deformazioni per acciai di tipo legato.	97
Figura 3.16 Grafico sforzi-deformazioni stimato per una cella avente forma cilindrica e diametro 5 cm.	99
Figura 3.17 Andamento del segnale in uscita dal ponte di Wheatstone stimato in funzione del carico applicato e degli sforzi nella cella.	100
Figura 3.18 Geometria della cella di carico.	100
Figura 3.19 Per simulare il carico di trazione sul corpo della cella è stata applicata una forza in direzione z distribuita sulla superficie interna del foro sommitale, mentre nella superficie interna del foro inferiore sono stati applicati dei vincoli di contrasto. a) Corpo della cella nel piano ZY b) Corpo della cella nel piano ZX.	101
Figura 3.20 Sforzi di trazione nella cella lungo la direzione di applicazione della forza.	102

Figura 3.21 Sforzi di trazione nella sezione trasversale della cella.	102
Figura 3.22 Sforzi rilevati nella sezione longitudinale XZ passante per il centro della cella.....	103
Figura 3.23 Sforzi rilevati nella sezione longitudinale YZ passante per il centro della cella.....	103
Figura 3.24 Sistema bypass progettato dalla ditta Incofil Tech per ospitare la cella di carico Load Link.	104
Figura 3.25 Caratteristiche geometriche dei morsetti ad omega con perno a vite impiegati per la realizzazione del sistema bypass.	104
Figura 3.26 Rappresentazione di un estensimetro elettrico a resistenza.	106
Figura 3.27 Disposizione degli estensimetri sulla cella di carico prototipale.	109
Figura 3.28 Nell'immagine sono rappresentati i due schemi con cui viene raffigurato il ponte di Wheatstone: a) Schema classico a rombo b) Schema semplificato.	110
Figura 3.29 Guaina di protezione del circuito estensimetrico.	113
Figura 3.30 Formula di taratura della cella di carico Load Link DT0001.	115
Figura 3.31 Trigger Link.	116
Figura 3.32 Installazione del dispositivo Trigger Link.	117
Figura 3.33 Diagramma di flusso del software RSN, applicativo sviluppato in Matlab®, che consente l'organizzazione, la validazione e l'elaborazione dei dati di monitoraggio registrati dal sistema Rockfall Safety Network.	121
Figura 3.34 Mediante una mappa viene rappresentata la collocazione del sito.....	122
Figura 3.35 All'interno della piattaforma web è possibile visualizzare mediante appositi schemi le barriere monitorate, le loro caratteristiche e l'ubicazione dei sensori su di esse.	122
Figura 4.1 Alcune foto della strada provinciale raggiunta dai blocchi, distaccatosi dal versante, in occasione della frana avvenuta il 06/02/2016 (www.vallesabbianews.it).	124
Figura 4.2 Planimetria rappresentativa della parete rocciosa di Vobarno. Le due nuove barriere flessibili RAV_8/A sono rappresentate con una linea rossa continua mentre le opere esistenti con linee blu tratteggiate.	125
Figura 4.3 Disposizione degli strumenti di monitoraggio prototipali sulle barriere paramassi collocate nel cantiere Monte Cingolo.	126
Figura 4.4 a) I moduli BPM sono stati disposti sui montanti ad un'altezza di 6.50 metri dalla base di fondazione e collegati alla cella di carico b) I dispositivi Trigger Link, sono stati disposti sui montanti di estremità prossimi alla centralina di acquisizione.	127
Figura 4.5 Documentazione fotografica del sito pilota di Vobarno. Le prime tre foto sono state realizzate da piano campagna mentre il quarto fotogramma è stata realizzato ad una quota di circa 40 metri tramite l'ausilio di un drone.	128
Figura 4.6 Livello della batteria di alimentazione del datalogger G801.	130
Figura 4.7 Dati registrati da una seconda centralina posta nelle vicinanze del sistema Rockfall Safety Network. In occasione dell'evento temporalesco avvenuto il 2 agosto il datalogger ha smesso di funzionare. Il ripristino è avvenuto a seguito di un sopralluogo in cui è stata sostituita la batteria danneggiata.	130
Figura 4.8 In data 6/02/2019 è avvenuta la disconnessione del modulo 5 (a) dalla rete seguito dal modulo 3 in data 1/03/2019 (b). Le immagini scaricate dalla piattaforma di rappresentazione dei dati sono relative all'inclinazione del montante misurata dal sensore MEMS in direzione monte-valle.	131
Figura 4.9 Schema dei collegamenti radio tra i moduli BPM e il radio master disponendo le antenne sulla sommità dei montanti.	133

Figura 4.10 Posizione dei dispositivi pluviometrici rispetto al sistema RSN (Google Earth)	135
Figura 4.11 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Odolo e le attivazioni del Trigger Link A.....	137
Figura 4.12 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Odolo e le attivazioni del Trigger Link B.....	137
Figura 4.13 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Puegnano e le attivazioni del Trigger Link A.....	138
Figura 4.14 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Puegnano e le attivazioni del Trigger Link B.....	138
Figura 4.15 Altezza di pioggia oraria misurata il giorno 7/9/2019 dal pluviometro posto in località Odolo e attivazioni del Trigger Link A.....	139
Figura 4.16 Altezza di pioggia oraria misurata il giorno 7/1/2020 dal pluviometro posto in località Odolo e attivazioni del Trigger Link A.....	139
Figura 4.17 Carico sui controventi di monte misurato dalla cella di carico DT0001LL.	143
Figura 4.18 Sistema di riferimento moduli BPM e celle di carico Load Link.	144
Figura 4.19 Rotazione dei montanti della barriera di monte, in direzione x , misurata dai sensori RSN Link.	145
Figura 4.20 Rotazione dei montanti nella barriera di valle, in direzione x , misurata dai sensori RSN Link. .	145
Figura 4.21 Confronto tra la variazione dell'inclinazione del montante misurata dal sensore RSN Link disposto all'interno del modulo BPM DT0004 e la temperatura registrata dal medesimo sensore nel mese di luglio 2019.	146
Figura 4.22 Rotazione dei montanti della barriera 1 registrati dai sensori RSN link HR nel periodo di monitoraggio considerato.....	147
Figura 4.23 Rotazione dei montanti della barriera 2 misurate dai sensori RSN Link HR.	148
Figura 4.24 Confronto tra la variazione dell'inclinazione del montante misurata dal sensore RSN Link HR integrato nel modulo BPM DT0005 e la temperatura registrata dal medesimo sensore nel mese di agosto 2019.	148
Figura 4.25 Variazione della forza sui controventi di monte rilevata dai dispositivi Load Link nella barriera 1.	149
Figura 4.26 Variazione della forza sui controventi di monte rilevata dai dispositivi Load Link nella barriera 2.	150
Figura 4.27 Confronto tra i dati normalizzati registrati dalla cella di carico DT0005LL e dal sensore RSN Link HR disposto all'interno del modulo DT0005.....	151
Figura 5.1 Orientazione degli assi dell'accelerometro rispetto alla barriera (Render grafico).	154
Figura 5.2 Sistema prototipale Gflow.....	155
Figura 5.3 Prima configurazione di installazione.	156
Figura 5.4 Seconda configurazione di installazione.	156
Figura 5.5 Terza configurazione di installazione.....	157
Figura 5.6 Quarta configurazione di installazione.	157
Figura 5.7 Diagramma di flusso semplificato software Gflow.	161

Figura 5.8 a) Consumo in corrente tipico del sensore ADXL335 in funzione della tensione di alimentazione b) Orientazione degli assi nell'accelerometro (Analog Devices, 2009).	162
Figura 5.9 Variazione del valore di accelerazione lungo l'asse x e y letti dall'accelerometro ADXL335 nel tempo. I segnali sono stati campionati in ADC e successivamente convertiti in g	165
Figura 5.10 Risultato del test per valutare il campo di variazione della risultante delle accelerazioni mantenendo inalterate le condizioni di misura.	167
Figura 5.11 Variazione della risultante delle accelerazioni al variare della temperatura.	168
Figura 5.12 Relazione tra la risultante delle accelerazioni e la temperatura.	169
Figura 5.13 Attraverso uno shaker elettrodinamico sono state imposte al prototipo vibrazioni costanti nel tempo e in parallelo è stata misurata in continuo l'accelerazione imposta con un accelerometro ad alta risoluzione PCB PIEZOTRONICS 356A16.	170
Figura 5.14 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il Test 1 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri.	173
Figura 5.15 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 2 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri. Le linee rosse nel grafico rappresentano rispettivamente la media dei valori massimi e dei valori minimi registrati dall'accelerometro PCB 356A16 nell'intervallo di tempo considerato.	174
Figura 5.16 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 3 b) Sovrapposizione dei segnali campionati durante il test 3 dai due accelerometri.	175
Figura 5.17 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 4 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri. Le linee rosse nel grafico rappresentano rispettivamente la media dei valori massimi e dei valori minimi registrati dall'accelerometro PCB 356A16 nell'intervallo di tempo considerato.	176
Figura 5.18 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 5 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri nel test 5.	177
Figura 5.19 Lo strumento Gflow è stato fissato al sistema di calibrazione e successivamente sono state imposte rotazioni note lungo i due assi x e y	178
Figura 5.20 Disposizione e orientazioni degli accelerometri durante la prova.	181
Figura 5.21 La rete flessibile è stata fissata al telaio in acciaio mediante l'impiego di golfari. Sulla superficie del telaio sono stati posti target a distanze predefinite.	182
Figura 5.22 Ricostruzione dello spazio percorso e della velocità del peso P1 nel test 1 attraverso l'elaborazione video.	184
Figura 5.23 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 1.	185
Figura 5.24 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dai due accelerometri impiegati. Il tempo di inizializzazione del prototipo nel test 1 è risultato essere pari a 40.81 ms.	185
Figura 5.25 Ricostruzione attraverso l'elaborazione video dello spazio percorso e della velocità dei pesi P1 e P2 nel test 2.	186
Figura 5.26 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 2.	187
Figura 5.27 Il tempo di inizializzazione nel test 2 è risultato essere pari a 46.24 ms.	187
Figura 5.28 Ricostruzione attraverso l'elaborazione video dello spazio percorso e della velocità del peso P1 nel test 3.	188
Figura 5.29 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 3.	189
Figura 5.30. Il tempo di inizializzazione del prototipo nel test 3 è risultato essere pari a 50.20 ms.	189

Figura 5.31 Sistema prototipale Eyeflow.	191
Figura 5.32 Fotogrammi realizzati durante la prova di affidabilità del prototipo Eyeflow.	191

Lista delle tabelle

Tabella 1.1 Tipologie di movimenti franosi secondo la classificazione di Varnes	23
Tabella 1.2 Classificazione dei fenomeni franosi, secondo Varnes, in funzione della tipologia di movimento e del materiale che li compone (Varnes, 1978).....	24
Tabella 1.3 Suddivisione dei fenomeni franosi in base alla velocità di propagazione (modificata da (Cruden e Varnes, 1996))	25
Tabella 1.4 Principali fattori scatenanti dei fenomeni di caduta massi.	30
Tabella 1.5 Opere di mitigazione dalla caduta massi.....	31
Tabella 1.6 Proprietà delle colate detritiche e valori caratteristici (Iverson, 1997).....	37
Tabella 1.7 Le principali cause di innesco delle colate detritiche (Hobart M. King. - www.geology.com).....	39
Tabella 1.8 Dati riguardanti il volume delle colate detritiche simulate, la velocità del flusso, e la deformazione massima della rete (modificata da (DeNatale et al., 1999)).	45
Tabella 1.9 Principali caratteristiche delle barriere flessibili testate.	45
Tabella 1.10 Accelerazioni massime e minime misurate in corrispondenza delle diverse ondate.	52
Tabella 1.11 Accelerazioni misurate in corrispondenza della prima deformazione della rete rilevata.	52
Tabella 2.1 Caratteristiche principali dei sistemi di monitoraggio a controllo delle opere passive.	59
Tabella 2.2 Parametri monitorati nelle colate detritiche e sensori impiegati	67
Tabella 3.1 Variazione di inclinazione dei montanti della barriera RAV_8A 5000 kJ durante i test di certificazione.....	84
Tabella 3.2 Caratteristiche tecniche del sensore MEMS.....	85
Tabella 3.3 Caratteristiche tecniche dell'ampolla elettrolitica.	85
Tabella 3.4 Livello di servizio di una barriera in funzione dell'energia sopportata durante i test MEL e SEL.	95
Tabella 3.5 Composizione chimica dell'acciaio 39NiCrMo3.	96
Tabella 3.6 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio 39MiCr4Mo3.....	96
Tabella 3.7 Forza di trazione di snervamento al variare dell'area del corpo della cella, ipotizzato cilindrico.	98
Tabella 3.8 Aspetti da tenere in considerazione durante la scelta degli estensimetri (Modificata da (Kark Hoffman, 2001)).....	105
Tabella 3.9 Materiali comunemente impiegati per la realizzazione di estensimetri e relativi fattori di taratura.	107
Tabella 3.10 Materiali impiegati per la realizzazione dei fogli di supporto che ospitano le griglie estensimetriche.....	108
Tabella 3.11 Tipologie di estensimetri in funzione della disposizione e del numero di griglie.	109
Tabella 3.12 Caratteristiche tecniche della macchina di trazione impiegata per la taratura delle celle.	114
Tabella 3.13 Grafici presenti nella piattaforma web.....	123
Tabella 4.1 Dispositivi installati nel cantiere Monte Cingolo e codice identificativo associato.	126
Tabella 4.2 Tempi di riconnessione dei moduli radio slave nel periodo compreso tra il 03/05/2019 e il 10/10/2019.....	132

Tabella 4.3 Periferiche radio, codice identificativo e indice di qualità del segnale.....	133
Tabella 4.4 Caratteristiche delle stazioni pluviometriche considerate	134
Tabella 4.5 Data di attivazione dei dispositivi Trigger e altezza di pioggia cumulata registrata dai pluviometri di Odolo e Puegnano nelle medesime giornate.....	136
Tabella 4.6 Livelli di allarme e procedure di segnalazione associate.	140
Tabella 4.7 Livelli di allarme e principi di attivazione.....	141
Tabella 4.8 Livelli del sistema di allertamento ed eventi associati.....	142
Tabella 4.9 Rotazione massima e minima e variazione angolare massima, in direzione x , misurata dal sensore RSN Link posto nel modulo BPM DT0nnn.	144
Tabella 4.10 Rotazione massima e minima e variazione angolare massima, in direzione x , misurata dal sensore RSN HR Link posto nel modulo BPM DT0nnn.	147
Tabella 4.11 Carico sui controventi di monte registrato dai sensori Load Link DT0nnnLL.....	150
Tabella 5.1 Scheda tecnica della scheda MKR WiFi 1010 prodotta dalla società Arduino S.r.l.....	159
Tabella 5.2 Datasheet dell'accelerometro Analog Devices ADXL335.....	162
Tabella 5.3 Scheda tecnica del sensore PCB 356A16.	171
Tabella 5.4 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione lungo x massima e minima registrata dal sensore PCB 356A16 durante il test 1.	173
Tabella 5.5 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima e minima registrata dal sensore PCB 356A16 durante il test 2.....	174
Tabella 5.6 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima e minima lungo x registrata dal sensore PCB 356A16 durante il test 3.	175
Tabella 5.7 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima e minima lungo x misurata dal sensore PCB 356A16 durante il test 4.	176
Tabella 5.8 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima e minima lungo x misurata dal sensore PCB 356A16 durante il test 5.	177
Tabella 5.9 Errori assoluti e relativi ottenuti durante le prove.	177
Tabella 5.10 Errore assoluto nella misura dei valori di inclinazione lungo x registrati dall'elettrolivella.....	179
Tabella 5.11 Errore assoluto nella misura dei valori di inclinazione lungo y registrati dall'elettrolivella.....	179
Tabella 5.12 Scheda tecnica Canon Eos 5D.....	182
Tabella 5.13 Sintesi dei risultati.....	190

Lista delle equazioni

[1.1]	20
[1.2]	21
[1.3]	21
[2.1]	74
[2.2]	76
[2.3]	76
[3.1]	88
[3.2]	89
[3.3]	89
[3.4]	90
[3.5]	90
[3.6]	91
[3.7]	91
[3.8]	91
[3.9]	92
[3.10]	98
[3.11]	98
[3.12]	99
[3.13]	106
[3.14]	106
[3.15]	107
[3.16]	107
[3.17]	107
[3.18]	110
[3.19]	110
[3.20]	110
[3.21]	110
[3.22]	110
[3.23]	111
[3.24]	111
[3.25]	111
[3.26]	111
[3.27]	111
[3.28]	111

[3.29]	112
[3.30]	112
[3.31]	112
[3.32]	114
[3.33]	118
[3.34]	119
[3.35]	119
[3.36]	119
[3.37]	119
[5.1]	163
[5.2]	166
[5.3]	168
[5.4]	172
[5.5]	172
[5.6]	172
[5.7]	172
[5.8]	178

Introduzione

Le frane in Italia sono molto diffuse a causa della particolare conformazione geologica, geomorfologica e idrografica del territorio. Di fatto, due terzi dei 900000 fenomeni franosi censiti in Europa (Herrera et al., 2018) si trova nel territorio italiano e, il 28% è riconducibile ad eventi rapidi (crolli, colate rapide di fango e detrito) caratterizzati da velocità notevoli e da un'elevata capacità distruttiva (ISPRA, 2018). L'intensa e sregolata attività di urbanizzazione, avvenuta a partire dal secondo dopoguerra, ha determinato un aumento rilevante degli elementi esposti a rischio frana. All'interno dei confini italiani più di un milione di abitanti risulta residente in aree caratterizzate da un'elevata pericolosità (ISPRA, 2018). Inoltre i cambiamenti climatici hanno portato ad un incremento della frequenza di eventi meteorologici estremi e, di conseguenza, di fenomeni naturali rapidi e particolarmente distruttivi.

Per limitare i danni correlati a tali eventi si ricorre sempre più spesso all'impiego di opere passive di tipo flessibile che, rispetto alle strutture rigide, risultano più economiche e versatili e installabili su versanti particolarmente acclivi o irregolari ed in zone difficilmente raggiungibili con mezzi d'opera. Le barriere flessibili sono particolarmente adatte all'arresto di fenomeni rapidi grazie alla loro permeabilità all'acqua e capacità di dissipare l'energia di impatto, deformandosi. Tuttavia le elevate prestazioni in termini di efficienza strutturale e affidabilità sono garantite solamente attraverso una manutenzione delle stesse costante e immediata, nel caso di impatto. Infatti, per ripristinare la capacità strutturale originale delle strutture, in seguito ad un'interazione con un evento rapido, è necessario rimuovere i detriti o i blocchi depositati sulla rete, sostituire il sistema frenante, se è entrato in funzione, e gli elementi che hanno subito danneggiamenti.

La ricerca presentata in questo elaborato si è concentrata sullo sviluppo e validazione di due diversi sistemi di monitoraggio automatici innovativi in grado di individuare da remoto e istantaneamente, possibili eventi occorsi sulle strutture e, in parallelo, fornire informazioni utili per la pianificazione delle attività di manutenzione. Un'ulteriore peculiarità dei sistemi è quella di rendere le medesime opere passive elementi di controllo dell'attività del versante. Le ricerche svolte sono state finanziate dalla società Incofil Tech S.r.l. mediante i fondi stanziati dalla Provincia Autonoma di Trento grazie alla legge n.6/1999. L'obiettivo del progetto di ricerca sovvenzionato era quello di sviluppare opere passive flessibili altamente performanti dal punto di vista strutturale e dotate di un sistema che ne consentisse il loro controllo remoto nel tempo.

Nel primo capitolo introduttivo verrà affrontato il problema della mitigazione del rischio frane. In particolare verrà fornita una descrizione sintetica dei fenomeni di caduta massi e delle colate detritiche e delle principali opere di difesa in uso. In aggiunta verranno mostrati i risultati derivanti da un'analisi condotta, partendo dai dati registrati durante una prova in scala reale realizzata nel 1996 dall'USGS, volta alla stima dell'accelerazione di una barriera flessibile impattata da un flusso di detriti.

Nella prima fase della ricerca ci si è concentrati sulla definizione dello stato dell'arte dei sistemi di monitoraggio dedicati ai fenomeni di caduta massi e di debris flow. Nel secondo capitolo verrà affrontato il tema del monitoraggio geotecnico e verranno descritti i principali sistemi automatici esistenti sul mercato impiegati nella mitigazione del rischio derivante dai fenomeni rapidi.

La prima tecnologia sviluppata è dedicata al monitoraggio delle barriere flessibili paramassi ed è denominata Rockfall Safety Network (RSN). Nel terzo capitolo verranno descritte le fasi di realizzazione del sistema e le sue caratteristiche principali. In particolare verrà affrontato approfonditamente lo sviluppo dei singoli componenti hardware e software e verranno descritte le procedure di calibrazione dei singoli sensori.

Per testare il sistema prototipale RSN si è individuato un sito di installazione pilota posto nella località di Vobarno (BS) in cui sono state installate e strumentate due barriere paramassi di nuova produzione. L'attività di monitoraggio delle strutture è iniziata a gennaio 2019 ed è tuttora in corso. Nel capitolo 4 verranno elencate le caratteristiche del sito e della tecnologia installata e verranno descritte le problematiche riscontrate nell'utilizzo del sistema a lungo termine e le soluzioni adottate per risolverle. Inoltre, verranno presentati i dati registrati durante l'attività di monitoraggio.

Nell'ultimo capitolo dell'elaborato verrà presentato un nuovo approccio per il monitoraggio delle opere flessibili paracolte, basato sulla misura in continuo delle accelerazioni della barriera. Il sistema proposto per svolgere tale attività è denominato Gflow Safety Network (GSN) ed è composto da due periferiche basate su schede commerciali Low Cost e a basso consumo energetico. Nei primi paragrafi del capitolo verrà descritta l'architettura del sistema e le fasi di sviluppo dei singoli componenti hardware; successivamente verranno presentati i risultati di test preliminari svolti su un sistema prototipale per valutarne le caratteristiche e i limiti.

CAPITOLO 1: RISCHIO FRANE: VALUTAZIONE E MITIGAZIONE

1.1 Definizione di rischio

Le frane possono essere considerate uno dei principali pericoli naturali (Dai et al., 2002). Ogni anno tali fenomeni arrecano ingenti danni alla popolazione sia diretti che indiretti. Nella storia si contano diversi eventi che hanno causato un numero significativo di vittime e hanno provocato danni rilevanti a strutture e infrastrutture. L'Italia è un paese fortemente interessato da instabilità a causa della morfologia del suo territorio, infatti, il 75% della superficie italiana è costituito da zone collinari o montane (ISPRA, 2018). Il numero consistente di fenomeni franosi censiti negli ultimi decenni in Italia e le conseguenze drammatiche che causano ogni anno fanno sì che questi tipi di fenomeni possano essere considerati un vero e proprio problema socio-economico del nostro paese (Fratini e Crosta, 2006). Inoltre, le intense attività di antropizzazione del territorio montano avvenute nel secondo dopo guerra quali: costruzioni di centri abitati in zone sprovviste di un piano regolatore, attività di disboscamento sregolato e, in parallelo, l'abbandono di aree rurali montane, hanno determinato l'aumento del numero di aree a rischio frana. Ai fini della pianificazione territoriale è utile suddividere il territorio in porzioni in base all'indice di rischio. Tale operazione consente di poter identificare le migliori strategie di mitigazione da adottare e limitare i danni causati da tali fenomeni. Varnes nel 1984 definì la Landslide Hazard Zonation come *"the division of the land in homogeneous areas or domains and their ranking according to degrees of actual / potential hazard caused by mass movement"* (Varnes 1984). In seguito alla sua pubblicazione, diversi autori si sono occupati di sviluppare procedimenti atti alla valutazione del rischio frana che caratterizza una determinata zona (Einstein 1988) (Fell 1994)(Leroi 1997). La prima definizione di rischio fu data nel 1972 durante un incontro organizzato dall'UNESCO al quale parteciparono diversi esperti del settore. Il Rischio, R , può essere definito come il valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovute al verificarsi di un particolare fenomeno di una data intensità. La formula più nota e idonea alla gestione del rischio frane venne pubblicata da Varnes nel 1984. L'autore definì il rischio come la combinazione di tre parametri: la pericolosità (H), la vulnerabilità (V) e il valore esposto (W).

$$R = H \cdot V \cdot W \quad [1.1]$$



Figura 1.1 Il rischio può essere espresso come il prodotto tra la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione.

La **Pericolosità**, H (*Hazard*), è la probabilità che un fenomeno di una determinata classe (tipologia, volume, e velocità) o di una di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una determinata area. Nella valutazione della pericolosità da frana giocano un ruolo importante i sistemi di monitoraggio automatici. Grazie alla registrazione dei dati in continuo, infatti, è possibile ottenere informazioni in merito all'attività dei fenomeni franosi nel tempo e individuare le porzioni di versante maggiormente attive. È importante sottolineare che per individuare un indice di pericolosità correlato ad una zona è necessario prima effettuare un'analisi della suscettibilità da frana. La **suscettibilità** può essere definita come la stima, quantitativa o qualitativa, delle frane esistenti o che potrebbero verificarsi in una determinata zona. Durante l'analisi i fenomeni franosi vengono catalogati a seconda della tipologia, del volume, dell'area di propagazione. In alcuni casi è presente una descrizione anche della velocità e dell'intensità dei fenomeni esistenti o probabili. L'intensità di una frana può essere espressa, ad esempio, in termini di energia cinetica oppure, per i fenomeni di debris flow, come il prodotto tra l'altezza del fronte e la sua velocità (Fell et al., 2008).

La **Vulnerabilità**, V (*Vulnerability*), è il grado di perdita atteso ad un elemento o ad un insieme di elementi posti all'interno di un data zona per effetto di un fenomeno franoso. È espressa in scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è funzione dell'intensità del fenomeno (i) e della tipologia di elemento a rischio (E). È un fattore adimensionale.

$$V = V(E, I) \quad [1.2]$$

Il **Valore esposto**, W (*Worth exposed*), rappresenta il valore economico o il numero di unità relative ad ognuno degli elementi a rischio in una data area. Il valore è funzione della tipologia di elemento (E) a rischio. Viene solitamente riportato in termini di perdite economiche rispetto all'evento [€/evento].

$$W = W(E) \quad [1.3]$$

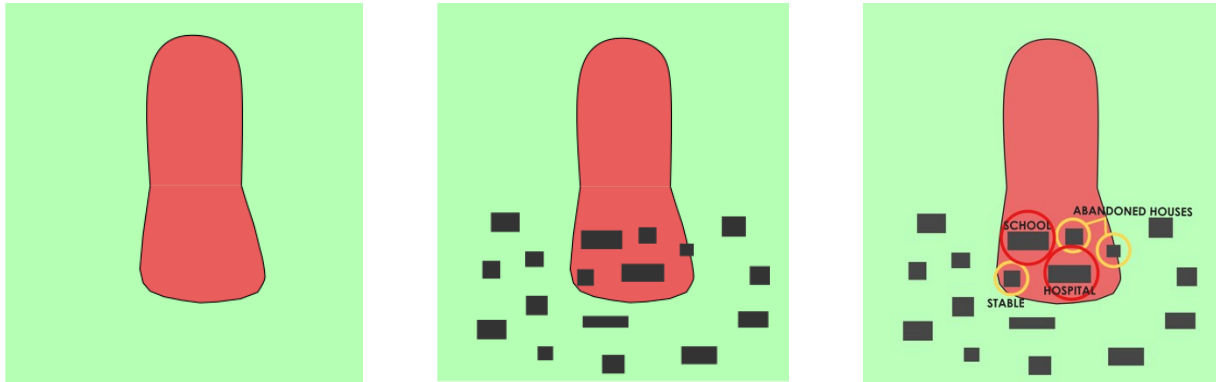


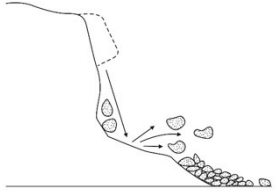
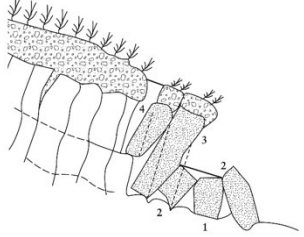
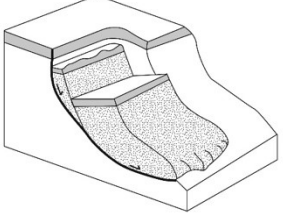
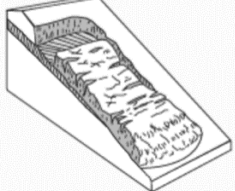

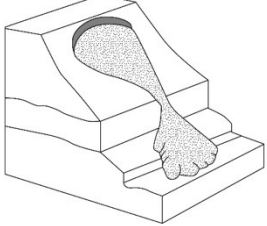

Figura 1.2 La zonazione del territorio in base al rischio prevede di redigere preliminarmente un inventario delle frane esistenti ed effettuare la zonazione di suscettibilità. Successivamente tramite i dati a disposizione è possibile stilare una mappatura della pericolosità. Infine, conoscendo le caratteristiche degli elementi a rischio, tra cui la loro propensione ai danni causati da un eventuale evento naturale e la loro esposizione, è possibile redigere la zonazione del rischio.

1.2 Classificazione dei movimenti franosi

L'individuazione del tasso di rischio associato ad un determinato territorio presuppone la conoscenza e la classificazione dei fenomeni franosi presenti. Nel linguaggio comune con un unico termine, "frana", vengono definiti tutti i tipi di movimenti, di porzioni di terreno o roccia, che sono attivati sotto l'effetto della forza di gravità. In realtà i fenomeni franosi hanno caratteristiche molto diverse tra loro in termini di materiale movimentato, tipologia di moto, velocità. Diversi autori, già a partire dal 1875, si sono occupati di sviluppare sistemi di classificazione che aiutassero a raggruppare i fenomeni di instabilità in gruppi aventi caratteristiche comuni (Varnes, 1978) (Cruden e Varnes, 1996)(Hung et al., 2014).

Uno dei sistemi di classificazione maggiormente diffuso a livello internazionale è quello teorizzato inizialmente da D. J. Varnes nel 1978 e perfezionato nel 1996. L'autore propose di assegnare una classe alle varie tipologie di frane in funzione di due parametri: la tipologia di movimento e il materiale coinvolto. Varnes, già nella prima pubblicazione, individuò cinque tipi di movimenti elementari che sono sintetizzati in Tabella 1.1. L'autore, inoltre, prevede una sesta categoria che definì complessa poiché caratterizzata dalla presenza di più tipologie di movimenti individuabili in un unico fenomeno. Il secondo parametro identificato è la natura del materiale movimentato che secondo l'autore può essere: roccia, terreno a grana grossa e terreno a grana fine. Come si può notare in Tabella 1.2 la descrizione e la classificazione avviene mediante due nomi, il primo è riconducibile al tipo di movimento individuato e il secondo al tipo di materiale movimentato.

Tabella 1.1 Tipologie di movimenti franosi secondo la classificazione di Varnes

Tipo di movimento:	Descrizione:	Immagine:
Crollo	Il crollo è un tipo di movimento che avviene quando vi è un distacco di uno o più blocchi di materiale da un versante acclive. Il movimento della massa lungo il pendio è caratterizzato da rimbalzi e da rotolamenti. Il crollo può riguardare un blocco singolo o cluster che difficilmente interagiscono tra loro. Le velocità dei blocchi in movimento misurate sono elevate.	
Ribaltamento	Il ribaltamento è un tipo di instabilità che viene attivato da forze che generano un momento ribaltante con centro in un punto ubicato al di sotto del baricentro della massa sollecitata. Se durante il ribaltamento il blocco non incontra un mezzo di contrasto che blocca il cinematismo, il movimento può evolversi in un crollo o in uno scorrimento. Le velocità nelle instabilità per ribaltamento sono variabili, da estremamente lente a estremamente rapide.	
Scivolamento rotazionale	Nei movimenti di scivolamento rotazionale una massa, sotto l'effetto della forza di gravità, scorre lungo una superficie di rottura concava. Il movimento può avvenire su tutta la superficie oppure propagarsi da una zona di rottura localizzata. Il corpo della frana, in questo tipo di movimenti, è caratterizzato da velocità lente che possono divenire fino a molto rapide nella fase di collasso.	
Scivolamento traslativo	I movimenti di scivolamento traslativo sono caratterizzati, come i rotazionali, da una massa che scorre lungo una superficie preferenziale di rottura che, in questo caso, non è più curvilinea ma risulta più o meno piana o debolmente ondulata. Il piano di rottura coincide nella maggior parte dei casi con piani di discontinuità, o zone di transizione, tra due terreni litologicamente differenti.	
Espansione laterale	Le espansioni laterali sono movimenti causati dalla liquefazione o dalla plasticizzazione del materiale che si trova al di sotto della frana.	
Colata	Le colate sono movimenti che si generano quando un volume sufficiente di sedimenti o detriti depositato in una porzione montana, caratterizzata da un'elevata inclinazione, viene mobilitata da un ingente flusso di acqua. La miscela, costituita da acqua e detriti di dimensioni variabili, si propaga verso valle solitamente lungo vie preferenziali come ad esempio letti di torrenti. Le velocità registrate sono da elevate ad estremamente elevate.	
Complessi	Il movimento di tipo complesso deriva dalla combinazione di due o più cinematismi precedentemente descritti. Molti fenomeni franosi sono complessi ma, generalmente, un tipo di moto predomina, parzialmente o temporalmente, sugli altri.	

I fenomeni di colata, ad esempio, sono inquadrati all'interno di tre classi:

- **Le colate di roccia:** durante il fenomeno, gli ammassi rocciosi si comportano come fluidi ad elevata viscosità. I movimenti sono caratterizzati da velocità estremamente lente.
- **Le colate di detriti:** comunemente chiamati con il termine anglosassone debris flow, sono movimenti estremamente rapidi che riguardano miscele di acqua e sedimenti di granulometria variabile (da mm a metri). Sono caratterizzati da un'elevata capacità distruttiva.
- **Le colate di terra (Earth flow):** individuano flussi con velocità modeste costituiti da materiale fine e saturo. All'interno di tale categoria si potrebbero inserire anche le colate di fango mud flow che sono, al contrario, caratterizzati da velocità simili a quelle dei debris flow (Federico Soatto, 2014).

Tabella 1.2 Classificazione dei fenomeni franosi, secondo Varnes, in funzione della tipologia di movimento e del materiale che li compone (Varnes, 1978).

Tipologia di movimento:	Tipo di materiale		
	<i>Ammasso Roccioso</i>	<i>Terreno prevalentemente a grana grossa</i>	<i>Terreno prevalentemente a grana fine</i>
Crollo	Crollo di roccia	Crollo di detrito	Crollo di terra
Ribaltamento	Ribaltamento di roccia	Ribaltamento di detrito	Ribaltamento di terra
Scivolamento rotazionale	Scivolamento rotazionale di roccia	Scivolamento rotazionale di detrito	Scivolamento rotazionale di terra
Scivolamento traslativo	Scivolamento traslazionale di roccia	Scivolamento traslazionale di detrito	Scivolamento traslazionale di terra
Espansione laterale	Espandimenti laterali di roccia	Espandimenti laterali di detrito	Espandimenti laterali di terra
Colata	Flusso di roccia	Colata di detrito	Colata di terra
Complesso	Unione di due o più movimenti semplici		

Nel 1996 Varnes introdusse un terzo parametro a descrizione dei fenomeni franosi, la velocità del movimento. Come si evince dalla Tabella 1.3 le classi di velocità individuate sono sette. Nei primi tre gruppi ricadono gli eventi che sono caratterizzati da velocità di movimento da estremamente lente a lente. Gli spostamenti e le conseguenze sulle strutture, che si trovano in prossimità della frana, in questo caso non sono percettibili ad occhio nudo e sono individuabili solamente installando sistemi di monitoraggio ad alta risoluzione. Il livello IV è una classe di transizione caratterizzata da velocità medie di circa 13 m/mese. L'indice della classe, come si può notare, è direttamente proporzionale alla velocità e ai danni causati. Negli ultimi tre livelli sono rappresentati i movimenti caratterizzati da velocità comprese tra 1.8 m/h a 5 m/s.

Tabella 1.3 Suddivisione dei fenomeni franosi in base alla velocità di propagazione (modificata da (Cruden e Varnes, 1996))

CLASSE	VELOCITA'	MOVIMENTO	DESCRIZIONE
VII	5 m/s	Estremamente rapido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ EDIFICI DISTRUTTI DALL'IMPATTO CON IL MATERIALE ▪ QUALSIASI TENTATIVO DI PORSI IN SALVO È IMPOSSIBILE. ▪ CATASTROFE DI ECCEZIONALE VIOLENZA
VI	3m /min	Molto rapido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PERDITA DI ALCUNE VITE UMANE ▪ L'EVACUAZIONE COMPLETA DELLA POPOLAZIONE È IMPOSSIBILE
V	1.8 m/h	Rapido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'EVACUAZIONE DELLA POPOLAZIONE È POSSIBILE ▪ DISTRUZIONE DI IMMOBILI ED INSTALLAZIONI PERMANENTI
IV	13 m/mese	Moderato	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ELEMENTI A RISCHIO PRESENTI NELL'AREA SUBISCONO GRAVI DANNI ▪ È POSSIBILE IL MANTENIMENTO DI ALCUNE STRUTTURE TEMPORANEE E NON VULNERABILI
III	16 m/anno	Lento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ELEMENTI A RISCHIO PRESENTI NELL'AREA SUBISCONO DANNI MODERATI ▪ DURANTE IL MOVIMENTO È POSSIBILE LA MANUTENZIONE, LA RIPARAZIONE E IL RINFORZO DI STRUTTURE NON VULNERABILI DURANTE LE FASI DI INATTIVITÀ
II	16 mm/anno	Molto lento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ALCUNE STRUTTURE PRESENTI NELL'AREA VULNERABILE POSSONO ESSERE DANNEGGIATE DAL MOVIMENTO
I		Estremamente lento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ MOVIMENTO IMPERCETTIBILE SENZA L'IMPIEGO DI STRUMENTI DI MONITORAGGIO ▪ POSSIBILE COSTRUZIONE DI NUOVE OPERE ADOTTANDO PRECAUZIONI

Nelle descrizioni fornite dall'autore tali eventi hanno conseguenze devastanti sul territorio e, per questo motivo, sono necessari sistemi che permettano l'individuazione immediata dei fenomeni in corso e l'allertamento della popolazione.

La classificazione di Varnes è relativamente semplice poiché permette di catalogare un evento franoso avendo pochi dati a disposizione. Allo stesso tempo comporta che eventi molto diversi tra loro possano ricadere nella medesima categoria. Per una classificazione maggiormente approfondita riguardante i fenomeni di colata si consiglia l'impiego delle soluzioni proposte da Hungr nel 2001 (Hungr et al., 2001), dal giapponese Tasmotsu Takahashi (Tamotsu Takahashi, 2008) o da Pierson e Costa nel 1987 (Pierson e Costa, 1987).

1.3 Fenomeni di caduta massi

La caduta massi è un fenomeno naturale che ricade tra i movimenti definiti da Varnes come estremamente rapidi. A differenza di altri eventi franosi colpiscono aree più piccole ma allo stesso tempo la loro velocità di propagazione impedisce di potersi mettere al riparo nel caso ci si trovi in prossimità della zona colpita (A. Volkwein et al., 2011). Le conseguenze legate a un fenomeno di caduta massi sono strettamente legate al numero e alle caratteristiche dei massi movimentati, all'orografia del territorio e, solitamente, le strutture, infrastrutture e persone poste lungo la traiettoria dei massi subiscono gravi danni (Vogel et al., 2009). In particolare il problema è particolarmente accentuato nei territori alpini e nelle zone costiere che sono state teatro di un intenso fenomeno di urbanizzazione ai fini turistici. Per questo motivo, al fine di proteggere le zone sensibili, risulta di fondamentale importanza individuare le opere di mitigazione più idonee e garantirne la loro funzionalità nel tempo attraverso un programma di manutenzione costante. In parallelo, è consigliabile installare su di esse strumenti di monitoraggio che consentano di stimare il tasso di lavoro a cui sono sottoposte nel tempo e che permettano, in automatico, di allertare gli enti territoriali e la popolazione nel caso di eventi critici. In questo paragrafo verrà fornita una descrizione sintetica del fenomeno di caduta massi e delle principali opere di difesa impiegate nella mitigazione del rischio, con particolare attenzione alle barriere paramassi flessibili che sono la sede di installazione del sistema Rockfall Safety Network, strumento il cui sviluppo verrà descritto in maniera dettagliata nel terzo capitolo.

1.3.1 Meccanica della caduta massi

Il fenomeno di caduta massi può essere definito come la movimentazione di uno o più frammenti di roccia che distaccatosi da pareti verticali o subverticali corrono lungo il versante rimbalzando oppure rotolando (Varnes, 1978). I blocchi movimentati sono solitamente caratterizzati da un'un'elevata energia cinetica e possono percorrere lunghe distanze (Stead, 2002). In un versante attivo possono essere identificate tre porzioni: la zona di distacco, la zona di transizione e la zona di deposito.

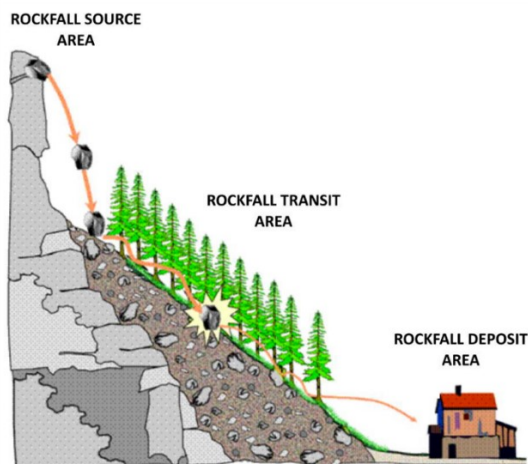


Figura 1.3 Durante il fenomeno di caduta massi si possono identificare 3 aree: la zona di distacco dei massi, la zona di transizione e la zona di deposito (Berger et al., 2013).

1.3.1.1 Zona di distacco

La zona di distacco è la porzione più a monte del versante dal quale prende il via il moto dei massi. La separazione dei blocchi dalla parete rocciosa può avvenire per crollo, ribaltamento, scivolamento o espansione laterale. La propensione di un versante ad essere oggetto di un fenomeno di caduta massi è da ricercare in diversi fattori tra cui: la sua morfologia e geologia, la distribuzione e orientazione delle discontinuità, le proprietà meccaniche dei materiali coinvolti, le caratteristiche meccaniche delle discontinuità e il suo regime idraulico. L'innesco di un movimento di caduta massi è causato solitamente da una rottura per trazione o per taglio lungo piani di discontinuità preesistenti che dividono la matrice rocciosa dal blocco instabile. In letteratura sono presenti diverse analisi che permettono di identificare le potenziali zone di distacco. Se l'obiettivo è la valutazione dell'instabilità di un blocco singolo può essere impiegata l'analisi all'equilibrio limite (Wyllie e Mah, 2017). Tale metodo si basa sul confronto tra le forze resistenti e destabilizzanti agenti su di un masso. L'analisi cinematica, invece, può risultare utile per individuare la propensione all'instabilità di blocchi a scala di versante partendo dalle caratteristiche delle discontinuità e dalla litologia e geometria della parete rocciosa analizzata (Jaboyedoff et al., 2004) (Kobal, 2018) (P.Frattini, G. Crosta, 2017).

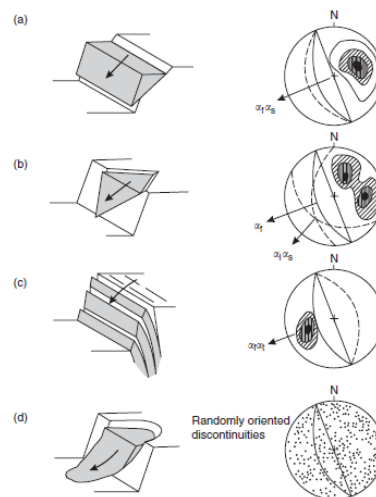


Figura 1.4 Rappresentazione delle quattro principali tipologie di rottura: a) Rottura per scivolamento planare b) Rottura per scivolamento tridimensionale c) Rottura per ribaltamento d) Rottura per scivolamento su superficie circolare, in questo caso il distacco non avviene lungo una determinata discontinuità e il materiale risulta fortemente fratturato (Wyllie e Mah, 2017).

1.3.1.2 Zona di propagazione

La seconda porzione identificabile nel versante è la zona di propagazione. In tale fascia i massi, una volta distaccatosi dalla parete, si muovono verso valle alternando rimbalzi, rotolamenti, scivolamenti e intervalli di volo libero (Ritchie, 1963). Le traiettorie assunte dipendono dalla topografia e dal materiale di cui è costituito il versante e dagli eventuali ostacoli presenti (vegetazione, opere di mitigazione ecc.).

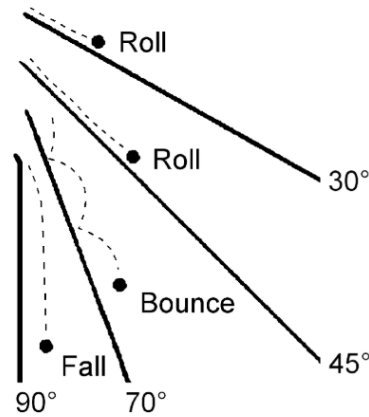


Figura 1.5 Tipologie di moto assunte da un masso durante la sua discesa in funzione della pendenza del versante (Dorren, 2003).

I blocchi seguono un moto di caduta libera in versanti caratterizzati da pendenze superiori a 70° (Ritchie, 1963). In questa fase la roccia può ruotare su sé stessa. Intorno ai 70° di pendenza del versante vi è il passaggio da un moto di caduta libera ad un moto caratterizzato da volo libero alternato a rimbalzi. Durante l'impatto con il terreno il masso in movimento perde gran parte della sua energia e può rompersi. La perdita di energia, durante l'urto o durante la fase di rotolamento, dipende da molteplici fattori che sono difficili da stimare come la velocità e la forma del masso, la presenza e la densità della vegetazione e l'angolo di impatto (Crosta e Agliardi, 2003). Nella pratica la perdita di energia cinetica durante un urto viene solitamente sintetizzata da un coefficiente di restituzione normale e tangenziale da assegnare al materiale impattato (Giani et al., 2004). Da sottolineare che, durante il primo urto, si stima che l'energia persa si aggiri intorno al 75-86% di quella iniziale (Dorren, 2003). Solitamente l'urto con il terreno genera un ulteriore moto rotativo del masso che ha come conseguenza l'estensione della zona di propagazione. Quando la pendenza della parete diviene inferiore a 45° si passa gradualmente ad un moto di solo rotolamento. Nella fase iniziale e nella fase finale è possibile osservare anche movimenti dei blocchi di tipo traslativo (Dorren, 2003). Per calcolare le traiettorie lungo il versante e la distanza di arresto dei massi vengono comunemente impiegati modelli che si possono suddividere in: modelli empirici, modelli basati su processi, modelli basati su GIS (Dorren, 2003) (A. Volkwein et al., 2011).

I modelli empirici, conosciuti anche come modelli statistici, sono sviluppati sulla base di dati raccolti da esperienze in sito e sono applicabili a casi di studio aventi caratteristiche simili (Kobal, 2018). Sono comunemente impiegati per calcolare approssimativamente la distanza di arresto e non forniscono al contrario dati in merito ai percorsi seguiti dai massi tra la fase di distacco e la fase di arresto. Tra i metodi presenti in letteratura troviamo il principio della linea di energia che è un tratto immaginario che collega la zona di distacco con il punto di arresto dei massi. L'inclinazione della retta immaginaria è legata all'energia persa dal masso durante il moto. In letteratura vengono suggeriti angoli da assegnare alla linea di energia compresi tra 28° e 38° . Tale metodo è comunemente impiegato a scala regionale in siti dove sono stati raccolti dati riguardanti eventi passati, utili per calibrare il modello e identificare correttamente l'angolo da assegnare alla linea di energia (Kobal, 2018).

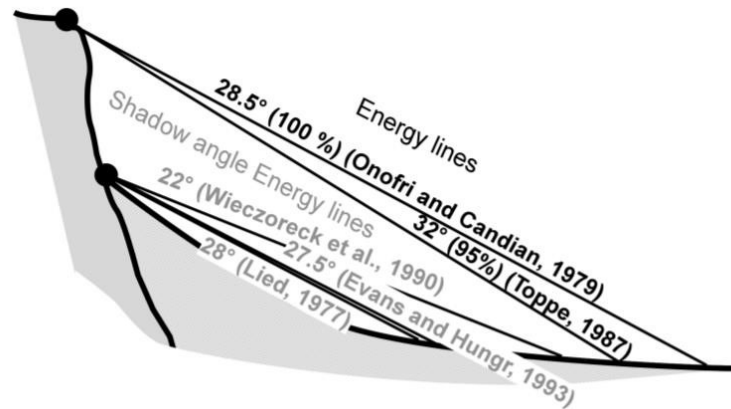


Figura 1.6 Principio della linea di energia e alcuni angoli da assegnargli suggeriti in letteratura (Jaboyedoff e Labiouse, 2011).

I modelli basati su processi sono molteplici e consentono di simulare le traiettorie dei massi lungo il pendio e individuarne la zona di arresto. Per ogni masso è possibile individuare lungo il versante: la velocità, l'energia cinetica e la zona di deposito. I modelli basati su processi si suddividono a loro volta in bidimensionali e tridimensionali. I primi permettono di ottenere informazioni lungo una determinata sezione del versante. In questo caso la modellazione è semplificata e non vengono presi in considerazione gli effetti tridimensionali del fenomeno. I modelli di tipo 3D, al contrario, permettono di simulare la traiettoria di caduta dei massi tenendo in considerazione la reale geometria tridimensionale del pendio. Gli algoritmi impiegati si basano su modelli digitali del terreno (DTM). Più la geometria è dettagliata maggiore è l'accuratezza dei risultati. I modelli basati su processi vengono comunemente impiegati per la progettazione delle opere di mitigazione di tipo passivo (barriere paramassi, trincee, valli paramassi ecc.). Il corretto dimensionamento delle opere, infatti, richiede la conoscenza delle traiettorie dei massi e della loro energia di impatto. I dati di input necessari ai modelli basati su processi sono in alcuni casi difficili da stimare o da reperire (coefficienti di restituzione normale e tangenziale, blocco di progetto ecc.) per cui il monitoraggio delle barriere diviene uno strumento utile anche per valutare l'effettiva efficacia delle opere nell'intercettare e arrestare eventuali blocchi. I modelli basati su GIS (Geographical Information Systems) sono pensati per individuare le possibili zone suscettibili ai fenomeni franosi (zone di distacco), le traiettorie di caduta e la distanza di arresto dei massi (Dorren, 2003). A differenza dei modelli basati su processi il calcolo avviene basandosi su sistemi informativi GIS.

1.3.1.3 Zona di deposito o arresto

La zona di deposito è la porzione più a valle del versante dove si arrestano i massi distaccatosi dalla parete. L'identificazione di tale area è di fondamentale importanza per poter censire le eventuali strutture e infrastrutture a rischio e per definire un eventuale strategia di mitigazione.

1.3.2 Fattori scatenanti

L'innesco di un fenomeno di caduta massi può essere provocato sia da fattori di origine naturale (precipitazioni, terremoti o fenomeni di erosione) sia da fattori legati all'attività dell'uomo. Un fattore scatenante può essere definito come un'azione esterna che può alterare lo stato di equilibrio di un ammasso roccioso. In Tabella 1.4 sono riassunti i principali fenomeni e i relativi effetti sulla parete rocciosa che possono portare all'attivazione di un'instabilità (D'Amato et al., 2016)(Collins e Stock, 2016)(Valagussa et al., 2014).

Tabella 1.4 Principali fattori scatenanti dei fenomeni di caduta massi.

Fattore scatenante:	Effetto:
Precipitazioni	<p>Possono generare un processo di erosione del materiale con granulometria ridotta lasciando i blocchi di dimensioni maggiori instabili.</p> <p>Possono generare un fenomeno di infiltrazione di acqua o un innalzamento della falda idrica con conseguente riempimento delle discontinuità, aumento della pressione interstiziale e riduzione della resistenza al taglio. È noto, infatti, che la resistenza al taglio di una discontinuità può essere espressa mediante la legge di Mohr-Coulomb.</p> $\tau = c + \sigma' \tan \varphi$ <p>Dove:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ τ rappresenta la resistenza a taglio della discontinuità; ▪ c rappresenta la coesione; ▪ σ' è la tensione efficace; ▪ φ è l'angolo di attrito. <p>Un aumento del flusso idrico all'interno della discontinuità genera un aumento delle pressioni interstiziali e di conseguenza una riduzione delle tensioni efficaci secondo la formula:</p> $\sigma' = \sigma_{tot} - u$ <p>Dove:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ σ_{tot} rappresenta la pressione totale; ▪ u rappresenta la pressione neutra;
Terremoti	I terremoti generano vibrazioni e accelerazioni sul versante che possono avere come conseguenza la perturbazione delle condizioni di equilibrio dei blocchi.
Scioglimento nevi	Lo scioglimento delle nevi modifica il regime idrico del versante e gli effetti sull'ammasso roccioso sono i medesimi di quelli descritti per le precipitazioni.
Cicli gelo - disgelo	L'acqua infiltrata all'interno di discontinuità o fratture, essendo confinata e aumentando di volume nel passaggio dallo stato liquido allo stato solido, genera un incremento delle tensioni che può portare all'attivazione di una caduta massi. L'innesco di un fenomeno può avvenire anche durante la fase di disgelo (D'Amato et al., 2016).
Vento	Come le precipitazioni può generare fenomeni di erosione.
Attività antropiche	Le vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze di un versante, come ad esempio l'esecuzione di scavi con esplosivo o il passaggio di mezzi pesanti, possono avere come conseguenza l'attivazione di un fenomeno instabilità.

1.3.3 Misure di mitigazione del rischio da caduta massi: opere di difesa.

Al fine di mitigare il rischio di caduta massi si può intervenire direttamente sulla stabilizzazione dell'ammasso roccioso instabile attraverso interventi di tipo attivo oppure si possono predisporre su di esso opere di tipo passivo. Gli interventi di tipo attivo agiscono all'origine del problema e hanno la funzione di impedire che avvengano distacchi. Solitamente riguardano: la stabilizzazione o il disgiungimento di blocchi instabili, la modifica del regime idraulico dell'ammasso roccioso e la protezione superficiale dall'erosione. Le opere di difesa passive al contrario vengono disposte lungo il versante e hanno il compito di intercettare, deviare e arrestare eventuali massi distaccatosi (barriere paramassi, valli e trincee paramassi, gallerie artificiali ecc.). Tali strutture vengono comunemente impiegate quando la via della stabilizzazione o riprofilatura del versante è tecnicamente e/o economicamente non percorribile.

Tabella 1.5 Opere di mitigazione dalla caduta massi

Opere di tipo attivo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chiodature ▪ Bullonature ▪ Spritz beton ▪ Reti in aderenza ▪ Drenaggi ▪ Rimozione di massi instabili con mezzi meccanici o esplosivo ▪ Riprofilatura del versante ▪ Paratie
Opere di tipo passivo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valli e Trincee ▪ Barriere paramassi ▪ Gallerie artificiali

Le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso possono essere migliorate attraverso l'utilizzo di chiodature e bullonature. L'impiego di tali tecnologie di rinforzo permette di ancorare eventuali singoli massi instabili a porzioni di versante considerate fisse. Nel caso vi sia una forte presenza di fratture e discontinuità è possibile iniettare all'interno di esse apposite miscele per ripristinare la continuità della roccia, oppure è possibile realizzare una copertura in calcestruzzo proiettato che, oltre a contrastare il distacco di blocchi, in parallelo, funge da strato protettivo contro l'erosione. Un ulteriore metodo impiegato per limitare i danni causati dall'erosione dovuta al ruscellamento e all'infiltrazione di acque meteoriche è quella di prevedere la rivegetazione delle aree a rischio, prestando tuttavia particolare attenzione all'eventuale azione divaricatrice degli apparati radicali che possono essere, a loro volta, la causa dell'innescarsi di fenomeni di instabilità. Nel caso l'avvento di distacchi sia fortemente legato all'instaurarsi di sovrappressioni nelle discontinuità, dovute all'innalzamento del livello di falda o alle intense precipitazioni, è buona norma la realizzazione di drenaggi che possono essere di tipo superficiale o profondo (Volta, 2011).

L'attivazione di fenomeni di caduta massi può avvenire progressivamente a partire da micro-crolli lungo la superficie esterna dell'ammasso. In questo caso è utile l'impiego di reti in aderenza o rafforzamenti corticali (Ferraiolo e Giacchetti, 2016). Le reti consentono di bloccare la caduta di

eventuali blocchi e ne permettono il loro accumulo al piede del versante. Il rafforzamento corticale prevede di accoppiare le opere in aderenza con eventuali bullonature in modo da associare alle peculiarità tipiche delle reti un'ulteriore funzione di consolidamento dello strato superficiale.

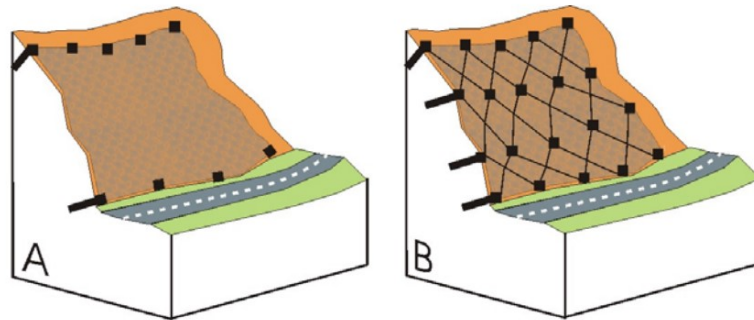


Figura 1.7 a) Rete in aderenza b) Rafforzamento corticale (Ferraiolo e Giacchetti, 2016).



Figura 1.8 Esempio di rete in aderenza costituita da un duplice strato di rete a doppia torsione e pannelli in fune.

La stabilizzazione di un versante roccioso può richiedere anche la modifica della sua geometria. Gli interventi di questo tipo sono la riprofilatura del versante con mezzi meccanici o esplosivo oppure il disaggio e rimozione di singoli blocchi potenzialmente instabili. Nel caso gli interventi necessitino dell'impiego di esplosivo risulta di particolare importanza il dimensionamento delle cariche, al fine di non danneggiare ulteriormente l'ammasso roccioso o generare vibrazioni tali da attivare eventuali crolli.

Le strutture di tipo passivo, al contrario, non intervengono direttamente sul versante ma hanno il compito di intercettare i blocchi distaccatosi dalla parete impedendo che questi possano raggiungere zone sensibili in cui sono presenti strutture e infrastrutture. Le principali opere di intercettazione impiegate sono: i rilevati, le gallerie e le barriere paramassi.

1.3.3.1 Rilevati paramassi

I rilevati paramassi sono terrapieni di materiale grossolano incoerente che hanno una geometria definita avente sezione trapezia (Volta, 2011). A monte viene solitamente realizzata una trincea con la funzione di raccogliere i massi intercettati. Il fondo dello scavo è riempito di materiale sciolto assorbente che permette di ridurre l'energia cinetica dei massi prima che questi impattino il rilevato. La progettazione del manufatto avviene sulla base dei dati ottenuti dalle simulazioni delle traiettorie di caduta dei massi.

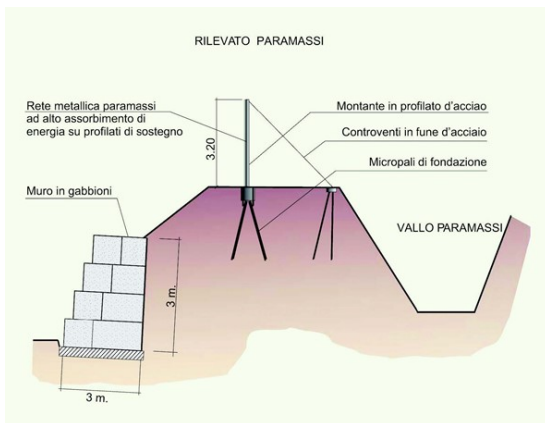


Figura 1.9 a) Sistema di mitigazione composto da un vallo accoppiato con un rilevato paramassi sulla cui sommità è prevista l'installazione di una barriera flessibile b) Rilevato paramassi realizzato nelle immediate vicinanze dell'abitato di Cogne (Valle d'Aosta) (Maccaferri, 2009).

1.3.3.2 Gallerie paramassi

Le gallerie artificiali sono gli interventi di mitigazione economicamente più onerosi. Vengono realizzati in prossimità di arterie stradali realizzate nelle immediate vicinanze di versanti acclivi caratterizzati da un'intensa attività di caduta massi. Le strutture sono solitamente in cemento armato o realizzate con elementi prefabbricati. In alcuni casi, al di sopra della copertura viene realizzato uno strato cuscinetto di materiale granulare, avente la funzione di ammortizzare eventuali impatti sulla struttura.

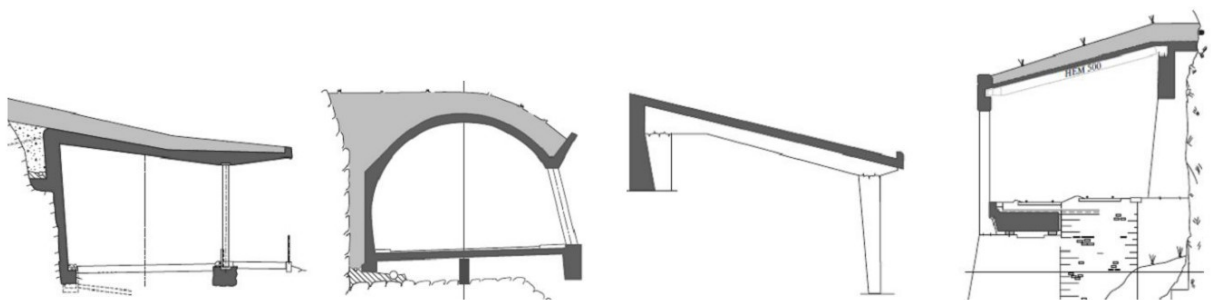


Figura 1.10 Tipologie di gallerie paramassi (A. Volkwein et al., 2011).

1.3.3.3 Barriere paramassi

Le barriere paramassi stanno divenendo le opere di difesa di tipo passivo maggiormente impiegate nella mitigazione del rischio da caduta massi (Volta, 2011). Si presentano come elementi modulari e le loro caratteristiche tecniche ne permettono l'installazione anche in versanti particolarmente inclinati. Non è raro scorgere strutture di questo tipo disposte in pareti verticali o subverticali. In molti casi le opere sono installate in luoghi difficilmente accessibili dove è difficoltoso organizzare gli interventi di manutenzione ordinaria. Non è raro che, effettuando controlli saltuari, si possano ritrovare barriere riempite di detriti o arbusti e quindi con efficienza ridotta se non annullata. Inoltre, le strutture sono progettate per resistere ad un impatto avente una determinata energia ed è quindi importante individuare il prima possibile un eventuale evento critico che abbia portato all'attivazione del sistema frenante.

Le barriere paramassi vengono suddivise in classi in base alle caratteristiche geometriche e al livello di energia che sono in grado di sopportare durante un impatto. I modelli presenti sul mercato sono caratterizzati da livelli di contenimento energetico che variano da 100 kJ fino a valori massimi certificati di 10000 kJ. La scelta del modello da installare è basata sui risultati ottenuti dalle simulazioni di caduta massi che consentono di ottenere dati puntuali sull'energia dei massi durante tutto il loro percorso. Le barriere si suddividono in rigide e flessibili a seconda della reazione della struttura durante l'impatto con un blocco. Le barriere di tipo rigido vengono installate solitamente nelle immediate vicinanze delle arterie stradali e ferroviarie e molto spesso vengono posizionate al di sopra di muri di sostegno. Rispetto alle strutture flessibili risultano più pesanti e sono progettate per contenere impatti caratterizzati da energie inferiori.

Le barriere paramassi flessibili sono progettate per dissipare l'energia di un eventuale impatto grazie alla loro deformabilità. I componenti che le costituiscono sono:

- La **struttura di intercettazione** che è composta da reti di fune in acciaio, con maglie di forma quadrata, romboidale o più comunemente circolare. La sua funzionalità è quella di deformarsi se impattata e distribuire uniformemente i carichi ai montanti, alle funi portanti e conseguentemente al sistema frenante e alle fondazioni. Viene normalmente fornita in pannelli che vengono collegati tra loro mediante morsetti. Nel caso si preveda il distacco di blocchi di dimensioni ridotte è possibile sovrapporre alla rete principale una rete secondaria avente maglie più piccole.
- La **struttura di sostegno** è costituita da elementi rigidi in acciaio, denominati montanti, aventi sezione tubolare oppure ad HEA. La sua funzionalità è quella di sostenere la rete di intercettazione, distribuire i carichi alle fondazioni, ai tiranti e al sistema frenante. I montanti sono generalmente disposti ad intervalli regolari lungo la struttura e solitamente connessi alla piastra di fondazione mediante una connessione a cerniera.
- La **struttura di collegamento** è costituita da funi in acciaio che fungono da collegamento tra la struttura di sostegno e il sistema freno-fondazione. A seconda della disposizione rispetto alla barriera i cavi vengono denominati controventi di monte o controventi laterali.
- Il **sistema frenante** è costituito da dispositivi, denominati freni, che vengono posti tra le funi di collegamento e le fondazioni con la funzione di dissipare l'energia dovuta ad un impatto. La forma, la tipologia e il principio di funzionamento dei freni variano a seconda della società produttrice della barriera. Vengono attivati da una forza definita e a seconda del modello

dissipano l'energia plasticizzandosi o per attrito. In Figura 1.11 sono rappresentati diversi sistemi presenti in commercio.

- La **struttura di fondazione** ha la funzione di collegare i montanti e i sistemi frenanti al versante e trasferire a terra le sollecitazioni derivanti dall'impatto con un blocco. Le fondazioni dei montanti vengono disposte al di sotto della piastra di base e sono solitamente costituite da plinti in calcestruzzo solitamente ancorati al terreno con bulloni o micropali. La realizzazione delle fondazioni per il sistema di collegamento delle funi avviene tramite tiranti a barra o a trefolo.



Figura 1.11 Modelli di dispositivi frenanti.

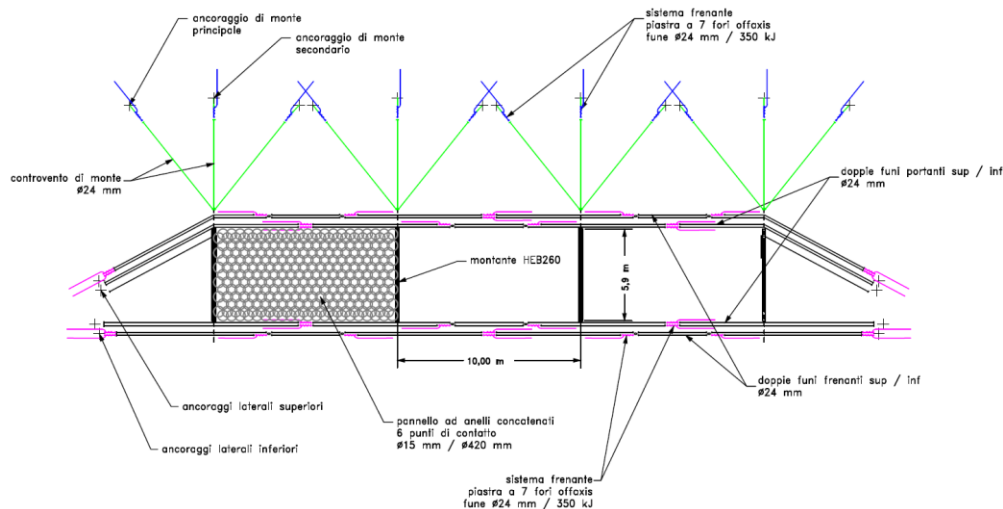


Figura 1.12 Schema tipo di una barriera paramassi modello RAV_8A realizzata dalla società Incofil Tech S.r.l.

1.4 Fenomeni di debris flow

Le colate di detrito sono movimenti rapidi di masse che avvengono principalmente in zone montane e si sviluppano sotto l'effetto della forza di gravità. La massa in movimento è un composto di acqua e detriti di granulometria variabile che va da pochi millimetri fino a metri (Brighenti et al., 2013). All'interno della miscela vi è solitamente anche una componente gassosa che viene normalmente trascurata. Tali fenomeni, vista la loro pericolosità e capacità di distruzione, sono riconosciuti fin dall'antichità. Si dice che in alcune zone montane del Giappone a tali eventi vennero associati nomi evocativi "il diluvio del re serpente", "tsunami di montagna", "marea di montagna" (Takahashi, 2009). A partire dal 1930 diversi autori si occuparono di studiare tali fenomeni e di fornirne descrizioni qualitative e definizioni. La consistenza fluida, che caratterizza le colate, consente alla massa in movimento di percorrere lunghi tragitti in tempi brevi con velocità che possono raggiungere i 30 m/s (Hübl et al., 2009), trasportare una gran quantità di detriti anche di dimensioni consistenti (diversi metri cubi), impattare strutture con violenza. Tali eventi sono caratterizzati da un'alta imprevedibilità e, nella maggior parte dei casi, non sono identificabili segnali premonitori (Tamotsu Takahashi, 2008). Nonostante siano stati eseguiti diversi studi sui fenomeni di colata non sono ancora del tutto chiari tutti i fenomeni fisici coinvolti (Federico Soatto, 2014). In questo paragrafo verrà fornita una descrizione sintetica dei fenomeni di debris flow e delle principali opere di difesa impiegate nella mitigazione del rischio, con particolare attenzione alle barriere paracolate flessibili che sono la sede di installazione del sistema di monitoraggio Gflow Safety Network, strumento il cui sviluppo verrà descritto in maniera dettagliata nel quinto capitolo.

1.4.1 Meccanica delle colate detritiche

I fenomeni di debris flow possono essere molto diversi tra loro poiché le proprietà dei materiali coinvolti e la loro concentrazione all'interno del flusso hanno domini di variazioni molto ampi. In un celebre articolo pubblicato nel 1997 (Iverson, 1997), Iverson riassunse i valori tipici assunti da parametri chiave nelle colate detritiche quali la densità del fluido, il diametro medio delle particelle ecc. (Tabella 1.6). Un parametro importante, ad esempio, nella caratterizzazione delle colate

detritiche è la concentrazione dei sedimenti all'interno del flusso che per l'autore è compresa tra 0.4 e 0.8.

Tabella 1.6 Proprietà delle colate detritiche e valori caratteristici (Iverson, 1997)

Proprietà	Simbolo	Valori tipici
Proprietà delle particelle solide		
Densità	ρ_s [Kg/m ³]	2500 – 3000
Diametro medio	D [m]	10^{-5} – 10
Angolo di attrito	ϕ_s [°]	25 – 35
Coefficiente di restituzione	e [-]	0.1 – 0.5
Proprietà del fluido interstiziale		
Densità	ρ_f [Kg/m ³]	1000 – 1200
Viscosità	μ [Pa s]	0.001 – 0.1
Proprietà della mistura		
Concentrazione volumetrica	C [-]	0.4 – 0.8
Permeabilità	K [m ²]	10^{-13} – 10^{-9}
Conducibilità idraulica	K [m/s]	10^{-7} – 10^{-2}
Rigidezza alla compressione	E [Pa]	10^3 – 10^5
Angolo di attrito	Φ [°]	25 – 45

Il percorso di un debris flow a scala di bacino può essere solitamente suddiviso in tre zone: la zona di innesco, la zona di propagazione o intermedia e la zona di deposito (Turnbull et al., 2015). La colata può avere inizio sia direttamente all'interno di alvei o in un pendio aperto caratterizzato da pendenze elevate dove sono presenti cumuli di detriti liberi (Bertoldi, 2014). Nella porzione intermedia vi è la propagazione del flusso. In questa zona la colata è estremamente variabile in termini di quantità di componente liquida presente, concentrazione e granulometria degli inerti. Il flusso, ad esempio, durante il suo percorso può erodere materiale dalle sponde o dal fondo dell'alveo, incrociare cumuli di detriti liberi oppure essere alimentato da corsi d'acqua. La zona di deposito o zona di run out, infine, definisce l'area in cui avviene l'arresto della colata. L'estensione di tale zona dipende dalle caratteristiche del flusso e dalla topografia del territorio. La pendenza che determina l'arresto dei flussi è compresa solitamente tra i 10 e i 15 gradi per le colate non confinate e tra i 4 e gli 8 gradi per quelle confinate in un alveo.

Dal punto di vista macroscopico le colate di detrito sono caratterizzate da un flusso non stazionario avente una portata variabile nel tempo e caratterizzato da una o più ondate consecutive. Il tempo intercorso tra le diverse onde non è costante e può variare da pochi secondi ad ore (Iverson, 1997). Analizzando una singola ondata è possibile solitamente identificare tre diverse zone: il fronte, il corpo della colata e la zona di coda

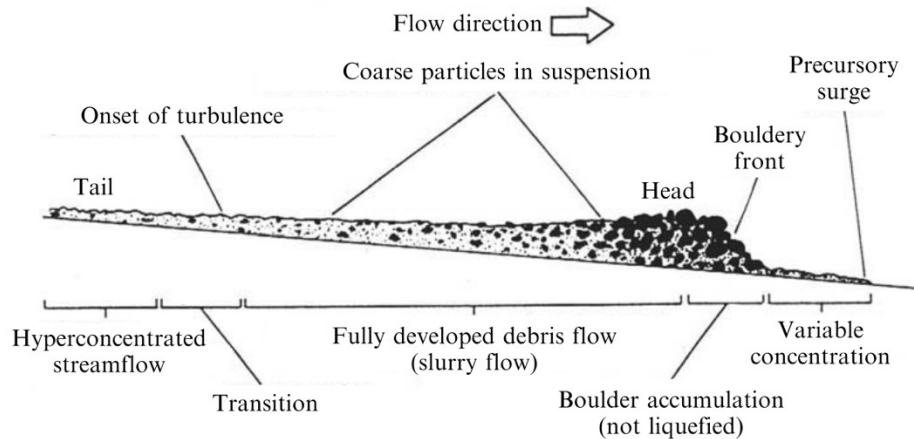


Figura 1.13 Ondata di una colata detritica schematizzata (Pierson, 1986).

Il fronte si presenta parzialmente saturo. In tale porzione si concentrano gli inerti di dimensioni maggiori ed eventualmente il materiale legnoso trasportato. Sul fronte, inoltre, è possibile individuare il picco di portata che può essere anticipato da onde minori dette precursori. Nel corpo della colata il flusso si presenta saturo e con caratteristiche di un corpo viscoso. In tale zona la superficie libera del flusso risulta pressoché parallela al fondo dell'alveo. La porzione di coda si presenta come una corrente iperconcentrata avente una portata inferiore e caratterizzata da concentrazioni volumetriche tra il 20% e il 47% (Pierson e Costa, 1987)). Il materiale trasportato è caratterizzato da granulometrie minori rispetto al corpo della colata.

1.4.2 Fattori scatenanti

Come già affermato precedentemente, le colate di detriti possono avere fra loro proprietà anche molto diverse ma, per la loro formazione, sono sempre necessari i seguenti ingredienti: un deposito di sedimenti, la presenza di acqua e un versante caratterizzato da pendenze elevate, normalmente maggiori di 15 gradi (Tubino e Lanzoni, 1993). L'innesco di una colata può essere quindi causato, ad esempio, da fenomeni di precipitazione intensi o dallo scioglimento repentino di neve o ghiacciai (Armanini et al., 2005). Gli ingenti flussi di acqua generati, scorrendo verso valle, possono interagire con accumuli di detriti generando debris flow. La formazione di una colata detritica può avvenire anche a seguito di un collasso di un versante o di un argine (Jakob e Hungr, 2013) o a seguito di attività di disboscamento sregolate o incendi. La copertura vegetativa, infatti, inibisce la formazione di colate detritiche poiché le radici degli alberi contribuiscono sia ad aumentare la resistenza a taglio dei terreni superficiali, sia ad assorbire parte del contributo idrico. Inoltre le piante, intercettando le precipitazioni, portano ad un rallentamento dell'assorbimento delle acque da parte del terreno (Armanini et al., 2005). Nella Tabella 1.7 sono riassunti i principali fattori scatenanti di flussi di detriti.

Tabella 1.7 Le principali cause di innesco delle colate detritiche (Hobart M. King. - www.geology.com)

Fattore scatenante:	Effetto:
Precipitazioni intense	Precipitazioni intense possono portare alla formazione di ingenti flussi di acqua che, incanalandosi verso valle, possono trasportare i detriti sciolti presenti in superficie generando un flusso detritico.
Scioglimento neve o ghiacciai	Uno scioglimento repentino di neve o ghiaccio, dovuto per esempio ad un innalzamento improvviso delle temperature, può portare alla formazione di flussi consistenti di acqua che scorrendo verso valle possono intercettare eventuali detriti sciolti depositati in superficie incontrati durante il tragitto generando un flusso detritico.
Erosione	Il passaggio di un flusso può generare un fenomeno di erosione al piede dell'argine fino al collasso dello stesso. Tale instabilità determina lo scorrimento improvviso del materiale arginale saturo verso l'alveo generando un debris flow.
Instabilità pendii	I debris flow possono essere generati anche da fenomeni franosi. Gli stessi fenomeni di instabilità possono essere causati da precipitazioni intense che generano un innalzamento della falda con conseguente aumento delle pressioni interstiziali e successivo collasso.
Incendi e disboscamento	La riduzione della vegetazione forestale dovuta ad incendi o ad attività di disboscamento sregolate può essere una conseguenza dell'attivazione di fenomeni di colate detritiche.
Eruzioni vulcaniche	Durante le eruzioni vulcaniche si formano flussi piroclastici (colate di materiale magmatico caratterizzate da alte temperature che scorrono lungo il pendio) che possono fondere rapidamente grandi volumi di neve e ghiaccio disposti sulle sponde del vulcano generando fenomeni di debris flow.

1.4.3 Misure di mitigazione del rischio da colate detritiche: opere di difesa

L'intenso processo di urbanizzazione avvenuto negli ultimi decenni ha portato alla realizzazione di zone abitate in territori caratterizzati da un rischio elevato di debris flow. In determinate situazioni eliminare totalmente il rischio non è un'opzione praticabile per cui sono state sviluppate strategie di mitigazione che possono essere divise in due gruppi (Vagnon, 2020):

- **Misure passive:** sono pensate per ridurre le conseguenze correlate al fenomeno naturale e non riguardano interventi diretti sul corpo di frana. Possono essere a loro volta suddivise in *misure preventive* in cui rientra la pianificazione del territorio, l'imposizione di vincoli costruttivi o la redazione di piani di emergenza ed evacuazione e *misure per la riduzione delle conseguenze durante l'evento* come la chiusura di arterie stradali o l'evacuazione di aree a rischio. Le operazioni previste, in caso di evento, sono spesso regolamentate dai sistemi di monitoraggio e allertamento. La chiusura di strade, ad esempio, può avvenire in maniera del tutto automatica in base al superamento di soglie definite oppure in base a disposizioni imposte dagli enti di gestione territoriali basandosi sui dati di monitoraggio campionati.
- **Misure attive:** sono pensate per ridurre la probabilità di innesco dei debris flow, il trasporto di detriti e limitare la propagazione degli stessi. L'utilizzo di queste misure permette di ridurre la frequenza di accadimento e la capacità distruttiva. Tali misure riguardano interventi di difesa attivi e di difesa passivi. In Figura 1.14 sono rappresentate le principali opere di difesa passive impiegate nella mitigazione del rischio delle colate detritiche.

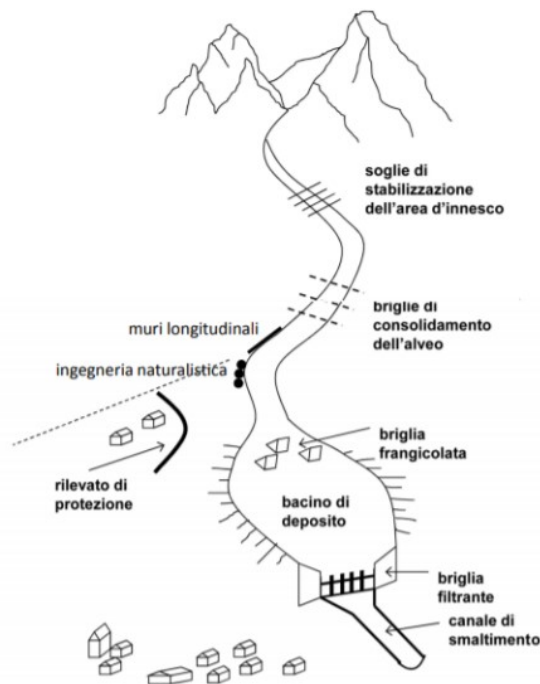


Figura 1.14 Opere di difesa nei debris flow (D'Agostino, 2005).

Uno dei due sistemi presentati in questo elaborato è pensato per essere installato su barriere flessibili che appartengono alla famiglia delle opere di difesa di tipo passivo. Nei prossimi paragrafi verranno descritte brevemente alcune di queste tecnologie.

1.4.3.1 Briglie frangicolata

Le strutture frangicolata sono costruzioni in cemento armato realizzate in alvei dove è previsto il possibile passaggio di una colata detritica. Nella zona centrale dell'opera vi è una porzione filtrante costituita da elementi strutturali triangolari, posti a distanze definite, anch'essi realizzati in calcestruzzo armato (Figura 1.15). Nella superficie rivolta verso monte dei singoli elementi della briglia può essere presente un rivestimento in gomma o in acciaio avente il compito di evitare l'instaurarsi di cricche negli elementi filtranti dovute all'impatto con il flusso. Le briglie sono progettate per ridurre la velocità e il livello energetico di una colata detritica e per fungere da filtro per il materiale più grossolano della miscela.

1.4.3.2 Bacino di deposito

Il bacino di stoccaggio è un'area situata in un punto del percorso della colata detritica ed è dedicato all'accumulo della componente più grossolana della miscela. A valle della zona di stoccaggio viene solitamente posta una briglia filtrante avente la funzione di trattenere il materiale con granulometria superiore ad un valore determinato. La progettazione del bacino di deposito (pendenza del fondo, capacità, geometria griglia ecc.) avviene sulla base delle caratteristiche del flusso previsto. Se la realizzazione di un bacino di grandi dimensioni non è un'opzione praticabile, è possibile realizzare più bacini di dimensioni ridotte in serie. Durante la realizzazione dell'opera è necessario prevedere una o più vie di accesso alla vasca di deposito per consentirne le operazioni di manutenzione o svuotamento.



Figura 1.15 a) Bacino di deposito costruito ad Anterselva di mezzo, Bolzano b) Esempio di briglia frangicolata.

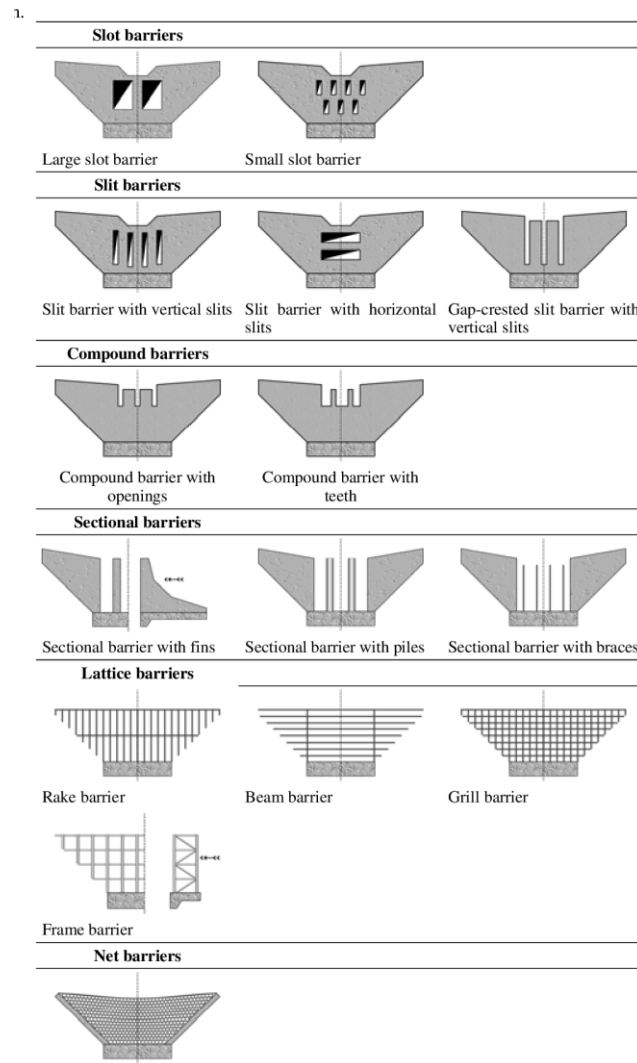
1.4.3.3 Briglie filtranti

Le briglie filtranti, comunemente denominate briglie selettive, sono strutture che appartengono alla famiglia delle barriere (Calcagno, 2019). Tali opere vengono poste lungo l'alveo di passaggio delle colate e sono solitamente ancorate alle sponde e al fondo mediante strutture di fondazione (Hübl et al., 2015). Le loro funzioni principali sono:

- Ridurre l'energia della colata;

- Filtrare il flusso, trattenendo i materiali più grossolani e permettendo il passaggio della componente fluida e del materiale più fine;

Possono essere suddivise in aperte o chiuse, a seconda della presenza o assenza di intercapedini nella struttura che permettono il passaggio della componente fluida e in rigide o flessibili, in funzione del tipo di comportamento assunto in risposta ad un impatto. Le barriere di tipo chiuso sono strutture murarie, prive di intercapedini, disposte ortogonalmente al canale. Consentono di trattenere il materiale detritico ma, allo stesso tempo, non permettono il passaggio dell'acqua. La loro efficacia termina al riempimento del volume retrostante l'opera. Le barriere aperte al contrario sono dotate di vuoti che permettono il passaggio della componente più fluida e del materiale con granulometria più fine. La spinta idraulica su tali strutture è ridotta. Sul mercato esistono diverse tipologie di barriere filtranti aperte che possono essere suddivise in: barriere a finestra, barriere a fessura, barriere a pettine e barriere a reticolo. Un elemento che accomuna tutte queste strutture è la necessità di effettuare operazioni di manutenzione per rimuovere il materiale detritico trattenuto durante un evento prima che ne avvenga un successivo.



5: Construction types of open barriers (HÜBL et al., 2003)

Figura 1.16 Tipologie di briglie filtranti (Hübl et al, 2005).

1.4.3.4 Barriere flessibili

Le barriere paracolate flessibili fanno parte della famiglia delle barriere filtranti a reticolo. La loro caratteristica principale è la possibilità di deformarsi dissipando l'energia dovuta ad un impatto con una colata. Le barriere flessibili vengono impiegate come strutture di protezione per i debris flow canalizzati. Si estendono da una sponda all'altra dell'alveo dove vengono realizzate le strutture di fondazione. La struttura di intercettazione, viene solitamente posta ad una quota definita in modo da lasciare un'intercapedine per il passaggio del normale deflusso dell'alveo, senza che questo alla lunga arrechi danni alla struttura (Volkwein, 2014). Le opere in oggetto sono installabili facilmente e velocemente. Se la zona di posizionamento è difficilmente raggiungibile, i singoli componenti possono essere trasportati tramite un elicottero e il montaggio non richiede mezzi pesanti se non l'impiego di perforatrici per la realizzazione degli ancoraggi (Volkwein, 2014). Possono essere installate singolarmente o in serie lungo il canale a seconda delle dimensioni dell'alveo e della quantità di detriti prevista. Le barriere dopo essere state impattate necessitano di operazioni di manutenzione quali lo svuotamento della rete e la sostituzione dei freni, se entrati in funzione. In alcuni casi è necessaria anche la sostituzione della struttura di intercettazione.

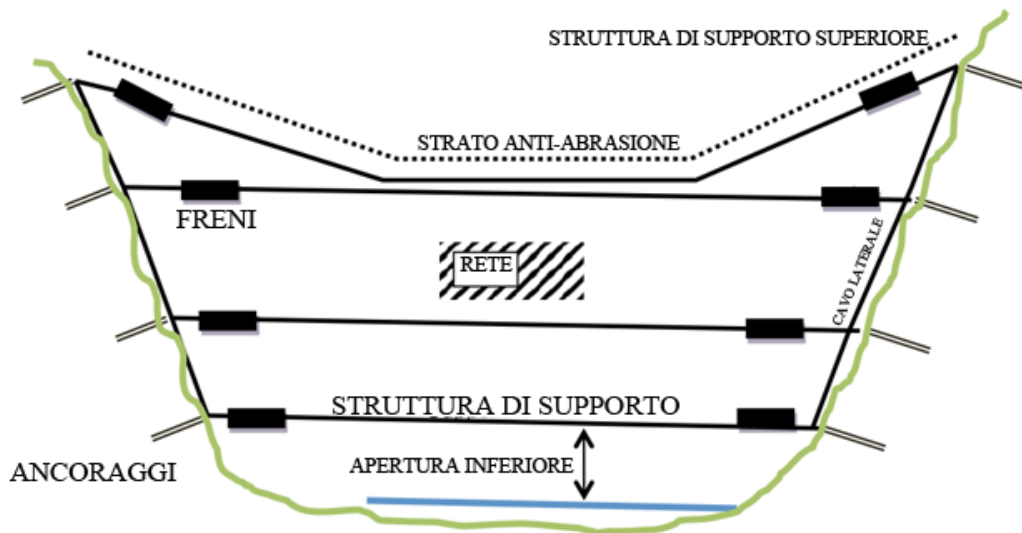


Figura 1.17 Schema tipo di una rete flessibile (modificata da (Volkwein, 2014)).

I principali componenti di una rete paracolata sono:

- **La rete** che è il componente della barriera che entra in contatto con il flusso e ha il compito di trasferire le forze che si sono instaurate, durante l'urto con la colata, alla struttura di supporto. A seconda del tipo di fenomeno, in termini di granulometria, si predispongono due reti in aderenza tra loro con apertura di maglia diversa.
- **La struttura di supporto** che è costituita da cavi in acciaio, paralleli tra loro e disposti solitamente a distanze costanti, che hanno la funzione di trasferire i carichi provenienti dalla rete alla struttura frenante e di conseguenza alle fondazioni. Il tipo di cavi e la dimensione dipende dalla magnitudo del flusso atteso. Per barriere con estensioni superiori a 20 metri vengono normalmente inseriti montanti di supporto.

- La **struttura di supporto superiore** che è composta da un cavo che corre, nella parte centrale della barriera, parallelo rispetto al cavo di supporto in sommità e si collega ad una quota superiore dell'alveo mediante ancoraggi. L'introduzione di tale fune consente di concentrare il flusso nella parte centrale della barriera durante l'impatto e riduce l'abbassamento della rete (Volkwein, 2014). In alcuni casi, a protezione del cavo superiore e del cavo di supporto sommitale, è previsto uno strato anti-abrasione. I cavi laterali vengono fissati e disposti paralleli alle sponde dell'argine e impediscono che si possano creare delle intercapedini ai fianchi della struttura.
- La **struttura frenante** che ha la funzione di dissipare l'energia di impatto sulla barriera e ridurre la forza di picco agente sulle funi (Axel Volkwein et al., 2011). È composta da elementi metallici che sottoposti a forze si deformano plasticamente o per attrito. I freni vengono normalmente installati tra gli ancoraggi e i cavi di supporto.



Figura 1.18 Esempi di barriere flessibili (www.incofil.com – www.geoprodotti.eu).

1.4.4 Interazione tra il flusso e le strutture flessibili: accelerazioni sulla rete

Nel capitolo 5 del presente elaborato verranno descritte le fasi sviluppo del sistema di monitoraggio Gflow Safety Network, progettato per individuare impatti sulle barriere flessibili paracolate, misurando in continuo le accelerazioni della rete di intercettazione. Le caratteristiche del sensore da implementare sono state definite in base alle accelerazioni attese sulle strutture flessibili, causate dalle interazioni con una colata detritica.

In letteratura vi sono diverse pubblicazioni in cui sono presentati dati riguardanti le forze agenti sulle funi, l'allungamento dei freni e la deformazione della rete di intercettazione derivanti da modelli, da sistemi di monitoraggio installati in barriere in sito o registrati durante test in scala reale o in canaletta (Wendeler et al., 2007)(Tan et al., 2018)(Jiang et al., 2020)(Tan et al., 2020). Diversamente non vi sono casi in cui si siano campionati accelerazioni della rete. Non potendo disporre di dati misurati in modo diretto si è ricostruito l'andamento delle accelerazioni partendo dai dati di allungamento della rete misurati durante un impatto. Le barriere flessibili, infatti, se colpite subiscono deformazioni determinate dall'allungamento dei dispositivi frenanti. Gli spostamenti maggiori della rete si registrano principalmente in direzione parallela al canale (Jiang et al., 2020). Inoltre è possibile evidenziare anche una riduzione dell'altezza della stessa (Axel Volkwein et al., 2011).

Nel giugno 1996 l'USGS (United States Geological Survey) ha condotto sei test su barriere flessibili in scala reale per valutarne l'applicabilità nella mitigazione del rischio da colate detritiche

(DeNatale et al., 1999). L'obiettivo della ricerca era indagare il comportamento di quattro diverse strutture flessibili durante le interazioni con un flusso. In particolare, nel test 3 e nel test 5, si è analizzata la capacità strutturale delle barriere, già sollecitate dal precedente impatto e dal carico degli inerti presenti nella rete, di resistere ad una successiva colata.

Le prove sono state realizzate nel sito di test a Blue River, in Oregon, dove è presente una canaletta di lunghezza 95 m, larghezza 2 m e profondità 1.2 m. Le strutture flessibili testate, aventi altezza di 2.4 metri e larghezza di 9.1 metri, sono state installate allo sbocco della canaletta e sostenute mediante l'impiego di due montanti. I flussi sono stati simulati con una miscela di acqua, ghiaia e sabbia. In Tabella 1.8 sono rappresentati i volumi dei debris flow simulati, la velocità di impatto sulla struttura e la deformazione massima della rete rilevata durante i test. In Tabella 1.9 sono riassunte le principali caratteristiche delle strutture testate. Per approfondimenti si rimanda all'articolo citato.

Tabella 1.8 Dati riguardanti il volume delle colate detritiche simulate, la velocità del flusso, e la deformazione massima della rete (modificata da (DeNatale et al., 1999)).

Parametro:	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
Volume debris flow [m ³]	9.8	9.6	10.3	10.4	10.4	10.1
Velocità di impatto [m/s]	MS*	9.0	6.5	8.0	6.0	5.0
Allungamento massimo della rete in direzione del flusso [m]	MS*	1.46	0.30	1.93	0.40	1.50

MS = Malfunzionamento sistema di monitoraggio

Tabella 1.9 Principali caratteristiche delle barriere flessibili testate.

Test	Dimensioni barriera:	Tipologia maglia:	Metodologia di collegamento dei montanti alla base:	Diametro cavi di supporto:
1	2.4 m x 9.1 m	Quadrata 30 cm x 30 cm	Incastro	1.9 cm
2	2.4 m x 9.1 m	Quadrata 20 cm x 20 cm	Cerniera	1.9 cm
3	La barriera impiegata nel test 3 è la medesima del test 2 sottoposta ad un secondo impatto.			
4	2.4 m x 9.1 m	Quadrata 15 cm x 15 cm	Incastro	1.9 cm
5	La barriera impiegata nel test 5 è la medesima del test 4 sottoposta ad un secondo impatto.			
6	2.4 m x 9.1 m	Ad anelli di diametro 30 cm	Incastro	1.9 cm

Durante le prove, mediante l'impiego di un estensimetro a filo e di un sistema di acquisizione ad alta frequenza, è stato possibile registrare la deformazione della rete nel tempo. Più precisamente si è valutato l'allungamento, in direzione del flusso, di un punto posto nella mezzeria della rete a 50 cm di altezza dal piano campagna al quale è stata collegata l'estremità dell'estensimetro (Figura

1.19). Partendo dai dati registrati dal dispositivo, rappresentati in Figura 1.20, si sono calcolati i valori di accelerazione in funzione del tempo del punto sulla barriera preso in considerazione.

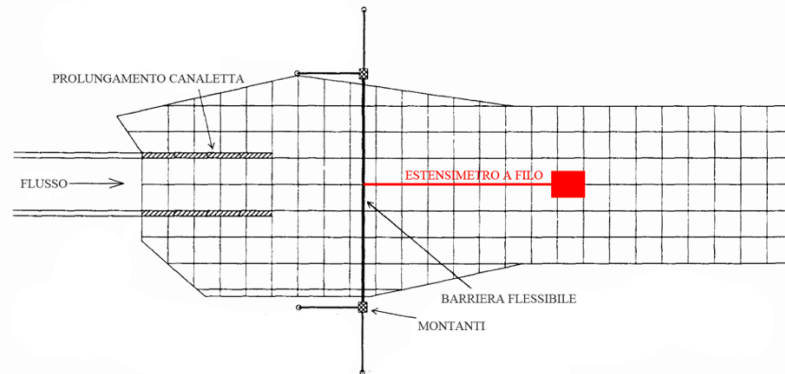


Figura 1.19 Disposizione dell'estensimetro a filo rispetto alla barriera flessibile.

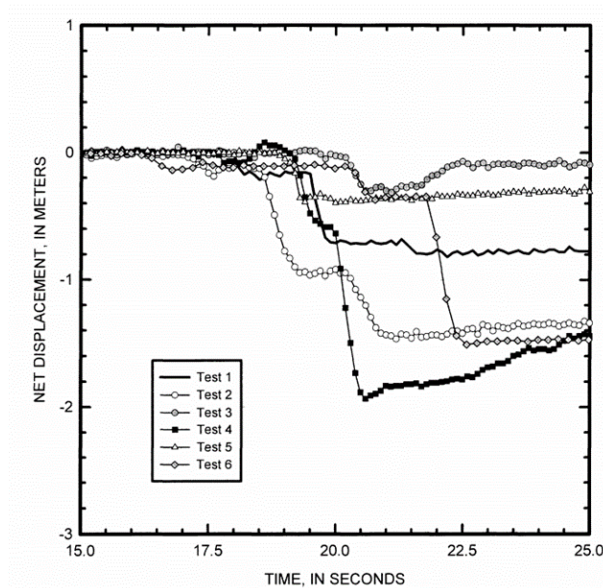


Figura 1.20 Deformazione della rete misurata mediante l'impiego di un estensimetro a filo durante le prove (DeNatale et al., 1999).

Le entità degli spostamenti sono state estrapolate dal grafico in Figura 1.20, riportato nella pubblicazione, mediante l'impiego del software Engauge Digitizer. L'applicativo Open Source consente di estrapolare i valori numerici riportati in un grafico in formato immagine, specificando l'origine degli assi del sistema di riferimento e le coordinate di due punti noti. In base al numero di dati campionati per secondo si è appurato che la frequenza di acquisizione dell'estensimetro fosse di 10 Hz. Il sistema di monitoraggio sviluppato prevede la registrazione dei dati con una frequenza superiore e pari a 175 Hz. Per tale motivo si sono ricavati i valori di spostamento ogni 0.005 secondi, interpolando linearmente i valori rilevati dall'estensimetro. Successivamente, con i dati di spostamento ricavati, si è calcolato l'andamento della velocità della rete nel tempo e dell'accelerazione.

1.4.4.1.1 Test 1

In Figura 1.21 sono rappresentati i dati di accelerazione ricavati e le deformazioni misurate dall'estensimetro nel test 1. Dal grafico è possibile individuare una prima ondata a partire dall'istante $t = 2.21$ s che ha determinato uno spostamento della rete massimo di 0.21 m e una seconda ondata in corrispondenza dell'istante di tempo $t = 4.48$ s che ha determinato un ulteriore allungamento massimo della rete pari a 0.81 m. Durante la prima prova vi è stato il collasso della struttura portante per cui le deformazioni della rete sono risultate di entità inferiore rispetto ai successivi test in cui si è analizzata la capacità strutturale di una barriera nel contenere un primo impatto. Il dominio delle accelerazioni misurate nella prima ondata è risultato compreso tra 3.84 g e -5.22 g mentre nella seconda tra 12.09 g e -9.40 g. Le accelerazioni individuate a seguito del secondo impatto sono probabilmente legate principalmente alle fluttuazioni del cavo estensimetrico.

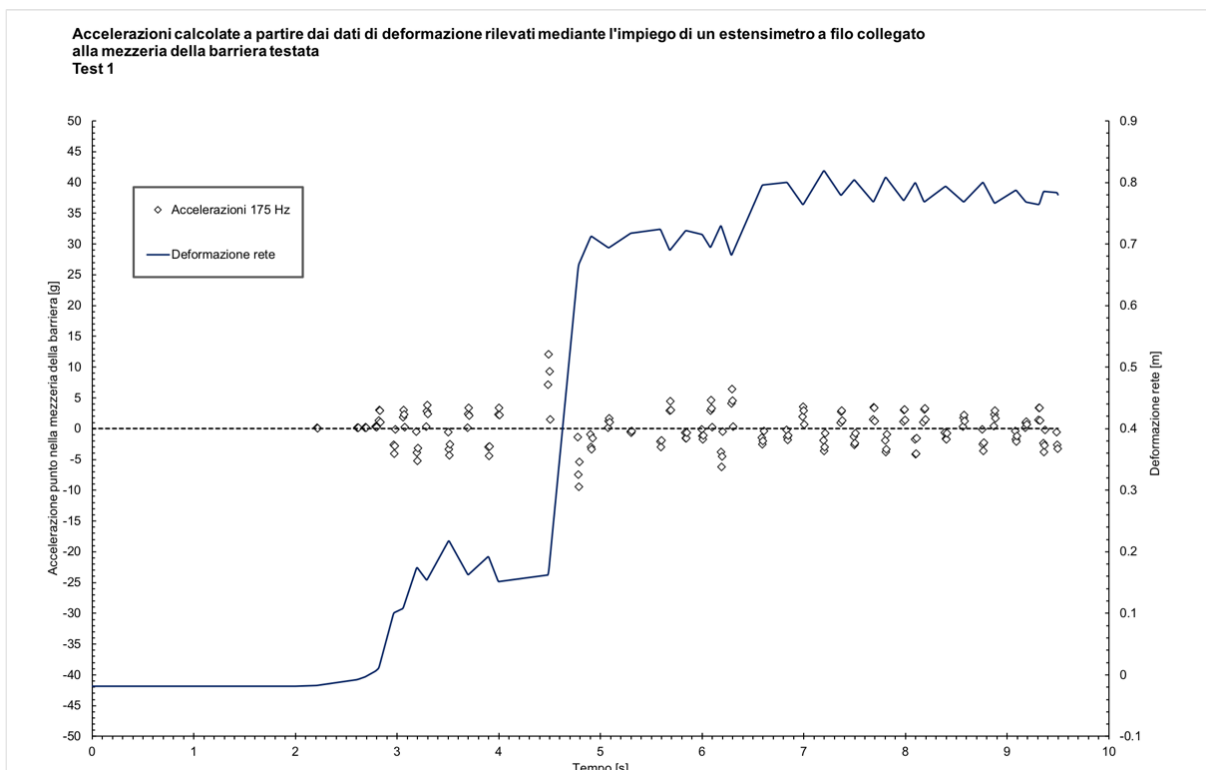


Figura 1.21 Test 1: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.

1.4.4.1.2 Test 2

Nel flusso simulato della seconda prova è possibile individuare tre ondate. La prima ha determinato un allungamento massimo della rete pari a 0.18 m e le accelerazioni della struttura calcolate rientrano nel dominio compreso tra 3.21 g e -5.37 g. L'ondata successiva ha impattato la struttura all'istante $t = 3.48$ s e ha determinato un'accelerazione massima e minima della stessa rispettivamente pari a 7.06 g e -5.13 g. I valori di accelerazione della rete registrati durante la terza ondata, il cui impatto è stato registrato all'istante $t = 5.17$ s, sono compresi tra 6.66 g e -7.94 g. La deformazione massima della rete è risultata pari a 1.45 metri.

1.4.4.1.3 Test 3

Nel test 3 si è valutata la capacità della struttura flessibile, utilizzata nel test 2 e riempita degli inerti del flusso precedente, di resistere ad un ulteriore impatto. In questo caso, in corrispondenza dell'interazione col flusso, si può notare uno spostamento della rete in direzione della colata pari a 0.31 m seguito da un successivo spostamento in direzione contraria pari 0.23 m. La deformazione residua risulta di 0.10 m. Inoltre, all'istante $t = 4.64$ secondi, si può rilevare una deformazione preliminare pari a 4 cm seguita da uno spostamento in direzione contraria pari a 3 cm. Le accelerazioni misurate durante la prova sono ricadute all'interno del dominio compreso tra 3.38 g e -5.24 g.

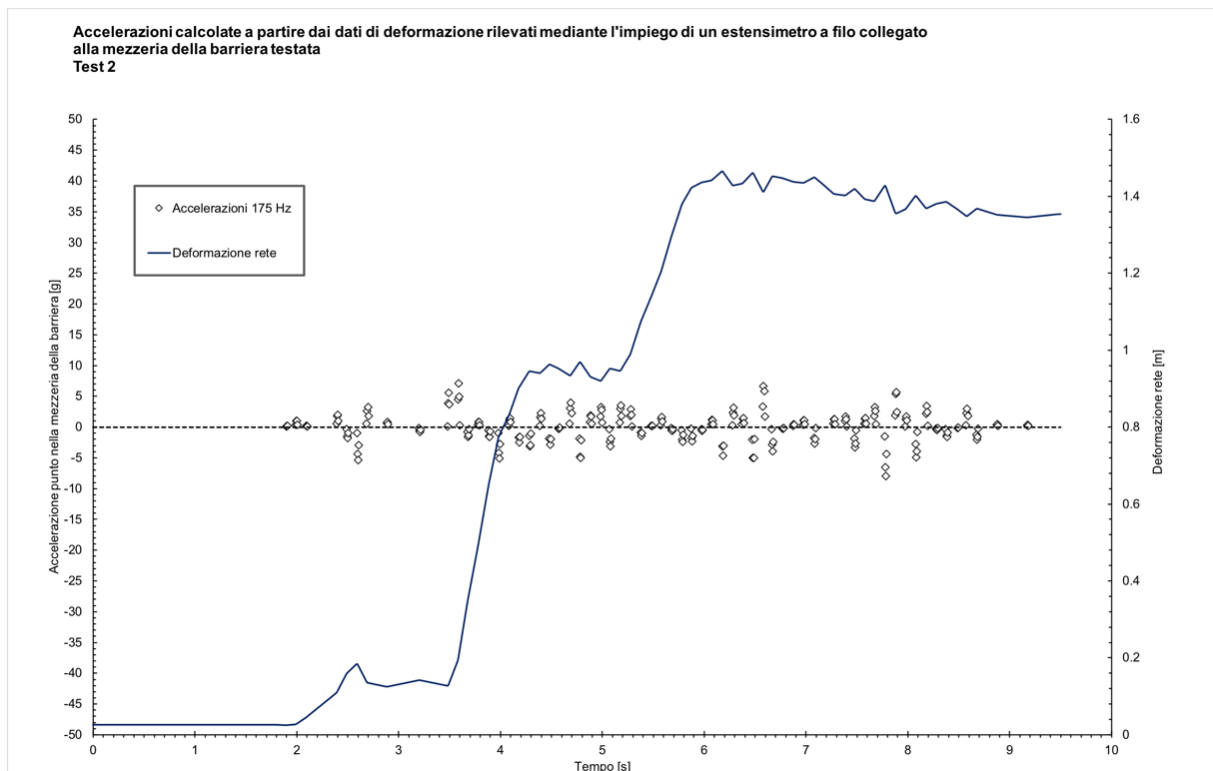


Figura 1.22 Test 2: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.

1.4.4.1.4 Test 4

Nel test 4 l'analisi dei dati è avvenuta a partire dall'istante 4.07 s poiché dal grafico in Figura 1.20 non era possibile individuare correttamente l'andamento delle deformazioni nel periodo precedente. A partire da tale istante il flusso simulato ha raggiunto la struttura flessibile seguendo due ondate. La prima interazione ha determinato uno spostamento della rete di 0.59 m mentre la seconda uno spostamento massimo pari a 1.92 metri. La deformazione residua della rete risulta di 1.47 metri. Le accelerazioni rilevate durante la prima ondata sono ricadute nel dominio compreso tra 2.90 g e -2.14 g. Mentre durante la seconda ondata si sono rilevati valori compresi tra 9.85 g e -4.05 g.

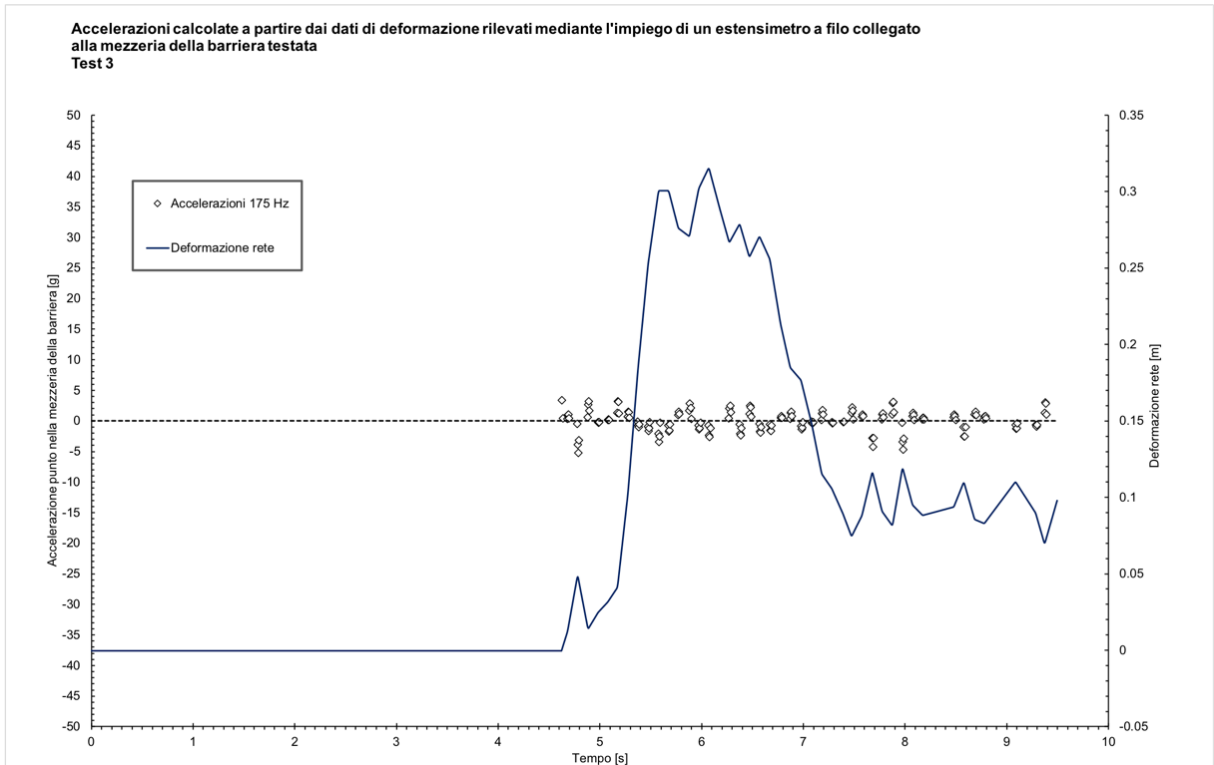


Figura 1.23 Test 3: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.

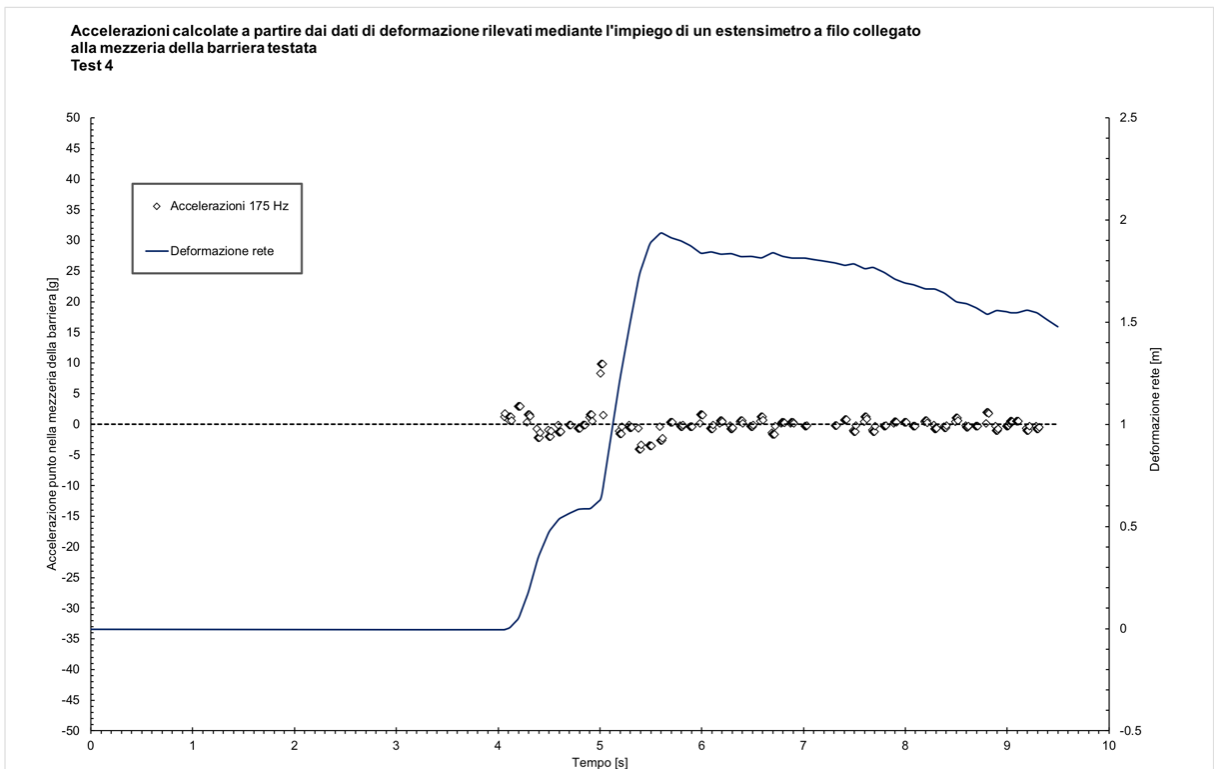


Figura 1.24 Test 4: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.

1.4.4.1.5 Test 5

Nel test 5 si è valutata la capacità della struttura flessibile, utilizzata nel test 4 e riempita degli inerti del flusso precedente, di resistere ad un ulteriore impatto. In questo caso, in corrispondenza dell'interazione col flusso avvenuto all'istante $t = 3.85$ s, si può notare uno spostamento della rete in direzione della colata pari a 0.39 m. La deformazione residua risulta di 0.31 m. Le accelerazioni misurate durante la prova sono ricadute all'interno del dominio compreso tra 9.61 g e -11.80 g.

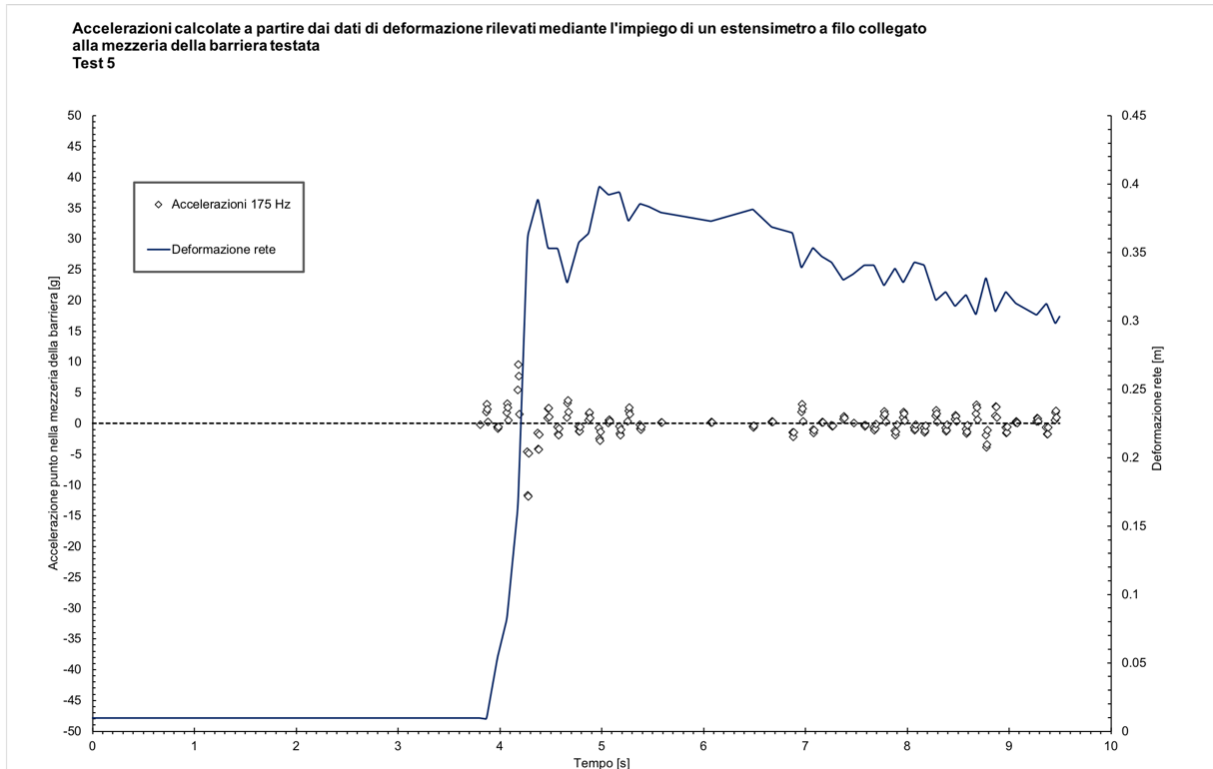


Figura 1.25 Test 5: Accelerazione e allungamento nel tempo, in direzione del flusso, del punto della rete al quale è vincolato l'estensimetro.

1.4.4.1.6 Test 6

Nel test 6 si possono individuare 3 ondate rispettivamente in corrispondenza degli istanti $t = 0.84$ s, $t = 5.20$ s e $t = 6.77$ s. Il primo impatto da determinato un allungamento massimo della rete pari a 13 cm e le accelerazioni rilevate risultano comprese tra 2.12 g e -1.35 g. La deformazione massima rilevata in occasione della seconda ondata è risultata essere di 0.37 metri. Il dominio delle accelerazioni misurate è compreso tra 3.83 g e -3.38 g. La deformazione massima della rete si è misurata in concomitanza con la terza ondata ed è risultata pari a 1.50 metri. L'impatto in questo caso ha generato un'accelerazione massima e minima rispettivamente pari a 9.98 g e -7.57 g.

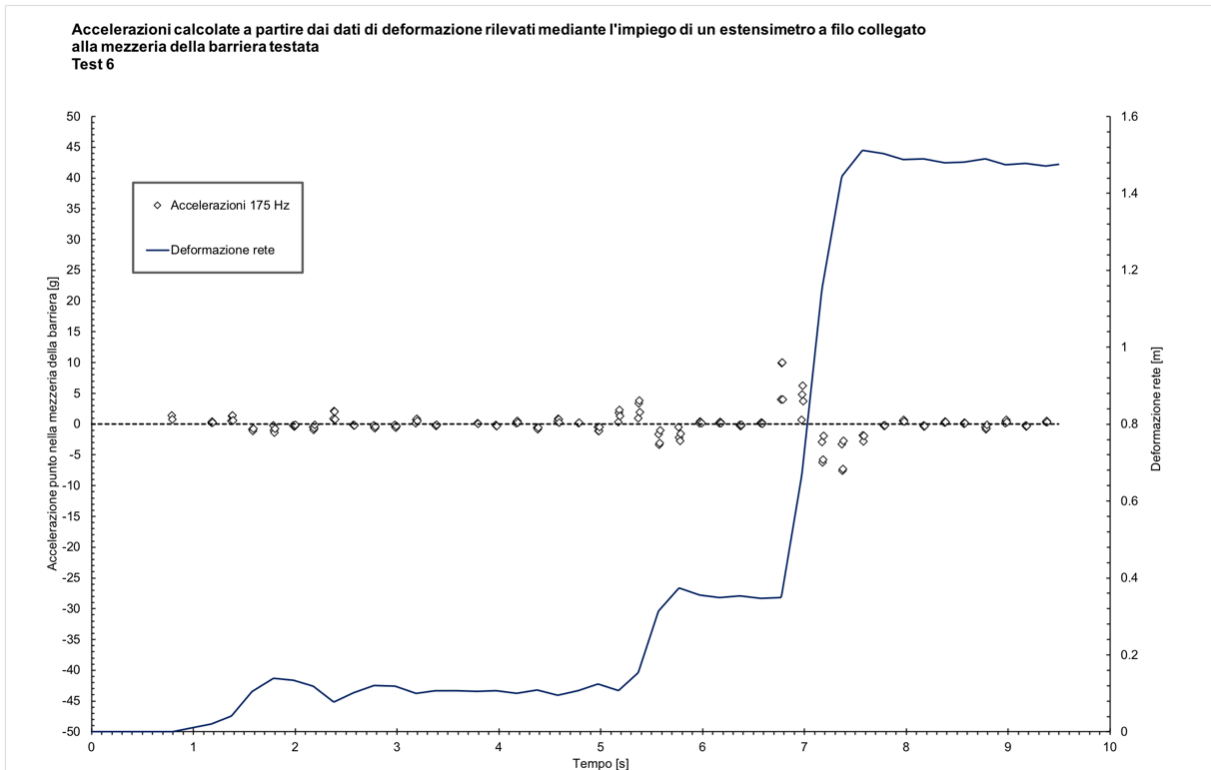


Figura 1.26 Test 6: Accelerazione e allungamento nel tempo del punto della rete in cui è vincolato l'estensimetro.

1.4.4.1.7 Conclusioni

In tutte e sei le prove le interazioni della colata detritica con le strutture flessibili hanno generato accelerazioni della rete in direzione del flusso. Le entità sono state ricavate dai dati di spostamento nel tempo del punto di ancoraggio di un estensimetro posto a valle delle strutture flessibili e letto con una frequenza di 10 Hz. In quattro test è stata valutata l'efficacia delle strutture flessibili nell'arrestare un primo impatto. Durante tali prove, in due casi, il flusso detritico ha raggiunto la struttura testata seguendo due ondate mentre, negli altri due casi, sono riconoscibili tre ondate. Le prime ondate hanno determinato deformazioni delle strutture nettamente inferiori rispetto alle successive e le accelerazioni calcolate sono tutte ricadute all'interno dell'intervallo compreso tra 3.84 g e -5.37 g. Le successive ondate hanno determinato sulla porzione di barriera analizzata deformazioni e accelerazioni di entità superiore. Nel primo test è stata misurata un'accelerazione positiva in corrispondenza dell'impatto pari a 12.09 g e un'accelerazione negativa legata alla fase di arresto della barriera pari a -9.4 g. Nelle altre 3 prove le accelerazioni ricadono nel dominio compreso tra 9.98 g e -7.57 g. In due prove (Test 3 e Test 5) le barriere, già riempite di detriti derivanti da un precedente impatto, sono state ulteriormente sollecitate da un secondo debris flow. In questo caso è identificabile un unico spostamento della rete poiché probabilmente la forza di impatto della prima ondata non è risultata sufficiente per mobilitare il sistema barriera-detriti. Durante il test 3 si sono registrate accelerazioni positive che ricadono nell'intervallo 3.38 g e -5.24 g, mentre nella prova 5 i valori di accelerazione calcolati sono risultati superiori con un valore registrato massimo positivo e negativo pari rispettivamente a 9.61 g e -11.8 g. In Tabella 1.11 è rappresentato l'istante di tempo t_{imp} in cui si è registrato il primo spostamento della rete nelle sei prove e la corrispondente accelerazione misurata.

Tabella 1.10 Accelerazioni massime e minime misurate in corrispondenza delle diverse ondate.

		Ondata 1	Ondata 2	Ondata 3
Test 1	<i>Acc. Max [g]</i>	3.84	12.09	-
	<i>Acc. Min [g]</i>	-5.22	-9.4	-
Test 2	<i>Acc. Max [g]</i>	3.21	7.06	6.66
	<i>Acc. Min [g]</i>	-5.37	-5.13	7.94
Test 3	<i>Acc. Max [g]</i>	3.38	-	-
	<i>Acc. Min [g]</i>	-5.24	-	-
Test 4	<i>Acc. Max [g]</i>	2.9	9.85	-
	<i>Acc. Min [g]</i>	-2.14	-4.05	-
Test 5	<i>Acc. Max [g]</i>	9.61	-	-
	<i>Acc. Min [g]</i>	-11.8	-	-
Test 6	<i>Acc. Max [g]</i>	2.12	3.83	9.98
	<i>Acc. Min [g]</i>	-1.35	-3.38	-7.57

Tabella 1.11 Accelerazioni misurate in corrispondenza della prima deformazione della rete rilevata.

Test	t_{imp} [ms]	Accelerazione misurata in corrispondenza dell'istante t_{imp} [g]
1	2211	0.11
2	1897	0.10
3	4628	3.38
4	4102	0.71
5	3868	1.90
6	788	1.40

CAPITOLO 2: MONITORAGGIO E STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI DEDICATI AI MOVIMENTI RAPIDI

2.1 Monitoraggio

Il termine monitoraggio deriva da *Monitor -oris* parola latina che ha molteplici significati quali ammonire, avvisare, informare e consigliare. Nell'ingegneria geotecnica il monitoraggio può essere definito come un processo di misura ripetuto nel tempo attraverso l'utilizzo di strumenti idonei. L'introduzione delle prime apparecchiature di monitoraggio è avvenuta a partire dal 1930. All'inizio i sistemi erano semplici e basati su principi di funzionamento di tipo meccanico e idraulico. Con il progredire della tecnologia vi è stato un perfezionamento continuo dei dispositivi che li ha resi più sicuri ma altrettanto complessi. Negli ultimi 30 anni, infatti, vi è stata una vera e propria svolta verso gli strumenti di tipo elettrico che, inizialmente, si sono dimostrati meno affidabili rispetto agli strumenti ottici ma col passare del tempo sono divenuti lo standard nei sistemi di monitoraggio. In parallelo il progresso tecnologico nel campo elettronico e informatico e l'installazione di nuove reti di telecomunicazione ha permesso lo sviluppo di sistemi totalmente automatizzati in grado di raccogliere dati in continuo dal territorio senza l'ausilio di un operatore. I sistemi automatici, grazie ai loro vantaggi in termini di automazione nella raccolta e nell'elaborazione dei dati, vengono impiegati comunemente nella mitigazione del rischio. Le strutture critiche esposte al rischio di frane infatti, come edifici, dighe, cave, autostrade, ecc., necessitano di sistemi di allarme rapidi e di un monitoraggio in tempo reale in grado di restituire un messaggio immediato al raggiungimento di determinate soglie. Ciò consente la pronta attivazione di tutte le procedure di emergenza richieste (Segalini et al., 2017).

2.1.1 Caratteristiche degli strumenti di monitoraggio

Tutti gli strumenti di monitoraggio sono costruiti allo scopo di effettuare delle misure; ogni misura comporta errori ed incertezze. È importante definire quali siano le caratteristiche relative alle incertezze ed agli errori nelle misure al fine di arrivare alla scelta dello strumento più adatto all'impiego specifico. In primo luogo, gli strumenti debbono essere conformi all'ambiente oggetto di misurazione; ciò significa che gli strumenti dovrebbero teoricamente leggere il parametro di interesse evitando di perturbarlo. Un'altra caratteristica dello strumento è l'accuratezza, cioè la vicinanza della misura dello strumento alla grandezza reale da misurare. Questa viene generalmente valutata durante la calibrazione, quando si confronta il valore misurato dallo strumento con il valore "reale", cioè il valore del parametro misurato mediante uno strumento di verificata accuratezza. Essa è generalmente indicata come percentuale del fondo scala (%FS). Altro parametro caratteristico dello strumento è la precisione, cioè la vicinanza di ogni misura alla media aritmetica delle stesse. Risoluzione è il termine con il quale si indica la minima divisione della scala dello strumento. Negli strumenti digitali la risoluzione massima è la variazione di un valore dell'ultimo numero del display. La sensibilità di un sensore è il rapporto fra la variazione della grandezza d'uscita e quella dell'ingresso che l'ha determinata. Lo strumento risulta avere una sensibilità elevata quando, a parità

di variazione della grandezza di ingresso, la variazione grandezza di uscita è molto elevata. La linearità indica quanto i valori forniti dallo strumento siano direttamente proporzionali alla quantità misurata mentre l'isteresi è legata alla misura di una grandezza che varia ciclicamente; in taluni casi la misura della medesima dipende dal fatto che la grandezza stia crescendo o diminuendo. La distanza tra la curva di letture in aumento ed in diminuzione rappresenta l'isteresi. Infine, il rumore è un termine usato per indicare le variazioni casuali delle misure determinate causate da fattori esterni: questo crea mancanza di precisione ed accuratezza. Se il rumore fosse eccessivo potrebbe mascherare le variazioni più piccole della grandezza misurata.

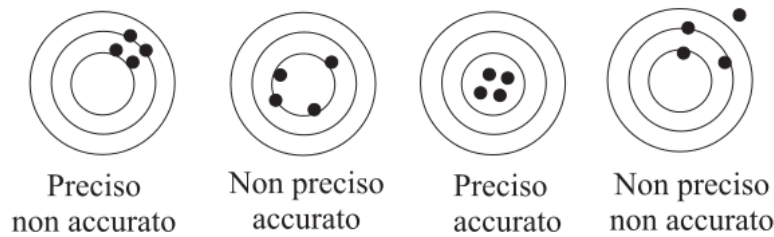


Figura 2.1 Precisione e accuratezza di uno strumento.

Per quanto riguarda gli errori essi sono definiti come la differenza tra il valore misurato e quello reale; matematicamente è uguale all'accuratezza. Gli errori possono derivare da molteplici cause e possono essere: grossolani, sistematici, di precisione, accidentali e di campionamento.

2.2 Stato dell'arte dei sistemi dedicati al monitoraggio dei fenomeni rapidi

Lo sviluppo dei due sistemi Rockfall Safety Network e Gflow Safety Network, presentati in questo elaborato, è iniziato con una valutazione dello stato dell'arte dei sistemi dedicati al monitoraggio dei fenomeni di caduta massi e delle colate detritiche.

2.2.1 I Sistemi di monitoraggio nella mitigazione del rischio da caduta massi

I sistemi di monitoraggio automatici impiegati nel processo di mitigazione del rischio da caduta massi possono essere suddivisi a seconda della finalità che può essere: il controllo diretto dell'ammasso roccioso oppure il controllo delle opere di protezione.

2.2.1.1 Sistemi di monitoraggio a controllo dell'ammasso roccioso

L'attività di controllo degli ammassi rocciosi può avvenire sia mediante l'impiego di strumenti a contatto, cioè installati in aderenza al versante instabile sia mediante l'impiego di tecnologie di misura da remoto. Nei prossimi paragrafi verranno illustrati i principali strumenti utilizzati per tale scopo:

2.2.1.1.1 *Clinometri*

I clinometri sono dispositivi che possono essere utilizzati nel monitoraggio di ammassi rocciosi per la misura automatica di rotazioni localizzate legate alla mobilitazione di blocchi instabili. Tali strumenti possono essere mono-assiali e bi-assiali e vengono resi solidali alla roccia mediante appositi supporti regolabili. Sono solitamente equipaggiati con ampole elettrolitiche o sensori MEMS. I principali vantaggi riguardano la buona precisione di misura e l'economicità dei dispositivi.

2.2.1.1.2 *Fessurimetri*

I fessurimetri sono strumenti impiegati per monitorare l'apertura delle discontinuità negli ammassi rocciosi. Possono essere di tipo ottico, meccanico ed elettrico (Scaioni et al., 2007). Nelle prime due tipologie, la lettura viene effettuata manualmente mentre nei fessurimetri elettrici è resa automatica da trasduttori potenziometrici o a corda vibrante. Il fessurimetro ottico è composto da due elementi plastici vincolati all'estremità della frattura e paralleli tra loro e permette la misura degli spostamenti in due direzioni tra loro perpendicolari mediante un reticolo centrale millimetrato. Il fessurimetro meccanico può essere monoassiale o triassiale; nel primo caso è composto da un'asta di misura d'acciaio che viene installata in direzione ortogonale alla frattura, vincolata ad un'estremità e libera di scorrere rispetto a un riscontro fissato nell'altra estremità. Per mezzo di un comparatore si è in grado di misurare la dilatazione della fessura. I fessurimetri meccanici triassiali sono composti da due corpi distinti: un prisma di sezione quadrata e un telaio esterno dotato di tre comparatori con il quale è possibile rilevare le deformazioni lungo tre assi ortogonali tra loro. Il fessurimetro elettrico è costituito da un trasduttore di spostamento lineare provvisto di due ancoraggi fissati ai lati della fessura. Come per i fessurimetri meccanici può essere triassiale. Durante la fase di monitoraggio di discontinuità è importante individuare il rumore strumentale e le variazioni di ampiezza stagionali per evitare di incorrere in falsi allarmi.

2.2.1.1.3 Estensimetri multibase

L'estensimetro è uno strumento di misura impiegato per la determinazione delle deformazioni di un ammasso roccioso lungo una determinata direzione. L'utilizzo di tali strumenti diviene utile nel momento in cui si vogliono misurare le deformazioni di porzioni di ammasso o di singoli blocchi rispetto ad una zona considerata fissa alla quale viene ancorato lo strumento mediante barre ad aderenza migliorata e cementazione. Le basi possono essere molteplici e sono solitamente realizzate in fibra di vetro, acciaio o invar e inserite all'interno di guaine che ne consentono lo scorrimento rispetto alla porzione di versante in movimento. L'estremità libera della base è collegata a un comparatore elettrico che misura lo spostamento delle aste rispetto a un oggetto solidarizzato alla superficie dell'ammasso denominato testa dell'estensimetro.



Figura 2.2 a) Testa di un estensimetro multibase in cui sono collegate tre basi. Nella fase operativa la barra filettata passante per il foro viene collegata al comparatore elettrico b) Estensimetro elettrico a controllo dell'apertura di una discontinuità.

2.2.1.1.4 Celle di carico toroidali

Nel caso in cui l'ammasso roccioso sia consolidato mediante bulloni o tiranti è possibile monitorare la forza che agisce sui rinforzi mediante l'impiego di celle toroidali. Tali strumenti possono essere automatizzati mediante l'impiego di strain gauges, o sensori a corda vibrante. Sono solitamente di forma circolare con un foro centrale per permettere il passaggio del tirante. In Figura 2.3 è rappresentato lo schema di installazione. Il dispositivo viene interposto tra due piastre che permettono la distribuzione del carico.

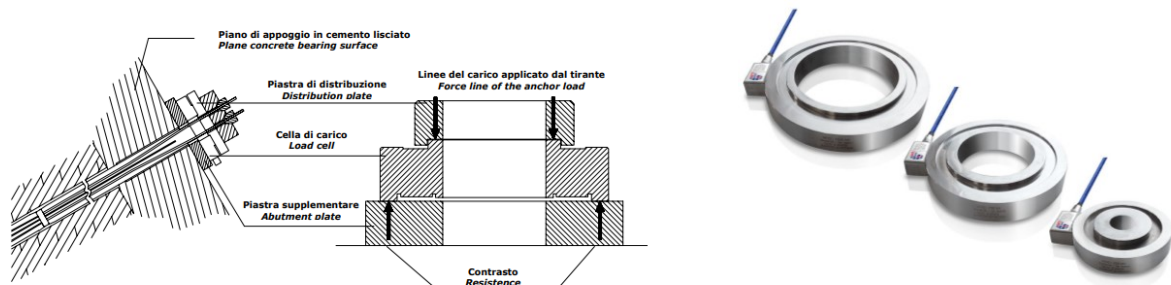


Figura 2.3 Installazione di una cella di carico toroidale ((Sara Grebl, 2007) – www.earthsystem.it).

2.2.1.1.5 Catene inclinometriche

Gli inclinometri sono strumenti utilizzati nel monitoraggio di pendii in terra e in roccia al fine di individuare i movimenti del sottosuolo in funzione della profondità e conseguentemente la posizione di un presunto piano di scivolamento. Tali strumenti restituiscono la distribuzione degli spostamenti normali rispetto alla verticale di un tubo solidale con il terreno attraverso la misura di rotazioni. Il sistema è costituito da un tubo inclinometrico deformabile dotato di due coppie di guide che viene reso solidale a un foro di sondaggio e da una sonda inclinometrica costituita da un corpo cilindrico dotata di due carrelli per poter scorrere lungo le scanalature del tubo mantenendo costante l'azimut durante la misura. La sonda viene letta a diverse profondità e lungo due piani ortogonali tra loro in maniera da poter ricostruire il vettore risultante degli spostamenti. Per migliorare la qualità del risultato si effettuano per ogni coppia di guide due misure coniugate. Lo spostamento lungo le due direzioni viene calcolato con formule trigonometriche attraverso la conoscenza dei dati di inclinazione e del passo delle misure. Negli ultimi decenni sono state sviluppate catene inclinometriche automatiche che, rispetto alle strumentazioni tradizionali, consentono di campionare dati in near real-time e ottenere informazioni sugli spostamenti di tipo tridimensionale (MUMS, SAA, DMS ecc.). Inoltre, nelle medesime strumentazioni, possono essere integrate più tipologie di sensori (MEMS, Ampolle elettrolitiche, Piezometri) (Segalini et al., 2014). Tale peculiarità consente di ottenere informazioni ridondanti e di tipologia differente e metterle a confronto per poter individuare eventi in corso o relazioni tra variazione di parametri e fenomeni di instabilità (Grignaffini et al., 2018). Gli inclinometri di tipo automatico possono essere installati all'interno di perforazioni o ancorati direttamente alla superficie della roccia lungo uno stendimento.

2.2.1.1.6 Stazioni totali

Il rilievo topografico meccanizzato viene impiegato per monitorare spostamenti nel tempo di punti di interesse. Il sistema si basa su una stazione totale dotata di collimazione automatica robotizzata su prismi riflettenti installati nei punti monitorati. Attraverso la restituzione in continuo di angoli zenitali, azimutali e distanze derivanti dalla collimazione dei prismi si è in grado di restituire la posizione degli stessi nel tempo.

2.2.1.1.7 Interferometria terrestre GBinSAR (Ground Based Synthetic Aperture Radar)

L'interferometria terrestre è una tecnica basata sul telerilevamento di deformazioni superficiali riguardanti porzioni estese di territorio come ammassi rocciosi, scarpate instabili oppure strutture. La tecnica si basa sulla correlazione di differenti immagini radar generate e acquisite attraverso un apparecchio, dotato di antenne di trasmissione e ricezione, in movimento lungo un binario installato ortogonalmente rispetto alla direzione in cui si vogliono monitorare gli spostamenti. Il risultato del telerilevamento è un'immagine costituita da una quantità di pixel che è in stretta relazione con la distanza radar-scenario. Confrontando le differenze di fase di ogni singolo pixel tra due immagini acquisite in tempi diversi si è in grado di elaborare una mappatura degli spostamenti lungo la linea di vista dello strumento.



Figura 2.4 a) Radar GBInSAR disposto su un binario (<https://www.stanlay.in>) b) Stazione totale robotizzata (<https://www.topconpositioning.com>).

2.2.1.1.8 Laser scanner

I laser scanner sono strumenti in grado di ricreare modelli tridimensionali di oggetti rilevati attraverso la generazione di una nuvola di punti ciascuno contenente informazioni riguardo la distanza, l'angolo orizzontale e verticale rispetto allo strumento (Scaioni et al., 2007). Confrontando modelli ricreati in tempi diversi si può comprendere il fenomeno deformativo in gioco .

2.2.1.1.9 Fotogrammetria

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che opera senza diretto contatto con l'oggetto basata sull'utilizzo di prese fotografiche realizzate tramite speciali camere calibrate. La posizione spaziale dei punti rappresentativi dell'oggetto rilevato viene ricavata utilizzando due prospettive centrali di un medesimo oggetto da due distinti centri di proiezione.

2.2.1.2 Sistemi di monitoraggio a controllo delle opere passive

Negli ultimi anni enti territoriali e società di gestione di grandi infrastrutture stradali hanno mostrato interesse nell'individuare una soluzione che potesse fornire dati utili per la pianificazione delle attività di manutenzione delle barriere paramassi e, in parallelo, fornisse informazioni istantanee sui possibili impatti sulle strutture. Tale esigenza ha portato diverse società ad impegnarsi nello sviluppo di sistemi di monitoraggio appositi. A differenza delle tecnologie a controllo dei fenomeni di debris flow che sono ampiamente descritte in letteratura, le informazioni riguardanti i sistemi di monitoraggio delle barriere paramassi sono nella maggior parte dei casi reperibili solamente dai documenti commerciali distribuiti e redatti dalle stesse società di sviluppo. In Tabella 2.1 sono sintetizzate le principali caratteristiche delle tecnologie identificate.

Tabella 2.1 Caratteristiche principali dei sistemi di monitoraggio a controllo delle opere passive.

Nome sistema	Società produttrice	Sensori impiegati	Presenza datalogger di acquisizione dati	Trasmissione dei dati	Elaborazione dati	Rappresentazione dati
Motion Sensors	Geoprevent	Dispositivi finecorsa	Si	La trasmissione tra i moduli e il datalogger avviene via radio. Tra il datalogger e il server mediante rete telefonica e/o radio.	L'elaborazione dati avviene nella centralina in sito.	Si, su piattaforma web
Sistema Spyder	Nesa S.r.l.	Non dichiarati	No	La trasmissione dei dati avviene mediante il protocollo IoT Narrowband	Non dichiarata	Non dichiarata
Sistema Cricky	IoTrust S.r.l. in collaborazione con Geobruigg S.r.l..	Sensori accelerometrici	Si	La trasmissione tra i grilli strumentati e il datalogger avviene tramite rete radio o cavo. Tra il datalogger e il server mediante rete GSM.	L'elaborazione dati avviene nella centralina in sito.	Si, su piattaforma web.
Rockfall Safety Network	Università di Parma	MEMS triassiale Ampolla elettrolitica biassiale Celle di carico estensimetriche Dispositivo trigger calibrato	Si	La trasmissione tra i moduli e il datalogger avviene via radio tramite rete Smart Mesh. Tra il datalogger e il server mediante rete telefonica e/o radio.	L'elaborazione avviene nel centro di calcolo.	Si, su piattaforma web interattiva.

2.2.1.2.1 Sistema Motion Sensors – Geoprevent

Il sistema Motion Sensors viene realizzato dalla ditta GEOPREVENT. Consiste in una serie di dispositivi radio, installati sulla sommità dei montanti della barriera, in cui sono posti due dispositivi a strappo ai quali sono collegati due cavi in acciaio. L'estremità opposta dei cavi viene allacciata alle funi portanti superiori. Se la barriera viene colpita da un masso le funi superiori tendono a scorrere e, di conseguenza, i cavi collegati ai dispositivi vengono posti in trazione e sfilati dalla propria sede. Tale azione genera l'invio da parte dei moduli radio di un segnale di allarme ad una centralina dove avviene l'elaborazione dei dati che, a sua volta, trasmette la comunicazione di

allerta agli enti preposti al monitoraggio mediante sms, e-mail e al server mediante FTP. I dati di attivazione vengono rappresentati su piattaforma web dedicata.



Figura 2.5 Dispositivo di misura realizzato dalla società Geoprevent installato su di una barriera paramassi.

2.2.1.2.2 Sistema Spyder – NESAs.r.l.

Il dispositivo, brevettato dalla società NESAs.r.l., è dotato di otto sensori di spostamento su molle calibrate e viene integrato alla rete di intercettazione mediante appositi ganci di fissaggio. Nel caso venga rilevato un impatto il sistema invia un allarme. Lo scatolare esterno è caratterizzato da un diametro di 30 cm ed è realizzato in alluminio rinforzato o ergal. I segnali trasmessi dal dispositivo contengono informazioni riguardanti lo stato di allarme, lo stato del dispositivo e il livello della batteria. Ogni dispositivo, inoltre, è dotato di un sensore GPS che permette di conoscerne la posizione di installazione. Il sistema di trasmissione utilizzato è l'IoT Narrowband che permette l'invio dei dati senza l'utilizzo di SIM card. In caso di mancata copertura IoT viene utilizzato un ripetitore satellitare.

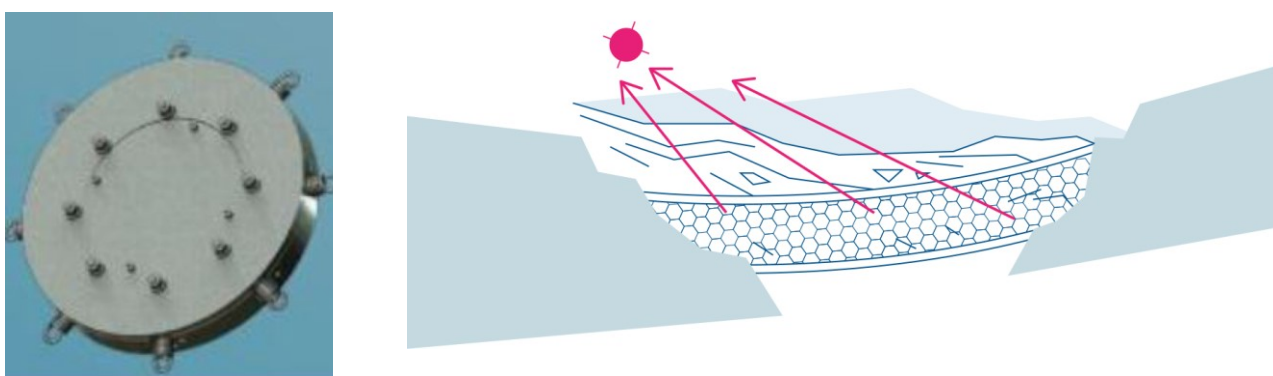


Figura 2.6 Sistema Spider System prodotto dalla società NESAs.r.l.

2.2.1.2.3 Sistema CRICKY – Iotrust S.r.l.

Il sistema Cricky è stato realizzato dalla società IoTrust in collaborazione con Geobrugg. Il sistema si compone di grigli strumentati con sensori (installati in punti critici della barriera) che comunicano via radio o via cavo con una centralina che viene alimentata da un pannello fotovoltaico. Il datalogger aggiorna quotidianamente un server in cloud contenente i dati inerenti allo stato dei

sensori. Nel caso in cui la connettività sia mancante, la centralina memorizza i dati e li trasmette al momento della riattivazione della comunicazione. Se almeno un sensore rileva un “G-shock” la centralina lo intercetta ed esegue immediatamente una chiamata di allarme. Se programmata, può inviare direttamente anche un SMS o una e-mail. Con i dati raccolti viene effettuata un’analisi volta ad individuare eventuali criticità. La rappresentazione dei risultati su piattaforma web avviene mediante simboli e colori. Le informazioni fornite riguardano: lo stato della barriera, il livello di carica della batteria e le eventuali anomalie riscontrate. Lo stato di salute della barriera viene rappresentato mediante un simbolo semaforico che in base al livello di gravità dell’evento può assumere una colorazione definita (verde, giallo, rosso). I grilli “intelligenti” sono strumentati con sensori di tipo accelerometrico. L’alimentazione dei grilli può avvenire sia mediante l’allaccio alla rete elettrica oppure mediante batterie.



Figura 2.7 Sistema di monitoraggio Cricky realizzato da IoTrust S.r.l.

2.2.2 I Sistemi di monitoraggio nella mitigazione del rischio da colate detritiche

Nel campo delle colate detritiche i sistemi di monitoraggio vengono per la maggior parte dei casi impiegati per prevedere o individuare un evento in corso. Per tale motivo il termine sistema di monitoraggio viene comunemente sostituito con il termine sistema di allertamento (Stähli et al., 2015). Già a partire dagli anni 60, diversi autori si sono occupati di suddividerli in categorie. Hungr. li suddivise in tre classi (Hungr et al., 1987):

- AWS - Advance Warning Systems;
- EWS - Event Warning Systems;
- PEWS - Post Event Warning Systems.

I sistemi AWS si basano sullo studio dei fattori scatenanti delle colate detritiche, in particolare delle precipitazioni e consentono di prevedere la possibile formazione di un fenomeno. Le problematiche connesse all’utilizzo di tali sistemi riguardano principalmente la definizione di soglie critiche e i possibili falsi allarmi scaturiti.

Gli EWS sono sistemi di monitoraggio che vengono solitamente installati negli alvei riconosciuti come possibile sede del passaggio di un flusso o direttamente sulle opere di mitigazione e hanno la funzione di rilevare il passaggio di un debris flow. Tali tecnologie vengono comunemente poste in una sezione dell’alveo a monte delle zone sensibili da preservare.

I PEWS permettono di ottenere informazioni sullo stato delle opere/strutture/infrastrutture che sono entrate in contatto con un flusso di detriti. I dati forniti da questi tipi di sistemi sono utili nelle

fasi decisionali post evento (chiusura strade o ferrovie, organizzazione attività di manutenzione sulle opere, ecc.).

I sistemi di allertamento, indipendentemente dalla tipologia, devono avere determinate caratteristiche:

- 1) Devono essere facilmente installabili. La corretta installazione è un punto essenziale per la buona riuscita del monitoraggio.
- 2) Le soglie di attivazione delle procedure di allertamento devono essere facilmente comprensibili per i responsabili, che spesso non sono tecnici.
- 3) I sistemi devono essere ridondanti. Confrontando i dati registrati da più strumenti si riduce la possibilità di falsi allarmi. La maggior parte dei sensori utilizzati nei monitoraggi in near real-time sono soggetti a possibili spikes. Le cause di tali fenomeni possono essere legate ad eventi effettivamente letti dai sensori ma non riconducibili ad un passaggio di una colata. Ad esempio, il movimento di un animale al di sotto della zona di misura di un idrometro oppure il passaggio di un mezzo pesante nelle vicinanze di un geofono potrebbero essere confusi con un evento in corso. Gli spikes, inoltre, possono essere riconducibili anche ad eventuali malfunzionamenti dei sensori o dell'unità di acquisizione/alimentazione nel tempo. La ridondanza va ricercata anche nelle modalità di trasmissione dei dati.
- 4) Il sistema di alimentazione deve essere dimensionato in maniera tale da consentire il funzionamento continuo e corretto dell'impianto. Una buona percentuale dei sistemi di monitoraggio viene installata in siti remoti dove non è possibile l'allaccio alla linea elettrica. In questi casi viene predisposto un sistema fotovoltaico composto da un pannello, un regolatore di carica e una batteria tampone. Nel dimensionare tali dispositivi è necessario valutare diversi aspetti quali: consumi degli apparati che compongono il sistema, irraggiamento solare nella zona sede dell'installazione, numero di giorni in cui è prevista la neve.
- 5) I sensori impiegati devono avere determinate caratteristiche in termini di accuratezza, sensibilità, fondo scala ecc. a seconda del parametro da monitorare.
- 6) Gli strumenti devono essere caratterizzati da una certa robustezza poiché una volta installati in sito vengono sottoposti per lungo tempo agli eventi atmosferici e in alcuni casi anche a perturbazioni meccaniche dovute al passaggio di detriti.

2.2.2.1 AWS - Advance Warning system

Gli AWS sono solitamente basati su correlazioni empiriche tra le precipitazioni e l'attivazione di flussi (Arattano e Marchi, 2008). Gli strumenti solitamente impiegati in questi sistemi sono i pluviometri e i radar meteo.

2.2.2.1.1 *Pluviometri*

Il pluviometro è uno strumento di tipo meccanico pensato per misurare l'altezza di precipitazione in mm. Un millimetro di pioggia raccolto dallo strumento equivale ad un 1 litro caduto su una superficie di 1 metro quadrato. Lo strumento è costituito da un contenitore cilindrico metallico avente una cavità nella parte sommitale. Il foro ha dimensioni standard ed è caratterizzato da un'area di 1000 cm². All'interno del contenitore è presente un imbuto che ha il compito di convogliare l'acqua raccolta. I più comuni dispositivi utilizzati nei sistemi di monitoraggio automatici sono i pluviometri a bascula. In questo caso, in prossimità della bocca di uscita dell'imbuto, è presente un sistema basculante costituito da due vaschette tarate. Come si può notare dalla Figura 2.8 l'acqua passando dall'imbuto entra all'interno della prima vaschetta.

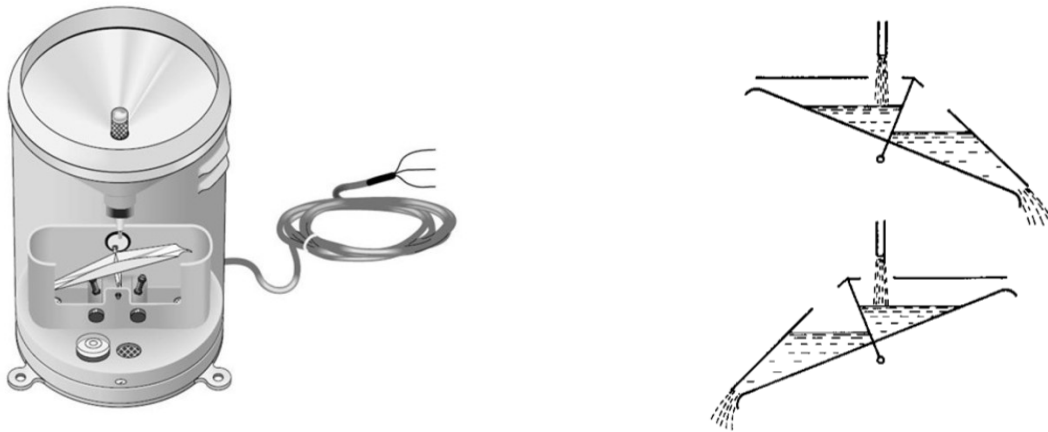


Figura 2.8 Pluviometro a bascula.

Il sistema ha due posizioni di equilibrio stabile e passa da una all'altra ogni volta che una delle due vaschette si riempie. Infatti, nel momento in cui si raggiunge un determinato livello di riempimento nella prima vaschetta cambiano le condizioni di equilibrio e il dispositivo ruota. Durante la rotazione viene svuotata la vaschetta riempita precedentemente. Nel passaggio tra le due posizioni di equilibrio un sistema magnetoelettrico emette un impulso di tensione che viene registrato dal datalogger. I pluviometri a bascula, per questo motivo, vengono comunemente denominati anche pluviometri conta impulsi. Il sistema basculante è tarato e ad ogni impulso corrisponde un determinata altezza di pioggia. Conoscendo il numero di impulsi registrati in un determinato intervallo di tempo si può calcolare l'altezza totale di precipitazione. Il pluviometro deve essere posizionato in un luogo aperto, lontano da strutture o vegetazione che possono deviare le precipitazioni destinate ad essere raccolte dallo strumento. Inoltre, la quota di posizionamento deve essere tale per cui gli eventuali schizzi di acqua non raggiungano il foro di captazione (>1.5 m).



Figura 2.9 Pluviometro automatico.

Se lo strumento viene impiegato per raccogliere dati riguardanti le precipitazioni solide (neve, grandine) è necessario prevedere un sistema di riscaldamento che ne permetta la fusione. Quanti più dispositivi sono presenti nell'area in esame quanto più dettagliate sono le informazioni riguardanti la distribuzione delle precipitazioni. Nel caso in sito vi sia presenza di forte vento è possibile che le letture del pluviometro siano affette da errori. Per tale motivo si consiglia di installare nei pressi del dispositivo un anemometro (Hürlimann et al., 2003).

2.2.2.1.2 Radar meteo

I radar meteorologici, chiamati anche Doppler Weather Radar, sono strumenti impiegati per la rilevazione di idrometeorie (pioggia, neve, grandine) in un volume di atmosfera. Mediante un'antenna viene inviata un'onda elettromagnetica in direzione della porzione di spazio da analizzare. L'impulso inviato viene riflesso dalle nubi in direzione della sorgente dove viene registrata l'onda di ritorno.



Figura 2.10 a) Radar meteorologico installato a Gattatico (RE) b) Sistema radar posizionato sul Monte Settepani (SV)

Analizzando l'onda elettromagnetica riflessa, in particolare la sua potenza e la sua variazione di fase, è possibile mediante l'utilizzo di appositi algoritmi calcolare: il moto delle precipitazioni, la tipologia (Pioggia, neve, grandine), l'intensità delle precipitazioni, la posizione e l'intensità futura. La rappresentazione dei dati di intensità di pioggia avviene su livelli sovrapposti a cartografie mediante l'impiego di scale cromatiche. Ad ogni colore corrisponde un valore di intensità di pioggia. Come si può notare nella Figura 2.11 sono rappresentati i valori di intensità di pioggia misurati da diversi radar meteorologici disposti nel territorio italiano il 1/05/2020 alle ore 19.20. L'immagine è stata presa dal portale della protezione civile italiana. L'accuratezza nella misura del radar dipende dalla distanza dalla sorgente. Il livello di dettaglio infatti decresce man mano che ci si allontana dal punto di invio degli impulsi.



Figura 2.11 Rappresentazione dei dati registrati il giorno 1/05/2020 alle ore 19.20 da diversi radar meteorologici, rappresentati con punti verdi nella mappa (<http://www.protezionecivile.gov.it/>).

2.2.2.1.3 Soglie

Una soglia può essere definita come il livello minimo o massimo di un determinato parametro che porta all'attivazione di un fenomeno. La difficoltà primaria da affrontare durante l'impiego degli AWS è la definizione di limiti di allerta. L'attivazione di flussi di detriti non dipende solamente dalle precipitazioni avvenute in un intervallo di tempo. Infatti, è necessario tenere in considerazione altri fattori tra i quali il rapido scioglimento delle nevi depositate nel bacino e le precipitazioni avvenute nel periodo precedente che sono legate al livello di saturazione dei terreni (Hungar et al., 1987). Per tale motivo gli AWS sono caratterizzati da un'alta probabilità di falsi allarmi e sono utilizzati comunemente dagli enti di protezione civile come strumento di preallarme. Gli AWS basati su pluviometri correlano i dati di precipitazione con l'attivazione di un flusso di detriti. I parametri sui quali vengono definite comunemente le soglie sono:

- L'intensità di pioggia;
- L'intensità massima di pioggia riferita ad 1 determinato periodo;
- Il rapporto tra le precipitazioni cumulate e le precipitazioni medie annue.

Le soglie di pioggia possono essere basate su modelli fisici o empirici (Guzzetti et al., 2007). I modelli fisicamente basati si fondano sulla teoria del pendio indefinito (Infinite Slope Model), sulla modellazione numerica e su modelli di filtrazione del terreno. Attraverso tali approcci è possibile ottenere dati sulla quantità di precipitazione necessaria affinché si attivi un'instabilità. Per poter ottenere risultati soddisfacenti è necessario avere a disposizione informazioni dettagliate

riguardanti l'idrologia, la litologia e le caratteristiche meccaniche dei materiali e la morfologia del territorio che difficilmente sono reperibili per aree estese (Guzzetti et al., 2007). Le soglie di pioggia basate su modelli empirici sono calibrate sui dati storici registrati in occasioni di eventi passati di colate. La rappresentazione delle soglie avviene solitamente su grafici che riportano sull'asse delle ordinate il parametro in esame (intensità di pioggia ecc.) sull'asse delle ascisse il tempo e sul grafico la linea che rappresenta le condizioni di pioggia che hanno portato all'attivazione di un fenomeno di debris flow.

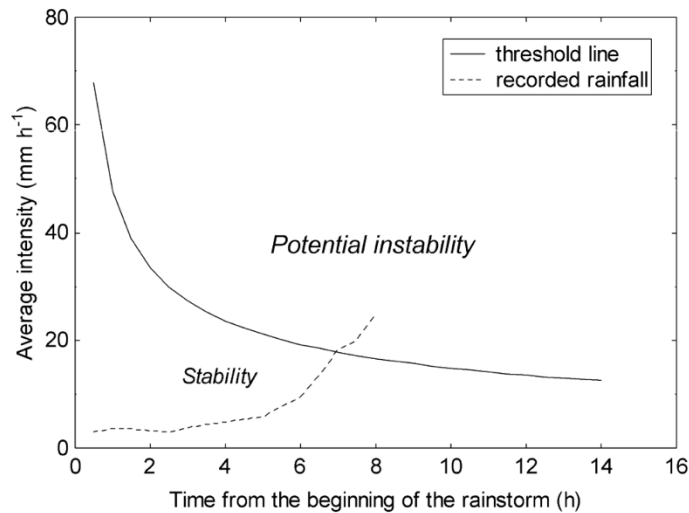


Figura 2.12 Esempio di soglia basata sulla misura dell'intensità di pioggia (Arattano e Marchi, 2008).

Le soglie possono essere globali, regionali o locali a seconda della zona presa in considerazione. Naturalmente una soglia di tipo globale, non tenendo in considerazioni caratteristiche specifiche di porzioni di territorio, sarà maggiormente affetta da falsi allarmi rispetto ad una soglia locale. Attraverso l'impiego di Weather Radar, inoltre, è possibile prevedere in anticipo l'arrivo di una determinata precipitazione in una zona critica, consentendo di organizzare preventivamente le eventuali operazioni di mitigazione del rischio.

2.2.2.2 EWS - Event Warning Systems

Gli EWS, come si è detto precedentemente, sono sistemi sviluppati per individuare nel più breve tempo possibile il passaggio di una colata detritica. Sono solitamente composti da una o più centraline a controllo di molteplici dispositivi di misura disposti lungo il canale o sulle strutture di mitigazione. Nei successivi paragrafi verranno descritti brevemente gli strumenti che compongono gli EWS. I dispositivi verranno classificati in base alla grandezza misurata. Nella tabella sottostante sono riassunti i principali parametri monitorati nelle colate detritiche e i rispettivi strumenti/sensori utilizzati (Arattano e Marchi, 2008)(Hürlimann et al., 2019).

Tabella 2.2 Parametri monitorati nelle colate detritiche e sensori impiegati

Parametro monitorato:	Strumenti utilizzati:
Livello idrometrico di picco	<ul style="list-style-type: none"> • Cavi a strappo • Fotocellule • Pendoli
Livello idrometrico nel tempo	<ul style="list-style-type: none"> • Idrometri a ultrasuoni • Dispositivi radar • Dispositivi laser
Vibrazioni del suolo e infrasuoni	<ul style="list-style-type: none"> • Geofoni • Accelerometri • Microfoni
Velocità media del flusso	<ul style="list-style-type: none"> • Sensori trigger • Sensori a ultrasuoni • Geofoni
Velocità del flusso superficiale	<ul style="list-style-type: none"> • LSPIV • Sensori Radar • Videocamere
Forza normale e di taglio alla base dell'alveo	<ul style="list-style-type: none"> • Celle di carico
Forza di impatto sulle opere di mitigazione	<ul style="list-style-type: none"> • Celle di carico

2.2.2.2.1 Livello idrometrico di picco

Cavi a strappo

Per individuare il passaggio e l'altezza massima di un flusso di detriti possono essere installate uno o più funi, ad altezze definite, trasversalmente rispetto al canale e collegate alle sponde dello stesso.

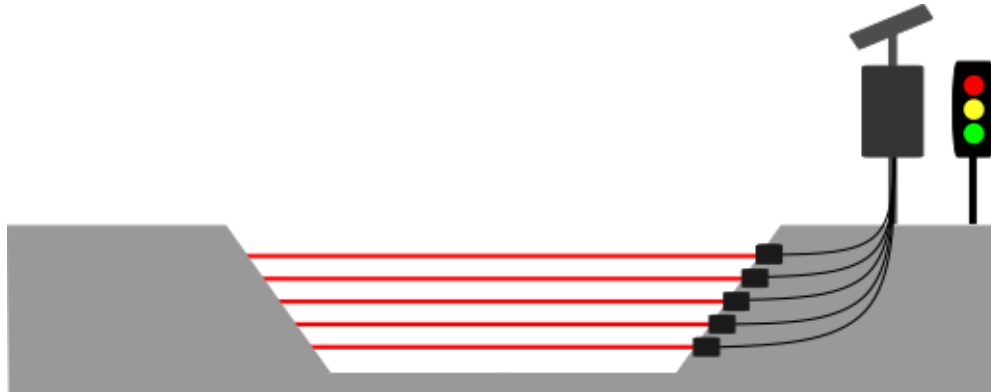


Figura 2.13 Cavi a strappo.

La prima estremità del cavo viene fissata ad una sponda mentre la seconda viene collegata ad un dispositivo, vincolato sul lato opposto, che funge da "interruttore". Nel momento in cui il flusso di detriti raggiunge la quota di installazione della fune, lo stesso viene posto conseguentemente in trazione. Il dispositivo al quale è collegato il cavo è tarato in modo tale che se viene raggiunto un determinato valore di trazione, viene rilasciato il filo e conseguentemente chiuso/aperto un circuito. L'azione di chiusura/apertura viene letta dal datalogger come una variazione di stato.



Figura 2.14 Esempi di installazione di cavi a strappo.

I cavi possono essere tensionati con una forza determinata e collegati ad un dispositivo tarato, in grado di chiudere/aprire un circuito sia in caso di tensionamento sia in caso di detensionamento. L'individuazione del detensionamento può essere utile per individuare l'eventuale lacerazione del filo. I sistemi a filo sono strumenti semplici e funzionali poiché permettono di effettuare un monitoraggio in real-time con un ridotto consumo di energia. Le informazioni ottenute con tali periferiche si limitano all'individuazione del passaggio di una colata (viene solitamente registrato

anche l'orario e la data di accadimento), e dell'eventuale altezza di flusso con una limitazione in termini di risoluzione legata al numero di fili posizionati e alla loro distanza reciproca.

La principale limitazione di tali sistemi è la non possibilità di controllare la funzionalità dei dispositivi di attivazione da remoto. La chiusura/apertura del circuito avviene meccanicamente ed è basata su un contatto tra piastrine in metallo che, se non impermeabilizzate a dovere, possono essere esposte nel tempo a fenomeni di corrosione e conseguentemente a malfunzionamenti. Un'altra limitazione può essere riscontrata nell'impiego di questa tecnica in alvei naturali per la difficoltà nel fissaggio dell'estremità dei cavi alle sponde. I fili possono essere disposti anche seguendo orientazioni differenti dall'orizzontale a seconda del tipo di impiego.

Fotocellule

Le Fotocellule sono dispositivi utilizzati comunemente per applicazioni che non riguardano necessariamente la geotecnica. È comune, ad esempio, il loro impiego nell'automazione di cancelli o negli allarmi perimetrali. Il sistema è composto da due diversi dispositivi, un trasmettitore che emette un fascio di luce in continuo, solitamente infrarossi, e un ricevitore. Se un corpo si interpone tra il trasmettitore e il ricevitore, viene interrotto il fascio di luce emesso. Tale anomalia viene captata nell'immediato dal ricevitore. Le fotocellule sono utili nel monitoraggio dei debris flow per individuare il passaggio del flusso e analogamente ai cavi a strappo se vengono disposte più periferiche a diverse quote è possibile stimare l'altezza di picco del flusso. Al contrario dei cavi a strappo, se non vengono danneggiati durante l'evento, non necessitano di ripristino.

Pendoli

I pendoli sono dispositivi a contatto che vengono solitamente disposti al di sopra dell'alveo e hanno la funzione di rilevare il passaggio di un debris flow. Sono costituiti da aste in acciaio disposte in posizione verticale. L'estremità superiore è collegata a cavi in acciaio o strutture metalliche mediante ancoraggi a cerniera che consentono all'asta di ruotare se eventualmente colpita. Durante il passaggio di una colata detritica il flusso intercetta l'estremità inferiore dell'asta che conseguentemente ruota. La variazione di orientazione viene tradotta in un segnale di allerta. La disposizione di più aste a diverse altezze nella medesima postazione consente di ottenere informazioni sullo spessore del flusso.



Figura 2.15 Un pendolo installato nel torrente Rotolon in Italia (Cavalli et al., 2013).

2.2.2.2.2 Livello idrometrico nel tempo

Idrometri a ultrasuoni

Gli idrometri a ultrasuoni sono dispositivi utilizzati comunemente in idraulica per il monitoraggio in continuo dell'altezza del flusso in una determinata sezione di un alveo. Lo strumento emette impulsi ultrasonici con frequenze comprese tra i 30 e i 70 kHz verso la superficie idrica e successivamente rileva gli echi di ritorno. L'impulso viene generato da una membrana che viene fatta oscillare tramite un segnale elettrico (Sassa et al., 2018). In base al tempo intercorso tra l'invio dell'impulso e la ricezione dello stesso viene calcolata la distanza tra lo strumento e la superficie che ha riflesso l'onda. I sensori a ultrasuoni solitamente vengono disposti al di sopra dell'alveo in una posizione non raggiungibile dal flusso. Se sono presenti lungo il percorso, i ponti possono essere un'ottima sede di installazione.



Figura 2.16 Installazione di un sensore a ultrasuoni.

In alternativa, per ospitare gli strumenti vengono costruite apposite strutture metalliche progettate a seconda delle caratteristiche del sito. Come è già stato descritto nei paragrafi precedenti, nei debris flow il tirante idrico nelle colate detritiche varia molto velocemente. Per tale motivo, al fine di riuscire a ricostruire un idrogramma dettagliato e individuare il valore di picco, è necessario prevedere tempi molto brevi tra una registrazione e la successiva. Solitamente la frequenza di campionamento è di 1 secondo (Arattano e Marchi, 2008). Acquisire dati da un sensore ad ultrasuoni con una frequenza elevata determina un conseguente elevato consumo di energia. Come si è già accennato precedentemente, nella maggior parte dei casi i sistemi di monitoraggio sono alimentati mediante sistemi fotovoltaici poiché sono disposti in zone dove non è possibile l'allaccio alla rete elettrica. Una possibile soluzione per ridurre il consumo energetico sta nel prevedere una duplice modalità di campionamento regolata da dispositivi letti in continuo e caratterizzati da un consumo inferiore.

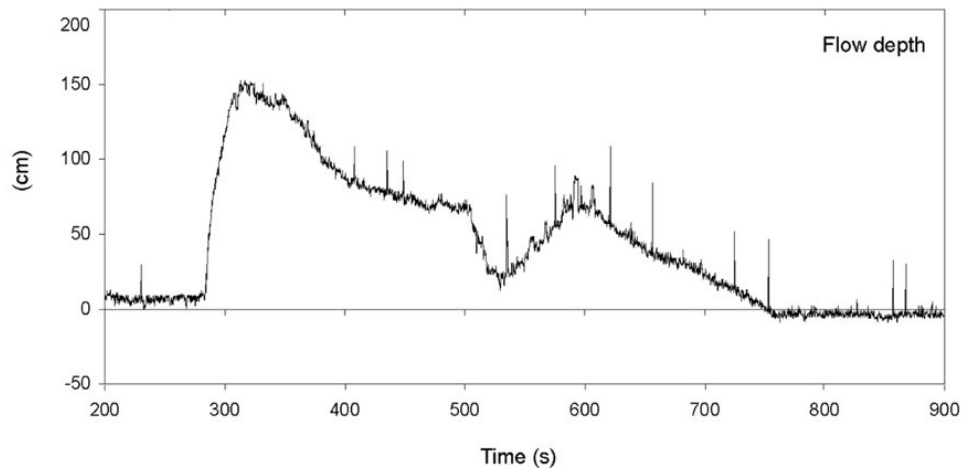


Figura 2.17 Idrogramma dell'evento di colata detritica avvenuto il 26 luglio 1998 presso il sito Rio Acquabona nel comune di Cortina d'Ampezzo, Italia (Genevois et al., 2000).

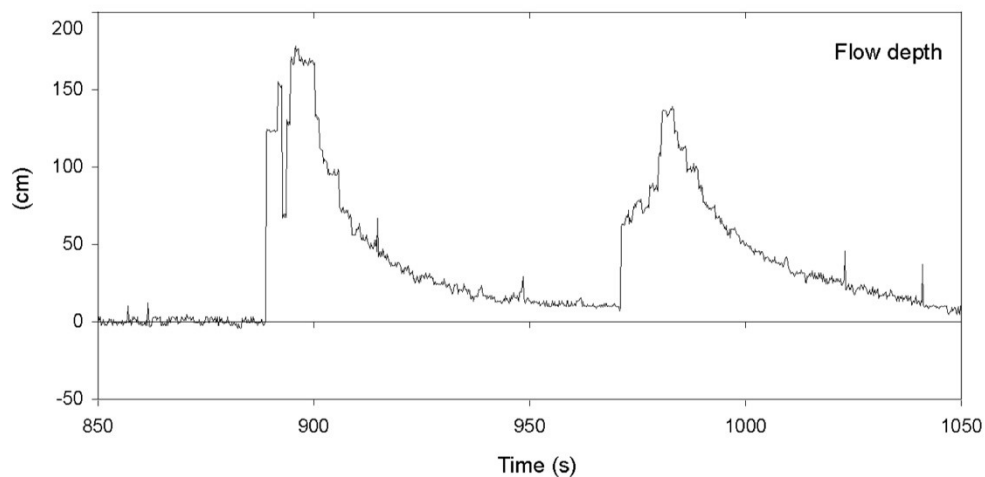


Figura 2.18 Idrogramma dell'evento di colata detritica avvenuto il 17 agosto 1998 presso il sito Rio Acquabona nel comune di Cortina d'Ampezzo, Italia (Genevois et al., 2000).

Dispositivi radar

La filosofia di funzionamento dei sensori radar è del tutto simile ai sensori ad ultrasuoni con la differenza che non vengono inviati impulsi sonori ma onde elettromagnetiche. Anche in questo caso la distanza della sorgente dal flusso viene misurata registrando l'eco di ritorno dell'onda emessa. I fondo scala dei dispositivi radar possono superare i 20 metri e l'accuratezza nella misura è in media di 2 mm (Sassa et al., 2018). I sensori Radar non sono influenzati dalla variazione della densità dell'aria e conseguentemente dalla variazione di temperatura. L'impiego del sensore radar è preferibile ai sensori a ultrasuoni in condizioni atmosferiche sfavorevoli (precipitazioni intense) o in presenza di schiuma, vapore o polvere.



Figura 2.19 Dispositivi radar.

Dispositivi laser

I dispositivi laser sono strumenti ottici che permettono di misurare la distanza tra una sorgente e un oggetto. Nell'ambito dei debris flow in diversi progetti sono stati impiegati misuratori laser di tipologia modimensionale e bidimensionale (Hürlimann et al., 2003)(Hübl et al., 2018)(McArdell et al., 2007). Tramite i dispositivi bidimensionali è possibile controllare l'intera sezione dell'alveo nel quale è posizionato il laser (angolo di misura 190°). Tali sistemi sono utili per monitorare flussi in cui sono presenti molti detriti poiché l'acqua pura non riflette i raggi laser.

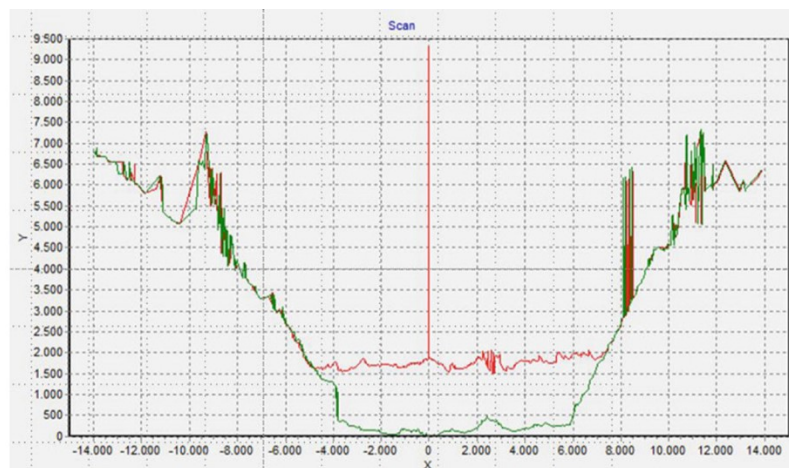


Figura 2.20 Esempio di un rilievo laser, la linea verde raffigura il profilo della sezione e la linea rossa il rilievo in corrispondenza del passaggio del flusso.

2.2.2.2.3 Vibrazioni del suolo e infrasuoni

Il passaggio di una colata detritica genera vibrazioni nel terreno che sono misurabili mediante dispositivi come geofoni, accelerometri e microfoni (Arattano e Marchi, 2008)(Itakura et al., 2005) (Telford et al., 1990). Le collisioni tra i detriti e le interazioni tra il flusso e il letto del canale generano onde di tipo sismico e onde infrasoniche. Gli infrasuoni sono onde sonore che si propagano nell'aria con una velocità di 344 m/s e sono caratterizzati da un dominio di frequenza compreso tra (0.001 e

20 Hz) (Sassa et al., 2018). Nello spettro acustico occupano una banda nelle basse frequenze che l'orecchio umano non è in grado di percepire. Le onde infrasoniche generate dalle colate detritiche hanno frequenze comprese tra i 4 Hz e i 15 Hz a seconda della viscosità del flusso e della granulometria degli inerti trasportati e, possono essere captate anche a diversi km di distanza.

Geofoni

I geofoni sono sensori realizzati con la finalità di campionare le onde sismiche che si propagano nel terreno e tradurle in impulsi elettrici. Il segnale di uscita del geofono può essere di tipo analogico o digitale a seconda della presenza di un AD Converter. Lo strumento è costituito da un contenitore in materiale non magnetico, solitamente plastica o alluminio, contenente la capsula geofonica. Il contenitore esterno in diverse applicazioni è collegato ad una struttura appuntita per poter essere infisso nel terreno. Nel caso il dispositivo non sia dotato di tale puntazza, si realizza una perforazione della profondità desiderata, si inserisce lo strumento e, successivamente, si riempie il foro con il materiale precedentemente estratto e si compatta. La capsula geofonica è costituita a sua volta da uno scatolare esterno anch'esso di materiale non magnetico con il compito di schermare eventuali disturbi elettromagnetici provenienti dall'esterno. All'interno dello scatolare è presente un magnete e una bobina in rame collegata allo stesso, mediante molle. Una volta che lo strumento viene solidarizzato al terreno il magnete, collegato direttamente alla struttura esterna, in caso di vibrazioni segue esattamente l'oscillazione, mentre la bobina tende a rimanere fissa a causa della sua inerzia. I movimenti relativi tra i due componenti generano una differenza di potenziale ai capi della bobina che viene successivamente tradotta in oscillazioni. Da risultati di monitoraggi effettuati con geofoni durante eventi reali e prove in sito si è visto che la frequenza di vibrazione indotta al terreno durante un fenomeno di debris flow è compresa nel range 10 -100 Hz e solo occasionalmente supera tale valore massimo (Arattano, 1999). Al fronte le frequenze campionate sono minori e solitamente comprese tra 10-50 Hz mentre la parte terminale del flusso genera vibrazioni comprese nel range 60 – 100 Hz. I geofoni non devono necessariamente essere installati all'interno dell'alveo, questo fa sì che questi strumenti siano meno soggetti a danneggiamenti durante la colata detritica (Arattano, 1999). Naturalmente, la distanza di installazione deve essere tale da permettere la registrazione di eventuali eventi. La frequenza di acquisizione dei geofoni è solitamente impostata a 500 Hz (Sassa et al., 2018).

Accelerometri

I sensori accelerometrici sono dispositivi che vengono impiegati per misurare le accelerazioni lineari. I campi di applicazione degli accelerometri sono svariati grazie alle dimensioni ridotte, ai costi contenuti e alla grande versatilità di utilizzo. Le richieste di mercato nel produrre apparecchi di dimensioni sempre più contenute hanno portato allo sviluppo degli accelerometri di tipo MEMS (Micro Electro Mechanical System). La particolarità di questi dispositivi sta nell'integrare in un solo chip di silicio di dimensioni millimetriche sia la parte meccanica sia i circuiti di condizionamento e controllo. I sensori MEMS possono essere di tipo monoassiale, biassiale o triassiale a seconda della capacità di misurare accelerazioni rispettivamente lungo 1, 2 o 3 assi. Nel campo dei debris flow, l'impiego di questi sensori è legato alla misura delle vibrazioni indotte dal passaggio di un flusso di detriti (Lee et al., 2008)(Ye et al., 2019).

Microfoni

Per monitorare le onde infrasoniche generate dai debris flow vengono utilizzati microfoni ideati per registrare frequenze sonore nel dominio 0 – 40 Hz. Le onde infrasoniche hanno la capacità di essere rilevate anche dopo aver percorso lunghe distanze poiché l'atmosfera tende ad assorbire maggiormente le onde caratterizzate da alte frequenze. Per questo motivo i microfoni a infrasuoni sono implementati in diversi sistemi di monitoraggio installati in frane, valanghe e flussi di detriti. Nell'implementazione di questa tipologia di monitoraggio è necessario valutare la possibilità di falsi allarmi poiché gli infrasuoni possono essere generati anche da altri fenomeni come: tuoni, vento, traffico ecc.

2.2.2.2.4 Velocità media del flusso

Per registrare la velocità del flusso si possono utilizzare diversi metodi e strumenti (Hübl et al., 2018). Nel caso nel sito monitorato siano predisposti lungo il canale due o più periferiche come idrometri, geofoni o sensori trigger, si può ricorrere al Time Distance Method. Tale tecnica permette di stimare la velocità media di un flusso comparando i tempi di acquisizione di un determinato parametro su più periferiche. Il caso più semplice riguarda l'utilizzo di tale metodologia impiegando sensori Trigger. I dispositivi Trigger consentono di individuare il passaggio di un flusso in una determinata sezione e registrarne l'orario del passaggio. Conoscendo la distanza tra due sensori è possibile calcolare la velocità media del flusso con la seguente formula.

$$v = \frac{S}{t_2 - t_1} \quad [2.1]$$

Dove:

- v è la velocità media di percorrenza del flusso in m/s del tratto compreso tra il punto di installazione del trigger uno e il punto di installazione del trigger due;
- S è la distanza in metri tra i sensori trigger lungo il canale di propagazione;
- t_2 è l'orario di attivazione del trigger di valle in secondi;
- t_1 è l'orario di attivazione del trigger di monte in secondi.

Come è già stato sottolineato nel primo capitolo le colate detritiche sono caratterizzate da un flusso non stazionario. Come si può notare dalla Figura 2.21 che rappresenta la sezione longitudinale di una colata, nella buona parte dei casi, durante il passaggio del fronte di una colata è possibile individuare una variazione repentina del tirante idrico e in tale zona è solitamente individuabile l'altezza di picco.



Figura 2.21 Sezione longitudinale di una colata detritica

Nell'immagine sottostante vengono rappresentati nel medesimo grafico tre idrogrammi registrati da tre postazioni di monitoraggio disposte lungo il torrente Moscardo durante un evento di colata detritica avvenuto il 22 giugno del 1996. Come si può notare, il passaggio del fronte, in questo caso, è facilmente identificabile.

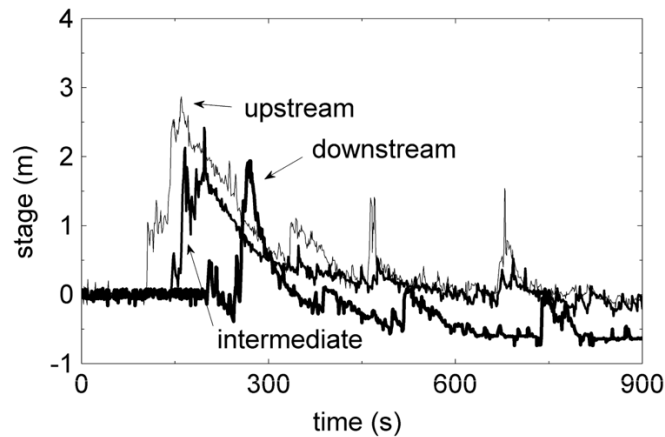


Figura 2.22 Idrogrammi registrati da 3 dispositivi idrometrici disposti lungo il torrente Moscardo durante l'evento di colata detritica avvenuto il 22 giugno 1996 (Arattano e Marchi, 2008).

Per calcolare la velocità è necessario individuare nell'idrogramma un punto di riferimento che può essere ad esempio l'altezza di picco di un'ondata e visualizzarne l'orario di accadimento. La velocità in maniera del tutto simile ai sensori trigger può essere calcolata come il rapporto tra la distanza esistente tra le postazioni di misura e il tempo trascorso tra la rilevazione del picco avvenuta nei due idrometri.

2.2.2.2.5 La velocità superficiale del flusso

LSPIV Large scale Particle Image Velocimetry

La velocità superficiale del flusso può essere monitorata utilizzando un dispositivo LSPIV Large Scale Particle Image Velocimetry. In questo caso non si parla più di valore medio ma di velocità istantanea. La misura è di tipo ottico e richiede l'impiego di videocamere che permettono di effettuare prese ad alta risoluzione e che consentono di campionare frame con una elevata frequenza di acquisizione (Hübl et al., 2018). Tale tecnica, altamente diffusa nell'ingegneria idraulica per misurare la velocità bidimensionale della superficie dei flussi, viene impiegata anche nei debris flow. La tecnica si basa sulla correlazione tra due immagini scattate ad intervalli differenti. Le immagini registrate vengono suddivise in regioni di forma rettangolare e successivamente attraverso un apposito algoritmo comparando i frame acquisiti si determinano gli spostamenti più probabili dei quadranti (Sarno et al., 2014).

Dispositivo radar

Un altro strumento utilizzato per la stima della celerità istantanea della superficie del flusso è il sensore radar descritto nei precedenti paragrafi. La valutazione della velocità è indiretta e avviene attraverso la registrazione della variazione di frequenza tra l'onda emessa dal dispositivo e l'onda di ritorno. La velocità si può calcolare con le seguenti formule (Arattano e Marchi, 2008) :

$$v = \frac{c \cdot f_d}{2 \cdot f_0 \cdot \cos \theta} \quad [2.2]$$

$$f_d = f_r - f_0 \quad [2.3]$$

Dove:

- v è la velocità dell'oggetto analizzato;
- c è la velocità delle onde radio;
- f_d è la frequenza di doppler;
- f_0 è la frequenza dell'onda trasmessa;
- f_r è la frequenza dell'onda ricevuta;
- $\cos \theta$ è l'angolo tra il fascio di onde emesse e la superficie in movimento.

Videocamere

In diversi sistemi di monitoraggio sono implementate videocamere che consentono di ottenere informazioni visive sulle colate detritiche. Processando i video e le immagini registrate, attraverso l'impiego di appositi algoritmi automatici, è possibile stimare la velocità superficiale del flusso.

2.2.2.2.6 Forza normale e di taglio alla base dell'alveo

La forza alla base dell'alveo o alla base di un'opera di mitigazione durante un fenomeno di debris flow può essere misurata attraverso l'impiego di celle di carico. I dispositivi, a seconda della loro orientazione nello spazio, consentono di registrare informazioni sia sulla forza normale del flusso di detriti sia sulla forza di taglio. Solitamente i dispositivi vengono protetti attraverso una lastra in acciaio al fine di evitare danneggiamenti durante impatti diretti con massi (Nagl e Hübl, 2017). Conoscendo la forza normale e l'altezza della massa in movimento è possibile ottenere informazioni riguardanti la densità del flusso (Cavalli et al., 2013).

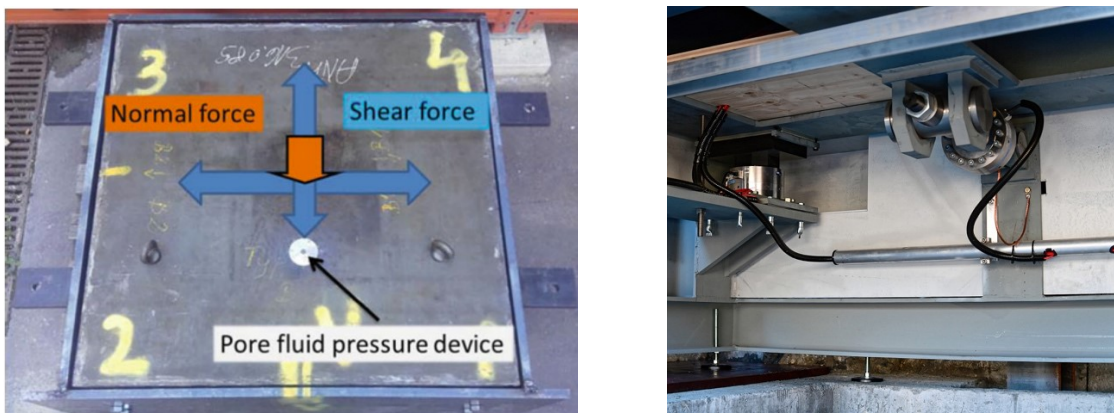


Figura 2.23 a) Piastra a protezione di celle di carico che consentono la misura della forza normale e della forza di taglio alla base dell'alveo (Nagl e Hübl, 2017) b) Celle di carico disposte al di sotto della piastra di protezione (<https://www.wsl.ch/>).

2.2.2.2.7 Forza di impatto sulle opere di difesa flessibili e rigide

Nelle barriere flessibili la valutazione della forza di impatto può avvenire monitorando il tensionamento delle funi principali, attraverso l'impiego di celle di carico a trazione collegate in serie tra il dispositivo frenante e il cavo di supporto, oppure, tra il freno e la struttura di fondazione (Wendeler et al., 2008)(DeNatale et al., 1999). L'interrogazione con una frequenza elevata delle celle di carico genera un elevato consumo energetico, non sopportabile da sistemi alimentati a batteria. Se vi è la necessità di effettuare un controllo in real-time della barriera la soluzione può essere quella di prevedere ulteriori dispositivi nel medesimo sito/struttura, caratterizzati da consumi ridotti e letti in continuo, che attivino il campionamento dei dati della cella al superamento di una determinata soglia.

Per studiare la forza di impatto di colate detritiche reali su strutture rigide nella provincia autonoma di Bolzano, più precisamente nel torrente Gadria, teatro di frequenti fenomeni di colate detritiche, è stata costruita nel 2016 una struttura in calcestruzzo e successivamente strumentata con diversi sensori (Nagl e Hübl, 2017). Sulla parete rivolta verso monte sono state poste 14 celle di carico in serie, protette da una lastra in metallo. Attraverso l'impiego di più dispositivi installati a diverse altezze è possibile individuare la distribuzione della forza di impatto sulla struttura.

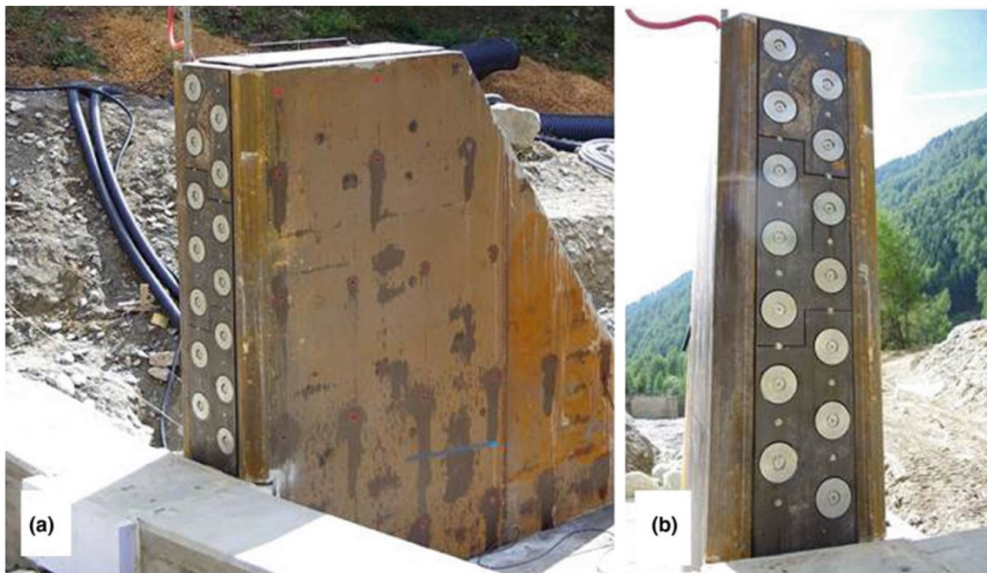


Figura 2.24 Celle di carico disposte nella zona frontale della struttura sperimentale costruita nel torrente Gadria (Nagl e Hübl, 2017).

2.2.2.3 PEWS - Post Event Warning system

I Post Event Warning System sono tecnologie impiegate per controllare lo stato delle infrastrutture o strutture che si trovavano nella zona di propagazione di un debris flow dopo che questo è avvenuto. All'interno del gruppo ricadono gli strumenti classici utilizzati nel monitoraggio strutturale, tra cui: barrette estensimetriche, fessurimetri, clinometri ecc.

CAPITOLO 3: SISTEMA ROCKFALL SAFETY NETWORK

Nel seguente capitolo verrà descritta la procedura di sviluppo di un sistema automatico, denominato Rockfall Safety Network, pensato per monitorare la funzionalità delle barriere paramassi dopo la loro installazione in sito. Il sistema, basato sulla filosofia dell'Internet of Things, può essere integrato sia a barriere di nuova produzione o già poste in opera rendendole "intelligenti" e facendole divenire un elemento di controllo dello stato di attività del versante. La tecnologia consente di:

- Valutare l'eventuale accumulo di materiale sulle reti attraverso la misura del carico residuo sui controventi di monte;
- Individuare il tasso di lavoro della barriera attraverso la misura della rotazione dei montanti, conseguenza dell'attivazione dei freni.
- Individuare impatti sulle strutture attraverso la valutazione dell'allungamento della rete;
- Individuare le porzioni del versante maggiormente attive;
- Fornire uno strumento per la valutazione della suscettibilità e della pericolosità da frana della zona;
- Allertare in automatico i responsabili delle attività di monitoraggio, nel caso venga individuato un impatto sulla struttura, attraverso l'invio automatico di sms, e-mail e l'attivazione di dispositivi remoti quali impianti semaforici, pannelli a messaggio variabile e sirene.

Da sottolineare che nel periodo di sviluppo del sistema altre società si sono impegnate nella realizzazione di nuove tecnologie per il monitoraggio delle opere passive, descritte nel secondo capitolo, basate su approcci differenti e incentrate prevalentemente nel fornire un segnale di allarme nel caso di impatto. Nel primo paragrafo verrà fornita una descrizione generale del funzionamento del sistema di monitoraggio automatico; successivamente verranno descritte più approfonditamente le varie componenti e le procedure di sviluppo.

3.1 Descrizione Sistema

Il sistema RSN è composto da una serie di sensori che consentono di monitorare la variazione di parametri significativi sulla struttura. La disposizione di molteplici dispositivi lungo la medesima barriera permette il controllo completo ed esteso della stessa (Segalini et al., 2021). Il monitoraggio automatico, inoltre, permette di disporre di un database cospicuo di dati e, di conseguenza, di conoscere il comportamento della stessa in rapporto alle variazioni ambientali. Ogni singolo punto di controllo sulla barriera è composto dai seguenti elementi di misura:

- Un sensore MEMS (Micro Electro Mechanical System);
- Un elemento sensibile elettrolitico;
- Una cella di carico estensimetrica.

I primi due sensori sono posti all'interno di uno scatolare metallico IP68, denominato modulo BPM, installabile facilmente in prossimità dei montanti mediante un connettore appositamente studiato. Essi vengono denominati rispettivamente RSN Link e RSN Link HR. In Figura 3.1 è rappresentato un esempio di installazione. Grazie alla versatilità del sistema di aggancio il modulo può essere connesso a molteplici modelli di barriere e allo stesso tempo, terminato il periodo di registrazione, il modulo può essere recuperato e riutilizzato.



Figura 3.1 Monitoraggio di un montante mediante il sistema Rockfall Safety Network. I sensori RSN Link e RSN Link HR sono posti all'interno di uno scatolare contenente la batteria di alimentazione e la periferica di comunicazione radio. La cella di carico è installata tra il montante e i controventi di monte e viene collegata al modulo BPM mediante un cavo esterno.

Il sensore MEMS restituisce informazioni riguardanti le tre componenti del campo magnetico, le tre componenti del campo gravitazionale terrestre e la temperatura. Quest'ultimo parametro risulta di fondamentale importanza per la calibrazione del sensore accelerometrico. Attraverso tali dati si è in grado di valutare la rotazione dei montanti. La cella elettrolitica è funzionale all'ottenimento di dati ridondanti dello stesso parametro. La doppia misura della stessa grandezza fisica consente la validazione dei risultati del monitoraggio.

Per quanto concerne l'installazione è consigliato il posizionamento di un modulo ogni due montanti in modo da avere almeno un punto di misura nelle immediate vicinanze di ciascun pannello. Consultando i report di test MEL e SEL, eseguiti nei campi prova, si può notare che i montanti adiacenti alla porzione di barriera colpita risentono maggiormente degli effetti dell'impatto e sono caratterizzati da angoli di rotazione maggiori.

La cella di carico, basata su tecnologia estensimetrica e realizzata in acciaio 39NiCrMo3, è stata progettata per ottenere indicazioni circa l'andamento dello stato tensionale al quale sono sottoposti i controventi di monte nel tempo. Al fine di non compromettere la funzionalità della barriera, tale cella di carico è inserita all'interno di un apposito sistema di bypass che garantisce l'integrità strutturale del sistema. L'alimentazione dei moduli BPM è garantita da batterie al Litio che, dal

punto di vista teorico considerando un'acquisizione al giorno, permettono un campionamento autonomo di due anni. Dopo tale periodo è necessaria la sostituzione delle stesse. Attraverso la misura accoppiata di più grandezze fisiche il sistema è in grado di percepire sia eventi di forte intensità, traducibili in una rotazione del montante e/o un allungamento del freno, sia eventi di intensità modesta, tali da non innescare il dispositivo frenante ma allo stesso tempo riconoscibili da un aumento della forza misurata sul controvento di monte. La risoluzione di misura dei sensori permette di individuare le rotazioni centesimali dei montanti dovute alle deformazioni delle strutture in acciaio sottoposte a variazioni di temperatura.

Oltre ai dispositivi sopraelencati è presente nello stesso sistema un dispositivo Trigger in grado di rilevare in qualsiasi momento eventuali allungamenti della rete dovuti ad impatti sulla barriera. Grazie all'implementazione di questa periferica il Rockfall Safety Network consente un monitoraggio delle strutture in real-time e può essere considerato un sistema di Early Warning. Nel caso venga percepito un allungamento della rete di intercettazione, viene effettuata una lettura di controllo degli altri sensori e successivamente viene inviato il dato al centro di calcolo. Successivamente un software automatico associa all'evento un livello di allarme basandosi sui dati campionati e attiva le conseguenti procedure di segnalazione.

3.1.1 Gestione dei dati

Il sistema di gestione dati del sistema RSN è composto dalle seguenti periferiche:

1. Sistema di comunicazione radio;
2. Centralina di acquisizione e trasmissione dei dati;
3. Database per lo storage dei dati;
4. Software di elaborazione;
5. Piattaforma di rappresentazione web.

I moduli BPM comunicano con la centralina attraverso un sistema radio. Il datalogger, con una frequenza che è definibile dall'utente, interroga i singoli dispositivi e salva i dati grezzi localmente su di un supporto di tipo SD. Da sottolineare che la comunicazione avviene solamente tra la centralina e i moduli e non viceversa. I dispositivi Trigger, al contrario, sono collegati mediante un cavo elettrico bipolare e sono in grado di comunicare con il datalogger in qualsiasi momento. Tale peculiarità permette alla centralina di percepire e registrare su SD nell'immediato l'invio di un impulso. I dati grezzi vengono successivamente inviati, con una frequenza di trasmissione programmabile, al centro di calcolo mediante un modulo UMTS. Una volta giunti al centro di calcolo avviene lo storage in un'apposita sezione del database. Successivamente al loro salvataggio, i dati vengono elaborati automaticamente tramite un apposito software fondato su algoritmi self-learning di carattere statistico in grado di elaborarli e verificarli in real-time al fine di attestarne preliminarmente la validità. I risultati derivanti dal processo di calcolo vengono salvati in una seconda sezione dello stesso database. La scelta di suddividere la banca dati in più sezioni deriva dalla volontà di preservare sia i dati grezzi sia quelli derivanti dall'elaborazione. Il processo di gestione dei dati è rappresentato in Figura 3.2.

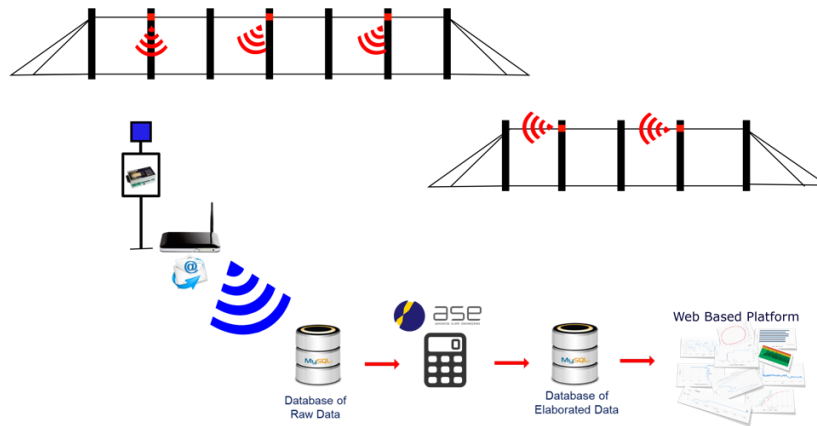


Figura 3.2 Processo di acquisizione, elaborazione e rappresentazione dei dati nel sistema Rockfall Safety Network.

3.1.2 Piattaforma di rappresentazione dei dati

La rappresentazione dei risultati avviene su piattaforma dinamica web-based la quale, attraverso appositi strumenti, permette di ottenere un'indicazione immediata dei possibili fenomeni in atto sul versante (Figura 3.3). La piattaforma, ad accesso controllato, è consultabile da molteplici periferiche (PC, Smartphone, ecc.) e permette di:

- Visualizzare mediante grafici i dati di monitoraggio relativi al periodo di campionamento desiderato;
- Selezionare il sensore di interesse direttamente cliccando su di una planimetria;
- Ottenere informazioni riguardo le caratteristiche tecniche della struttura monitorata;
- Georeferenziare le barriere;
- Ottenere un'indicazione delle porzioni di versante maggiormente attive;
- Ottenere informazioni riguardanti il livello della batteria dei dispositivi;
- Esportare i grafici nei formati .csv, .xls, .jpg, .svg, .png, .pdf;
- Correlare i dati di monitoraggio provenienti dai diversi sensori.

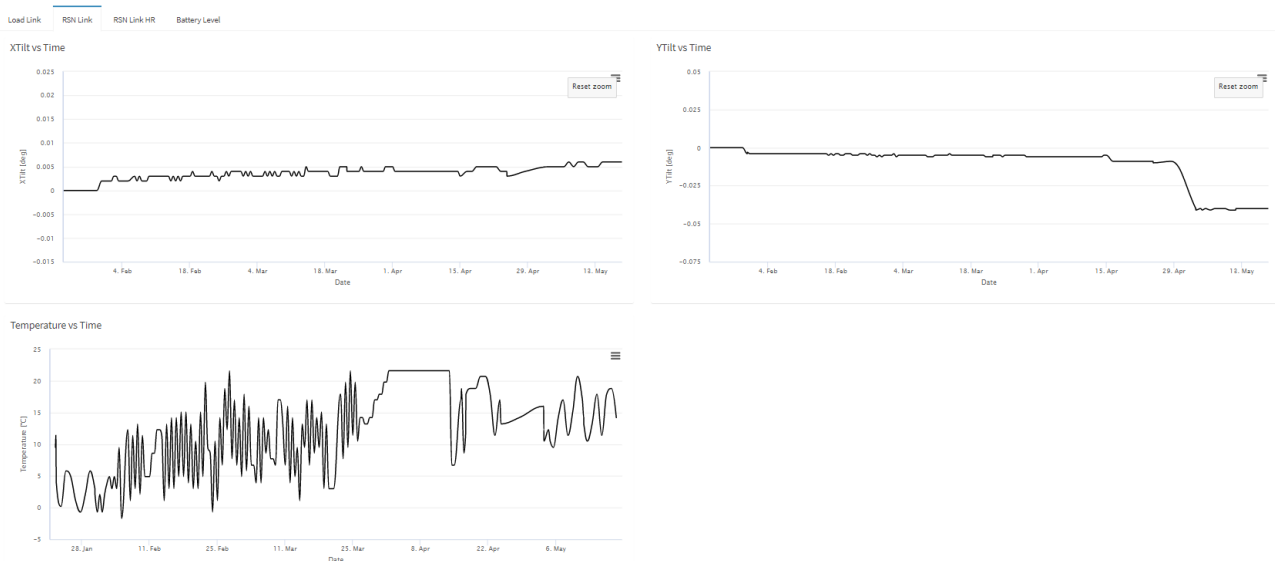


Figura 3.3 I risultati provenienti dal sistema Rockfall Safety Network sono rappresentati in appositi grafici dinamici.

3.2 Sviluppo del Sistema

3.2.1 Modulo BPM

Il modulo BPM, come si può notare dalla Figura 3.5, si presenta esternamente come uno scatolare metallico resistente a polveri e acqua (protezione IP68) di dimensioni 12,5 x 9 x 6 cm. All'interno dell'involucro di protezione (Figura 3.4) sono presenti:

- Una scheda elettronica necessaria per l'acquisizione dei dati dalla cella di carico e per la conversione del segnale analogico, originariamente in mV/V, in digitale;
- Una scheda elettronica per il condizionamento del sensore MEMS e dell'ampolla elettrolitica;
- Un modulo radio slave necessario per la trasmissione dei dati al datalogger;
- Le batterie funzionali all'alimentazione del modulo.

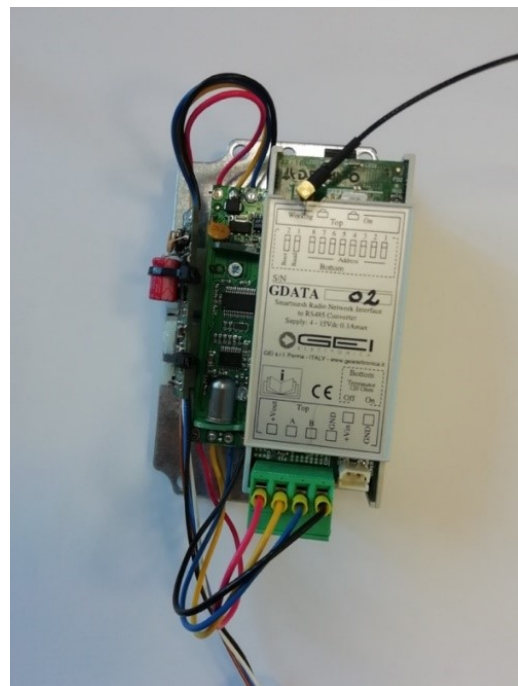


Figura 3.4 All'interno del modulo BPM sono poste le schede elettroniche necessarie per l'acquisizione dei dati dal sensore MEMS e dall'ampolla elettrolitica e la periferica radio slave funzionale alla comunicazione dei dati al sistema.

Le schede elettroniche all'interno del modulo sono collegate in serie attraverso una connessione digitale RS485. Nella porzione inferiore dello scatolare sono presenti due connettori necessari per il collegamento della cella di carico e di un'antenna, essenziale per la trasmissione dei dati tra i moduli.

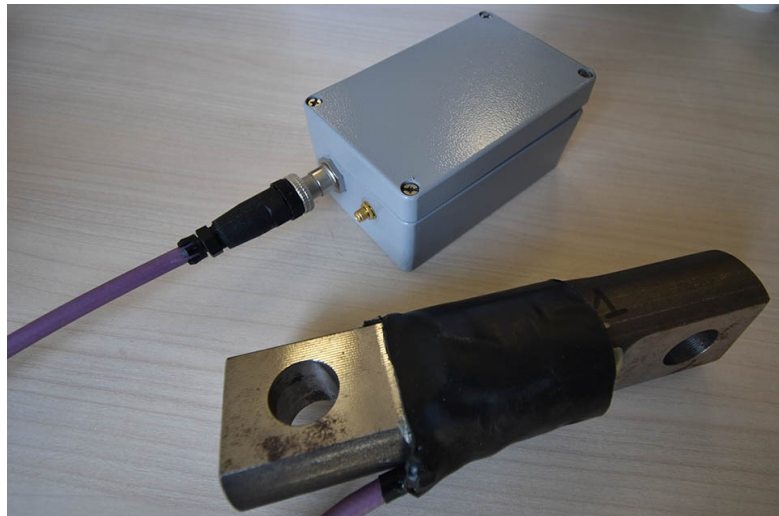


Figura 3.5 Modulo BPM e cella di carico estensimetrica.

3.2.1.1 Installazione

Il posizionamento dei moduli BPM sui montanti avviene mediante un apposito connettore in metallo composto da:

- una piastra alla quale viene fissata la scatola di protezione mediante un sistema a viti;
- un sistema a cerniera utile per l'allineamento verticale del modulo durante l'installazione;
- un sistema di aggancio al montante.

La connessione è stata progettata appositamente per permettere l'installazione dei moduli sulla barriera RAV_8/A 5000 kJ, prodotta dalla società Incofil Tech S.r.l. Tuttavia, lo stesso apparato può essere utilizzato per la connessione dei moduli BPM in montanti aventi un profilo ad H, uno spessore delle ali minore di 20 mm e una lunghezza minima dell'anima di 200 mm. Il fissaggio del modulo avviene a pressione, aumentando l'attrito tra il montante e il sistema di aggancio attraverso un sistema di viti e non necessita di apportare modifiche al profilato che potrebbero comprometterne la capacità strutturale (Figura 3.6). In Figura 3.7 sono rappresentati i disegni di progetto e le dimensioni dell'apparato. La cerniera permette di posizionare il modulo BPM perfettamente in verticale. Tale peculiarità è stata introdotta poiché, a differenza del sensore MEMS che ha un campo di misura di 360°, l'ampolla elettrolitica ha un range di misura che va da -25° a +25°. Le strutture di supporto delle barriere flessibili difficilmente vengono installate perfettamente in verticale e quindi il posizionamento parallelo al montante del modulo BPM ridurrebbe il campo di misura possibile del sensore. Ad esempio, un modulo installato su di un montante caratterizzato da un'inclinazione di 20° verso valle avrebbe la possibilità di registrare inclinazioni massime di 5 gradi per poi raggiungere il fondo scala.



Figura 3.6 Sistema di aggancio modulo BPM.

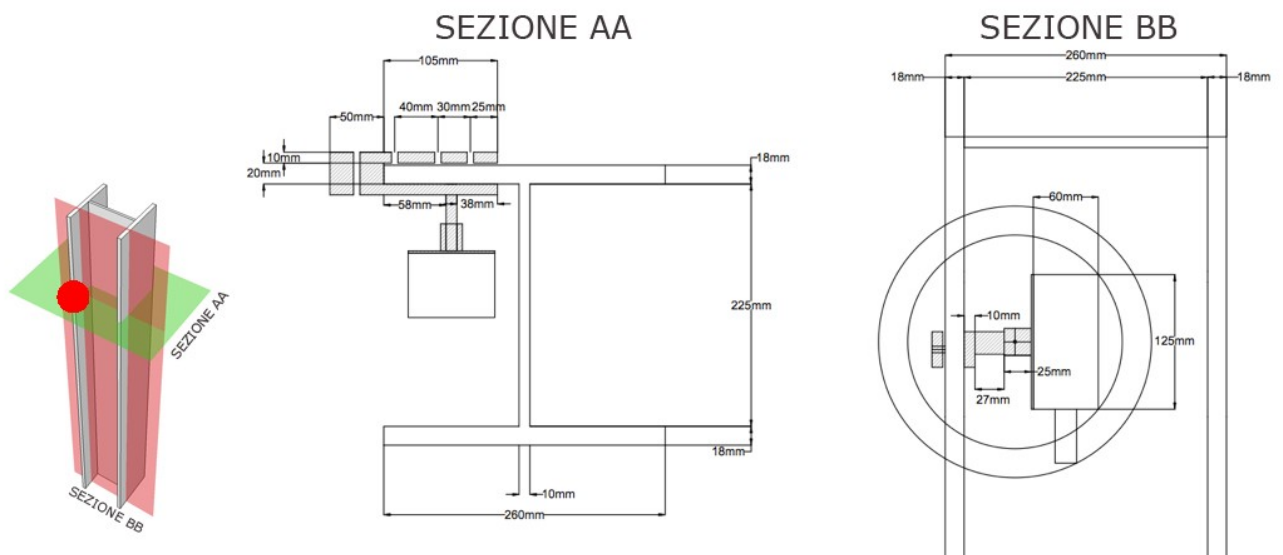


Figura 3.7 Progetto del sistema di collegamento del modulo BPM. a) Sezione trasversale AA b) Sezione longitudinale BB.

3.2.1.2 Sviluppo

Lo sviluppo dei moduli BPM è avvenuto per fasi. All'inizio della ricerca ci si è concentrati sullo studio delle entità delle rotazioni dei montanti registrate durante i test di barriere in scala reale. Come esempio in Tabella 3.1 sono riportate le variazioni di inclinazione dei montanti della barriera RAV_8/A 5000 kJ registrate durante i test di certificazione.

Tabella 3.1 Variazione di inclinazione dei montanti della barriera RAV_8A 5000 kJ durante i test di certificazione.

	Rotazione dei montanti [°]			
	Montante 1	Montante 2	Montante 3	Montante 4
Test SEL 1	1.5	10.5	7	0.5
Test SEL 2	1	5	7	0
Test MEL	10	37	34	20

Una volta individuate le entità in gioco si è passati alla ricerca dei sensori che avessero le caratteristiche idonee in termini di accuratezza, precisione e portata per poter misurare

correttamente le rotazioni attese. Le caratteristiche tecniche dei due sensori adottati, MEMS e ampolla elettrolitica, sono sintetizzate rispettivamente in Tabella 3.2 e in Tabella 3.3.

Tabella 3.2 Caratteristiche tecniche del sensore MEMS.

Campo di misura	360°
Sensore	Accelerometro 3D, Magnetometro 3D, Termometro
Portata dell'accelerometro	± 2 g
Risoluzione dell'accelerometro	0.244 mg/LSB
Stabilità dell'accelerometro	± 0.008 %/°C
Accuratezza dell'accelerometro	± 1 %
Portata del magnetometro	± 1200 µT
Sensibilità del magnetometro	0.1 µT /LSB
Stabilità del magnetometro	± 0.1 %/°C
Isteresi del magnetometro	± 1 % FS
Sensibilità del termometro	0.96 °C/LSB
Ripetibilità del termometro	1 °C
Campo operativo di temperatura	-40 °C ÷ +85 °C

Tabella 3.3 Caratteristiche tecniche dell'ampolla elettrolitica.

Portata cella elettrolitica (lineare)	± 25 °C
Risoluzione cella elettrolitica	0.003°
Ripetibilità cella elettrolitica	± 0.1 °
Coefficienti di temperatura (cella elettrolitica)	
Nulla	0.00617%/°C
Scala	0.1 %/°C

Come si può evincere dalle schede tecniche all'interno del sensore MEMS vi è un ulteriore elemento sensibile in grado di misurare il campo magnetico che viene solitamente utilizzato in strumentazioni inclinometriche automatiche (Segalini et al., 2011) (Segalini et al., 2014).

Il passaggio successivo è stato lo studio del sistema di alimentazione dei moduli. Nei primi prototipi realizzati si è pensato di impiegare un sistema di sostentamento non ricaricabile, composto da due batterie al litio da 3.6 V, in grado dal punto di vista teorico di alimentare i moduli per 2 anni. Come verrà spiegato meglio nel prossimo capitolo, in sito le previsioni si sono rivelate erranee per cui in un secondo momento si è implementata una batteria avente una capacità superiore.

La ricerca di una metodologia di trasmissione dei dati tra i moduli e la centralina ha portato alla scelta di implementare un sistema radio di tipo Smart Mesh. Il prodotto scelto è di tipo commerciale ed è distribuito dalla società Linear Technology. La rete utilizza due dispositivi differenti: i radio master e i radio slaves chiamati anche Motes. I radio slave sono posizionati all'interno dei moduli BPM e possono comunicare direttamente con il radio master che ha la funzione di gestire la rete e convogliare i dati alla centralina ma, allo stesso tempo, possono fungere da ponte radio per gli altri Motes. Tali sistemi si adattano alle applicazioni IoT poiché sono caratterizzati da un basso consumo energetico e una portata massima che può arrivare fino a 200 metri in campo aperto privo di ostacoli. Nella maggior parte dei casi, però, le barriere paramassi si trovano in zone impervie caratterizzate da un'alta densità di vegetazione. Nella rete Smart Mesh non vi deve essere per forza una zona totalmente priva di ostacoli (Figura 3.8). Al fine di permettere la trasmissione dei dati, infatti, è necessario che sia garantita almeno la visibilità e una distanza inferiore a 200 metri tra 2 moduli slave e tra uno slave e il radio master.

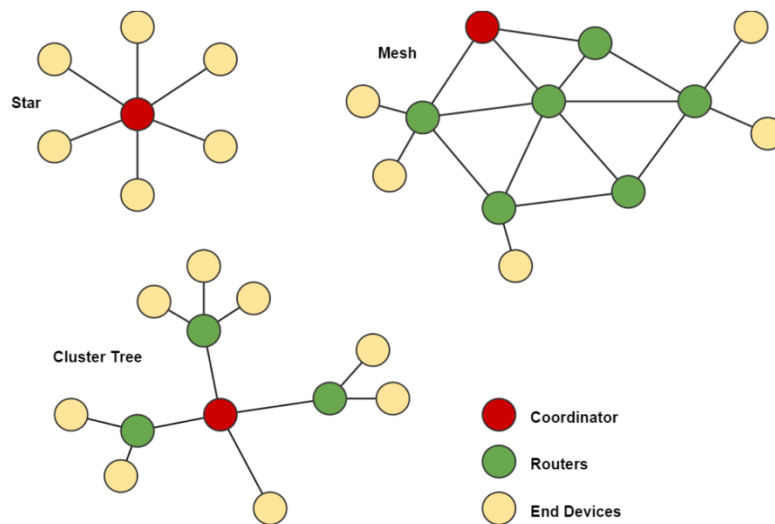


Figura 3.8 Nell'immagine sono rappresentate le tre principali tipologie di comunicazione radio.

L'applicazione dei sistemi di trasmissione di tipo Smart Mesh, inoltre, ha risvolti positivi nell'impiego nelle opere paramassi poiché in diversi scenari le strutture da monitorare sono caratterizzate da estensioni in lunghezza di parecchie centinaia di metri. Attraverso l'impiego di reti Smart Mesh è possibile installare una sola centralina dotata di radio master a controllo di molteplici periferiche slave allineate lungo la barriera. La centralina difficilmente in questi contesti ha un contatto visivo con tutte le periferiche e il segnale radio viene amplificato dai singoli moduli installati sulla sommità dei montanti (Figura 3.9).

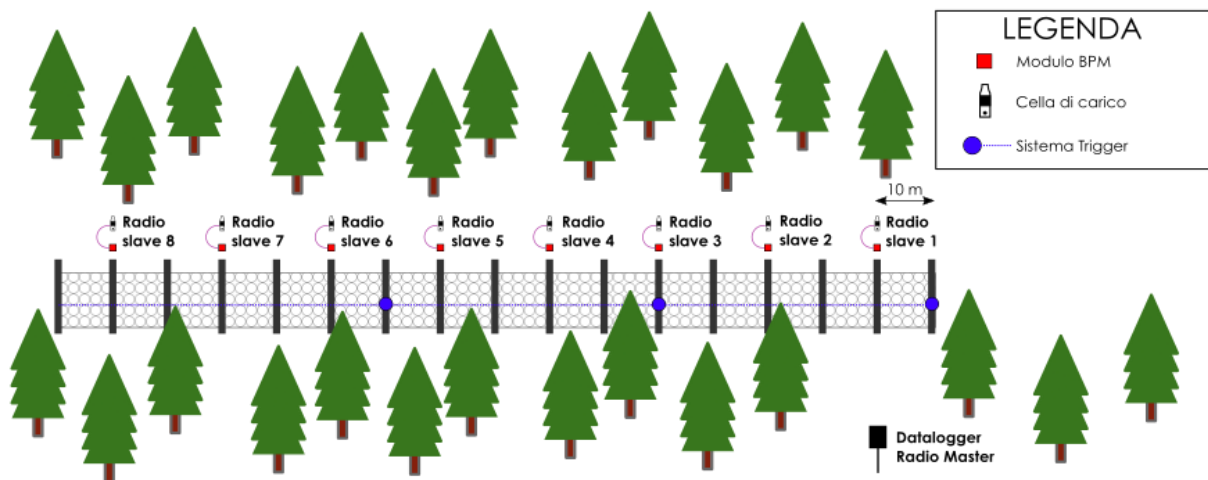


Figura 3.9 Scenario tipo di installazione del sistema RSN su di una barriera paramassi. Come si può notare in questo caso lo scambio di dati diretto può avvenire solamente tra il datalogger e i moduli BPM 1 e 2. Le altre comunicazioni dirette sono impediti dalla presenza di ostacoli tra le periferiche. Grazie alla rete Smart Mesh tutti i dispositivi possono comunicare con il datalogger poiché ogni singolo nodo funge da amplificatore e ripetitore del segnale radio.

3.2.1.3 Calibrazione

La valutazione della procedura di calibrazione dei sensori è un processo fondamentale nello sviluppo dei sistemi di monitoraggio. Il risultato finale del processo è una funzione che mette in relazione il segnale elettrico in uscita dal sensore e il parametro sottoposto a misurazione.

3.2.1.3.1 Sensore elettrolitico

Il sensore elettrolitico viene calibrato mediante un dispositivo di taratura appositamente progettato e composto da un supporto sul quale è collegata una barra in acciaio in grado di ruotare lungo una cerniera, disposta nella mezzeria della stessa, sulla quale vengono fissati fino a cinque moduli BPM. Inizialmente per valutare la funzionalità meccanica della macchina di taratura i moduli sono stati fissati mediante fascette come in Figura 3.10. Tale sistema è poi stato sostituito da appositi morsetti in grado di garantirne il blocco durante le operazioni di taratura.



Figura 3.10 Sistema di taratura dei moduli BPM.

Il sistema progettato permette di ruotare la barra di un angolo noto e di misurare l'inclinazione della stessa mediante due diversi strumenti, un goniometro e un elettrolivella tarata. Inoltre, una volta raggiunta l'inclinazione desiderata è possibile fissare la barra mediante un apposito sistema di blocco.

Il processo di calibrazione consiste nel posizionare l'asta in diverse giaciture e in parallelo effettuare la registrazione del segnale dell'ampolla mediante una centralina. Il sensore elettrolitico, a differenza del sensore MEMS, è di tipo biassiale e siccome il sistema di taratura ha la possibilità di ruotare lungo un unico asse è necessario effettuare un duplice processo di calibrazione. Come sistema di riferimento si è scelto di considerare positive le rotazioni in senso orario. L'ampolla elettrolitica è fortemente influenzata da vibrazioni accidentali provenienti dall'ambiente circostante per cui per ogni giacitura si effettuano tre registrazioni e successivamente si calcola la media dei valori campionati. Grazie a questo accorgimento è possibile individuare ed eliminare eventuali disturbi, ad esempio dovuti alle vibrazioni indotte dal passaggio di una persona nelle vicinanze della macchina di taratura, durante la fase di registrazione. La formula di taratura impiegata per convertire i dati da unità elettriche in gradi è un polinomio di primo grado:

$$\alpha_a = g_a \alpha'_a + int_a \quad [3.1]$$

Dove:

- α_a è angolo di inclinazione lungo l'asse a espresso in gradi [°];
- α'_a è l'angolo di inclinazione lungo l'asse a registrato dal sensore espresso in unità elettriche [ADC];
- g_a è il primo parametro di calibrazione e rappresenta il coefficiente angolare della retta di regressione;
- int_a è il secondo parametro di calibrazione e rappresenta l'intercetta della retta di regressione;

Il coefficiente angolare e l'intercetta vengono individuate mediante una regressione lineare minimizzando la somma degli scarti tra i dati registrati dall'elettrolivella calibrata e l'ampolla elettrolitica.

3.2.1.3.2 Sensore MEMS

L'accelerometro installato nei moduli BPM richiede un duplice processo di calibrazione. Nella prima fase vengono definiti i parametri di taratura necessari per individuare gli angoli relativi, ovverosia le inclinazioni rispetto ad una posizione di riferimento. Nella seconda fase invece vengono definiti i parametri necessari per individuare l'orientazione assoluta del MEMS nello spazio.

La fase iniziale del processo di calibrazione prevede di inserire il sensore all'interno di una camera climatica controllabile mediante un PLC. L'utilizzo di tale cella consente di tarare il sensore tenendo conto della variazione del suo segnale legata alla variazione di temperatura (Figura 3.11). All'interno della cella climatica vi è un sistema meccanico appositamente progettato per la calibrazione dei dispositivi MUMS (Modular Underground Monitoring System) in grado di imporre

delle rotazioni ad un dodecaedro in materiale metallico intorno a due assi, permettendone il posizionamento in molteplici giaciture nello spazio.

Il modulo BPM, contenente il sensore MEMS, viene inserito all'interno del dodecaedro e fissato. Il processo di taratura prevede di portare l'ambiente interno della camera ad una determinata temperatura e posizionare il dodecaedro in 24 giaciture differenti. Ad ogni giacitura i valori di output del sensore vengono letti e registrati. Le temperature prese in considerazione durante il processo sono 10 ($-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$). Per tenere conto dell'inerzia termica del modulo BPM tra due cicli di calibrazione si attendono 90 minuti. I valori in uscita dal sensore sono:

- $a_{x_{ADC}}$ è la componente del campo gravitazionale lungo x in unità elettriche ADC;
- $a_{y_{ADC}}$ è la componente del campo gravitazionale lungo y in unità elettriche ADC;
- $a_{z_{ADC}}$ è la componente del campo gravitazionale lungo z in unità elettriche ADC;
- T_{ADC} è la temperatura in unità elettriche ADC.

Siccome il sensore MEMS è di tipo tridimensionale è possibile calcolare i parametri di calibrazione attraverso una regressione lineare minimizzando gli scarti tra l'accelerazione di gravità e la risultante delle accelerazioni misurata dal sensore MEMS. L'accelerazione terrestre è una variabile costante ed è uguale a 9.80665 m/s^2 , valore corrispondente a 1 g. La risultante delle tre componenti del campo accelerometrico, registrate da un sensore MEMS 3D in condizioni statiche e correttamente calibrato, deve restituire tale valore. Il calcolo della risultante del campo accelerometrico viene effettuato con la formula seguente:

$$G_g = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad [3.2]$$

Dove:

- G_g rappresenta la risultante del campo accelerometrico registrato dall'accelerometro;
- a_x rappresenta la componente lungo x del campo accelerometrico terrestre registrata dall'accelerometro in g;
- a_y rappresenta la componente lungo y del campo accelerometrico terrestre registrata dall'accelerometro in g;
- a_z rappresenta la componente lungo z del campo accelerometrico terrestre registrata dall'accelerometro in g.

Nella prima fase del processo di calibrazione per ogni sensore MEMS vengono calcolati sei parametri ($g_{x_t}, i_{x_t}, g_{y_t}, i_{y_t}, g_{z_t}, i_{z_t}$). Il processo prevede di minimizzare ε_t che rappresenta la sommatoria delle differenze tra G_v e G_g calcolate per ogni giacitura (24 totale) ad una determinata temperatura variando i parametri di calibrazione.

$$\varepsilon_t = \sum_{a=1}^{24} [G_v - G_g] \quad [3.3]$$

$$\varepsilon_t = \sum_{a=1}^{24} \left[G_v - \sqrt{(g_{x_t} a'_{x_t} + i_{x_t})^2 + (g_{y_t} a'_{y_t} + i_{y_t})^2 + (g_{z_t} a'_{z_t} + i_{z_t})^2} \right] \quad [3.4]$$

Dove:

- ε_t è la sommatoria delle differenze tra il campo accelerometrico terrestre e il campo accelerometrico registrato dal sensore per una determinata temperatura;
- G_v è il campo accelerometrico terrestre. È un valore costante che equivale a 9.80665 m/s²;
- g_{x_t} rappresenta il coefficiente angolare della componente di accelerazione lungo x alla temperatura t ;
- a'_{x_t} rappresenta la componente di accelerazione lungo x registrata dall'accelerometro in unità elettriche ad una determinata temperatura t ;
- i_{x_t} è l'intercetta della componente di accelerazione lungo x alla temperatura t ;
- g_{y_t} è il coefficiente angolare della componente di accelerazione lungo y alla temperatura t ;
- a'_{y_t} è la componente di accelerazione lungo y registrata dall'accelerometro in unità elettriche ad una determinata temperatura t ;
- i_{y_t} rappresenta l'intercetta della componente di accelerazione lungo y alla temperatura t ;
- g_{z_t} rappresenta il coefficiente angolare della componente di accelerazione lungo z alla temperatura t ;
- a'_{z_t} è la componente di accelerazione lungo z registrata dall'accelerometro in unità elettriche ad una determinata temperatura t ;
- i_{z_t} rappresenta l'intercetta della componente di accelerazione lungo z alla temperatura t ;

A seguito di questo primo processo si ottengono sei parametri di calibrazione per ogni temperatura presa in considerazione. Nel caso di una taratura standard effettuata variando la temperatura della camera 10 volte si ottengono 60 parametri.

Il secondo step del processo di calibrazione prevede di identificare tre coefficienti angolari g_x , g_y , g_z rappresentativi. Per ogni asse viene calcolato il valore $g_{a_{tm}}$ che rappresenta la differenza massima tra il parametro $g_{a_{ti}}$, coefficiente angolare dell'asse a calcolato alla temperatura t , e la media dei dieci valori g_{a_t} calcolati durante l'intero processo di calibrazione. Tale valore viene rimosso.

$$g_{a_{tm}} = \max \begin{bmatrix} g_{a_{t1}} - \frac{\sum_{i=1}^{10} g_{a_t}}{10} \\ \dots \\ g_{a_{t10}} - \frac{\sum_{i=1}^{10} g_{a_t}}{10} \end{bmatrix} \quad [3.5]$$

Successivamente la medesima formula viene applicata al dataset rimanente composto da nove dati e viene rimosso il secondo massimo. A questo punto vengono calcolati i 3 parametri

rappresentativi (g_x, g_y, g_z) come la media dei coefficienti angolari rimanenti attraverso la seguente formula:

$$g_a = \frac{(\sum_{i=1}^8 g_{a_i})}{8} \quad [3.6]$$

La correzione termica degli accelerometri è ottenuta applicando tre diverse regressioni lineari ai set di dati, rappresentati rispettivamente dai parametri $i_{x_t}, i_{y_t}, i_{z_t}$, considerati come variabili y e le temperature note come variabili x .

$$i_{a_t} = g_{aT}T' + int_{aT} \quad [3.7]$$

Dove:

- i_{a_t} è l'intercetta della componente di accelerazione lungo l'asse a alla temperatura t ;
- g_{aT} è il valore del coefficiente angolare della temperatura lungo l'asse a ;
- T' è il valore della temperatura espresso in unità elettriche ADC;
- int_{aT} è il valore dell'intercetta della temperatura lungo l'asse a ;

La conversione dei dati RAW in unità fisiche, prendendo in considerazione la correzione dovuta alle variazioni termiche, avviene impiegando la seguente formula:

$$a_a = g_a a'_a + g_{aT}T' + int_{aT} \quad [3.8]$$

Dove:

- a_a è il valore della componente lungo l'asse a del campo accelerometrico terrestre espresso in unità fisiche g ;
- g_a è il valore del coefficiente angolare dell'accelerazione lungo l'asse a ;
- a'_a è il valore della componente lungo l'asse a del campo accelerometrico terrestre espresso in unità elettriche ADC;
- g_{aT} è il valore del coefficiente angolare della temperatura lungo l'asse a ;
- T' è il valore della temperatura espresso in unità elettriche ADC;
- int_{aT} è il valore dell'intercetta della temperatura lungo l'asse a ;

Per ogni sensore MEMS vengono definiti quindi alla fine del primo processo di calibrazione 9 parametri che sono $g_x, g_{xT}, int_{xT}, g_y, g_{yT}, int_{yT}, g_z, g_{zT}, int_{zT}$. Il processo di calibrazione adottato fino ad ora può essere utilizzato per applicazioni in cui si intende ottenere solamente una misura relativa rispetto ad uno zero di riferimento. Per poter determinare l'orientazione assoluta del MEMS nello spazio è necessario un secondo processo di calibrazione che viene effettuato utilizzando il medesimo apparato e procedimento impiegato per la calibrazione delle ampolle.

I parametri integrativi sono due e vengono ottenuti attraverso una regressione lineare in cui vengono minimizzati gli scarti tra gli angoli misurati, registrati dall'elettrolivella, e l'arcoseno dei valori della componente accelerometrica lungo l'asse analizzata, calcolati tramite l'equazione [3.8].

La formula di calibrazione finale è la seguente:

$$A_a = Gass_a \sin^{-1}(g_a \alpha'_a + g_{aT} T' + int_{aT}) + Iass_a \quad [3.9]$$

Dove:

- A_a rappresenta l'angolo di inclinazione in gradi [°];
- $Gass_a$ rappresenta il primo parametro di calibrazione ottenuto dalla regressione lineare;
- $Iass_a$ rappresenta il secondo parametro di calibrazione ottenuto dalla regressione lineare.

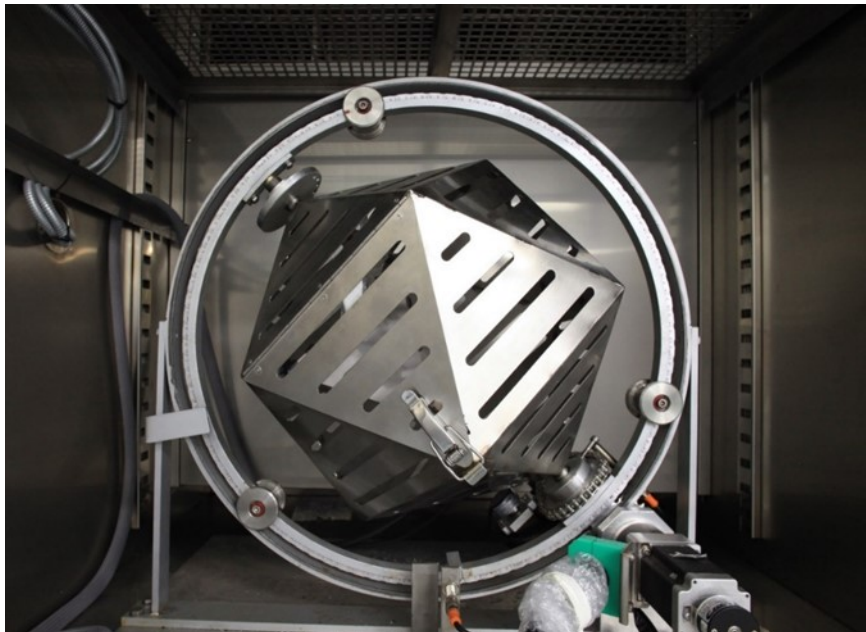


Figura 3.11 Camera di calibrazione a temperatura controllata.

3.2.1.4 Test per valutare l'affidabilità del sistema radio e la dipendenza dei sensori alle variazioni di temperatura.

Per testare l'affidabilità delle periferiche radio scelte nel mantenere la connessione a lungo termine si è effettuato un test in laboratorio. La prova è stata eseguita su due moduli BPM prototipali (DT0002 e DT0004) successivamente installati nel sito pilota di Vobarno (Capitolo 4). I dispositivi sono stati posizionati in laboratorio ad una distanza dalla centralina di acquisizione rispettivamente di 24 e 37 metri. L'avvio del test è avvenuto il 22/12/2018. Successivamente le periferiche sono state interrogate con una frequenza oraria per 18 giorni consecutivi. Ad ogni lettura i valori sono stati registrati su una scheda di memoria di tipo SD. Durante il test non sono state registrate disconnessioni dei moduli dalla rete o errori durante l'invio dei dati. Inoltre, analizzando i valori campionati, si è confermata la maggiore dipendenza del segnale della cella elettrolitica alle variazioni di temperatura. Infatti, a differenza del sensore MEMS, nella formula di calibrazione dell'ampolla non avviene la correzione in temperatura. La variazione angolare massima dichiarata dai produttori del sensore risulta essere di 0.00617° , per una variazione di temperatura pari a un grado. Per cui, ipotizzando un'escursione termica stagionale in sito pari a 50°C , la variazione angolare stimata risulta essere di 0.308° , valore accettabile per l'applicazione. Durante il test, inoltre, la dipendenza del sensore dalla temperatura è risultata inferiore e pari a $0.0008^\circ/\text{C}$.

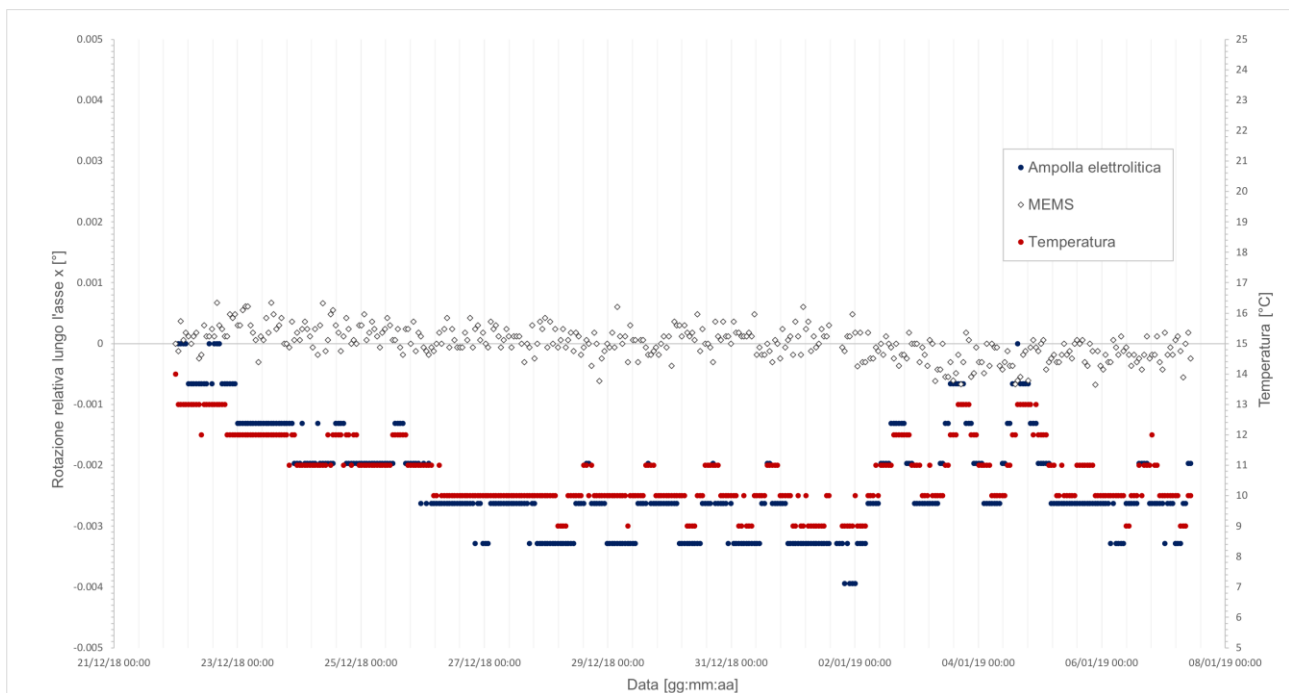


Figura 3.12 Rotazione angolare lungo l'asse x letta dal sensore MEMS e dall'ampolla elettrolitica posti nel modulo BPM DT0002 e temperatura misurata durante il test.

3.2.2 Cella di carico - Load Link

Le celle di carico sono dispositivi pensati per convertire forze in segnali elettrici. Vengono comunemente impiegate nel settore geotecnico per monitorare lo stato tensionale a cui sono sottoposte le centine di una galleria durante le fasi di costruzione o la forza a cui sono sottoposti i tiranti in paratie (Segalini et al., 2018). Tali dispositivi, inoltre, vengono utilizzati durante i test di certificazione a cui sono sottoposte le barriere paramassi, prima di essere distribuite sul mercato, per la valutazione del carico agente sulle fondazioni (Spaggiari, 2018). Si possono suddividere in base alla metodologia di funzionamento, alla tipologia di forza monitorata e naturalmente alle caratteristiche tecniche (risoluzione, portata ecc.). Le principali celle di carico presenti sul mercato sono di tipo meccanico (idrauliche o pneumatiche) o di tipo elettrico (capacitive o estensimetriche).

La cella di carico integrata nel sistema Rockfall Safety Network è di tipologia estensimetrica e denominata Load Link. Lo sviluppo della stessa è avvenuto in due fasi. Inizialmente è stata progettata la struttura della cella, successivamente si è passati alla selezione degli estensimetri e alla realizzazione del circuito elettrico. In Figura 3.13 sono rappresentate tre tipologie di celle di carico a trazione.



Figura 3.13 Esempi di celle di carico a trazione. I primi due modelli consentono di effettuare misure di carico di piccola entità grazie agli intagli presenti nella struttura che ne favoriscono la deformazione.

3.2.2.1 Progettazione della struttura della cella

Durante la progettazione della struttura che ospita i sensori estensimetrici della cella Load Link si è tenuto conto di diversi aspetti tra i quali:

- La forza massima da misurare (fondo scala della cella);
- La risoluzione richiesta;
- La metodologia di installazione;
- La tipologia, il numero e lo schema di collegamento degli estensimetri;
- La funzione della cella (strutturale/non strutturale);

3.2.2.1.1 Carico di progetto

In commercio esistono diverse tipologie di barriere paramassi che si suddividono a seconda delle dimensioni e a seconda dell'energia che sono in grado di dissipare e di conseguenza dei carichi a cui sono sottoposti i tiranti e che dovrà sopportare la cella di carico. Per questo motivo la progettazione del corpo della cella è fortemente legata alla tipologia di barriera in cui verrà installata, a differenza del modulo BPM che può essere adattato a molteplici modelli. Nel presente paragrafo verrà illustrato lo sviluppo del primo prototipo appositamente progettato per essere integrato nelle barriere modello RAV_8/A da 5000 kJ prodotte dalla ditta Incofil Tech S.r.l.

Un nuovo modello di barriera paramassi, prima di poter essere commercializzato, deve superare diversi crash test in scala reale che sono regolamentati dalla normativa EOTA ETAG 027. Durante la procedura di certificazione vengono raccolti dati utili come il carico sulle fondazioni e l'inclinazione dei montanti prima e dopo l'impatto. Il crash test consiste nel far impattare la struttura paramassi da un blocco omogeneo e regolare, di peso definito, avente nell'istante dell'impatto una velocità maggiore o uguale a 25 m/s. La normativa EOTA prevede che la barriera sia sottoposta a due test distinti:

- Test MEL (Maximum Energy Level): viene effettuato un lancio avente un'energia uguale o superiore alla massima energia nominale sopportabile dalla barriera.
- Test SEL (Service Energy Level): vengono effettuati due lanci successivi aventi un'energia pari a 1/3 del MEL. Tra i due crash test non possono essere effettuate operazioni di manutenzione se non la rimozione del masso dalla rete.

Da sottolineare che il campo prove può essere di tipo verticale o inclinato. La norma EOTA, in base ai risultati ottenuti dai test, classifica le barriere in funzione del livello di energia di servizio (Tabella 3.4). Per ulteriori informazioni in merito alle procedure di test si consiglia di consultare tale normativa.

Tabella 3.4 Livello di servizio di una barriera in funzione dell'energia sopportata durante i test MEL e SEL.

Classificazione energia di servizio	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL [kJ]	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL [kJ] ≥	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

Durante i test di certificazione della barriera RAV_8/A 5000 kJ è stato disposto in ogni controvento di monte un apparato a controllo del carico per un totale di 11 celle di carico. Con i dati a disposizione si è definito il fondo scala della cella da realizzare. Da sottolineare che l'introduzione del dispositivo di controllo del carico nel sistema Rockfall Safety Network è avvenuta con l'obiettivo di individuare:

1. L'aumento della forza di trazione sui controventi di monte dovuta ad un accumulo di materiale nella rete che, nel depositarsi, non ha attivato il sistema frenante (bassa energia di impatto);
2. Il carico residuo agente sui controventi di monte a seguito di un impatto avente energia massima pari a quella di servizio.

Date queste considerazioni il carico di progetto scelto per il dimensionamento è risultato pari al valore massimo di trazione registrato durante i due test SEL che è stato suggerito dalla società Incofil Tech S.r.l. essere pari a 135.7 kN. Siccome la cella non è pensata per avere funzione strutturale e resistere ad un impatto pari al valore energetico del test MEL, la sua installazione è prevista in parallelo ad un sistema di Bypass concepito per entrare in funzione in caso di rottura della stessa. In ogni caso, il sistema RSN è in grado di individuare impatti caratterizzati da un'energia superiore a quella di servizio che sono identificabili da un allungamento del freno e da una relativa ingente rotazione del montante misurata dal sensore MEMS e dall'ampolla elettrolitica.

3.2.2.1.2 Materiale utilizzato

Il materiale impiegato per la realizzazione della cella è l'acciaio 39NiCrMo3 la cui composizione chimica è rappresentata in Tabella 3.5.

Tabella 3.5 Composizione chimica dell'acciaio 39NiCrMo3.

C%	Si max%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0.35-0.43	0.40	0.50-0.80	0.025	0.035	0.60-1.00	0.15-0.25	0.70-1.00

La lega 39MiCrMo3 è un acciaio di tipo legato che risulta essere particolarmente indicato per la realizzazione di celle di carico grazie alla sua elevata deformabilità a caldo e a freddo e allo stesso tempo elevata resistenza anche in celle caratterizzate da sezioni relativamente grandi. Nella Tabella 3.6 sono riassunte le principali proprietà meccaniche del materiale tra cui la resistenza massima a trazione e la tensione di snervamento.

Tabella 3.6 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio 39MiCr4Mo3.

Materiale EN	Diametro [mm]	Resistenza a trazione [MPa]	Tensione di snervamento [MPa]	Allungamento [%]	Modulo elastico [MPa]
39MiCrMo3	0-16	980 - 1180	785	11	203000
	16-40	930 - 1130	735	11	203000
	40-100	880 - 1080	735	12	203000

3.2.2.1.3 Dimensionamento della struttura della cella

Durante l'impatto di un masso sulla barriera nei tiranti di monte si sviluppano sollecitazioni meccaniche monoassiali di tipo normale che hanno origine da forze di trazione. I tiranti infatti hanno la funzione di canalizzare le forze che si generano sui montanti verso i dispositivi frenanti che hanno a loro volta il compito di dissiparle.

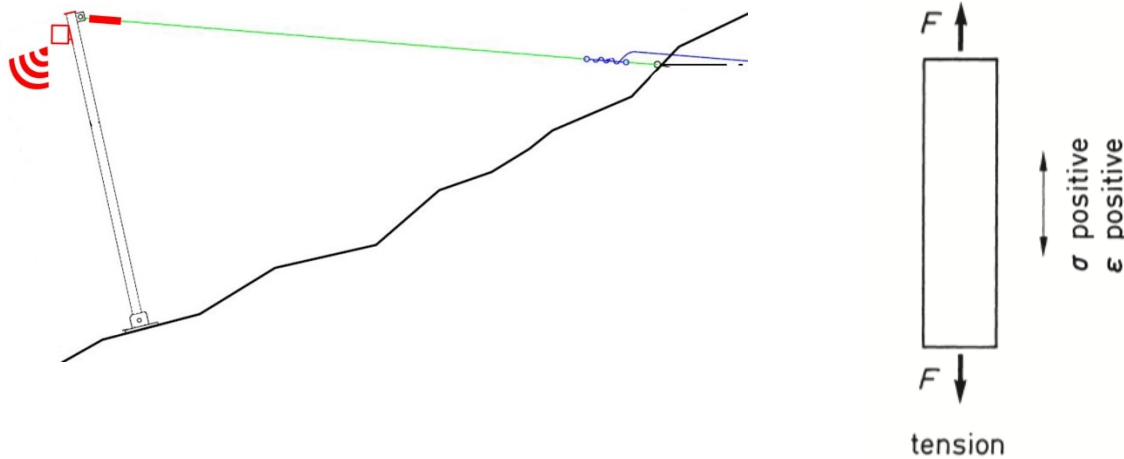


Figura 3.14 Nell'immagine di sinistra viene rappresentata la posizione di installazione della cella di carico sulla barriera. Il dispositivo risente unicamente delle forze di trazione che agiscono sui controventi di monte.

La cella di carico essendo installata tra il montante e il controvento di monte risente anch'essa di forze principalmente monoassiali normali. La corretta progettazione di un dispositivo a controllo di forza prevede di individuarne la migliore geometria in modo tale da registrare il carico di progetto rimanendo nel campo elastico del materiale selezionato. Gli acciai di tipo legato sono caratterizzati solitamente da una risposta alle sollecitazioni di trazione che è sintetizzata dal diagramma sforzi-deformazioni in Figura 3.15.

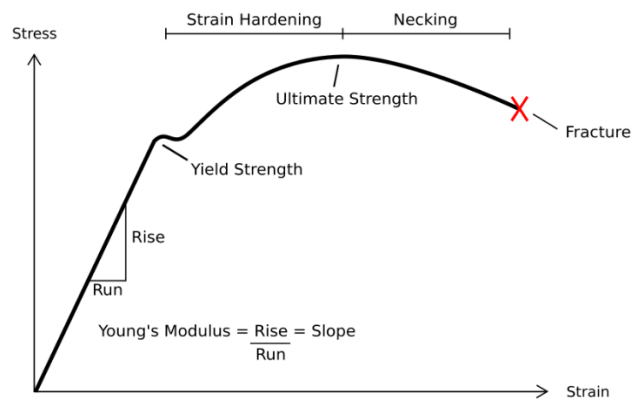


Figura 3.15 Diagramma sforzi deformazioni per acciai di tipo legato.

Come si evince dal grafico, per carichi di trazione inferiori a quello di snervamento, la risposta in termini di deformazioni è di tipo elastico. Superato tale limite si entra nel regime di perfetta plasticizzazione dove, a carico costante, avvengono deformazioni consistenti ed infine, si può notare un tratto di incrudimento dove si può distinguere un aumento delle sollecitazioni legato ad una consistente crescita delle deformazioni fino al raggiungimento del carico massimo o carico di rottura. Il carico di rottura, per definizione, è la sollecitazione massima sopportabile dal materiale preso in considerazione. Il materiale 39MiCrMo3, impiegato per il confezionamento della cella, è caratterizzato da un carico di snervamento che è pari a 735 MPa per diametri compresi tra 40 e 100 mm e da un carico di rottura che varia da 880 – 1080 MPa.

Per poter definire un diametro di primo tentativo si è inizialmente ipotizzato di realizzare la cella di forma cilindrica e individuarne il carico di snervamento al variare dell'area (Tabella 3.7) con la seguente formula:

$$F_{sn} = \sigma_{sn} \cdot A \quad [3.10]$$

Dove:

- F_{sn} è la forza di snervamento del provino cilindrico avente area A ;
- σ_{sn} è la tensione di snervamento dell'acciaio 39MiCrMo3 in kPa;
- A è l'area della cella di forma cilindrica in metri quadrati;

Tabella 3.7 Forza di trazione di snervamento al variare dell'area del corpo della cella, ipotizzato cilindrico.

Diametro [m]	Area [m²]	Tensione snervamento [kPa]	Forza di snervamento [kN]
0.01	7.85398E-05	785000	61.65375583
0.02	0.000314159	735000	230.90706
0.03	0.000706858	735000	519.5408851
0.04	0.001256637	735000	923.6282402
0.05	0.001963495	735000	1443.169125
0.06	0.002827433	735000	2078.16354

Per la realizzazione dei primi prototipi si è scelto di adottare un diametro di 5 cm in modo da evitare lavori di tornitura sulle barre a disposizione di forma cilindrica e caratterizzate da tale geometria.

In base al diametro scelto, conoscendo il modulo elastico che è pari a 203000 MPa, sono state calcolate le deformazioni elastiche subite dal provino cilindrico sottoposto a carichi di trazione compresi nel campo di lavoro previsto (0 – 140 kN). In Figura 3.16 è rappresentato l'andamento delle deformazioni previste in funzione del carico calcolate mediante la seguente formula:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} \quad [3.11]$$

Dove:

- ε_i è la deformazione subita dal provino cilindrico avente area 19.63 cm² sottoposto ad una forza F_i ;
- σ_i è lo sforzo stimato generato nel provino cilindrico sottoponendolo ad una forza F_i ;
- E è il modulo elastico del materiale impiegato per la realizzazione della cella.

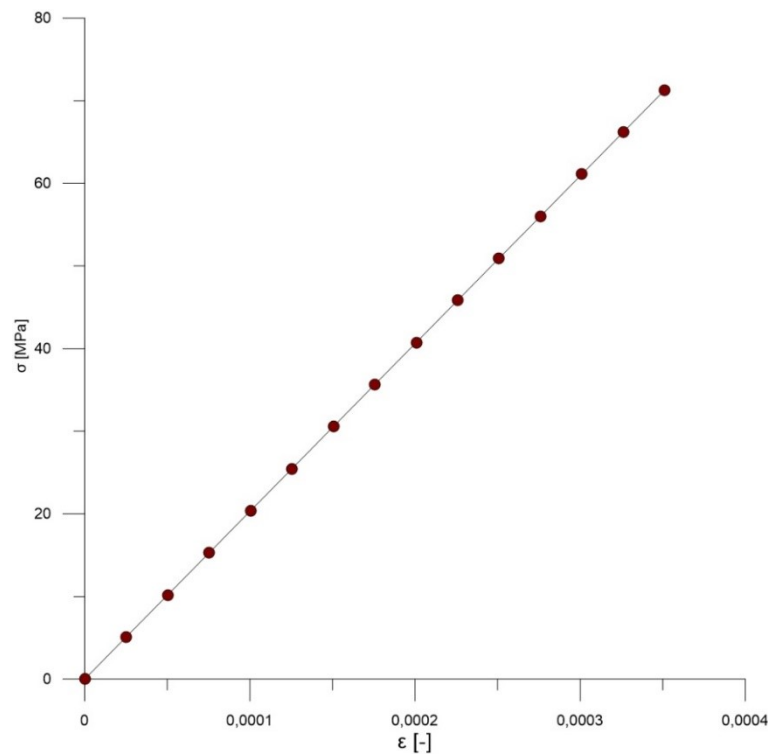


Figura 3.16 Grafico sforzi-deformazioni stimato per una cella avente forma cilindrica e diametro 5 cm.

In base alle deformazioni stimate si è calcolato il segnale in uscita da un eventuale circuito estensimetrico a ponte di Wheatstone applicato alla cella con la seguente formula:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad [3.12]$$

Dove:

- V_0 è il segnale in mV;
- V_S è la tensione di alimentazione del circuito prevista pari a 5 V;
- k è una costante caratteristica degli estensimetri impiegati;
- ε_1 è la deformazione in direzione longitudinale della cella letta dall'estensimetro 1;
- ε_2 è la deformazione in direzione trasversale della cella letta dall'estensimetro 2;
- ε_3 è la deformazione in direzione longitudinale della cella letta dall'estensimetro 3;
- ε_4 è la deformazione in direzione longitudinale della cella letta dall'estensimetro 4.

La posizione degli estensimetri sulla cella e la definizione del parametro k verranno affrontati nei successivi paragrafi. L'andamento del segnale in funzione del carico applicato e degli sforzi è sintetizzato in Figura 3.17.

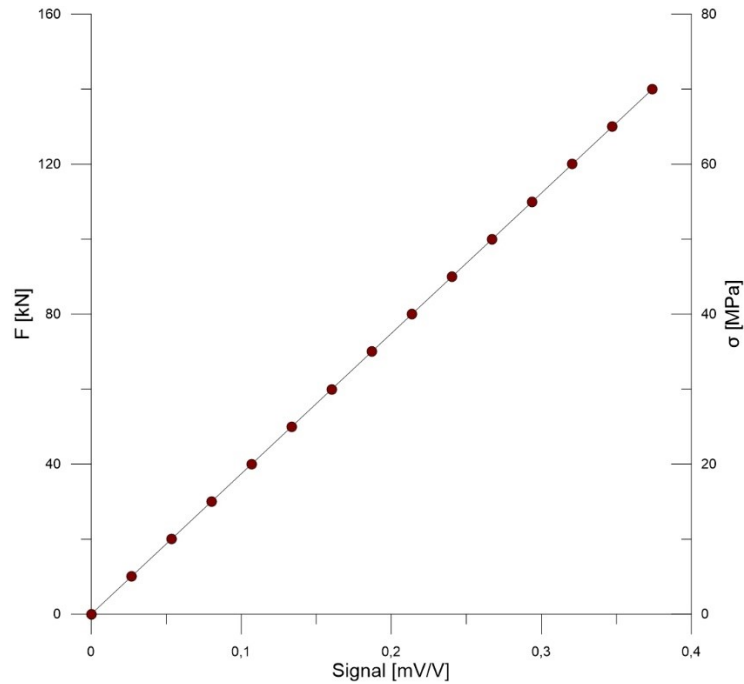


Figura 3.17 Andamento del segnale in uscita dal ponte di Wheatstone stimato in funzione del carico applicato e degli sforzi nella cella.

Come si denota dal grafico, il segnale in uscita dall'estensimetro ha un'entità massima di 0.37 mV/V, valore accettabile considerando che il sistema di acquisizione è pensato per misurare valori nel dominio compreso tra 0 e 2 mV/V. La cella così pensata, di forma cilindrica, è in grado di misurare valori di carico fino a 750 kN rimanendo nel campo di deformazioni elastiche del materiale e nel campo di misura dell'unità di acquisizione.

Il collegamento della cella alla barriera è previsto mediante l'impiego di 2 grilli di dimensioni nominali 3/4. Al fine di permettere ed agevolare l'inserimento del grillo di collegamento, il corpo della cella è stato sagomato come in Figura 3.18 ed inoltre sono stati realizzati due fori di diametro 28 mm alle due estremità del corpo della stessa.

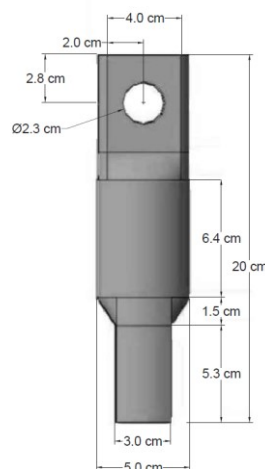


Figura 3.18 Geometria della cella di carico.

Come previsto il duplice intaglio e la realizzazione dei due fori ha provocato l'instaurarsi di zone di debolezza caratterizzate da forze massime di snervamento inferiori rispetto alla zona centrale cilindrica. Per analizzare nel dettaglio tali porzioni e per effettuare un'analisi maggiormente approfondita delle tensioni attese nelle zone di applicazioni degli estensimetri si è realizzato un modello numerico impiegando il codice commerciale ad elementi finiti Straus7. Come si può evincere dalla Figura 3.19 nel modello la cella è orientata con il lato maggiore in direzione parallela all'asse z.

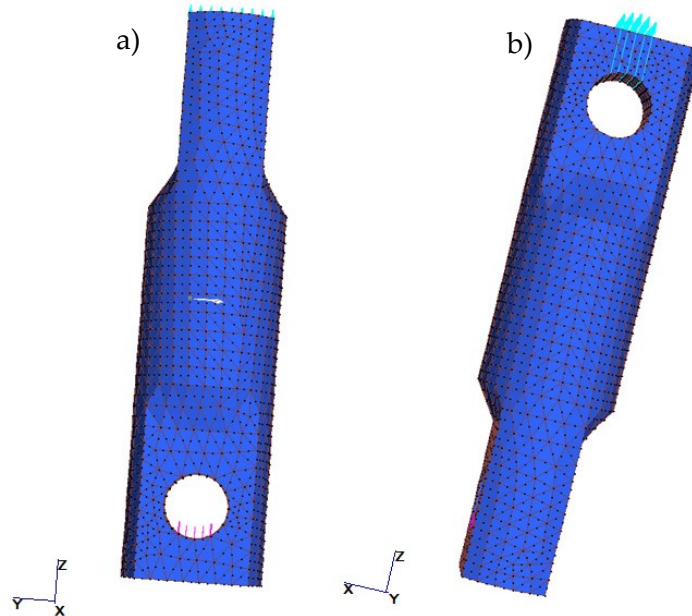


Figura 3.19 Per simulare il carico di trazione sul corpo della cella è stata applicata una forza in direzione z distribuita sulla superficie interna del foro sommitale, mentre nella superficie interna del foro inferiore sono stati applicati dei vincoli di contrasto. a) Corpo della cella nel piano ZY b) Corpo della cella nel piano ZX.

Per simulare il carico agente sulla cella è stata applicata una forza distribuita nella superficie interna del foro superiore della cella, avente direzione parallela e verso concorde all'asse z e modulo pari a 140 kN, fondo scala definito. Nel foro opposto al contrario sono stati inseriti degli elementi vincolari a contrasto della forza applicata per simulare l'effetto della fondazione.

Il modello è stato discretizzato mediante una mesh automatica avente 13685 nodi. Dall'analisi di tipo lineare elastica si è notato che in prossimità dei fori le tensioni fossero nettamente superiori rispetto al centro della cella (Figura 3.20)(Figura 3.21). Nel punto di applicazione della forza distribuita si può notare una piccola porzione compressa caratterizzata da valori massimi in termini di sforzi pari a 883 MPa che però, essendo confinata alle immediate vicinanze al foro, difficilmente può portare a rottura la cella. Al contrario, l'applicazione della forza genera due fasce di trazione che hanno origine dagli estremi del foro e si propagano verso la superficie esterna della cella (Figura 3.22)(Figura 3.23). Ad un carico pari a 140 kN corrisponde uno sforzo massimo identificato in tali zone pari a 613 MPa. Tale valore risulta inferiore rispetto alla tensione di snervamento del materiale per cui le deformazioni, in questo caso, rimangono in campo elastico e non compromettono il corretto funzionamento della cella. Il modello prevede che tali zone entrino in regime di plasticizzazione a partire da carichi aventi modulo pari a 167 kN. Dal punto di vista strutturale, ipotizzando una tensione di rottura pari a 980 Mpa, la forza massima di trazione sopportabile dalla cella risulta essere pari a 225 kN.

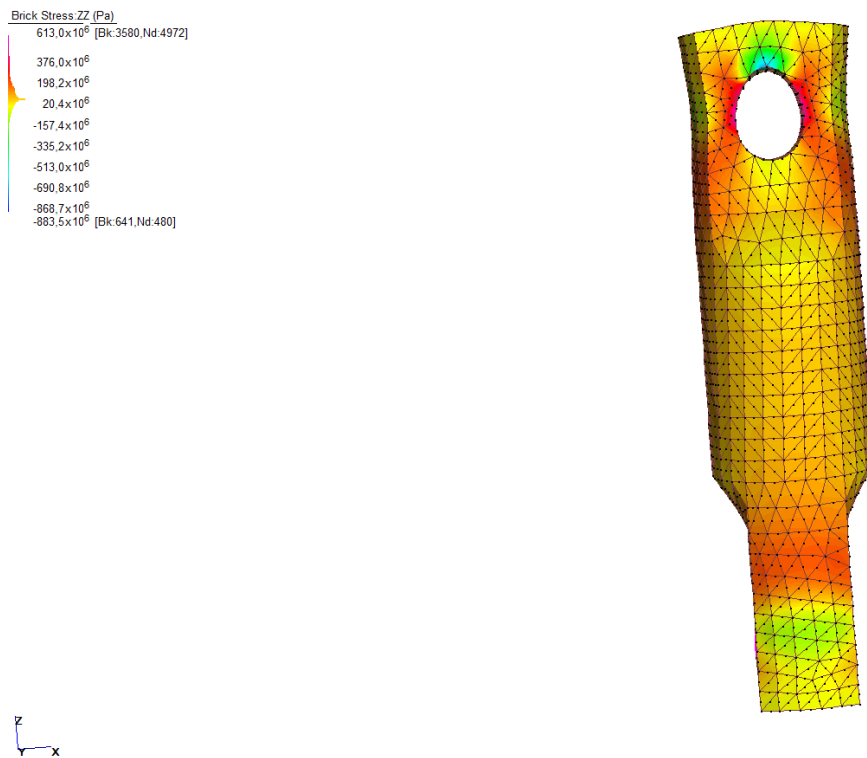


Figura 3.20 Sforzi di trazione nella cella lungo la direzione di applicazione della forza.

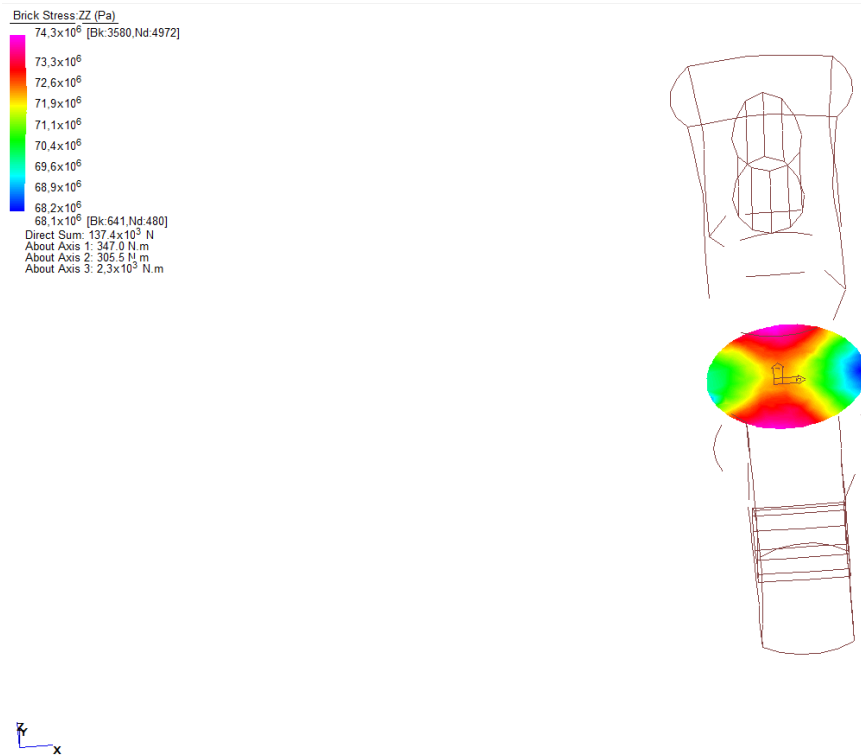


Figura 3.21 Sforzi di trazione nella sezione trasversale della cella.

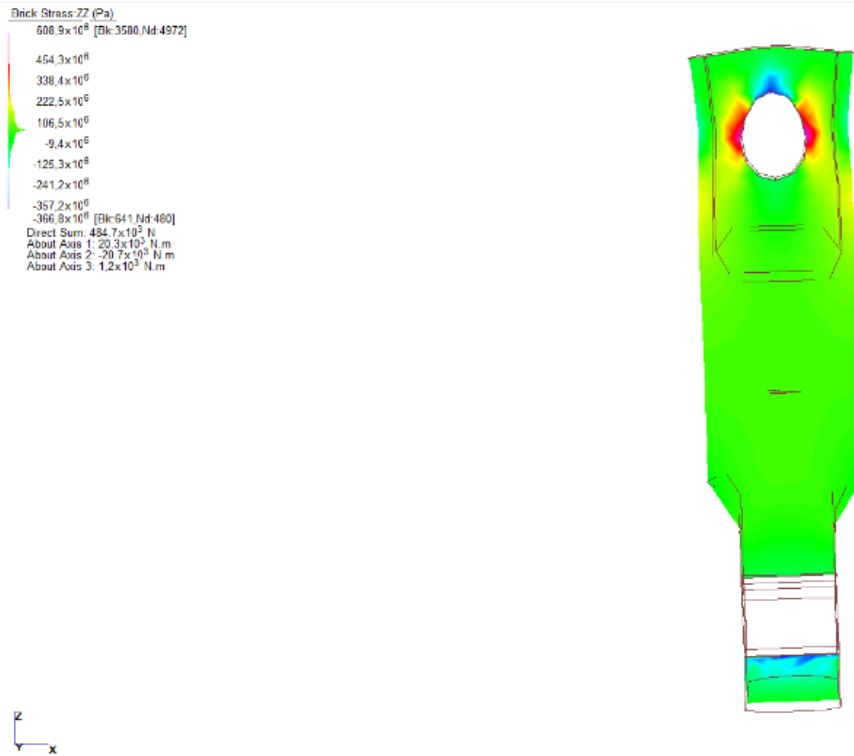


Figura 3.22 Sforzi rilevati nella sezione longitudinale XZ passante per il centro della cella.

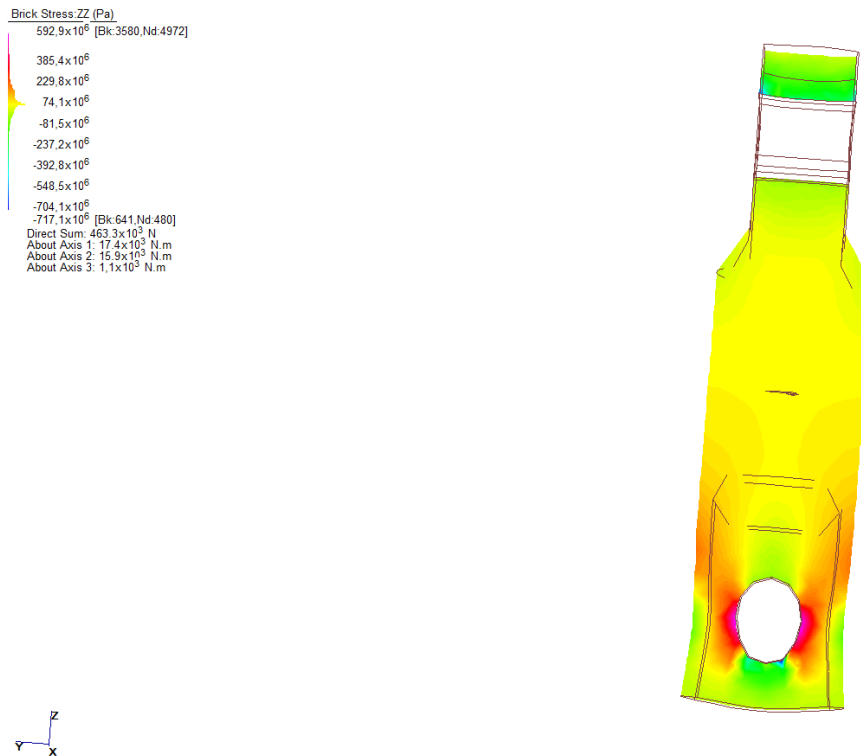


Figura 3.23 Sforzi rilevati nella sezione longitudinale YZ passante per il centro della cella.

3.2.2.1.4 Sistema di Bypass

Il collegamento della cella Load Link alla struttura avviene mediante un apposito bypass progettato dalla ditta Incofil Tech S.r.l. (Figura 3.24). Come si può notare l'apparato è composto in sequenza a partire dal montante da un duplice grillo a omega con perno a vite, avente dimensione nominale 7/8 (Figura 3.25), collegato a due grilli DN 3/4 necessari per il collegamento della cella. All'estremità opposta della cella è presente un solo grillo DN 3/4 e due grilli DN 7/8 necessari per il collegamento al controvento di monte. Nella connessione è stato inserito un doppio cavo in acciaio passante tra il secondo e il sesto grillo come ulteriore elemento di sicurezza.



Figura 3.24 Sistema bypass progettato dalla ditta Incofil Tech per ospitare la cella di carico Load Link.

Dimensione nominale [Inch]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	Peso [Kg]
3/4	31.8	22.4	71.5	19.1	51	46	1.07
7/8	36.6	25.4	84	22.4	58	53	1.64

Figura 3.25 Caratteristiche geometriche dei morsetti ad omega con perno a vite impiegati per la realizzazione del sistema bypass.

3.2.2.2 Selezione estensimetri e schema di collegamento

Gli estensimetri, chiamati comunemente con il termine anglosassone *Strain Gauges*, sono sensori che consentono la misura della deformazione superficiale di un elemento meccanico che viene sottoposto ad uno stato di sollecitazione causato dall'applicazione di forze esterne. In commercio ne esistono di diverse tipologie che si differenziano a seconda del principio di funzionamento in piezoelettrici, capacitivi, a semiconduttore, elettrici a resistenza, fotoelastici. In questo elaborato verranno trattati principalmente i microcircuiti elettrici a resistenza che sono gli estensimetri impiegati per la realizzazione della cella Load Link. La selezione degli estensimetri e dello schema di collegamento dipende dal problema in esame (Hoffmann, 1978). Karl Hoffman ha sintetizzato in una tabella (Tabella 3.8) gli aspetti da tenere in considerazione durante tale processo (Kark Hoffman, 2001). Nella medesima tabella, nella colonna 4, sono riportate le caratteristiche della cella Load Link relative alle indicazioni dettate dall'autore.

Tabella 3.8 Aspetti da tenere in considerazione durante la scelta degli estensimetri (Modificata da (Kark Hoffman, 2001)).

Problema di misura	Primario	Misura delle deformazioni	Il problema di misura è di tipo primario; vengono misurate le deformazioni a cui è sottoposto il corpo della cella.
	Secondario	Analisi sperimentali, Progettazione trasduttori, monitoraggio impianti	
Condizioni meccaniche nel punto di misura	Tipo di sforzo	Monoassiale, biassiale Principali direzioni di sforzo note o non note	Il tipo di sforzo è monoassiale e le principali direzioni di sforzo sono note.
	Distribuzione delle sollecitazioni	Omogenea, disomogenea	La distribuzione delle sollecitazioni nella zona di misura è pressoché omogenea.
	Tipo di carico	Statico (Entità, direzione, numero di carichi)	Dinamico (Impulsivo, stocastico, ciclico, carico variabile). Numero di cicli di carico Misure riferite o non riferite allo zero
Condizioni ambientali	Durata del monitoraggio	Singola misura, breve termine, misure ripetute per un breve periodo di tempo, lungo termine, durata di esercizio richiesta.	La tipologia di monitoraggio è a lungo termine; si prevede una durata dei dispositivi di almeno dieci anni.
	Temperatura	Temperatura alla quale verrà posta la cella di carico, tasso di variazione.	La cella verrà installata in siti con temperature variabili da -10° a +40°.
	Presenza di effetti di disturbo	Intensità degli effetti di disturbo, durata effettiva	I principali effetti di disturbo potrebbero essere causati da precipitazioni atmosferiche (pioggia, grandine, neve e formazione di ghiaccio). Inoltre, essendo i dispositivi installati sui montanti in acciaio non si esclude la presenza di disturbi causati da fulmini.
	Presenza di: Umidità, acqua, acqua in pressione, precipitazioni nevose, formazione di ghiaccio		
	Presenza di oli (olio per trasformatori, paraffina) o prodotti chimici		
	Il dispositivo è sottoposto a pressioni		
	Presenza di disturbi causati da: campi elettrici, campi magnetici, trasferimento istantaneo di energia (Fulmini ecc.), radiazioni.		
	Presenza di possibili forze esterne che agiscono sul dispositivo (impatti, pressione del suolo)		
Condizioni elettriche	Circuito di misura	Quarto di ponte, circuito a tre fili, mezzo ponte, doppio quarto di ponte, ponte completo	Il circuito di misura scelto è il ponte di Wheatstone completo al fine di eliminare gli effetti di disturbo dovuti alla variazione di temperatura. L'alimentazione è diretta e continua tramite un sistema a batterie. Il cavo di collegamento utilizzato è di tipo schermato e resistente agli effetti atmosferici.
	Tipologia di alimentazione strain gauges		
	Cavo utilizzato	Lunghezza, resistenza agli effetti atmosferici.	
Condizioni di impiego	Materiale impiegato	Lavorabilità del materiale, proprietà di incollaggio	Il materiale impiegato è il 39NiCrMo3, è facilmente lavorabile e caratterizzato da buone proprietà di incollaggio.
	Condizioni spaziali estensimetro	Cavo - Agente di copertura - Tappi di protezione	Gli estensimetri sono protetti mediante uno strato di silicone e una guaina di termorestringente.

3.2.2.2.1 Principio di funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza

Gli estensimetri elettrici sono composti da una griglia resistiva che viene annegata o fotoincisa in un foglio di supporto e collegata a due terminali che permettono il collegamento al circuito elettrico di alimentazione (Figura 3.26). Gli estensimetri sono pensati per essere incollati su di un componente meccanico di cui si vuole misurare lo stato tensionale. L'applicazione di un carico sul componente meccanico genera delle deformazioni nello stesso. Gli estensimetri, essendo solidarizzati al componente mediante appositi collanti, subiscono anch'essi una conseguente deformazione.

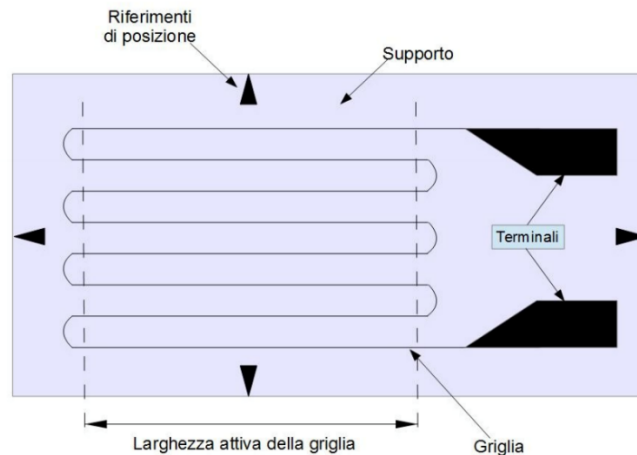


Figura 3.26 Rappresentazione di un estensimetro elettrico a resistenza.

La griglia è composta da un elemento resistivo cilindrico filiforme avente raggio r e lunghezza L . Nel momento in cui il componente meccanico viene sottoposto ad una forza di trazione F subisce una sollecitazione σ che è direttamente proporzionale alla forza applicata. Come conseguenza dell'applicazione del carico, inoltre, vi è un allungamento dell'elemento cilindrico di una quantità ΔL e una diminuzione della sua sezione trasversale. La deformazione per trazione ε (Strain) è data dal rapporto tra la variazione di lunghezza dovuto agli effetti di trazione ΔL e la lunghezza originale L .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{[m]}{[m]} \quad [3.13]$$

Come si può notare la deformazione è adimensionale poiché proviene dal rapporto tra due grandezze omogenee. Nonostante ciò, i valori di deformazioni sono comunemente seguiti da unità come m/m , $\mu m/m$ o $\mu\varepsilon$. Se le deformazioni sono contenute all'interno del campo elastico del materiale la sollecitazione può essere definita come il prodotto tra la deformazione e il modulo elastico del materiale.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad [3.14]$$

Ogni metallo è caratterizzato da una propria resistenza elettrica che varia nel caso in cui venga deformato. Un allungamento o un accorciamento rispettivamente aumenta o diminuisce la resistenza del materiale. Gli estensimetri elettrici a resistenza si basano su tale principio. La resistenza di un conduttore filiforme si definisce come:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad [3.15]$$

Dove:

- ρ rappresenta la resistività del materiale;
- l è la lunghezza della resistenza;
- A è l'area della sezione trasversale;

Se ipotizziamo, ad esempio, di avere un estensimetro di lunghezza L sottoposto ad un allungamento di trazione ΔL , tale deformazione genererà una variazione di resistenza dell'estensimetro ΔR che può essere scritta come:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_l \cdot \frac{\Delta L}{L} = K_l \cdot \varepsilon \quad [3.16]$$

Dove K_l rappresenta il Gauge factor o fattore di taratura e rappresenta la sensibilità dell'estensimetro. Tale coefficiente dipende dal materiale di cui è costituita la griglia; negli estensimetri di uso comune, realizzati con Constantana o Karma, è di circa 2 (Tabella 3.9).

Tabella 3.9 Materiali comunemente impiegati per la realizzazione di estensimetri e relativi fattori di taratura.

Materiali:	Fattore di taratura:	Allungamento massimo (%):
Constantana (Constantan)	2.1	1
Rame (Copper)	2.6	0.5
Platino (Platinum)	6.1	0.4
Argento (Silver)	2.9	0.8

Il Gauge Factor rappresenta il rapporto tra la variazione di resistenza sul valore della resistenza dell'estensimetro e la sua deformazione:

$$K_s = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad [3.17]$$

Per la realizzazione della cella di carico si è scelto di utilizzare estensimetri caratterizzati da una griglia in Constantana aventi un Gauge Factor pari a 2.13.

3.2.2.2.2 *Strato di supporto*

Un ulteriore elemento dell'estensimetro è lo strato di supporto che ha il compito di:

- Trasmettere le deformazioni della cella alla griglia;
- Isolare elettricamente la parte sensibile dell'estensimetro e i relativi collegamenti;
- Ospitare i terminali di collegamento alla griglia;

Il supporto può essere realizzato con differenti materiali che sono riassunti in Tabella 3.10. La scelta dipende dalle condizioni ambientali a cui verranno sottoposti gli estensimetri e al loro livello di protezione.

Tabella 3.10 Materiali impiegati per la realizzazione dei fogli di supporto che ospitano le griglie estensimetriche.

Materiale impiegato per la realizzazione del supporto:	Campo di temperatura ammesso: [°C]
Resina fenolica contenente fibra di vetro	-200 < T > +300
Resina epossidica contenente fibra di vetro	-270 < T > +230
Resina poliammidica contenente fibra di vetro	-200 < T > +330
Cemento ceramico	-200 < T > +750
Resina poliammidica	-200 < T > +200

Nel caso degli estensimetri adottati la trasmissione delle sollecitazioni e l'isolamento elettrico sono garantiti da una pellicola in poliammide che sigilla completamente il circuito resistivo.

3.2.2.2.3 *Lunghezza e valori di resistenza estensimetro*

I principali estensimetri in commercio sono caratterizzati da griglie aventi una resistenza caratteristica di 120 o 350 ohm. Gli estensimetri da 350 ohm sono più costosi ma permettono di ottenere migliori prestazioni in termini di pulizia del segnale dai rumori ma allo stesso tempo sono maggiormente sensibili ad interferenze di tipo elettromagnetico. Siccome in sito non sono previsti tali disturbi si sono adottate resistenze a 350 ohm.

3.2.2.2.4 *Geometria e tipologia estensimetri*

Gli estensimetri sono prodotti in varie forme e dimensioni. I principali parametri da tenere in considerazione durante la scelta, oltre ai materiali che lo costituiscono, sono la lunghezza della griglia, il numero di elementi sensibili e l'orientazione. La lunghezza della griglia può variare da 0.6 mm a 150 mm. La geometria va scelta in base ai seguenti criteri:

- **Spazio a disposizione sulla cella di carico per l'applicazione degli estensimetri.** Se l'area di applicazione degli estensimetri è sufficientemente grande si consiglia l'impiego di griglie con lunghezza compresa tra i 3 e i 6 mm (Kark Hoffman, 2001). Maggiore è la grandezza degli elementi sensibili minore è la possibilità di commettere errori di allineamento durante le operazioni di incollaggio. Da sottolineare che la sensibilità degli estensimetri non varia in base alla lunghezza della griglia.
- **Campo deformativo nella zona di misura.** Se il materiale e il campo deformativo nella zona di misura è pressoché omogeneo si può optare per l'implementazione di estensimetri con una griglia più contenuta inferiore ai 6 mm.

In base a tali criteri suggeriti si sono selezionati estensimetri lineari aventi lunghezza pari a 5 mm e larghezza 3.5 mm (Tabella 3.11).

Tabella 3.11 Tipologie di estensimetri in funzione della disposizione e del numero di griglie.

Configurazione:	Codice identificativo:	Immagine:
Linear SG	L	
Double SG	D	
Rosette with 2 measure grids	X	
Rosette with 3 measure grids	R	

3.2.2.2.5 Circuito estensimetrico

Gli estensimetri lineari selezionati sono stati disposti sulla cella in modo da realizzare un circuito a ponte di Wheatstone completo (Muller et al., 2010) alimentato con una tensione di 5 V. Il circuito è stato teorizzato nel 1843 dallo scienziato inglese Sir Charles Wheatstone e consente di individuare le variazioni relative di resistenza degli estensimetri con grande accuratezza.

Per formare il circuito sono necessari 4 estensimetri che fungono da resistenze R1, R2, R3 ed R4. Nella cella Load Link le resistenze R1 e R3 sono state poste in verticale lungo la direzione dove sono previste le deformazioni maggiori, ai due lati opposti della cella, mentre le resistenze R2 ed R4 sono state orientate ortogonalmente alle prime (Figura 3.27). Tale disposizione consente di compensare le deformazioni della cella dovute ad effetti termici. Nel corpo della cella come si può notare dalla medesima figura sono stati realizzati due intagli in modo da creare due zone planari che facilitassero l'incollaggio degli estensimetri.

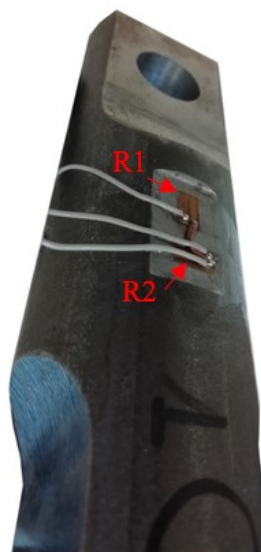


Figura 3.27 Disposizione degli estensimetri sulla cella di carico prototipale.

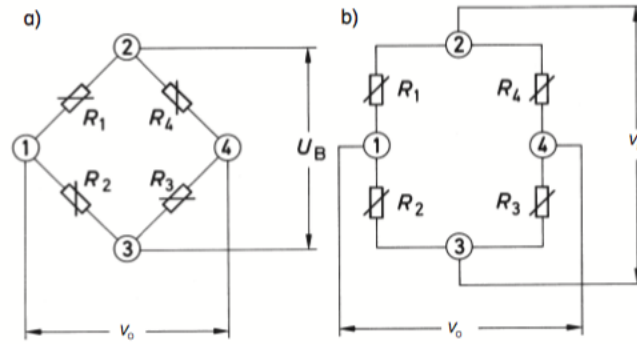


Figura 3.28 Nell'immagine sono rappresentati i due schemi con cui viene raffigurato il ponte di Wheatstone: a) Schema classico a rombo b) Schema semplificato.

Il circuito necessita di essere alimentato con una tensione in ingresso costante V_s . Il segnale in uscita V_0 che viene letto dai capi 2 e 3 risponde all'equazione che segue:

$$V_0 = V_s \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad [3.18]$$

Se il ponte di Wheatstone è bilanciato, cioè non vi sono deformazioni nella cella, il segnale in uscita dal ponte equivale a zero.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad [3.19]$$

Se tutti gli estensimetri subiscono una medesima deformazione vi è un incremento della resistenza delle griglie equivalente ΔR_n e la formula diviene:

$$V_0 = V_s \cdot \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) \quad [3.20]$$

Per poter effettuare delle misure di deformazioni utilizzando il ponte di Wheatstone le resistenze R_1 e R_2 e R_3 e R_4 devono essere uguali. Quindi avremo che:

$$R_1 = R_2 = R_1 \quad [3.21]$$

$$R_3 = R_4 = R_3 \quad [3.22]$$

$$V_0 = V_S \cdot \left(\frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4) - (R_3 + \Delta R_4) \cdot (2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2)}{(2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2) \cdot (2R_1 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right) \quad [3.23]$$

Nella formula estesa compaiono diversi termini $\Delta R_n \cdot \Delta R_n$ che rispetto agli altri termini risultano nettamente inferiori e quindi si possono eliminare senza incorrere in grossi errori. L'equazione diviene:

$$V_0 = V_S \cdot \left(\frac{R_1(\Delta R_3 + \Delta R_4) - R_1(\Delta R_1 + \Delta R_2) + 2R_3\Delta R_1 - 2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3 + 2R_1\Delta R_3 + 2R_1\Delta R_4 + 2R_3\Delta R_1 + 2R_3\Delta R_2} \right) \quad [3.24]$$

La formula può essere ulteriormente semplificata esaminando i valori del denominatore, infatti, $4R_1R_3$ risulta nettamente più grande rispetto agli altri termini che possono essere eliminati.

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{R_1\Delta R_3}{4R_1R_3} + \frac{R_1\Delta R_4}{4R_1R_3} + \frac{R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} + \frac{R_3\Delta R_2}{4R_1R_3} + \frac{2R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} - \frac{2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3} \quad [3.25]$$

Risolvendo l'equazione si ottiene:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{4R_3} - \frac{\Delta R_1}{4R_3} + \frac{\Delta R_2}{4R_1} + \frac{\Delta R_1}{2R_1} - \frac{\Delta R_4}{2R_3} \quad [3.26]$$

Che può essere scritta come:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad [3.27]$$

Sostituendo il termine:

$$\frac{\Delta R_n}{R_n} = k_n \cdot \varepsilon_n \quad [3.28]$$

Dove:

- ΔR_n è la variazione di resistenza dell'estensimetro n;
- R_n è la resistenza caratteristica dell'estensimetro che nel caso della cella Load Link è pari a 350 Ω .
- ε_n è la deformazione agente sull'estensimetro n;
- K_n rappresenta il Gauge factor dell'estensimetro n.

Si ottiene:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad [3.29]$$

Come si può notare dalla formula, se la cella subisce una deformazione assiale queste viene tradotta in un allungamento degli estensimetri R1 e R3 e in un conseguente sbilanciamento del ponte e variazione del segnale di output del circuito.

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} \cdot ((\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_1) - \varepsilon_2 + (\varepsilon_3 + \Delta\varepsilon_3) - \varepsilon_4) \quad [3.30]$$

Una deformazione dovuta alla temperatura nel caso di materiali omogenei genera una variazione di resistenza uguale in tutti gli estensimetri. Il circuito è stato pensato, come si può notare dalla formula sottostante, per compensare gli effetti dovuti alla variazione di temperatura.

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} \cdot ((\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_t) - (\varepsilon_2 + \Delta\varepsilon_t) + (\varepsilon_3 + \Delta\varepsilon_t) - (\varepsilon_4 + \Delta\varepsilon_t)) \quad [3.31]$$

3.2.2.2.6 *Protezione degli estensimetri*

Le barriere paramassi sono molto spesso localizzate in ambienti montani dove il clima rigido è caratterizzato da precipitazioni, anche a carattere nevoso, di forte intensità e da elevate escursioni termiche giornaliere e stagionali. Per tale motivo è stato necessario prevedere un sistema di protezione per gli estensimetri composto da uno strato di materiale siliconico neutro immediatamente a contatto con le resistenze a protezione dei circuiti e delle saldature, accoppiato con una guaina di materiale termorestringente avente uno spessore di 3 mm (Figura 3.29).

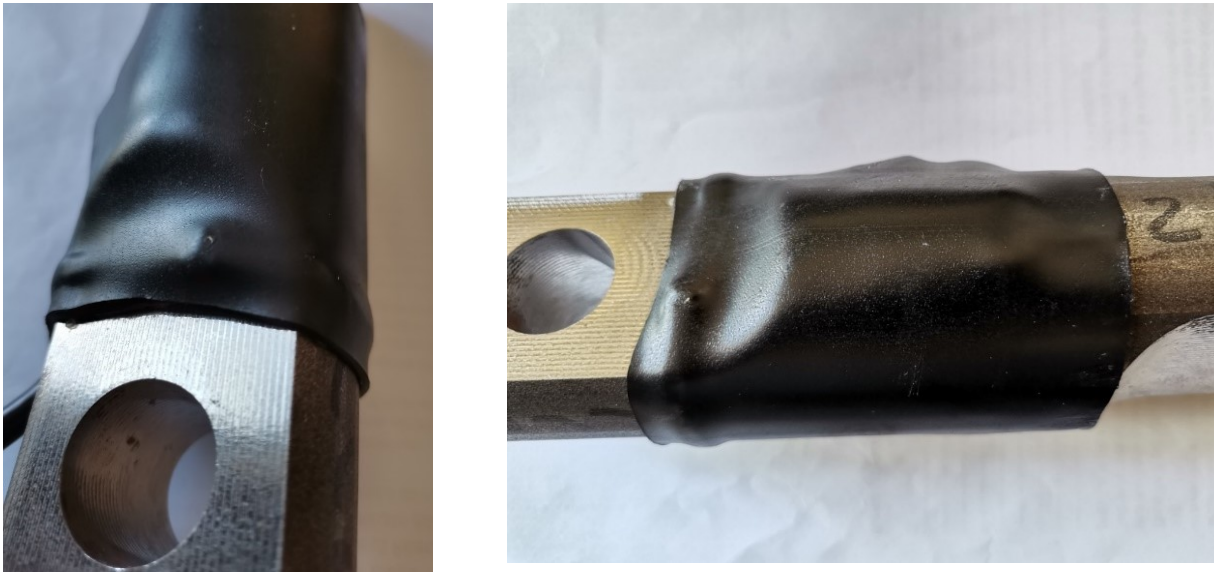


Figura 3.29 Guaina di protezione del circuito estensimetrico.

3.2.2.3 Calibrazione

La calibrazione delle celle è avvenuta applicando carichi di trazione noti al dispositivo e registrando in parallelo il valore in ADC in uscita dal sensore. Per imporre lo stato tensionale si è impiegata la macchina di trazione Metrocom UI 30 C avente fondo scala 300 kN e costituita da un telaio rigido avente una parte fissa e una mobile, il cui movimento è garantito da un circuito elettroidraulico (Tabella 3.12). La calibrazione delle celle è avvenuta per fasi:

1. Collegamento della cella alle ganasce della macchina di trazione mediante connettori appositamente realizzati;
2. Lettura di zero;
3. Aumento del carico da 0 a 175 kN, seguendo incrementi di 25 kN. La regolamentazione del carico è avvenuta leggendo i valori di una seconda cella integrata nel macchinario posta in serie e caratterizzata da una risoluzione di un ordine di grandezza superiore rispetto al dispositivo da calibrare.
4. Lettura del segnale di output della cella da calibrare in ADC in corrispondenza di ogni fase di carico. Per minimizzare i possibili errori ogni 25 kN sono state effettuate tre diverse letture mantenendo il carico costante.
5. Individuazione dei coefficienti di taratura mediante una regressione lineare.

La relazione tra i valori registrati dalla cella e i carichi applicati è risultata lineare (Figura 3.30), la formula di calibrazione impiegata è la seguente:

$$q_{kN} = q_{ADC} \cdot ca + int \quad [3.32]$$

dove:

- q_{kN} rappresenta il valore del carico in unità fisiche (kN);
- q_{ADC} rappresenta il valore del carico letto dalla cella Load Link in ADC;
- ca rappresenta il coefficiente angolare della funzione di calibrazione;
- int rappresenta l'intercetta della funzione di calibrazione.

Ogni cella è stata sottoposta a tre cicli di carico per valutare gli effetti di un eventuale isteresi che sono risultati trascurabili.

Tabella 3.12 Caratteristiche tecniche della macchina di trazione impiegata per la taratura delle celle.

Costruttore:	Metrocom
Modello:	UI 30 C
Matricola:	274767
Portata massima:	300 kN
Principio di funzionamento:	Elettroidraulico
Misuratore di pressione:	Trasduttore di pressione fondo scala 350 bar (AEP TP 14 matr. 134830)
Condizionatore di segnale:	A/D (CERMAC TAKSB 14 matr.14A19)
Generatore di pressione:	Pompa idraulica METROCOM ELT 300 (matr. 950294)

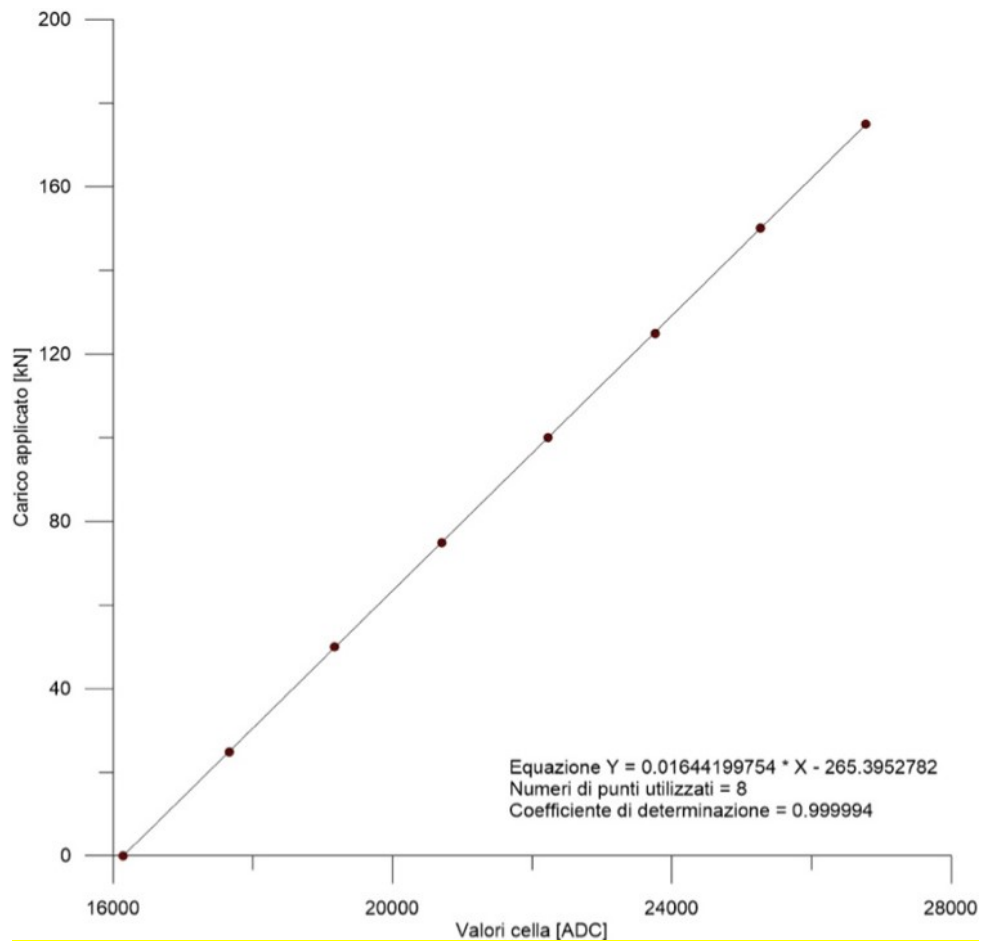


Figura 3.30 Formula di taratura della cella di carico Load Link DT0001.

3.2.3 Dispositivo Trigger Link

Il dispositivo Trigger, denominato Trigger Link, nasce dall'esigenza di rilevare nell'immediato un impatto sulla barriera e di far divenire il Rockfall Safety Network un sistema di allertamento. I moduli BPM accoppiati alle celle, infatti, sono funzionali all'ottenimento di informazioni giornaliere (1-2 lettura/e al giorno) ma allo stesso tempo non forniscono dati nell'immediato in merito ad eventi avvenuti nell'intervallo di tempo compreso tra due acquisizioni consecutive.

Il dispositivo Trigger consente di superare tale limite del sistema, individuando in real-time il superamento di un valore imposto sull'allungamento della rete di intercettazione. Il dispositivo è di tipo elettromeccanico ed è composto da un finecorsa appositamente installato all'interno di uno scatolare IP68 al quale è collegato una fune in acciaio da posizionare lungo la struttura (Figura 3.31).

Se un masso durante la caduta intercetta la rete ne determina un allungamento e di conseguenza la fune in acciaio viene posta in trazione. La forza viene trasferita al sensore finecorsa che mediante un sistema di tipo meccanico chiude un circuito. La centralina traduce tale impulso come evento critico ed è programmata per effettuare una lettura straordinaria dei sensori.

Il Trigger Link viene posto sul montante di estremità più vicino al datalogger e, a differenza dei moduli BPM, non necessita di alimentazione e comunica con la centralina mediante un cavo elettrico. Il finecorsa è fissato all'interno dello scatolare e posto in parallelo ad un sistema di molle che consentono di aumentare la forza di trazione necessaria per la chiusura del circuito. Il dispositivo impiegato nasce per applicazioni industriali ed è caratterizzato da una forza di attivazione di solamente 0.6 Kg. Mediante l'apparato impiegato tale valore è stato portato a 18 Kg.

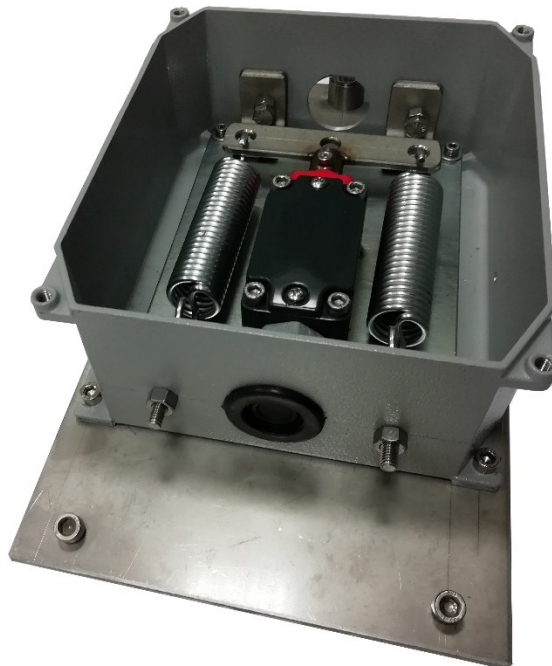


Figura 3.31 Trigger Link.

Il cavo in acciaio viene vincolato mediante morsetti al montante di estremità opposto e intrecciato alla rete primaria e secondaria lungo tutta l'estensione della barriera. L'estremità opposta della fune viene poi collegata al dispositivo Trigger Link (Figura 3.32).



Figura 3.32 Installazione del dispositivo Trigger Link.

3.2.4 Database MySQL e software di calcolo RSN

La gestione e lo storage dei dati grezzi provenienti dall'attività di monitoraggio avvengono su di un server locale mediante l'impiego di un database relazionale di tipo MySQL. L'applicativo consente di archiviare e organizzare i dati secondo tabelle aventi una struttura definita a priori. All'arrivo di un nuovo file sul server, dopo le operazioni di importazione e archiviazione dei dati grezzi, viene avviato in automatico il software RSN sviluppato in ambiente MATLAB® che consente di organizzare, validare ed elaborare i dati provenienti dal sistema di monitoraggio. Nel diagramma di flusso in Figura 3.33 vengono sintetizzate le funzioni principali del software. I file in arrivo sul database contengono al proprio interno una stringa contenente un duplice codice che identifica lo strumento di monitoraggio (DTxxxx) e la centralina di acquisizione (IDyyyy). La prima operazione effettuata dal software è quella di collegarsi al database dove, ad ogni codice strumento e codice centralina, sono associate informazioni che riguardano il numero di sensori presenti nello strumento, la tipologia ecc. Ad esempio, ad ogni singolo modulo BPM è collegato un codice DT0nnn che identifica uno strumento avente tre sensori (RSN Link, RSN Link HR e Load Link). Tale operazione è di fondamentale importanza per associare al singolo sensore l'algoritmo che verrà impiegato per il calcolo dei risultati. Successivamente vengono definiti i parametri di installazione che regolano:

- L'associazione dei dispositivi Trigger Link e BPM installati nella medesima barriera;
- La soglia assoluta misurata in gradi per l'attivazione degli allarmi;
- La soglia assoluta di carico, espressa in kN, per l'attivazione degli allarmi;
- Il valore di variazione ammesso del vettore risultante delle accelerazioni misurato dal sensore MEMS. Un valore di variazione puntuale (lettura meno lettura precedente) superiore al valore impostato attiva l'annullamento del dato;
- La temperatura massima oltre la quale i dati non sono più ritenuti attendibili;
- La temperatura minima al di sotto della quale i dati non sono più considerati attendibili.

La procedura è del tutto automatica e i valori vengono caricati nel software mediante un file di testo. Successivamente per ogni sensore avviene lo scarico dei parametri di calibrazione precedentemente caricati sul database e dei dati grezzi di monitoraggio (compresi i valori di batteria) a partire da una data successiva rispetto a quella di installazione, per ottimizzare i tempi impiegati per le operazioni di calcolo. I dati scaricati vengono organizzati in matrici e successivamente convertiti impiegando le formule di calibrazione [3.1] [3.9] e [3.32] descritte nei paragrafi precedenti. Nel caso del sensore MEMS, considerando che dal punto di vista trigonometrico un singolo valore di seno può riferirsi a due angoli differenti, è necessario discriminare queste due condizioni. Per fare questo ci si riferisce al segno dell'asse z , convenzionalmente positivo quando è diretto verso il basso. Si va a controllare che tale ipotesi sia verificata, altrimenti vengono applicate le appropriate correzioni a seconda del segno dell'angolo.

I due possibili casi vengono trattati come segue:

$$angREL_i > 0, z < 0 \quad \rightarrow \quad angREL_i = \pi - angREL_i \quad [3.33]$$

$$angREL_i < 0, z < 0 \quad \rightarrow \quad angREL_i = -\pi - angREL_i \quad [3.34]$$

Dove:

- $angREL_i$ è l'angolo relativo calcolato con la formula $angREL_i = \sin^{-1}(a_a)$.

Per quanto riguarda le ampole elettrolitiche è stato implementato un apposito algoritmo per individuare un eventuale fuori scala. Il difetto di questo tipo di sensore, infatti, è che se esce dalla scala da una parte (ad esempio sopra i 32768 ADC) rientra dall'altro lato (ad esempio -32768). Per evitare dunque che il software rilevi ampie rotazioni in direzione opposta che nella realtà non sono avvenuti, si controlla il segno alla data n e alla data $n-1$. Se i due segni sono diversi significa che i valori o sono in prossimità dello 0 o si è in presenza di un fuori scala. Per capire in quale situazione ci si trovi, vengono controllati i valori in punti ADC. Se sono superiori a 15000, si è di fronte ad un fuori scala. A questo punto si considera il segno alla data precedente ($n-1$) e si corregge la misura andando a sommare al fondo scala di segno corrispondente, la differenza tra questo valore e quello misurato dall'ampolla.

Per fondoscala positivo:

$$angolo_{corretto,ADC} = 32768 + (32768 + angolo_{ADC}) \quad [3.35]$$

Per fondoscala negativo:

$$angolo_{corretto,ADC} = -32768 + (-32768 + angolo_{ADC}) \quad [3.36]$$

Successivamente, a seconda dei sensori vengono effettuati controlli per validare il dato misurato. Nel caso in cui il valore non venga considerato attendibile viene scartato e sul database viene copiato il dato relativo alla data precedente e in una colonna a parte la lettura viene segnalata in errore.

I primi due filtri riguardano solamente il MEMS e sono necessari per identificare un possibile malfunzionamento del sensore o la necessità di ricalibrarlo. Il primo filtro controlla che la variazione della risultante di accelerazione sia inferiore ad un limite prestabilito. La formula utilizzata è quella proposta di seguito:

$$|ris_acc_j - ris_acc_{j-1}| < t_{acc} \quad [3.37]$$

dove:

- ris_acc_j rappresenta la risultante delle accelerazioni in corrispondenza della lettura j ;

- ris_acc_{j-1} rappresenta la risultante delle accelerazioni in corrispondenza della lettura $j-1$;
- t_{acc} rappresenta la tolleranza di variazione della risultante delle accelerazioni ammessa.

Il secondo filtro controlla che il valore assoluto della risultante delle accelerazioni del sensore MEMS sia compreso all'interno di un intervallo definito da due valori limite che per la prima applicazione sono stati impostati pari a 0.8 g e 1.2 g.

Sia il MEMS che l'ampolla elettrolitica hanno al loro interno un sensore di temperatura. La registrazione di un valore non coerente con la reale temperatura ambientale può essere indice di un'anomalia. Per cui è stato implementato un terzo filtro, sui dati di entrambi i sensori, che elimina i valori registrati corrispondenti a letture di temperatura che fuoriescono da un intervallo definito.

La centralina di acquisizione, in caso di anomalia durante l'interrogazione di un dispositivo, è configurata per scrivere una stringa al posto del valore numerico letto del sensore che riporta un codice a cui è associata una possibile problematica. Il quarto filtro presente nel software è stato introdotto per identificare tali stringhe e registrare il valore campionato come errore.

A seguito dei filtri è stato sviluppato un apposito processo di allertamento che verrà trattato nello specifico nel capitolo successivo.

L'ultima operazione compiuta dal software prima della scrittura dei dati sul database è quella di effettuare un controllo sulla batteria della centralina e dei moduli BPM. Se il valore di carica risulta inferiore ad una soglia definita, in automatico, viene inviata una e-mail ai responsabili delle attività di monitoraggio.

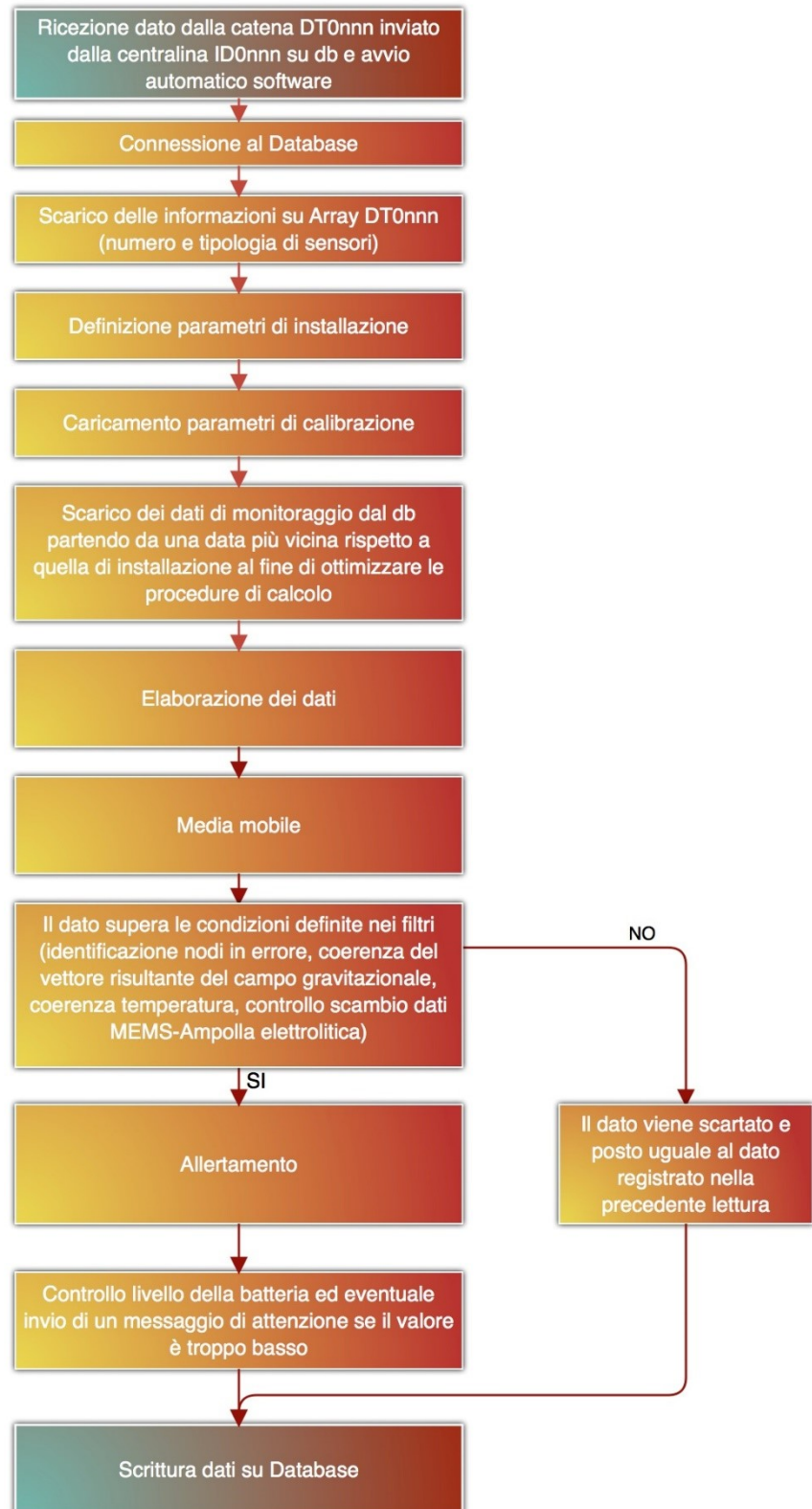


Figura 3.33 Diagramma di flusso del software RSN, applicativo sviluppato in Matlab®, che consente l'organizzazione, la validazione e l'elaborazione dei dati di monitoraggio registrati dal sistema Rockfall Safety Network.

3.2.5 Piattaforma di rappresentazione web

La rappresentazione dei dati provenienti dall'attività di monitoraggio avviene mediante una piattaforma web dinamica. Nella schermata principale viene visualizzata una mappa da cui è possibile ottenere informazioni riguardanti la dislocazione geografica del sito (Figura 3.34) e un disegno in pianta in cui sono indicate le paramassi monitorate. Selezionando la barriera di interesse viene rappresentato un secondo schema (Figura 3.35) in cui viene riportata la posizione e il numero dei sensori presenti sulla struttura e le caratteristiche principali della stessa (livello energetico, estensione, altezza, numero di montanti). Cliccando sul sensore di interesse viene aperta un'ulteriore sezione contenente i grafici di visualizzazione dei dati. È possibile rappresentare l'intero dataset campionato oppure solamente alcuni dati riferiti ad un intervallo di tempo ben preciso selezionabile mediante la definizione di una data di inizio e fine monitoraggio. Inoltre è possibile scaricare i dati grezzi ed elaborati in formato .txt o .csv oppure esportare i singoli grafici nei formati più comuni (.jpg, .png, .svg). Nella Tabella 3.13 vengono elencati i grafici presenti in piattaforma.

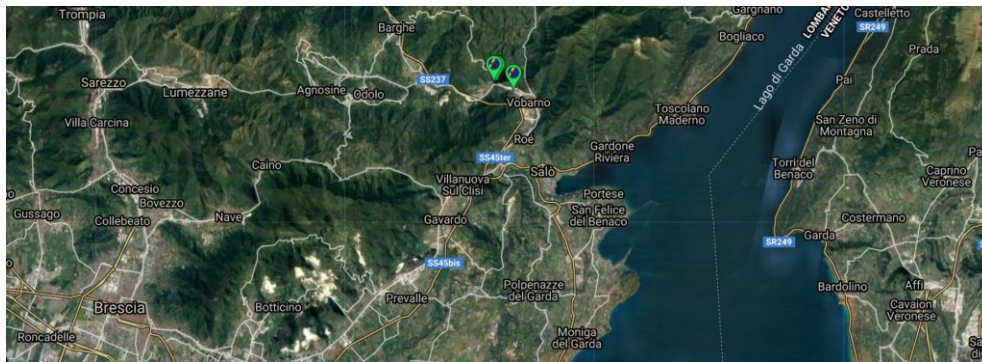


Figura 3.34 Mediante una mappa viene rappresentata la collocazione del sito.

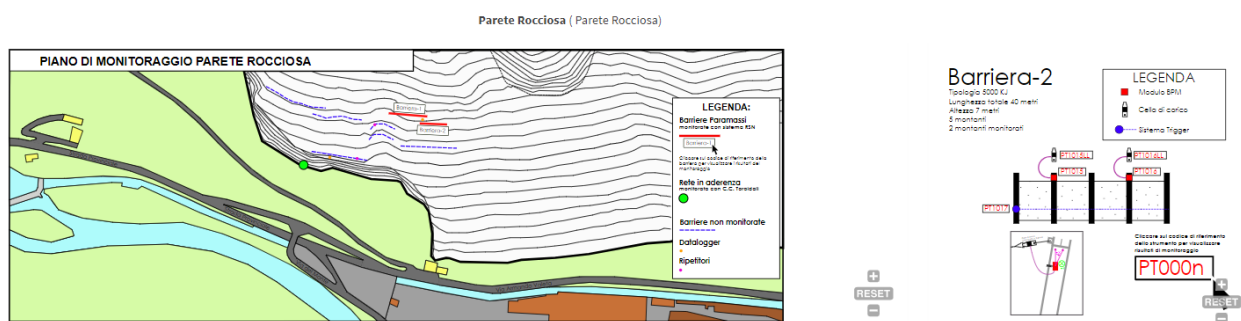


Figura 3.35 All'interno della piattaforma web è possibile visualizzare mediante appositi schemi le barriere monitorate, le loro caratteristiche e l'ubicazione dei sensori su di esse.

Tabella 3.13 Grafici presenti nella piattaforma web.

Sensore/Dispositivo:	Grafico:	Descrizione:
Load Link	Forza di trazione assoluta agente sui controventi di monte nel tempo.	Viene rappresentata l'effettiva forza a cui è sottoposta la cella di carico. Valori positivi corrispondono a valori di trazione.
	Forza di trazione relativa agente sui controventi di monte nel tempo.	Viene rappresentata la variazione di forza misurata nel tempo dalla cella di carico rispetto al primo valore campionato. Valori positivi corrispondono a valori di trazione
RSN Link	Angolo di inclinazione del montante lungo l'asse x misurata dal sensore MEMS nel tempo.	Viene rappresentata l'inclinazione del montante in direzione monte-valle. Angoli positivi indicano una rotazione verso valle.
	Angolo di inclinazione del montante lungo l'asse y misurata dal sensore MEMS nel tempo.	Viene rappresentata l'inclinazione del montante in direzione trasversale. Un valore positivo indica una rotazione in senso antiorario guardando la barriera da monte verso valle.
	Temperatura assoluta nel tempo rilevata dal sensore MEMS.	
RSN Link HR	Angolo di inclinazione del montante lungo l'asse x misurata dal sensore elettrolitico nel tempo.	Viene rappresentata l'inclinazione del montante in direzione monte-valle. Angoli positivi indicano una rotazione verso valle.
	Angolo di inclinazione del montante lungo l'asse y misurata dal sensore elettrolitico nel tempo.	Viene rappresentata l'inclinazione del montante in direzione trasversale. Un valore positivo indica una rotazione in senso antiorario guardando la barriera da monte verso valle.
	Temperatura assoluta nel tempo rilevata dal sensore elettrolitico.	
Trigger Link	Numero di attivazioni nel tempo.	Vengono rappresentati i riferimenti temporali in cui sono stati misurati degli allungamenti della rete.
Control Link	Numero di allarmi di livello 3 e livello 4	Vengono rappresentati i riferimenti temporali in cui è avvenuta l'attivazione di una procedura di allertamento di livello 3 o 4.
Batteria modulo	Livello della batteria del modulo BPM nel tempo.	
Batteria e temperatura centralina	Livello della batteria del datalogger nel tempo e temperatura registrata.	

CAPITOLO 4

CASO DI STUDIO: SITO PILOTA DI VOBARNO

Al fine di poter testare il sistema prototipale di monitoraggio Rockfall Safety Network si è individuato un sito di installazione pilota posto nella località di Vobarno (BS). Il cantiere identificato è caratterizzato da una parete rocciosa altamente fratturata situata in direzione nord-ovest rispetto all'abitato di Vobarno e a ridosso della strada provinciale Nord IV che collega il capoluogo con la frazione di Carpeneda. Nel corso degli anni il sito è stato oggetto di diversi fenomeni di caduta massi; per tale motivo sono state dislocate sul versante molteplici strutture flessibili. L'evento verificatosi il 6 febbraio 2016 è risultato quello con apporto di materiale maggiore valutato in 750 m³, con blocchi che hanno raggiunto la carreggiata della sottostante strada provinciale, il bar Roccia e lo stabilimento Valsir S.p.A adiacenti alla via di collegamento (Figura 4.1). Dopo tale episodio sono state aggiunte due nuove strutture di classe VIII, prodotte dalla società Incofil Tech S.r.l. (modello RAV_8/A) e aventi una capacità di assorbimento di 5000 kJ, a monte delle opere di mitigazione passive già presenti sul versante. Le due barriere flessibili, caratterizzate da estensioni rispettivamente di 60 e 40 metri, sono state installate rispettivamente ad una quota di 410 m s.l.m. e 400 m. s.l.m. con la funzione di intercettare e bloccare eventuali massi distaccatosi dalle quote più alte del versante o quantomeno ridurre la velocità e l'energia prima di raggiungere le barriere disposte a quote inferiori.



Figura 4.1 Alcune foto della strada provinciale raggiunta dai blocchi, distaccatosi dal versante, in occasione della frana avvenuta il 06/02/2016 (www.vallesabbianews.it).

Come si può evincere dalla Figura 4.2 le due barriere sono state disposte lungo due allineamenti differenti. La struttura di sostegno della barriera più a monte, che nel seguente elaborato verrà chiamata "Barriera 1", è costituita da sette montanti aventi altezza sette metri distanziati tra loro 10 metri. Nella seconda struttura, definita "Barriera 2" e posta ad una distanza di circa 30 metri rispetto alla struttura di monte, sono presenti solamente cinque puntoni di altezza sette metri distanziati anch'essi 10 metri. I montanti, al piede, sono stati vincolati al basamento di fondazione tramite una cerniera monodirezionale saldata alla piastra di base e solidarizzata al terreno. Il sistema frenante, in entrambe le barriere, è costituito da elementi dissipativi ad attrito. La rete di intercettazione è formata da pannelli di rete in fune con orditura ad anelli concatenati. Sovrapposta alla principale è

presente una seconda rete a maglia romboidale più fine, con lo scopo di arrestare il moto di piccoli elementi lapidei. La struttura di collegamento è formata da tiranti longitudinali e da controventi di monte.

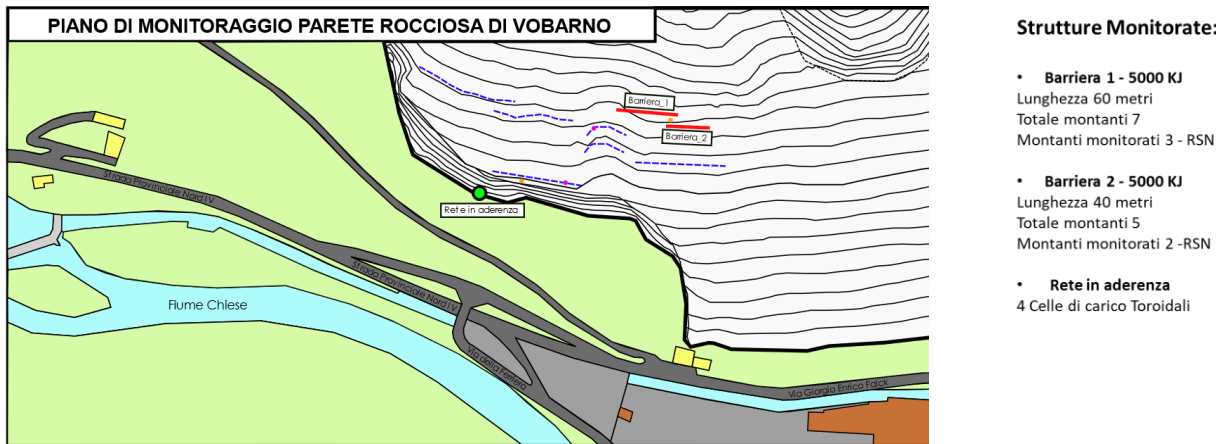


Figura 4.2 Planimetria rappresentativa della parete rocciosa di Vobarno. Le due nuove barriere flessibili RAV_8/A sono rappresentate con una linea rossa continua mentre le opere esistenti con linee blu tratteggiate.

Sulle due nuove strutture è stato installato il sistema prototipale di monitoraggio Rockfall Safety Network con lo scopo di:

- Individuare eventuali eventi critici che hanno attivato il sistema frenante delle barriere, attivare automaticamente una sirena disposta nella sede del comune di Vobarno e recapitare nell'immediato un messaggio di allarme ai responsabili del monitoraggio in modo da attivare sopralluoghi delle strade sottostanti al versante e delle barriere. I freni dopo essere entrati in funzione per arrestare il moto di un blocco con energia prossima al limite di progetto devono necessariamente essere sostituiti. La pregressa plasticizzazione, infatti, riduce l'efficienza della barriera nel contrastare un successivo possibile impatto. Inoltre, un evento critico porta ad una riduzione dell'altezza utile della stessa e quindi una mancata intercettazione di una percentuale delle possibili traiettorie dei massi previste da progetto.
- Fornire dati utili sull'eventuale riempimento della rete per l'organizzazione delle attività di manutenzione delle opere. Le due strutture si trovano in prossimità della vetta del monte Cingolo, sono raggiungibili solamente percorrendo a piedi un sentiero particolarmente impervio e dissestato che, in caso di maltempo, diviene inagibile. Inoltre non vi sono punti facilmente raggiungibili da cui è possibile controllare visivamente le strutture. Per tale motivo il controllo ordinario della barriera viene demandato al sistema di monitoraggio.

4.1 Architettura del sistema

Le strutture sono state rese “intelligenti” attraverso l’installazione di 17 sensori. In particolare per il caso di studio sono stati realizzati 5 moduli BPM, 2 dispositivi Trigger e 5 celle di carico prototipali. In Figura 4.5 viene presentata la documentazione fotografica del sito pilota. Nella barriera di monte sono stati previsti tre moduli BPM, tre celle di carico e un sensore Trigger. Nella barriera di valle sono stati installati i restanti due moduli BPM, due celle di carico e un sensore Trigger. La disposizione dei sensori è avvenuta a montanti alterni.

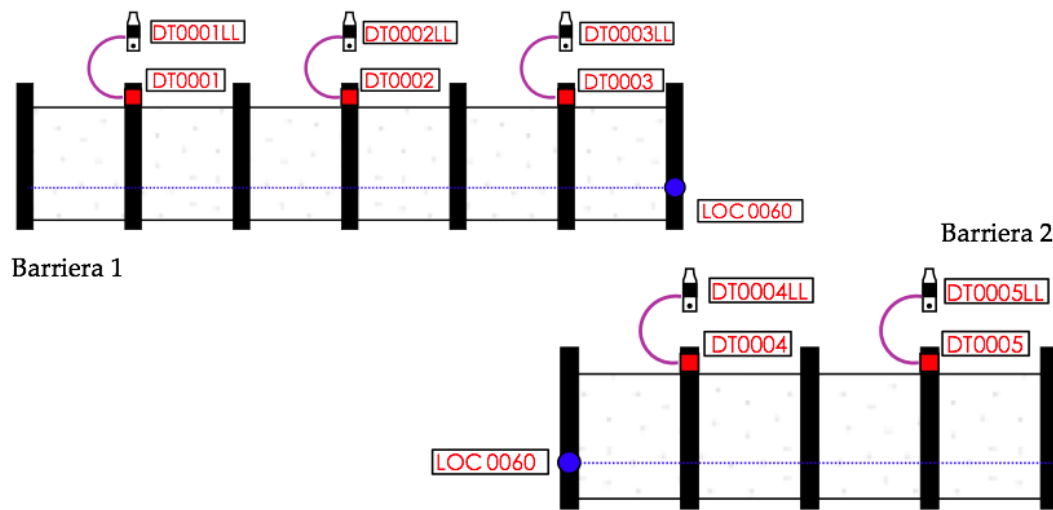


Figura 4.3 Disposizione degli strumenti di monitoraggio prototipali sulle barriere paramassi collocate nel cantiere Monte Cingolo.

A tutti i dispositivi installati nel cantiere del Monte Cingolo è stato associato un codice identificativo, funzionale alle operazioni di importazione dei dati all’interno del database (Figura 4.3). Per l’identificazione della tipologia di dispositivo in funzione del codice si rimanda alla Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Dispositivi installati nel cantiere Monte Cingolo e codice identificativo associato.

Codice identificativo	Tipologia Strumento	Sensori presenti
DT0001	Modulo BPM	MEMS* – Ampolla elettrolitica
DT0002	Modulo BPM	MEMS* – Ampolla elettrolitica
DT0003	Modulo BPM	MEMS* – Ampolla elettrolitica
DT0004	Modulo BPM	MEMS* – Ampolla elettrolitica
DT0005	Modulo BPM	MEMS* – Ampolla elettrolitica
DT0001LL	Cella di carico	Estensimetri
DT0002LL	Cella di carico	Estensimetri
DT0003LL	Cella di carico	Estensimetri
DT0004LL	Cella di carico	Estensimetri
DT0005LL	Cella di carico	Estensimetri
LOC0060	Sistema Trigger	Finecorsa elettromeccanico

LOC0060	Sistema Trigger	Finecorsa elettromeccanico
*Micro Electro Mechanical System		

L'installazione del sistema è avvenuta in due fasi. Le celle comprensive del sistema di bypass, essendo interposte tra il montante e i tiranti di monte, sono state posizionate preliminarmente durante le fasi di assemblaggio della barriera.

I rimanenti dispositivi sono stati installati in data 22 gennaio 2019. La centralina di acquisizione e il sistema di comunicazione radio e UMTS sono stati disposti nella zona di sovrapposizione delle due barriere. I dispositivi Trigger Link sono stati collocati nei montanti di estremità più vicini al datalogger, per ridurre al minimo la lunghezza del cavo di collegamento, ad un'altezza di 1.50 metri dalla base di fondazione. I moduli BPM sono stati vincolati all'ala del montante ad un'altezza di 6.50 metri (Figura 4.4).



Figura 4.4 a) I moduli BPM sono stati disposti sui montanti ad un'altezza di 6.50 metri dalla base di fondazione e collegati alla cella di carico b) I dispositivi Trigger Link, sono stati disposti sui montanti di estremità prossimi alla centralina di acquisizione.

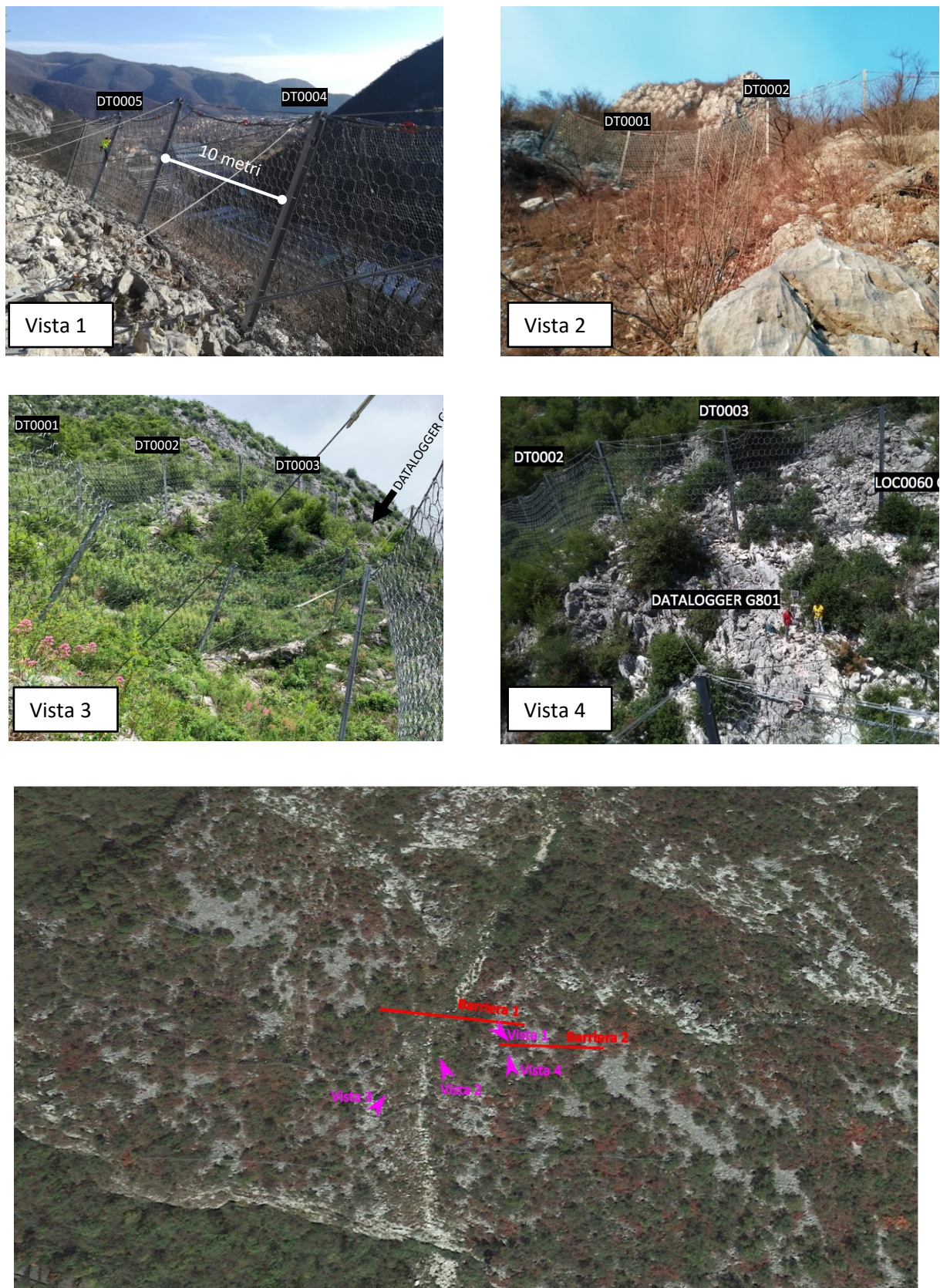


Figura 4.5 Documentazione fotografica del sito pilota di Vobarno. Le prime tre foto sono state realizzate da piano campagna mentre il quarto fotogramma è stata realizzata ad una quota di circa 40 metri tramite l'ausilio di un drone.

4.2 Attività di monitoraggio

L'attività di monitoraggio è stata avviata il giorno 22/01/2019 ed è attualmente in corso. Nel presente elaborato verranno mostrati i dati campionati fino al giorno 6/11/2020. Nell'intervallo temporale esaminato non si sono evidenziati crolli sul Monte Cingolo che hanno intercettato le due barriere e le reti risultano libere da detriti. Nel primo periodo di monitoraggio, compreso tra la data di installazione e il 3/05/2019, i sensori sono stati interrogati con una frequenza di 2 letture al giorno, successivamente l'intervallo intercorso tra una lettura e l'altra è stato portato a 24 ore. Durante l'attività di monitoraggio sono insorte diverse problematiche al sistema fortemente legate al sito di installazione e all'impiego dei sensori a lungo termine e quindi non identificabili durante i test svolti sulla strumentazione in laboratorio. L'individuazione dei limiti della tecnologia impiegata, installata in sito, ha portato a identificare soluzioni che hanno apportato notevoli migliorie al sistema sviluppando rendendolo maggiormente adatto all'impiego per attività di monitoraggio a lungo termine.

Le criticità riscontrate hanno riguardato:

- La funzionalità a lungo termine del sistema radio commerciale adottato per la comunicazione tra i moduli BPM e la centralina;
- L'individuazione di falsi allarmi da parte del sensore Trigger Link, in occasioni di fenomeni temporaleschi;
- L'infiltrazione di acqua meteorica all'interno dei circuiti elettrici delle celle di carico;

Inoltre, durante il periodo di monitoraggio, il sistema di alimentazione fotovoltaico della centralina è stato danneggiato da una sovratensione in occasione di un evento temporalesco importante. Nei successivi paragrafi verranno descritte nello specifico le singole criticità riscontrate e le soluzioni adottate per risolverle.

4.2.1 Problematiche riscontrate e soluzioni: Sistema di alimentazione fotovoltaico

L'alimentazione della centralina, avente la funzione di convogliare e inviare i dati provenienti dai dispositivi disposti sulle barriere, avviene mediante un sistema fotovoltaico composto da una batteria tampone da 12 V, un regolatore di carica ed un pannello fotovoltaico da 20 W. I componenti sono prodotti commercializzati e comunemente impiegati nei sistemi di monitoraggio geotecnico. Come si può notare dalla Figura 4.6 a partire dal 2/08/2019 la ricarica ordinaria della batteria fornita dal pannello fotovoltaico è venuta a mancare. Nella medesima giornata la provincia di Brescia e la cittadina di Vobarno è stata interessata da un evento temporalesco particolarmente importante. In tale occasione si ipotizza che un fulmine possa aver raggiunto il versante del Monte Cingolo e danneggiato il sistema di alimentazione. A conferma di questo vi sono i dati di monitoraggio campionati da una seconda centralina, posta a circa 100 metri dal sistema Rockfall Safety Network, a gestione di quattro celle toroidali, che in tale giornata ha smesso di funzionare (Figura 4.7). Il ripristino della stessa è avvenuto a seguito di un sopralluogo in cui è stata sostituita la batteria danneggiata.

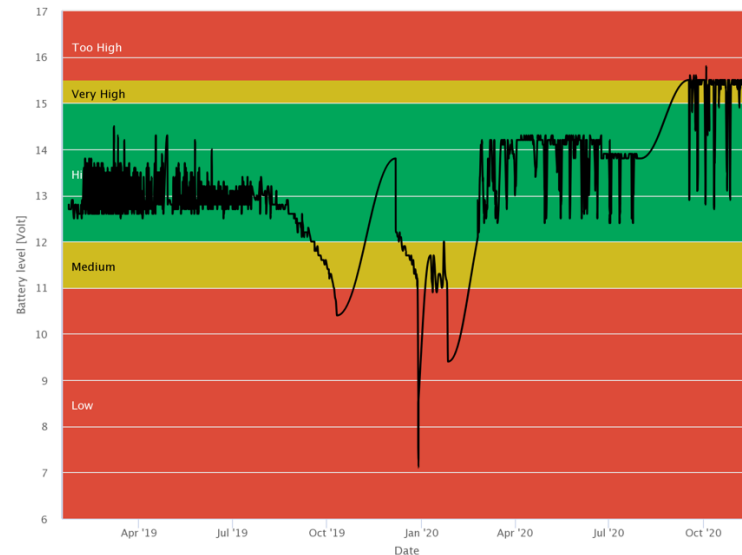


Figura 4.6 Livello della batteria di alimentazione del datalogger G801.

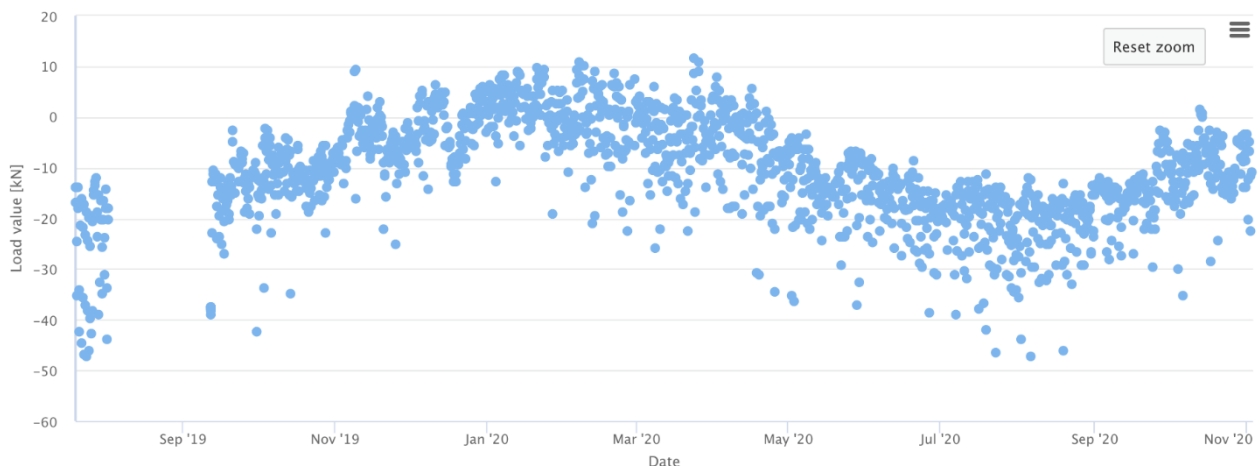


Figura 4.7 Dati registrati da una seconda centralina posta nelle vicinanze del sistema Rockfall Safety Network. In occasione dell'evento temporalesco avvenuto il 2 agosto il datalogger ha smesso di funzionare. Il ripristino è avvenuto a seguito di un sopralluogo in cui è stata sostituita la batteria danneggiata.

A partire dal 2/08/2019 la batteria tampone priva della ricarica del pannello ha permesso il proseguimento delle attività di monitoraggio fino al 10/10/2019. Il 6/12/2019 si è effettuato un sopralluogo in cui si è testata la funzionalità del pannello che inizialmente è risultato perfettamente funzionante e per tale motivo si è sostituito il regolatore di carica e la batteria. L'intervento ha consentito il riavvio del sistema ma non ha risolto la problematica che ha portato nuovamente la centralina a spegnersi. In data 24/02/2020 si è effettuato un'ulteriore operazione dove è stato ripristinato il sistema di monitoraggio, sostituendo un componente del pannello danneggiato non individuato nel precedente intervento. Tale problematica ha avuto come conseguenza la mancata registrazione dei dati di monitoraggio nei periodi compresi tra il 10/10/2019 e il 6/12/2019, tra il 28/12/2019 e il 10/01/2020 e tra il 25/01/2020 e il 24/02/2020. Il malfunzionamento riscontrato, in questo caso, è legato ad un evento eccezionale; per tale motivo ci si è limitati a ripristinare il sistema di alimentazione.

4.2.2 Problematiche riscontrate e soluzioni: Sistema radio

La trasmissione dei dati tra i moduli BPM avviene mediante una rete radio di tipo Smart Mesh. Il sistema di trasmissione, impiegato nel sito di Vobarno, è composto da una periferica radio master disposta all'interno dell'armadio che ospita la centralina e cinque periferiche radio slave integrate nei moduli BPM. Se tra un dispositivo radio slave e il radio master non vi sono ostacoli, la trasmissione dei dati può avvenire in maniera diretta. Se al contrario il radio master e il radio slave non hanno un contatto visivo, la trasmissione dei dati avviene in maniera indiretta passando tramite altri dispositivi radio slave visibili. Ogni modulo radio slave, infatti, funge anche da ripetitore di segnale. Pertanto affinché il sistema operi in maniera corretta almeno un modulo radio slave deve essere in contatto visivo con il radio master e i radio slave devono essere in contatto visivo con almeno un'altra periferica simile. La trasmissione e la ricezione dei dati, inoltre, è garantita da un'antenna esterna ai moduli che inizialmente è stata installata ortogonalmente al montante e rivolta verso monte nelle barriere di valle e verso valle nelle barriere di monte. In questa configurazione all'inizio del monitoraggio ai moduli DT0003, DT0004 e DT0005 è stata garantita una connessione al modulo master di tipo diretto e ai restanti moduli, a causa dell'orografia del versante, di tipo indiretto passando per i moduli DT0003 e DT0004.

In data 06/02/2019 il modulo DT0005 si è disconnesso dalla rete, seguito il 01/03/2019 dal modulo DT0003 (Figura 4.8). Nei giorni successivi entrambe le periferiche non hanno effettuato la riconnessione automatica al sistema prevista. Per tale motivo, in collaborazione con la ditta produttrice dei moduli radio, si sono effettuati diversi test di laboratorio su periferiche radio gemelle per individuare la causa del mancato ricollegamento automatico. A fine aprile si è individuato che il malfunzionamento fosse da imputare ad un processo a livello firmware che impediva la riconnessione dei moduli e in parallelo generava un consumo delle batterie superiore a quello previsto.

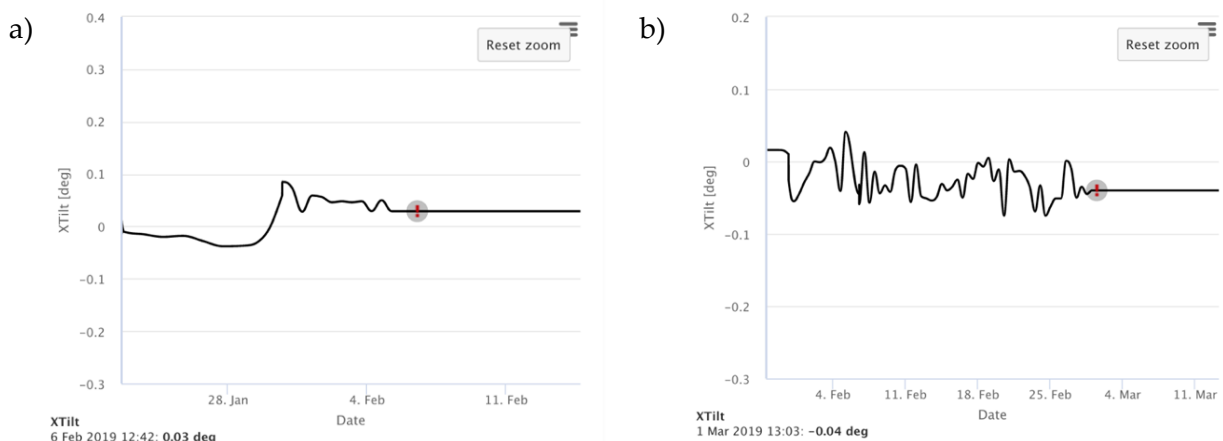


Figura 4.8 In data 6/02/2019 è avvenuta la disconnessione del modulo 5 (a) dalla rete seguito dal modulo 3 in data 1/03/2019 (b). Le immagini scaricate dalla piattaforma di rappresentazione dei dati sono relative all'inclinazione del montante misurata dal sensore MEMS in direzione monte-valle.

Dopo aver apportato le opportune modifiche al firmware, in data 03/05/2019 durante un sopralluogo, si è effettuato l'aggiornamento dei moduli. Nel periodo successivo, compreso tra la data dell'intervento e il giorno 10/10/2019, i moduli DT0002 e DT0004 hanno correttamente campionato e trasmesso i dati senza mai disconnettersi dalla rete radio. I restanti moduli si sono

scollegati per poi ricollegarsi, come previsto, in autonomia. In particolare il modulo DT0001 si è disconnesso tre volte, il modulo DT0003 quattro volte e il modulo DT0005 due volte. Da sottolineare che le tempistiche di riconnessione sono risultate più lunghe di quelle attese soprattutto per il modulo DT0001 che risulta essere il più distante dal modulo radio master (Tabella 4.2).

Tabella 4.2 Tempi di riconnessione dei moduli radio slave nel periodo compreso tra il 03/05/2019 e il 10/10/2019.

Data disconnessione [gg:mm:hhhh]	Data riconnessione [gg:mm:hhhh]	Giorni necessari per la riconnessione [Giorni]
DT0001		
22/06/2019	19/07/2019	27
27/07/2019	19/08/2019	23
20/08/2019	05/09/2019	16
DT0003		
14/05/2019	25/05/2019	11
02/06/2019	07/06/2019	5
10/06/2019	15/06/2019	5
03/09/2019	11/09/2019	7
DT0005		
10/06/2019	15/06/2019	5
10/07/2019	15/07/2019	5

Tra il 10/10/2019 e il 24/02/2020 come è stato descritto nel paragrafo precedente il sistema di alimentazione danneggiato della centralina non ha consentito la normale ricarica della batteria per cui in tale periodo non è stato possibile analizzare la funzionalità dei moduli radio.

Durante il ripristino del sistema di alimentazione della centralina sono state sostituite per precauzione le batterie di tutti i moduli. A seguito dell'intervento si è notato che il modulo DT0005 dopo essersi disconnesso dalla rete non si è più collegato ed inoltre in data 28/04/2020 le batterie dei restanti moduli si sono esaurite.

In data 23/06/2020, si è effettuato un ulteriore sopralluogo in cui si è notato che l'antenna del modulo DT0003 e del modulo DT0005 si era staccate dalla propria sede inficiando sulla corretta trasmissione dei dati. In tale occasione, mediante l'impiego di un software sviluppato dalla società produttrice del sistema radio, si è monitorata la potenza del segnale variando la posizione delle antenne collegate ai moduli. Dopo diversi tentativi si è optato per disporre le antenne in una nuova configurazione fissandole sull'estremità superiore dei montanti e disponendole parallele agli stessi. La configurazione adottata ha permesso il collegamento di ogni radio slave con almeno due dispositivi simili e di ottenere un indice di qualità del segnale superiore a 87 (Figura 4.9)(Tabella

4.3). L'indice considerato va da 0 a 100 ed è un parametro restituito dal software impiegato, proporzionale alla qualità del segnale radio. Un valore superiore a 50 indica una buona connessione.

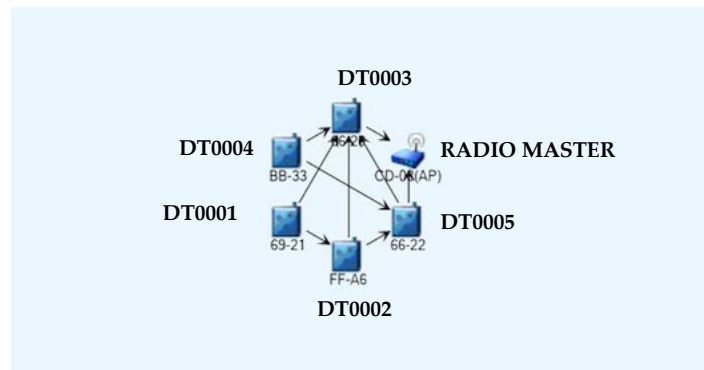


Figura 4.9 Schema dei collegamenti radio tra i moduli BPM e il radio master disponendo le antenne sulla sommità dei montanti.

Tabella 4.3 Periferiche radio, codice identificativo e indice di qualità del segnale.

Periferica radio integrata nel modulo:	Codice identificativo:	Indice di qualità del segnale:
DT0001	6921	100
DT0002	ffa6	87
DT0003	6626	94
DT0004	bb33	94
DT0005	6622	97

Dopo tale sopralluogo i moduli DT0001, DT0002 e DT0003 si sono scollegati ad una settimana dall'intervento e il modulo DT0004, lasciato scollegato per testarne l'auto connessione, non si è mai ricollegato alla rete. Pertanto si è successivamente smontato il sistema e si è portato in laboratorio. Nel periodo compreso tra il 31/07/2020 e il 16/09/2020 si sono simulate diverse configurazioni di installazione, monitorando in parallelo i consumi energetici dei moduli. Dai test si è individuato che nel tempo venivano letti dei picchi di tensione randomici che la batteria non era in grado di sopportare e che di conseguenza portavano ad un esaurimento precoce delle pile e alla disconnessione dei moduli.

Dopo aver individuato le operazioni a livello software che generavano gli aumenti improvvisi di tensione, si è nuovamente aggiornato il firmware dei moduli ed è stato previsto un sistema di alimentazione a 9 V più prestante rispetto al precedente. Inoltre nei dispositivi modificati è stato previsto un pulsante per il riavvio dall'esterno e le scatole sono state riempite con un liquido isolante per garantire un grado di impermeabilità superiore.

I moduli modificati sono stati installati in data 17/09/2020. A seguito dell'operazione i dispositivi DT0003, DT0004 e DT0005 non si sono mai disconnessi. Il modulo DT0002 si è disconnesso in data 27/09/2020 e si è correttamente riconnesso in data 04/10/2020. Il modulo DT0001 inizialmente ha mostrato problemi di connessione legati al collegamento della cella di carico. Tale problematica verrà affrontata nei paragrafi successivi. Dopo la disconnessione della cella di carico avvenuta il 07/10/2020 il modulo non si è mai disconnesso dalla rete. Le modifiche apportate sembrano aver risolto i problemi di connessione riscontrati fino ad ora.

4.2.3 Problematiche riscontrate e soluzioni: Sistema Trigger Link

Nel sistema installato nel sito di Vobarno sono presenti due dispositivi Trigger Link identificati con lo stesso codice LOC0060. La stringa di identificazione è univoca poiché i dispositivi a livello di elaborazione dei dati vengono identificati come un unico strumento avente due canali. Per chiarezza di contenuti il sensore disposto nella barriera di monte verrà denominato Trigger Link A e il sensore installato nella barriera di valle Trigger Link B.

Nel primo periodo di monitoraggio il software di elaborazione dei dati era programmato per attivare il processo di allertamento alla rilevazione di un impulso registrato dal sensore trigger. Ad un mese dall'installazione i dispositivi Trigger sono stati sottoposti ad un preliminare collaudo. In tale occasione il cavo in acciaio collegato al finecorsa è stato posto in trazione manualmente. In entrambi i test le operazioni di allertamento previste sono andate a buon fine.

In data 04/04/2020 alle ore 11.19 il Trigger Link A ha segnalato un impatto sulla barriera di monte che ha attivato la procedura di allertamento. In tale occasione, a causa delle problematiche radio iniziali evidenziate nel paragrafo precedente, solamente il dispositivo DT0002 era attivo. Non potendo individuare da remoto eventuali incrementi di carico o rotazioni dei montanti in due punti di misura, si è effettuato un sopralluogo nel sito nel quale non sono stati individuati né blocchi né depositi di detriti sulle reti ed è stato appurato che l'attivazione fosse riconducibile ad un falso allarme.

Dalla prima attivazione dell'aprile 2019 i dispositivi Trigger hanno inviato diversi impulsi non legati ad eventi di caduta massi. Nel periodo di monitoraggio considerato, infatti, si sono contate 145 attivazioni del dispositivo Trigger Link A e 7 attivazioni del Trigger Link B. Confrontando in tempo reale le attivazioni con i dati di precipitazione, registrati dai radar meteorologici presenti nella zona e forniti dal servizio Centro Meteo Lombardo, si è notato che fossero strettamente correlate al passaggio di fenomeni temporaleschi. Al fine di confermare tale ipotesi si sono presi in considerazione i dati di pioggia registrati da due stazioni pluviometriche poste nelle immediate vicinanze di Vobarno e resi pubblici dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia (Tabella 4.4). La prima stazione è posta nella località di Odolo, si trova ad ovest rispetto al Monte Cingolo e dista 7.4 Km dal sistema RSN. Il secondo strumento considerato è il pluviometro di Puegnano del Garda, ubicato a sud-est e distante 9.2 Km rispetto al sistema sviluppato.

Tabella 4.4 Caratteristiche delle stazioni pluviometriche considerate

Nome stazione [-]	Tipologia [-]	Ubicazione [-]	Quota [m]	Latitudine [-]	Longitudine [-]	Distanza dal sistema RSN [km]
Odolo	Pluviometro	Via Praes - Odolo	345	45.6420476	10.3896962	7.4
Puegnano	Pluviometro	Via XXV Aprile – Puegnano del Garda	155	45.5525849	10.0852115	9.2



Figura 4.10 Posizione dei dispositivi pluviometrici rispetto al sistema RSN (Google Earth).

Nell'istogramma in Figura 4.11 e in Figura 4.12 sono rappresentati rispettivamente i dati di altezza di pioggia cumulata giornaliera rilevata dal Pluviometro di Odolo e il numero di attivazioni del Trigger Link A e del Trigger Link B. Da sottolineare che il dispositivo pluviometrico, nel periodo considerato, ha registrato dati in errore che nel grafico sono rappresentati con bande arancioni. In Figura 4.13 e in Figura 4.14 sono rappresentati i dati di altezza di pioggia cumulata giornaliera rilevata dal pluviometro di Puegnano e il numero di attivazioni del Trigger Link A e del Trigger Link B. Dall'analisi effettuata si è riscontrato che nel 95% dei casi le attivazioni del Trigger Link A sono avvenute in giorni in cui almeno una stazione pluviometrica ha registrato eventi meteorici. Le uniche due attivazioni registrate in giorni dove non sono state rilevate precipitazioni, il 12/07/2019 e il 29/08/2019, potrebbero essere state scatenate da eventi temporaleschi localizzati che non hanno interessato le zone dove sono ubicati i due dispositivi. Per quanto riguarda invece il Trigger Link B, nella totalità dei casi, le attivazioni sono avvenute in giorni in cui entrambi i pluviometri hanno rilevato precipitazioni. La correlazione tra gli eventi meteorici e l'invio di impulsi di trigger si può riscontrare anche a livello orario. Come esempio, nei grafici in Figura 4.15 e in Figura 4.16, sono riportate le altezze di pioggia orarie rilevate dal pluviometro di Odolo nei giorni 9/7/2019 e 1/7/2020. Nei medesimi grafici sono rappresentate le attivazioni del Trigger Link A. Nella giornata del 9/7/2019 le precipitazioni maggiori si sono concentrate principalmente nell'intervallo che va dalle 15.00 alle 17.00 (dalle 15:00 alle 16:00 sono stati misurati 10.2 mm mentre dalle 16:00 alle 17:00, 6.4 mm). Nell'intervallo temporale compreso tra le 15.30 e le 16.30 sono state rilevate 4 attivazione del sensore Trigger Link A. Durante l'evento del 1/7/2020 le precipitazioni si sono concentrate in due intervalli compresi tra le 10.00 e le 11.00 (20 mm) e tra le 17.00 e le 19.00 (3 mm). Nel medesimo giorno il dispositivo Trigger Link A ha rilevato 13 attivazioni tra le 9.30 e le 11.00 e una alle ore 17.26.

Tabella 4.5 Data di attivazione dei dispositivi Trigger e altezza di pioggia cumulata registrata dai pluviometri di Odolo e Puegnano nelle medesime giornate.

Data di attivazione del Trigger Link A [gg/mm/aaaa]	Data di attivazione del Trigger Link B [gg/mm/aaaa]	Altezza di pioggia cumulata giornaliera registrata dal pluviometro posto in località Odolo [mm]	Altezza di pioggia cumulata giornaliera registrata dal pluviometro posto in località Puegnano [mm]
04/04/2019	-	-	94.2
24/04/2019	-	11	14
03/05/2019	-	19.4	6.6
04/05/2019	-	2	22.4
11/05/2019	11/05/2019	4	7.2
21/05/2019	-	9.8	2.2
24/05/2019	-	2.8	0
28/05/2019	-	22.6	8.8
11/06/2019	-	7.4	0.2
22/06/2019	22/06/2019	7.6	41.6
03/07/2019	-	0	23.8
09/07/2019	-	18.8	6.2
12/07/2019	-	0	0
18/07/2019	-	5.8	0.2
27/07/2019	-	30.4	70
02/08/2019	-	22	69.8
06/08/2019	-	11.4	27.8
12/08/2019	-	8.4	8.8
24/08/2019	-	8.4	0
29/08/2019	-	0	0
31/08/2019	-	3	0
02/09/2019	02/09/2019	13.2	57.8
06/09/2019	-	-	45.6
18/09/2019	-	12	22.8
02/10/2019	-	6.2	6
03/10/2019	03/10/2019	1.4	28.8
29/04/2020	-	13.2	16.8
30/04/2020	-	16.4	3
14/05/2020	-	0.2	0
23/05/2020	-	4.4	8.2
06/06/2020	06/06/2020	5.8	14.8
07/06/2020	-	30	15.6
09/06/2020	-	2.4	1.4
19/06/2020	-	0.8	2
01/07/2020	01/07/2020	24.6	57.8
02/07/2020	02/07/2020	31.4	11.4
11/07/2020	-	38.8	14
22/07/2020	-	20.2	4.8
23/07/2020	-	0	0.2
24/07/2020	-	16.2	13.6
16/09/2020	-	0.6	7
24/09/2020	-	14.4	20.2
25/09/2020	-	2.4	7.6
10/10/2020	-	-	21.8
11/10/2020	-	-	24.6

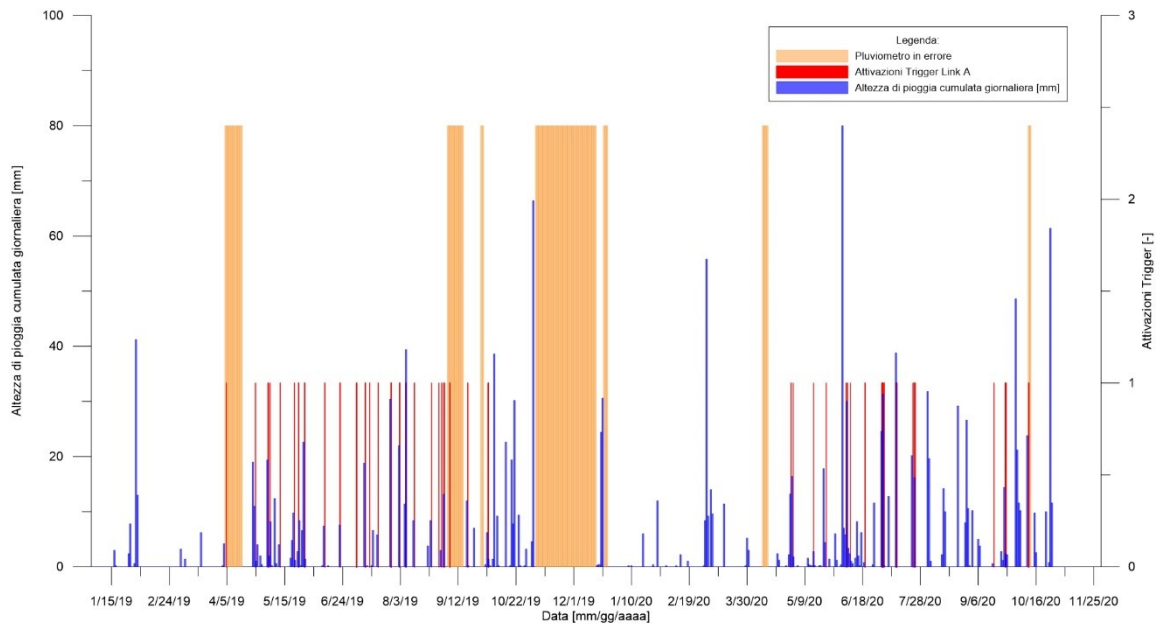


Figura 4.11 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Odolo e le attivazioni del Trigger Link A.

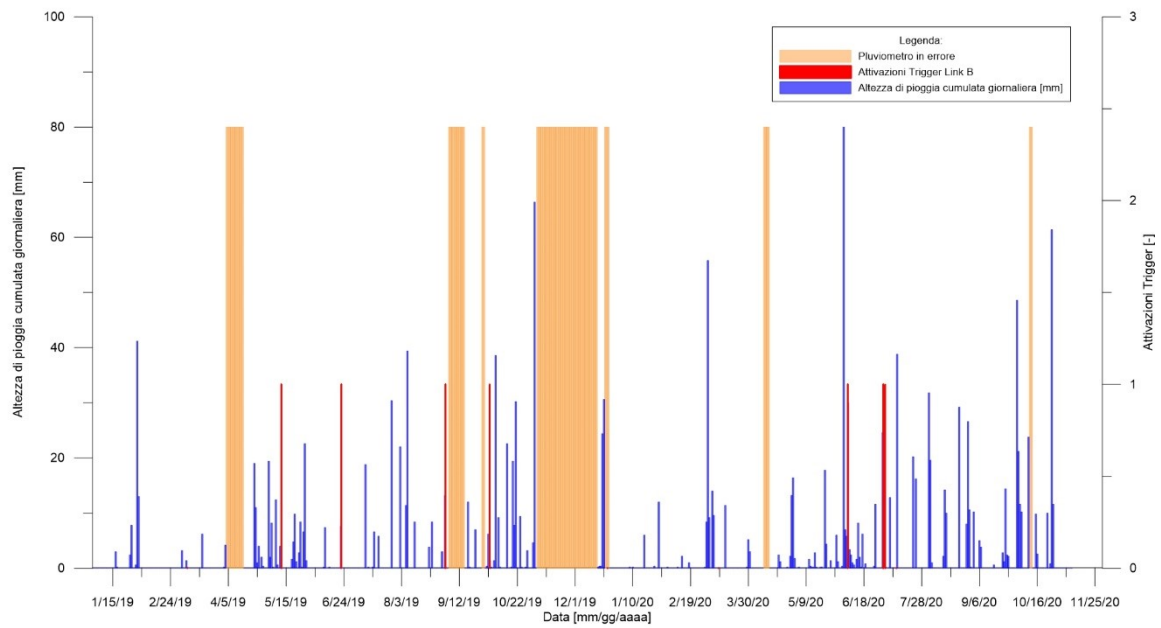


Figura 4.12 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Odolo e le attivazioni del Trigger Link B.

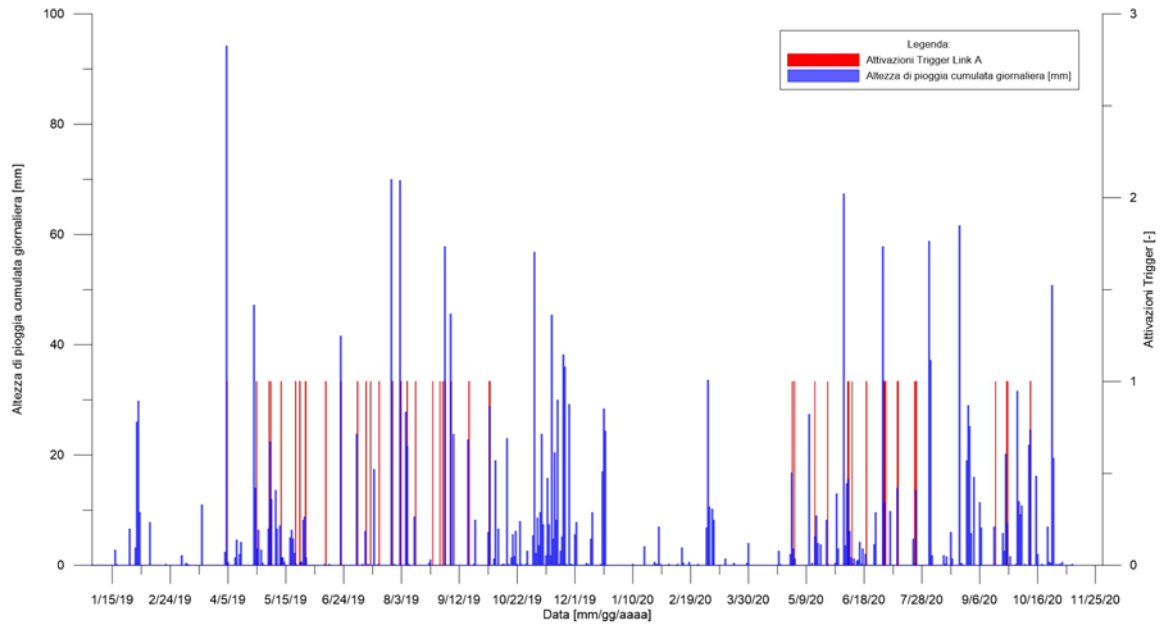


Figura 4.13 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Puegnano e le attivazioni del Trigger Link A.

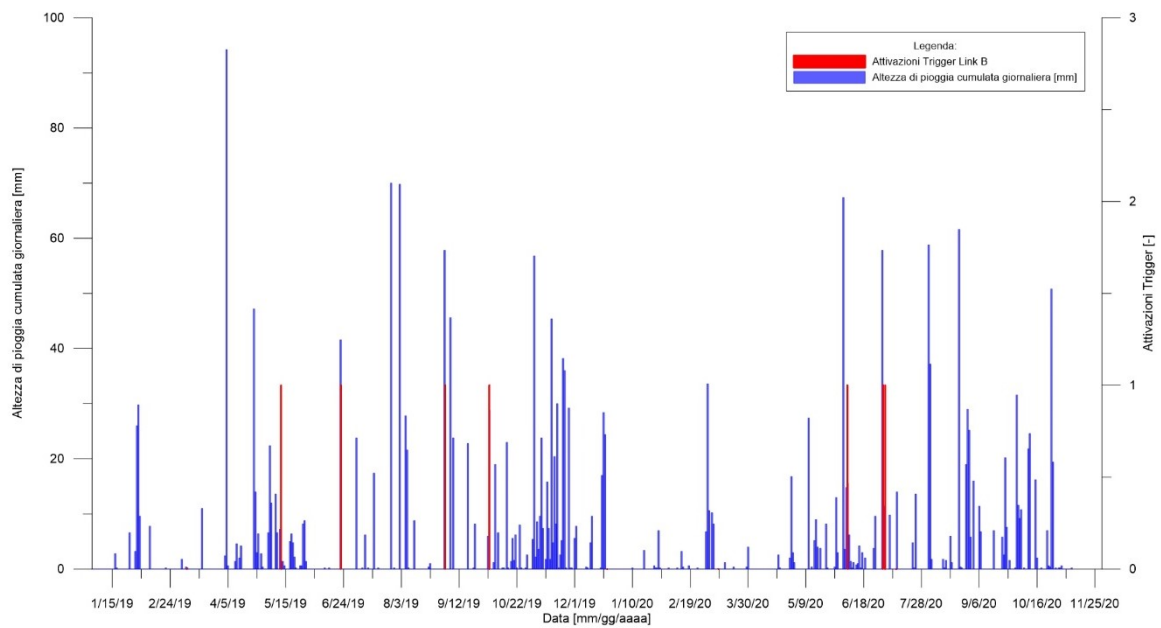


Figura 4.14 Confronto tra i dati rilevati dal pluviometro posto nella località di Puegnano e le attivazioni del Trigger Link B.

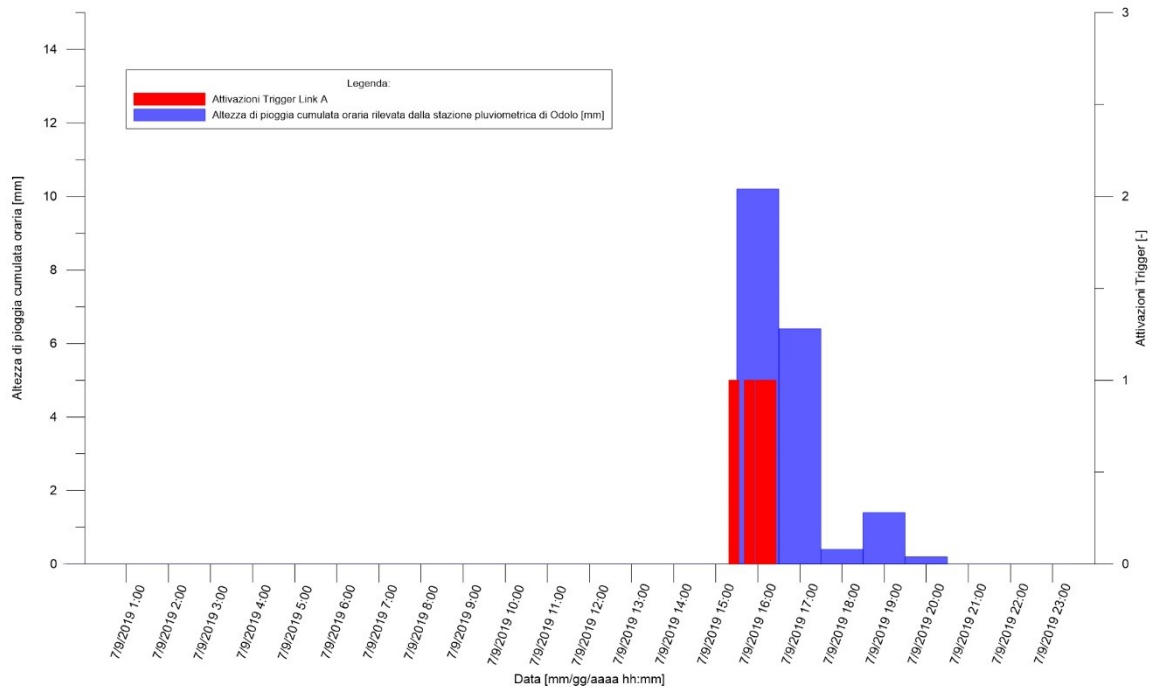


Figura 4.15 Altezza di pioggia oraria misurata il giorno 7/9/2019 dal pluviometro posto in località Odolo e attivazioni del Trigger Link A.

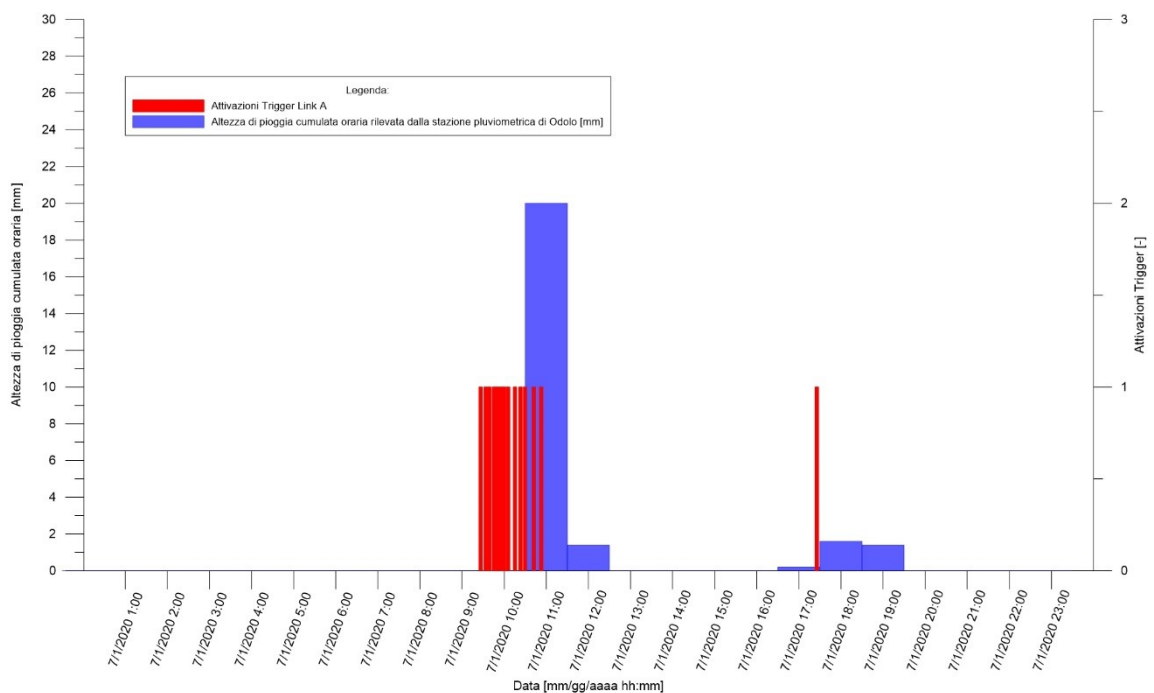


Figura 4.16 Altezza di pioggia oraria misurata il giorno 7/1/2020 dal pluviometro posto in località Odolo e attivazioni del Trigger Link A.

Essendoci una correlazione diretta tra eventi meteorici e attivazioni dei dispositivi, in un primo momento si è pensato che la problematica fosse causata da infiltrazioni di acqua all'interno dei contatti del sensore fincorsa per cui, a giugno 2019, si è effettuato un sopralluogo in cui si sono

impermeabilizzati ulteriormente i dispositivi già posti all'interno di scatole IP66. Come si può vedere dai grafici l'operazione non ha risolto le problematiche riscontrate. Successivamente si è pensato che le attivazioni fossero dovute a disturbi di tipo elettromagnetico in occasioni di eventi temporaleschi.

Per validare tale ipotesi si è installato dal 1/10/2019 al 24/12/2019 un dispositivo Trigger Link gemello a quelli presenti nel sito di Vobarno in una struttura metallica posta al campus di Parma e disposta all'esterno. La lettura della periferica è avvenuta mediante l'impiego della medesima centralina disposta nel sito di test. Nonostante in tale periodo il campus sia stato interessato da diversi fenomeni temporaleschi non sono state registrate attivazioni del sensore. Per cui, ad oggi, dal punto di vista hardware non sono ancora chiare le motivazioni che portano i dispositivi Trigger Link ad inviare impulsi.

In parallelo, nell'aprile del 2019, si è sviluppato un nuovo sistema di gestione degli allertamenti che consente di filtrare i falsi allarme in fase di elaborazione dei dati, basato non più solamente sulle attivazioni dei dispositivi Trigger Link, ma anche sui dati campionati dai sensori presenti nella medesima barriera. La procedura di gestione degli allertamenti sviluppata prevede cinque livelli di allarme ai quali corrispondono diverse procedure di segnalazione (Tabella 4.6). L'attivazione di un livello di allarme è associata al superamento di una o più soglie contemporaneamente. Il raggiungimento di un'allerta di livello più alto esclude in automatico quella di livello inferiore.

Tabella 4.6 Livelli di allarme e procedure di segnalazione associate.

Allarme	Invio e-mail agli sviluppatori del sistema	Invio di un sms agli sviluppatori del sistema	Invio di un'e-mail ai responsabili del monitoraggio	Invio di un sms ai responsabili del monitoraggio	Attivazione dei dispositivi di allertamento
Livello 0	X	-	-	-	-
Livello 1	X	-	-	-	-
Livello 2	X	-	-	-	-
Livello 3	X	-	X	-	-
Livello 4	X	X	X	X	X

Le soglie individuate sono:

Soglia Trigger: viene superata nel caso in cui venga registrata nell'ultimo invio di dati l'attivazione di un sistema Trigger

Soglia Errore: la soglia errore viene superata nel caso in cui un modulo BPM perfettamente funzionante fino all'attivazione del Trigger, venga letto in errore in occasione di tale lettura.

Soglia di Trend: viene calcolata la media e la deviazione standard dei dati campionati nei precedenti sette giorni all'attivazione del Trigger per ogni sensore (MEMS, ampolla e cella di carico). Nel caso in cui il valore letto da almeno due sensori durante la lettura generata dall'attivazione del Trigger risulti superiore rispetto alla media più due deviazioni standard, la soglia di Trend viene considerata superata. Nel calcolo della media e della deviazione standard non entrano i dati campionati in occasione di eventi Trigger avvenuti nella settimana in esame.

Soglia Assoluta A: il superamento della soglia assoluta A avviene se almeno un sensore su tre, presenti nel modulo BPM, supera un parametro di input definibile dall'utente o dal produttore della barriera.

Soglia Assoluta B: il superamento della soglia assoluta B avviene se almeno due sensori su tre superano un parametro di input definibile dall'utente o dal produttore della barriera.

In Tabella 4.7 vengono sintetizzate le tipologie di allerta e il reciproco principio di attivazione. Nei primi tre livelli si prevede di informare solamente gli sviluppatori del sistema di monitoraggio.

In particolare i primi due livelli sono funzionali a registrare le attivazioni del trigger al fine di proseguire la ricerca sul sistema. Il livello 2 può essere considerato un livello di attenzione; all'interno di esso ricadono gli eventi che hanno determinato una rotazione dei montanti e/o una variazione del carico sui controventi che però risultano minori dei dati registrati durante i test SEL.

Nel livello 3 si prevede l'invio di una e-mail anche a responsabili del monitoraggio mentre nel livello 4 è previsto anche il recapito di un messaggio sms e l'attivazione dei dispositivi di allertamento. Questi ultimi due livelli sono basati sul superamento di una soglia assoluta identificata sulla rotazione del montante e sulla forza di trazione agente sui controventi di monte. Il valore può essere definito dai produttori della barriera, mediante la piattaforma web, in funzione dei risultati ottenuti durante i test di certificazione. Nel sito di Vobarno la soglia assoluta definita sulla rotazione è pari a 5° e corrisponde al valore minimo di inclinazione dei montanti centrali rilevato durante i test SEL. Il valore di soglia identificato sul carico a cui sono sottoposti i controventi di monte è pari a 65 kN.

Tabella 4.7 Livelli di allarme e principi di attivazione.

Tipologia di allerta:	Principio di attivazione:
Livello di allarme 0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superamento Soglia Trigger
Livello di allarme 1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superamento Soglia Trigger ▪ Superamento Soglia Errore
Livello di allarme 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superamento Soglia Trigger ▪ Superamento Soglia di Trend
Livello di allarme 3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superamento Soglia Trigger ▪ Superamento Soglia di trend ▪ Superamento Soglia assoluta A
Livello di allarme 4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superamento Soglia Trigger ▪ Superamento Soglia di trend ▪ Superamento Soglia assoluta B

Malgrado la problematica non sia stata risolta dal punto di vista hardware, il nuovo sistema di gestione degli allertamenti nel periodo di monitoraggio considerato ha consentito di filtrare

correttamente tutti i falsi allarme. In Tabella 4.8 sono rappresentati gli eventi associati ai livelli del sistema di allertamento.

Tabella 4.8 Livelli del sistema di allertamento ed eventi associati.

Livello 0	Nel livello 0 ricadono gli eventi che hanno determinato l'attivazione del Trigger ma allo stesso tempo non hanno determinato variazioni delle rotazioni dei montanti e del carico nei controventi di monte e che quindi non hanno compromesso la capacità strutturale della struttura.
Livello 1	Il livello 1 è funzionale a tenere traccia degli eventi in cui si è registrata l'attivazione del Trigger e in parallelo si è letto un dispositivo BPM in errore.
Livello 2	Nel livello 2, che può essere definito livello di attenzione, ricadono gli eventi che hanno determinato una rotazione dei montanti e/o una variazione del carico sui controventi che però risultano di entità inferiore rispetto alle soglie assolute definite.
Livello 3	Nel livello 4 ricadono gli eventi che hanno determinato un aumento di carico sui controventi o una rotazione dei montanti superiore ai valori di soglia assoluti definiti.
Livello 4	Nel livello 4 ricadono gli eventi aventi un'energia superiore rispetto al SEL.

4.2.4 Problematiche riscontrate e soluzioni: Cella di carico DT0001LL

Come è stato descritto nel capitolo precedente, gli elementi sensibili estensimetrici funzionali a misurare le deformazioni del corpo delle celle di carico, installate nel sito di Vobarno, sono protetti con uno strato di materiale siliconico e una guaina termorestringente di 3 mm di spessore. Il sistema di impermeabilizzazione adottato non ha impedito l'infiltrazione di acqua meteorica nella cella di carico DT0001LL posta nell'estremità ovest della barriera di monte. A partire da maggio 2019 il dispositivo ha restituito alcuni spikes e a partire da giugno 2020 ha rilevato valori di carico nettamente superiori rispetto all'andamento della forza rilevata fino a quel momento (Figura 4.17).

Dopo la reinstallazione dei moduli BPM, avvenuta il 17/09/2020, si è appurato che la cella restituiva valori al di fuori della curva di calibrazione e impedisse il collegamento del modulo radio. Per tale motivo in data 06/10/2020 il dispositivo è stato scollegato. Le celle di carico, essendo prototipali, sono state realizzate manualmente ed è probabile che la criticità riscontrata nella cella DT0001LL possa essere imputabile ad un'imperfezione nella realizzazione del sistema di impermeabilizzazione.

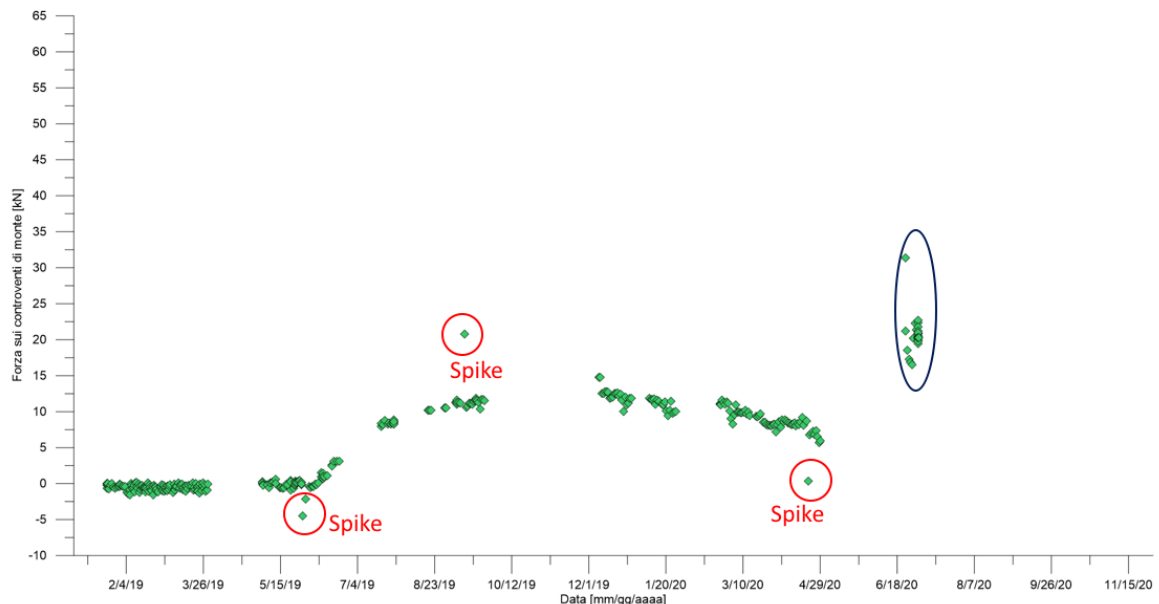


Figura 4.17 Carico sui controventi di monte misurato dalla cella di carico DT0001LL.

4.3 Risultati dell'attività di monitoraggio

Nel presente paragrafo verranno presentati i dati registrati dai singoli sensori del sistema Rockfall Safety Network nel periodo di monitoraggio considerato. In particolare verranno mostrati i dati riferiti alle rotazioni del montante lungo l'asse x , direzione monte-valle e i carichi sui controventi di monte. Tali valori vengono impiegati come parametri di input del sistema di gestione degli allertamenti. In Figura 4.18 viene rappresentato il sistema di riferimento dei moduli BPM e delle celle di carico Load Link.

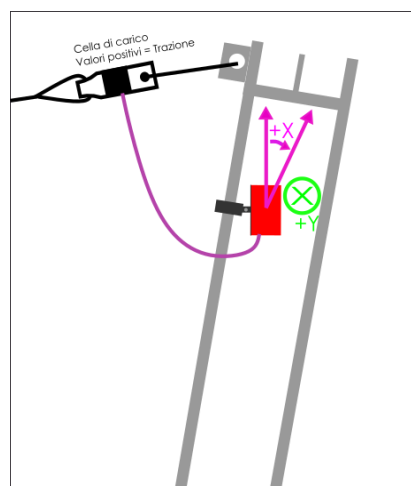


Figura 4.18 Sistema di riferimento moduli BPM e celle di carico Load Link.

4.3.1 RSN Link

Nei grafici in Figura 4.19 e in Figura 4.20 sono rappresentati i dati relativi alle rotazioni dei montanti, in direzione x monte-valle, misurati rispettivamente nella Barriera 1 e nella Barriera 2 dai sensori RSN Link. Nel periodo considerato non si sono identificati spikes. La rotazione angolare massima è stata registrata nella barriera 1 dal sensore integrato nel modulo BPM DT0001 ed è risultata pari a 0.122° . Tale valore corrisponde al 2.44% della soglia assoluta impostata nel sistema di allertamento. I valori massimi registrati dagli altri sensori sono rappresentati in Tabella 4.9.

Tabella 4.9 Rotazione massima e minima e variazione angolare massima, in direzione x , misurata dal sensore RSN Link posto nel modulo BPM DT0nnn.

	Rotazione dei montanti lungo x misurata dal sensore RSN Link posto nel modulo BPM DT0nnn				
	DT0001	DT0002	DT0003	DT0004	DT0005
Rotazione massima [°]	0.122	0.095	0.068	0.083	0.116
Rotazione minima [°]	-0.292	-0.357	-0.278	-0.177	-0.258
Variazione angolare massima [°]	0.414	0.452	0.346	0.260	0.374
Rotazione massima in percentuale rispetto alla soglia assoluta impostata nel sistema di allertamento [%]	2.44	1.90	1.36	1.66	2.32

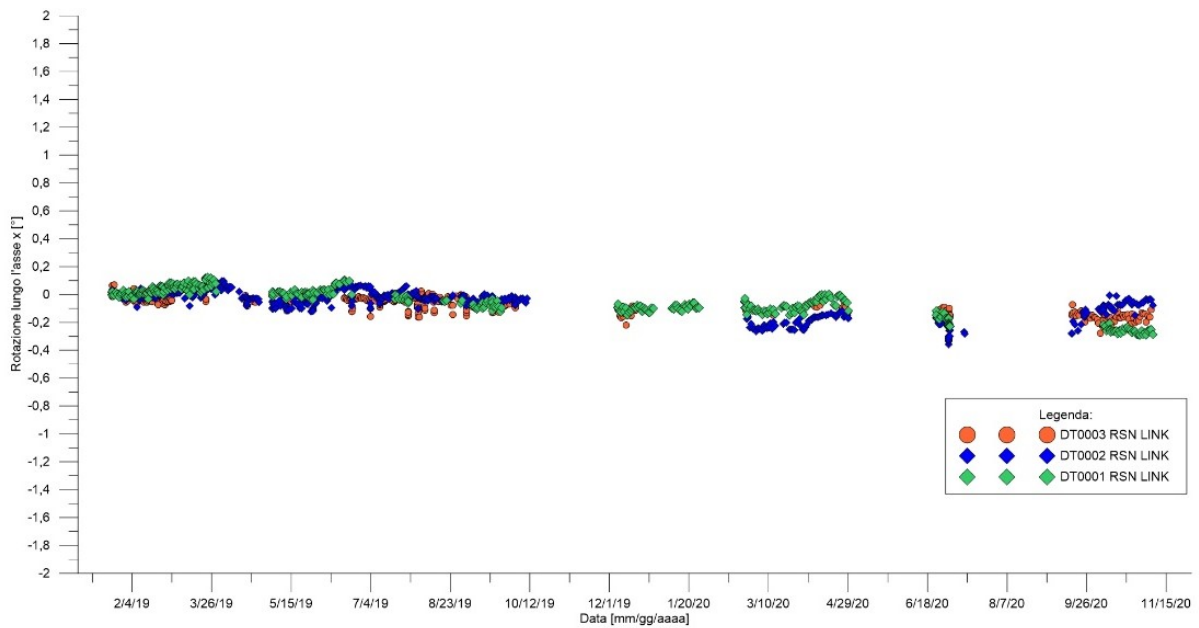


Figura 4.19 Rotazione dei montanti della barriera di monte, in direzione x , misurata dai sensori RSN Link.

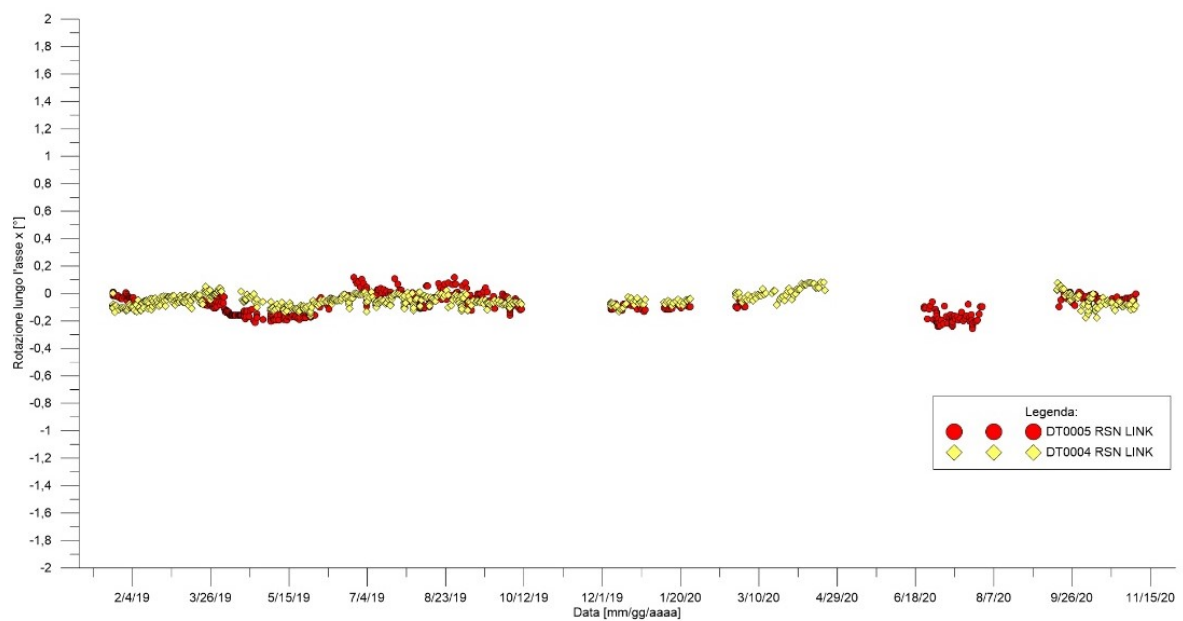


Figura 4.20 Rotazione dei montanti nella barriera di valle, in direzione x , misurata dai sensori RSN Link.

Le variazioni campionate nel periodo di monitoraggio considerato sono principalmente da attribuire alle deformazioni termiche della struttura e in minima parte agli effetti della temperatura sul sensore, poiché calibrato appositamente per ridurre al minimo tali effetti. Nel grafico in Figura 4.21 viene riportato come esempio la variazione dell'angolo x , registrata dal sensore MEMS posto nel modulo DT0004, durante il mese di luglio 2019 e la variazione di temperatura misurata dal medesimo sensore. Come si può notare vi è una stretta correlazione tra l'andamento della temperatura e il parametro misurato. La media delle variazioni angolari massime, calcolate come differenza tra la rotazione massima e la minima individuata dai singoli sensori RSN Link prendendo in considerazione l'intero dataset, è risultata pari a 0.36° .

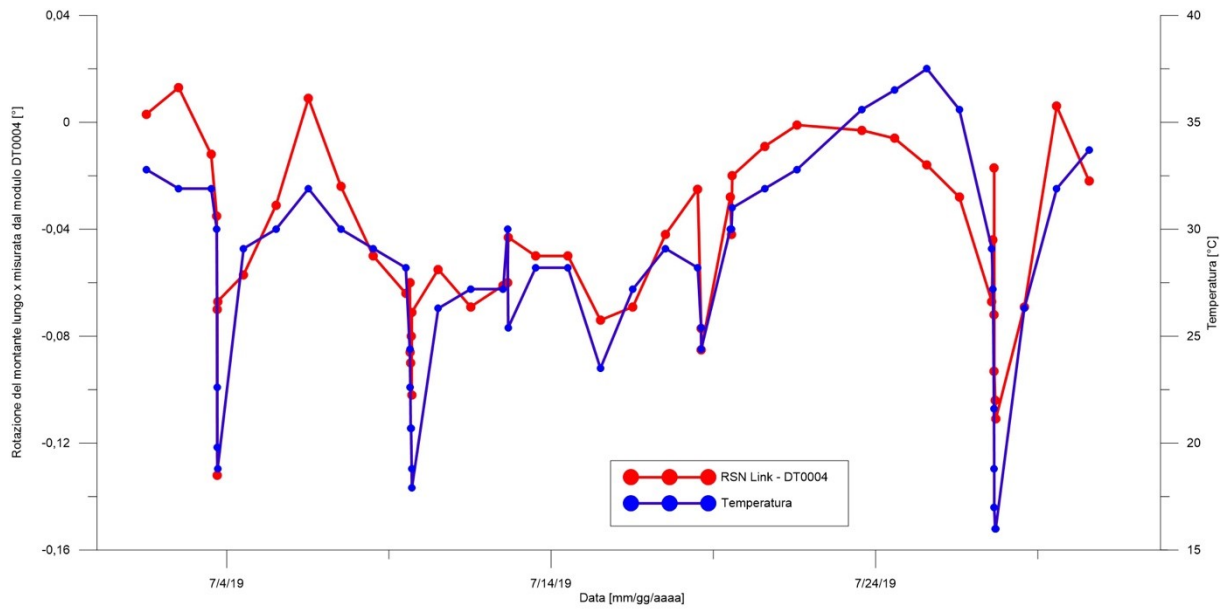


Figura 4.21 Confronto tra la variazione dell'inclinazione del montante misurata dal sensore RSN Link disposto all'interno del modulo BPM DT0004 e la temperatura registrata dal medesimo sensore nel mese di luglio 2019.

4.3.2 RSN HR Link

Le rotazioni dei montanti misurate nella Barriera 1 e nella Barriera 2, dai sensori RSN Link HR, sono rispettivamente rappresentate in Figura 4.22 e Figura 4.23. La variazione angolare massima in direzione valle è stata rilevata nella Barriera 2 dal sensore integrato nel modulo BPM DT0005 e ha valore 0.39° . Durante il periodo di monitoraggio non si sono individuati spikes e le rotazioni dei montanti individuate in questo caso sono correlabili alle deformazioni termiche della struttura e agli effetti della temperatura sul sensore. Come esempio si riporta il confronto tra le rotazioni registrate dal sensore RSN Link HR e la variazione di temperatura nel mese di agosto 2019 (Figura 4.24). Durante il periodo in esame la media delle variazioni angolari massime è risultata pari a 0.33° . Il valore massimo registrato in direzione valle è risultato superiore rispetto a quello registrato dai sensori RSN Link e pari al 7.88% della soglia definita nel sistema di allertamento.

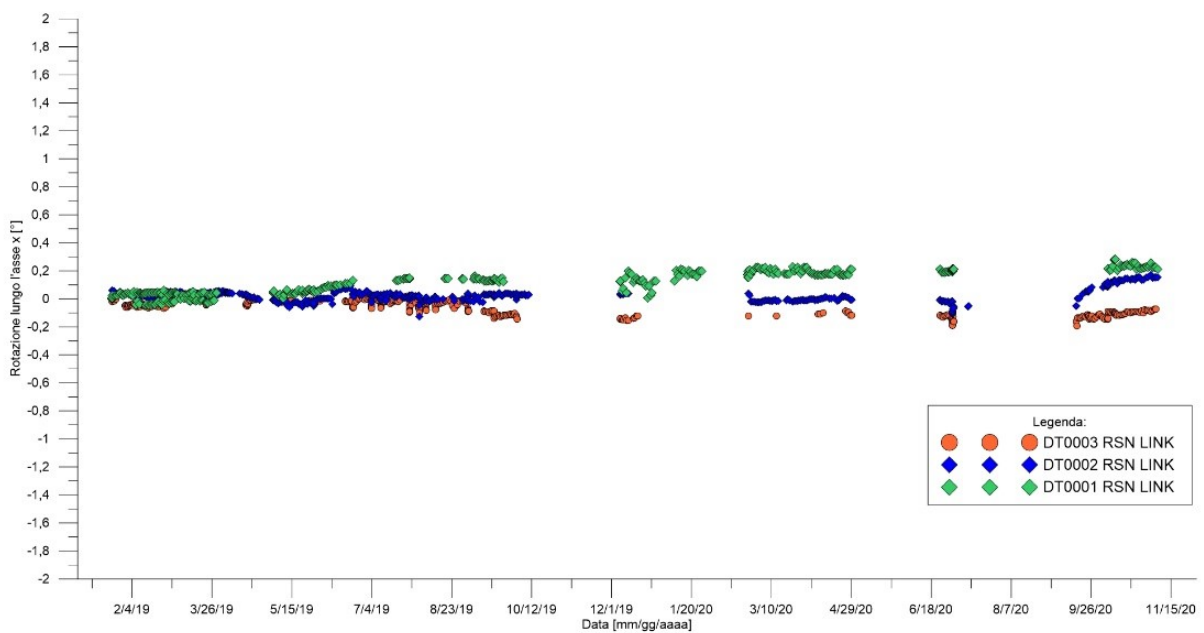


Figura 4.22 Rotazione dei montanti della barriera 1 registrati dai sensori RSN link HR nel periodo di monitoraggio considerato.

Tabella 4.10 Rotazione massima e minima e variazione angolare massima, in direzione x , misurata dal sensore RSN HR Link posto nel modulo BPM DT0nnn.

	Rotazione dei montanti lungo x misurata dal sensore RSN Link HR posto nel modulo BPM DT0nnn				
	DT0001	DT0002	DT0003	DT0004	DT0005
Rotazione massima [°]	0.282	0.171	0.018	0.291	0.394
Rotazione minima [°]	-0.047	-0.125	-0.191	-0.080	-0.077
Variazione angolare massima [°]	0.330	0.297	0.209	0.372	0.471
Rotazione massima in percentuale rispetto alla soglia assoluta impostata nel sistema di allertamento [%]	5.65	3.43	0.37	5.82	7.88

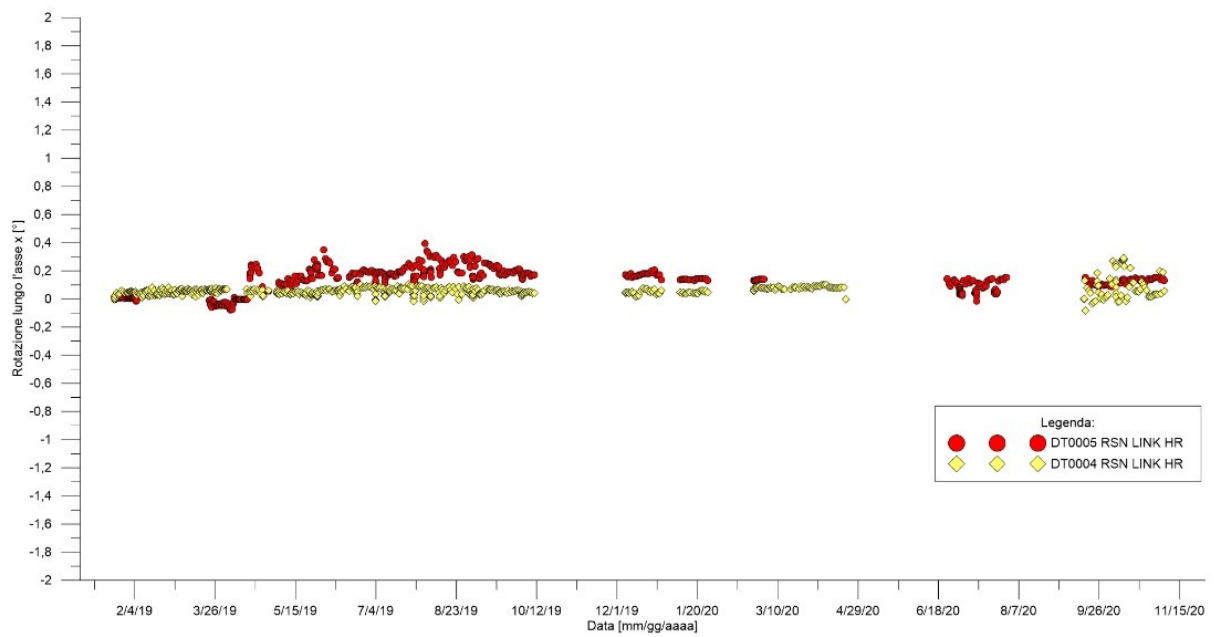


Figura 4.23 Rotazione dei montanti della barriera 2 misurate dai sensori RSN Link HR.

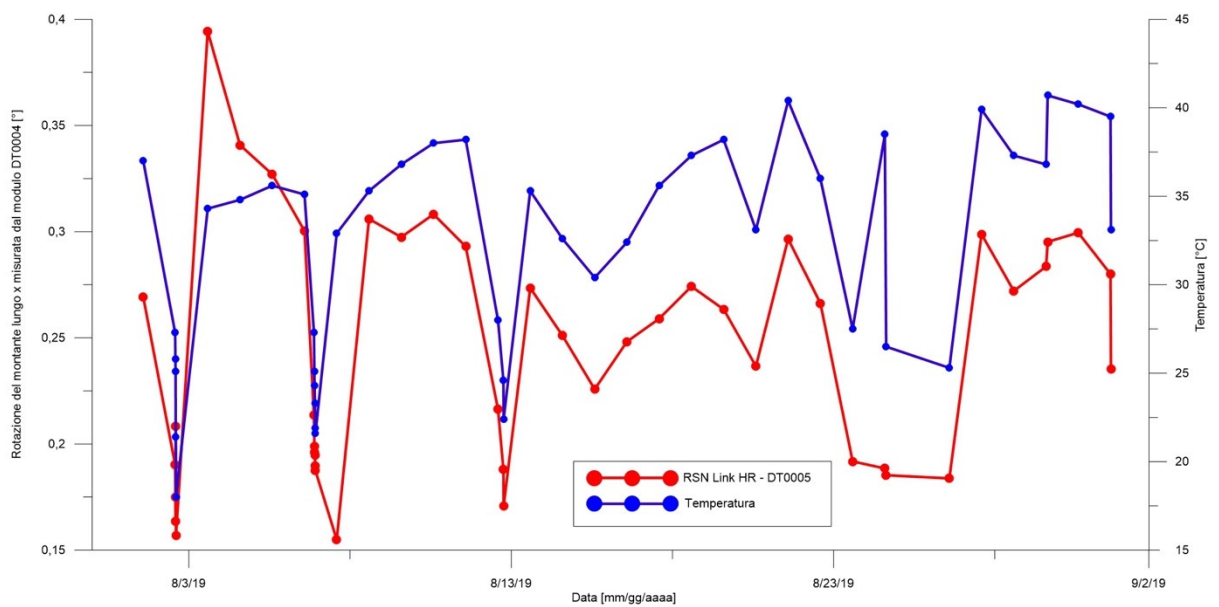


Figura 4.24 Confronto tra la variazione dell'inclinazione del montante misurata dal sensore RSN Link HR integrato nel modulo BPM DT0005 e la temperatura registrata dal medesimo sensore nel mese di agosto 2019.

4.3.3 Load Link

Le celle di carico hanno mostrato comportamenti tra loro differenti. La DT0001LL è stata installata con una tensione di trazionamento pari a 18.02 kN. A partire da giugno 2019 il dispositivo ha rilevato un incremento di carico con un valore massimo registrato a settembre 2019 pari a 12 kN. Successivamente si è notato un decremento dello stesso a partire da gennaio 2020. Nell'analisi sono stati presi in considerazione i dati fino a giugno 2020 poiché dopo il ripristino dei moduli BPM la cella ha registrato valori di forza nettamente superiori rispetto al trend registrato precedentemente, segnale preliminare del malfunzionamento in seguito riscontrato a ottobre 2020. Durante il periodo di monitoraggio compreso tra la data di installazione e il 28/04/2020, la cella DT0001LL ha rilevato tre spikes in data 2/06/2019, in data 11/09/2019 e in data 24/04/2020.

La cella DT0002LL è stata disposta sulla barriera con una forza di trazione iniziale pari a 2 kN. L'andamento nel tempo del segnale è simile a quello individuato dal dispositivo descritto precedentemente, con un incremento di carico avvenuto a partire da giugno 2019 e un valore massimo pari a 12.01 kN registrato a settembre 2019.

L'ultima cella disposta sulla barriera 1 è stata installata con una tensione iniziale di trazionamento pari a 12.31 kN. Dai dati registrati è possibile evidenziare una consistente decrescita del carico iniziale a partire dalla data di installazione e pari a 8 kN. Le variazioni di carico individuate sono probabilmente da attribuire ad una ripartizione del peso proprio della barriera sui controventi di monte. In Figura 4.25 viene rappresentata la variazione della forza sui controventi di monte rilevata dai dispositivi Load Link nella barriera 1.

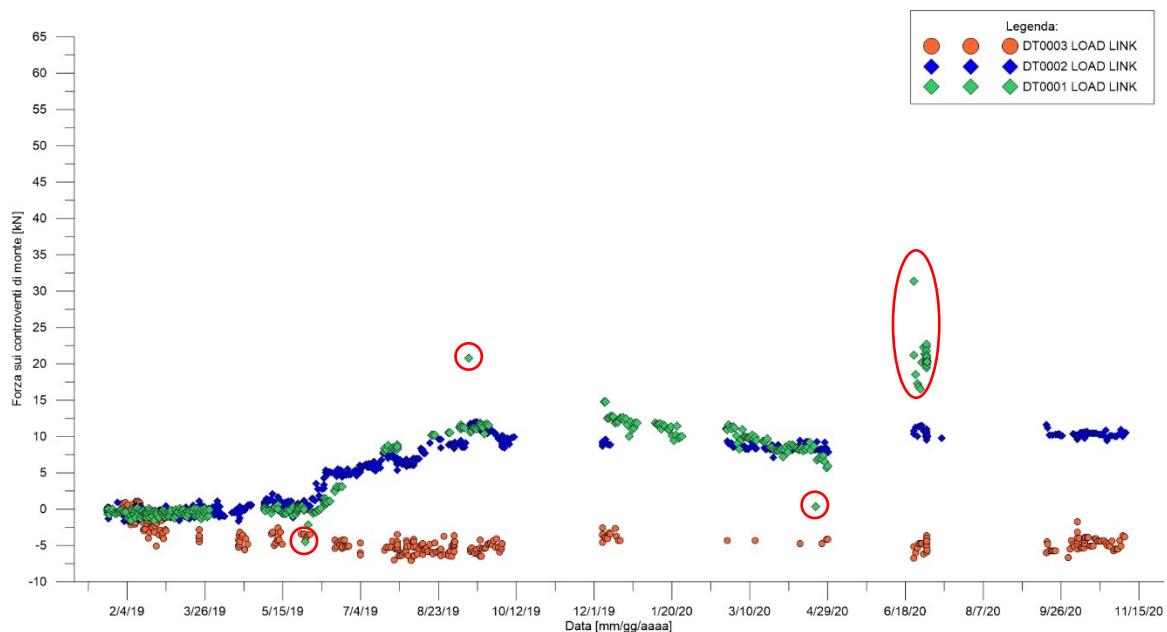


Figura 4.25 Variazione della forza sui controventi di monte rilevata dai dispositivi Load Link nella barriera 1.

La cella di carico DT0004LL, disposta nella barriera 2, è stata sottoposta ad una forza di trazione iniziale pari a 5.63 kN. La variazione massima registrata nel periodo di monitoraggio considerato è risultata essere di 5.13 kN. Il secondo dispositivo Load Link DT0005LL disposto nella medesima

struttura ha registrato variazioni di carico, tra una lettura e la successiva, superiori rispetto ai restanti dispositivi (Figura 4.26). La variazione massima registrata è stata di 16.13 kN (Tabella 4.11). In tale punto di misura pare che vi sia una continua variazione dell'entità del carico dovuta alla redistribuzione del peso della barriera causato dalle deformazioni termiche dei componenti della struttura. Da sottolineare che il sensore RSN Link HR nel medesimo punto ha rilevato anch'esso variazioni di rotazione tra una lettura e l'altra superiori rispetto ai restanti dispositivi. Nel grafico in Figura 4.27 vengono riportati i dati normalizzati del carico agente sul tirante e della rotazione del montante rilevati nel punto in esame.

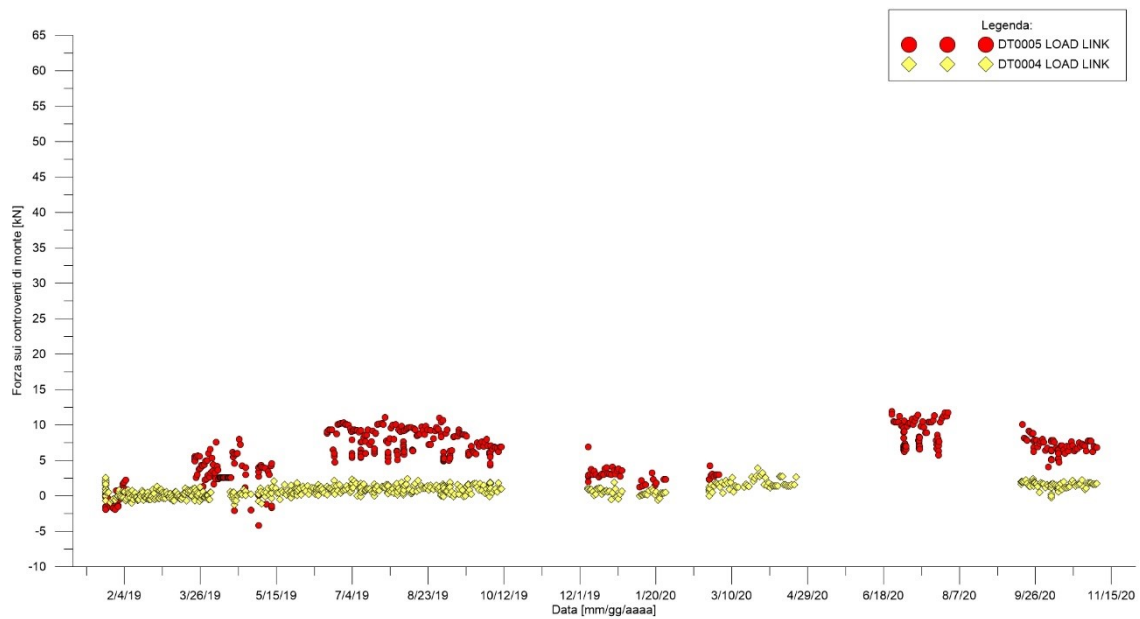


Figura 4.26 Variazione della forza sui controventi di monte rilevata dai dispositivi Load Link nella barriera 2.

Tabella 4.11 Carico sui controventi di monte registrato dai sensori Load Link DT0nnnLL

	Carico sui controventi di monte registrato dal sensore Load Link DT0nnnLL				
	DT0001LL	DT0002LL	DT0003LL	DT0004LL	DT0005LL
Carico massimo rilevato [kN]	14.804516	14.01496	13.396426	9.532838	13.917788
Carico minimo rilevato [kN]	-2.107914	0.33818	5.265754	4.400338	-2.220372
Variazione di carico massima [kN]	16.91243	13.67678	8.130672	5.1325	16.13816
Forza di trazione iniziale [kN]	18.12	2	12.31	5.63	2
Carico massimo in percentuale rispetto alla soglia assoluta impostata nel sistema di allertamento [%]	22.77	18.48	1.67	6.00	18.33

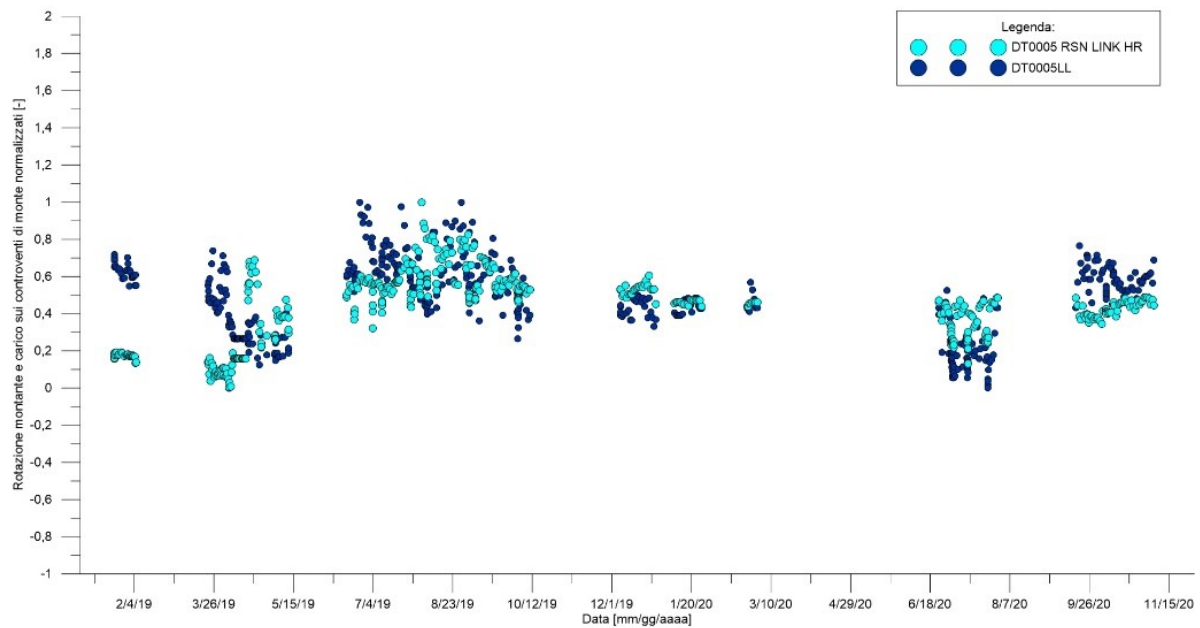


Figura 4.27 Confronto tra i dati normalizzati registrati dalla cella di carico DT0005LL e dal sensore RSN Link HR disposto all'interno del modulo DT0005.

4.4 Conclusioni

Al fine di testare la tecnologia di monitoraggio Rockfall Safety Network, in data 22/01/2019, è stata installata una versione prototipale del sistema in un sito pilota posto nella località di Vobarno (BS). Il cantiere identificato è caratterizzato da una parete rocciosa fortemente fratturata dove sono state installate due nuove barriere, modello RAV_8/A realizzate dalla società Incofil Tech S.r.l., al fine di mitigare il rischio di caduta massi. Le due strutture sono state monitorate attraverso l'impiego di 5 moduli BPM, 5 celle di carico Load Link e 2 dispositivi Trigger. Dalla data di installazione al 6/11/2019 non si sono evidenziati crolli sul Monte Cingolo che hanno intercettato le due barriere e le reti risultano libere da detriti. Nel periodo di monitoraggio considerato, i sensori che compongono il sistema RSN hanno registrato le variazioni minime di inclinazione dei montanti e delle forze sui controventi di monte causate dalle deformazioni termiche dei componenti delle strutture. La discordanza tra i valori del MEMS e dell'ampolla elettrolitica è da attribuire alla maggiore dipendenza del secondo sensore alla temperatura. Le variazioni massime di inclinazione registrate dai sensori RSN Link e dai sensori RSN link HR sono risultate rispettivamente inferiori al 2.44% e al 7.88% della soglia definita nel sistema di allertamento e pari a 5°. I valori di forza massimi rilevati sui controventi di monte sono risultati essere inferiori al 22.77% del valore della soglia impostata di 65 kN.

Durante l'attività di monitoraggio sono state identificate diverse criticità al sistema fortemente legate al sito di installazione e all'impiego dei sensori a lungo termine e quindi non identificabili durante i test svolti sulla strumentazione in laboratorio. Le prime due criticità sono state riscontrate nel sistema radio dei moduli BPM. La prima, risolta con un aggiornamento firmware del dispositivo, ha riguardato l'impossibilità dei moduli di effettuare una riconnessione alla rete. La seconda invece era legata ad un consumo energetico eccessivo del modulo radio che portava le batterie ad esaurirsi.

Il sistema di alimentazione dei moduli BPM, infatti, è stato dimensionato affinché possa garantire la loro operatività per almeno due anni, considerando un'acquisizione al giorno. Dai dati ottenuti in sito, la durata delle batterie è in realtà risultata nettamente inferiore e variabile dai due a cinque mesi. Dai test effettuati in laboratorio, ad agosto 2020, pare che il consumo superiore alle aspettative sia stato causato da picchi di tensione rilevati durante i processi di riconnessione del modulo che la batteria individuata non riusciva a sopportare. Per risolvere tale problematica si è modificata l'architettura del firmware in modo da ridistribuire i consumi ed è stata implementata una batteria avente una capacità superiore. Dalla data di installazione dei moduli modificati al 6/11/2020 il livello delle batterie è risultato costante e l'operazione sembra abbia risolto definitivamente le problematiche radio. Le prospettive future sono di valutare la nuova durata della batteria ed implementare un sistema di ricarica fotovoltaico da disporre nei singoli moduli in modo da ridurre al minimo le operazioni di manutenzione sul sistema. Un'ulteriore problematica ha riguardato l'invio di impulsi da parte dei dispositivi Trigger in occasione di fenomeni temporaleschi. La criticità è stata risolta sviluppando un nuovo sistema di gestione degli allertamenti che consente di filtrare i falsi allarme in fase di elaborazione dei dati, basato non più solamente sulle attivazioni dei dispositivi Trigger Link ma anche sui dati campionati dagli altri sensori presenti nella medesima barriera. L'ultima criticità ha riguardato il danneggiamento della cella di carico DT0001LL, probabilmente causato dall'infiltrazione di acqua meteorica all'interno del circuito estensimetrico, che ha portato allo scollegamento della stessa ad ottobre 2020. In futuro si prevede la sostituzione del dispositivo non più funzionante con un nuovo prototipo maggiormente impermeabilizzato.

CAPITOLO 5 SISTEMA GFLOW SAFETY NETWORK

Nel presente capitolo verrà illustrato lo sviluppo del sistema denominato GSN (Gflow Safety Network) pensato per il controllo remoto di barriere flessibili paracolte di nuova produzione o già poste in esercizio. Nel primo paragrafo verrà fornita una descrizione generale della tecnologia e delle sue possibili applicazioni, successivamente verrà illustrata la procedura di sviluppo dei singoli componenti ed infine verranno mostrati i risultati di test effettuati su un sistema prototipale per valutarne l'applicabilità e i limiti.

5.1 Descrizione sistema

Le barriere flessibili contro le colate detritiche, nella maggior parte dei casi, sono poste in zone remote dove non è presente la corrente elettrica. Per tale motivo le tecnologie automatiche dedicate al monitoraggio di tali strutture sono solitamente alimentate da batterie tampone e ricaricate mediante pannelli fotovoltaici. I sistemi pertanto devono essere ottimizzati al fine di ridurre al minimo il consumo energetico richiesto; non è quindi possibile prevedere un campionamento dei sensori in continuo, ma la scelta deve ricadere su soluzioni in near real-time. Tuttavia le colate detritiche sono fenomeni impulsivi (Hürlimann et al., 2019) e registrando i dati con frequenze ridotte non è possibile identificare l'istante dell'impatto e di conseguenza attivare nell'immediato le procedure di allertamento.

Il Gflow Safety Network nasce dall'esigenza di:

1. Monitorare in real-time le barriere flessibili con sistemi a batteria;
2. Attivare un eventuale sistema di monitoraggio esterno caratterizzato da una frequenza di campionamento in near real-time, avviando una lettura straordinaria dei sensori (es. celle di carico, idrometri, ecc.) in concomitanza di un evento;
3. Gestire una telecamera in modo tale da realizzare una foto giornaliera della barriera in condizioni ordinarie e una ripresa straordinaria in concomitanza di un evento;
4. Sviluppare una tecnologia a basso costo che permetta sia di identificare un impatto sia di registrare i dati che hanno provocato il superamento di una soglia predefinita, in modo da filtrare eventuali falsi allarmi.

I componenti del sistema sono due e sono rispettivamente denominati modulo Gflow e Eyeflow ed entrambi sono basati su schede commerciali Low Cost. Il primo dispositivo è pensato per essere installato direttamente a contatto con la rete e consente di misurare in continuo le accelerazioni a cui è sottoposta la porzione di barriera dove è ubicato. Si presenta esternamente come una scatola in metallo IP68 (dimensioni 12,5 x 9 x 6 cm) collegata a due piastre che ne consentono l'installazione per attrito sulla rete (Figura 5.2). All'interno dello scatolare sono presenti un accelerometro a basso consumo e una scheda elettronica programmabile per la gestione del sensore. L'alimentazione del modulo avviene mediante una batteria al Litio da 3.6 V, collegata ad un regolatore di tensione e ad un pannello esterno posto al di sopra dello scatolare, che ne consente la ricarica in continuo. Il

modulo Gflow è pensato per operare secondo due modalità: Low Power Mode e Operational Mode. Per la maggior parte del tempo il sistema si trova in modalità a risparmio energetico: in tale stato le componenti della scheda attive sono ridotte al minimo e, in assenza di ricarica del pannello (come in occasione di nevicate importanti che ricoprono lo stesso per diversi giorni), il sistema è in grado di proseguire l'attività di monitoraggio per circa dieci giorni. In modalità Operational Mode il consumo energetico risulta essere sei volte superiore. Il passaggio dalla modalità Low Power alla modalità Operational mode può avvenire in due modi:

1. In seguito alla lettura di un valore di accelerazione che ha superato una soglia;
2. Secondo una temporizzazione definita dall'utente.

Nel primo caso il passaggio è determinato dalla lettura di una variazione di tensione nelle porte analogiche mediante due comparatori che rimangono attivi in modalità Low Power. I segnali in uscita dall'accelerometro, espressi in Volt, sono tre: X_{out} , Y_{out} e Z_{out} e sono proporzionali al valore di accelerazione misurato lungo i tre assi. Il controllo sul cambiamento di tensione avviene sulle due porte ai quali sono collegati i segnali X_{out} e Y_{out} . In Figura 5.1 viene rappresentato un render grafico dell'installazione del dispositivo Gflow: come si può notare, l'asse x dell'accelerometro è rivolto in direzione parallela al canale e ortogonale alla barriera, l'asse y misura le accelerazioni dovute ad un abbassamento della rete mentre l'asse z viene rivolto trasversalmente alla rete. La scelta di impostare la soglia sugli assi x e y deriva dal fatto che lungo tali direzioni si attendono le accelerazioni maggiori e che non è possibile che un impatto sulla barriera generi accelerazioni solamente sull'asse z .



Figura 5.1 Orientazione degli assi dell'accelerometro rispetto alla barriera (Render grafico).

Nel secondo caso, il risveglio è regolato da una frequenza definita dall'utente che è possibile modificare da remoto anche dopo l'installazione mediante la piattaforma web. La possibilità di inviare dati quotidianamente e non al solo superamento di soglie risulta utile per monitorare lo stato di operatività del dispositivo nel tempo, il livello della batteria, la rotazione qualitativa della rete e la potenza del segnale WiFi che può essere inficiato dall'aumento della vegetazione nei periodi

primaverili-estivi o dalla presenza di precipitazioni nevose nel periodo invernale. Avvenuto il passaggio alla modalità Operational, la prima operazione effettuata è il campionamento di 150 dati di accelerazione per ogni asse e il calcolo della risultante. Se nel dataset calcolato non vi sono valori che hanno superato una seconda soglia, definita “soglia software”, viene inviato un file contenente informazioni in merito alla rotazione qualitativa della rete, calcolata sulla media dei dati di accelerazione registrati e allo stato del modulo. Se, al contrario, questa soglia viene superata, viene attivato un processo di allerta che prevede di inviare tutto il dataset dei valori di accelerazione campionati e di attivare una lettura straordinaria di eventuali centraline esterne. Il valore della soglia software può essere modificato anch'esso da remoto mediante l'apposita sezione nella piattaforma di rappresentazione. La trasmissione dei dati al centro di calcolo avviene mediante rete WiFi, generata da un modem esterno posto in una zona sicura ad una distanza non superiore a 70 metri dal modulo.

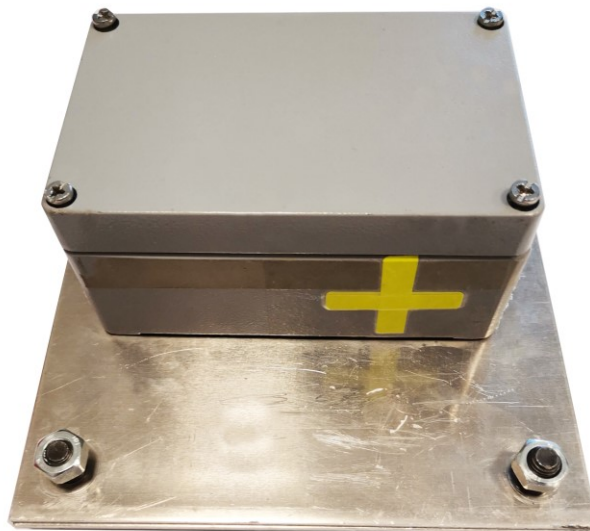


Figura 5.2 Sistema prototipale Gflow.

Il secondo dispositivo, denominato Eyeflow, nasce dall'esigenza di gestire una videocamera che permetta di campionare fotogrammi della struttura monitorata con una frequenza definita e in occasione di eventi di colata, contenendo allo stesso tempo i consumi sia in termini energetici sia in termini di quantità di dati inviati. All'interno della periferica prototipale sviluppata si è prevista una camera integrata; in ogni caso, la stessa può essere sostituita con una qualsiasi telecamera di tipologia IP. La comunicazione tra questo componente e il modem che genera la rete WiFi è basata sugli stessi presupposti illustrati per il sensore Gflow. Tramite il dispositivo è possibile impostare una frequenza e un tempo di riaccensione della telecamera, oltre alla frequenza di acquisizione dei fotogrammi all'interno di questo intervallo. Inoltre è possibile acquisire fotogrammi della barriera per una durata e con una frequenza definita dall'utente in concomitanza di un superamento di soglia registrato dal Gflow.

Il sistema Gflow Safety Network è totalmente automatizzato ed ottimizzato per fornire la segnalazione di un evento critico nel più breve tempo possibile. I dati campionati vengono inviati

ad un database (dove avviene lo storage) ed elaborati mediante un software appositamente sviluppato. Successivamente i risultati vengono rappresentati su di una piattaforma dinamica accessibile dal web.

5.1.1 Installazione e configurazioni

Il sistema Gflow Safety Network può essere installato in quattro differenti modalità. Nella prima configurazione si prevede di posizionare un solo dispositivo Gflow e Eyeflow a controllo di una barriera. Il sistema in questa modalità permette il controllo continuo della stessa, ma è maggiormente predisposto a possibili falsi allarmi a causa del numero limitato di sensori. Infatti, l'unico strumento che si ha a disposizione per validare la correlazione tra la registrazione di un valore di accelerazione sopra soglia e il passaggio di un debris flow è l'immagine della telecamera che, in condizioni di scarsa visibilità (es. nebbia), può essere inutilizzabile. Tale opzione di installazione è quindi consigliata in siti già strumentati con sistemi di tipo AWS in cui sono impostate soglie di allerta basate sui dati pluviometrici. Correlando il superamento di soglie di pioggia con gli eventuali superamenti di accelerazione è possibile ridurre i falsi allarmi.

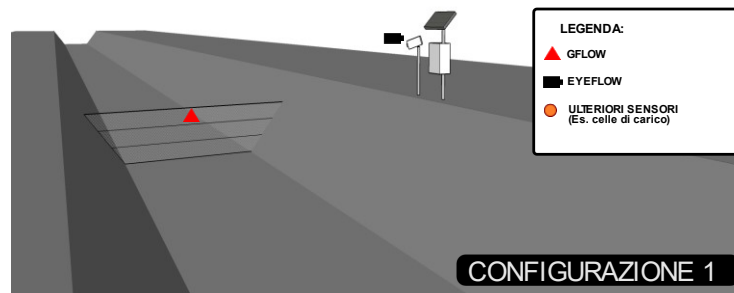


Figura 5.3 Prima configurazione di installazione.

Nella seconda configurazione si prevede l'installazione di molteplici dispositivi Gflow nella medesima barriera ottenendo dati ridondanti di accelerazione e riducendo pertanto i possibili falsi allarmi.

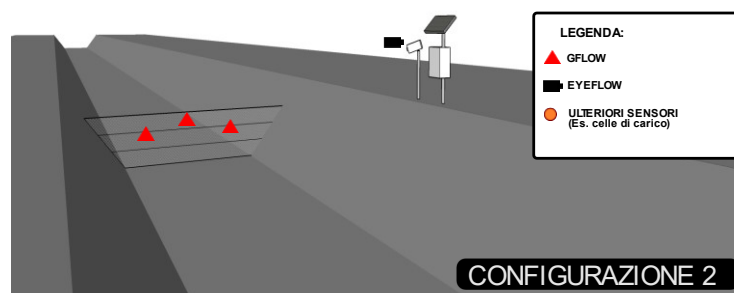


Figura 5.4 Seconda configurazione di installazione.

Nella terza configurazione di installazione si prevede di strumentare più barriere lungo il medesimo canale, se presenti. Conoscendo la distanza tra le barriere strumentate e l'istante di tempo

in cui è avvenuto il superamento della soglia di accelerazione, in due moduli disposti su due barriere diverse, è possibile stimare la velocità del flusso.

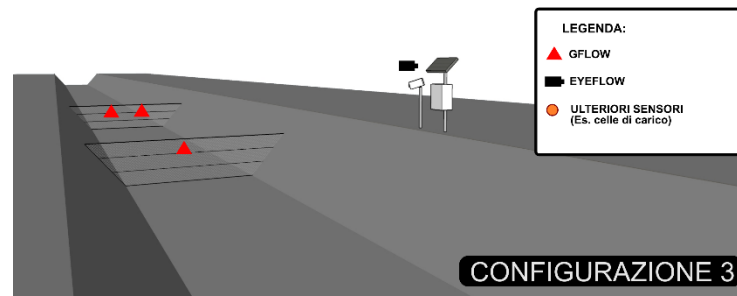


Figura 5.5 Terza configurazione di installazione.

La quarta configurazione prevede di disporre il sistema Gflow in parallelo a un sistema di monitoraggio con una frequenza di campionamento in near real-time, permettendone l'attivazione nel caso in cui venga rilevato un superamento della soglia impostata. La quarta modalità di installazione è consigliata poiché analizzando i dati provenienti da altri sensori è possibile filtrare eventuali superamenti di soglia dell'accelerometro non dovuti a fenomeni di colata.

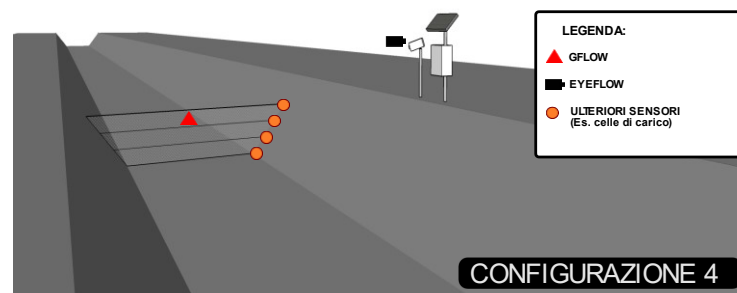


Figura 5.6 Quarta configurazione di installazione.

5.2 Sviluppo del sistema

Durante lo sviluppo del sistema per valutarne l'efficacia e i limiti si è realizzato un prototipo del sistema Gflow e un prototipo della scheda di gestione Eyeflow.

5.2.1 Modulo Gflow

Il modulo Gflow è basato sulla scheda di sviluppo MKR WIFI 1010, prodotta dalla società Arduino S.r.l. Nella Tabella 5.1 sono sintetizzate le principali caratteristiche tecniche della periferica. La scelta è ricaduta su tale soluzione per le seguenti ragioni:

- La scheda permette la realizzazione di soluzioni Internet of Things a basso consumo e quindi alimentate da un circuito a batteria.
- Il sistema di comunicazione WiFi è integrato nella board e non vi è la necessità di implementare ulteriori periferiche per la trasmissione dei dati. Tale peculiarità permette di ridurre al minimo i collegamenti via cavo presenti all'interno del prototipo e i problemi di comunicazione.
- La connettività WiFi consente la comunicazione tra il prototipo, posizionato sulla barriera, e un modem esterno al canale, senza la necessità di utilizzare dei cavi di trasmissione che potrebbero danneggiarsi durante un evento, essere sottoposti a fenomeni di usura dovuti a sbalzi termici o essere rovinati dall'azione di roditori.
- Il microcontrollore SAMD21 Cortex-M0+ a 32 bit con una velocità di clock di 48 MHz consente un'elaborazione più veloce dei dati rispetto a board più economiche che montano solitamente processori meno performanti. L'acquisizione dei dati accelerometrici può avvenire con una frequenza di acquisizione massima di circa 4.5 KHz.
- I dati accelerometrici possono essere registrati direttamente nella memoria Flash che per la scheda in questione risulta essere di 256 KB. La scelta di effettuare lo storage temporaneo dei dati su una memoria volatile deriva dalla volontà di non impiegare un'ulteriore scheda esterna per la scrittura su scheda SD. Questo per ridurre al minimo i componenti del prototipo, il tempo di avvio della registrazione e per evitare la corruzione della scheda durante le fasi di scrittura della stessa, problema comune nell'ambito del monitoraggio geotecnico. Tale scelta porta con sé anche degli svantaggi. Il numero massimo dei dati registrati è limitato ed inoltre se l'invio non va a buon fine i dati salvati sulla memoria flash vengono persi.

Da sottolineare però che il sistema è stato pensato per inviare una comunicazione straordinaria di allerta/allarme e attivare eventuali sistemi di acquisizione esterni. Prevedendo un tempo di registrazione troppo lungo c'è il rischio che il prototipo, nel frattempo, venga danneggiato dall'interazione col flusso di detriti e la comunicazione non vada a buon fine. In ogni caso se lo scopo del monitoraggio è quello di campionare un numero di dati superiore a quello possibile nella memoria flash, la scheda di sviluppo è pensata per integrare shield esterne.

Tabella 5.1 Scheda tecnica della scheda MKR WiFi 1010 prodotta dalla società Arduino S.r.l.

ARDUINO MKR WiFi 1010	
Microcontrollore	SAMD21 Cortex-M0+ 32bit Low Power ARM MCU
Tensione di alimentazione	5 V
Batterie supportate	Li-po 3.7 V 700 mAh minimo
Tensione operativa	3.3 V
Porte digitali I/O	8
UART	1
SPI	1
I2C	1
Connettività	Wireless
Porte analogiche (input)	7 (ADC 8/10/12 bit)
Porte analogiche (output)	1 (DAC 10 bit)
Memoria Flash	256 KB
SRAM	32 KB
EEPROM	No
Clock Speed	48 MHz
Dimensioni	61.5 mm X 25 mm X 5 mm
Peso	32 gr.

Per l'applicazione è stato sviluppato un apposito software per la gestione della scheda di sviluppo. In Figura 5.7 viene rappresentato un diagramma di flusso semplificato che descrive le principali operazioni effettuate. Nella descrizione del software è stata esclusa la trattazione delle funzioni secondarie.

La scheda dopo l'accensione è impostata per seguire le seguenti fasi:

- 1) Inizio del processo di inizializzazione;
- 2) Definizione delle librerie e delle variabili impiegate all'interno del software, compresa la soglia preliminare sulla componente di accelerazione;
- 3) Caricamento del file di configurazione contenente le informazioni riguardanti il server FTP sul quale verranno inviati i dati e della rete WiFi al quale connettersi. L'utilizzo di un file esterno consente di caricare i parametri di configurazione legati ad un sito, senza dover riprogrammare la scheda, evitando errori di ricompilazione.
- 4) Lettura del segnale analogico in uscita da ogni asse dell'accelerometro, conversione in unità fisiche e registrazione di 150 dati per ciascun asse. Con il valore di campionamento impostato di 175 Hz è possibile ricostruire correttamente vibrazioni caratterizzate da frequenze inferiori a 87.5 Hz e allo stesso tempo registrare un segnale di circa 0.8 secondi. Tuttavia la frequenza è modificabile a seconda delle esigenze di monitoraggio fino ad un valore massimo di 4500 Hz. Naturalmente, maggiore è la frequenza di acquisizione minore sarà il tempo di registrazione.
- 5) Calcolo della risultante delle accelerazioni registrate.
- 6) Confronto del valore assoluto della risultante delle accelerazioni con la soglia definita.
- 7) Se la soglia è stata superata:
 - a) Viene attivata la funzione chiamata Watchdog che consiste in un timer che viene resettato al termine di ogni processo del programma. Nel caso il software si arresti per qualche motivo durante un'operazione il timer non viene conseguentemente resettato e, una volta che viene raggiunto un valore di tempo definito, viene generato un reboot del prototipo. Tale funzione risulta di fondamentale importanza in sistemi automatici pensati per effettuare monitoraggi

-
- a lungo termine di siti remoti, difficilmente raggiungibili per eventuali attività di manutenzione.
- b) Viene attivato un relè (se presente) che permette l'attivazione di una centralina esterna e la lettura straordinaria di sensori posti sulla barriera flessibile;
 - c) Viene inizializzato il sistema di comunicazione WiFi;
 - d) Viene letto e registrato il valore della batteria e della potenza del segnale WiFi e in parallelo avviene l'inizializzazione dell'orologio interno e la sincronizzazione dell'orario via web.
 - e) I dati raccolti vengono riordinati e convertiti secondo un formato specifico funzionale all'importazione sul database e inviati. All'interno di questo processo vi sono diversi controlli al fine di garantire il corretto trasferimento dei dati al server.
 - f) Una volta che la trasmissione dei dati è terminata avviene l'aggiornamento del valore di soglia e della frequenza di risveglio, se è stata modificata nel database.
 - g) A questo punto viene disattivato il timer Watchdog, il relè esterno e il Gflow entra in modalità Low Power.
- 8) Se la soglia non viene superata il software prevede, anche in questo caso, l'attivazione della funzione Watchdog e l'inizializzazione del WiFi. Successivamente è previsto per ogni asse il calcolo della media dei valori di accelerazioni registrati. I dati accelerometrici in questo caso vengono impiegati per individuare eventuali variazioni di inclinazione della porzione di rete dove è ubicato il prototipo. In questo modo, è possibile individuare eventuali riempimenti della rete causati dall'accumulo nel tempo di materiale che, durante la deposizione, non ha provocato accelerazioni sulla rete tali da superare la soglia impostata. Successivamente avviene l'invio dei dati al server, l'aggiornamento della soglia software di attivazione e della frequenza di campionamento se è stata modificata. Al termine delle operazioni viene disattivata la funzione Watchdog e il prototipo Gflow passa alla modalità operativa Low Power.

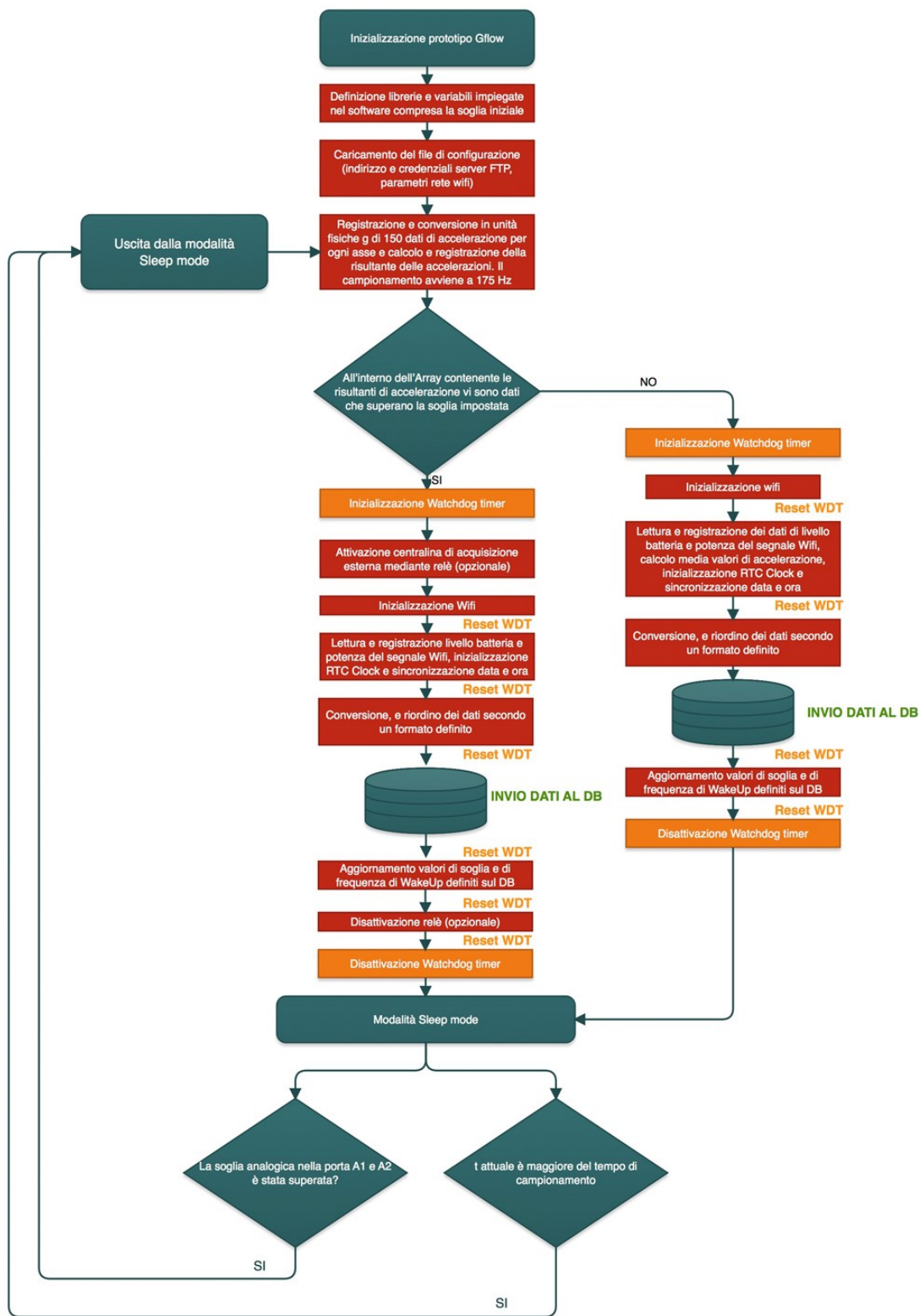


Figura 5.7 Diagramma di flusso semplificato software Gflow.

5.2.1.1 Accelerometro ADXL335

Alla scheda di sviluppo identificata è collegato il sensore accelerometrico ADXL335 prodotto dalla società Analog Devices (Analog Devices, 2009). L'accelerometro di tipo triassiale può essere impiegato sia in applicazioni di tipo tilt-sensing sia nel monitoraggio dinamico di accelerazioni generate ad esempio da vibrazioni, impatti o movimenti. È caratterizzato da dimensioni contenute (4 mm x 4 mm x 1.45 mm) e dal ridotto consumo pari a 350 μ A alimentando il sensore a 3.3 V. In Figura 5.8 viene rappresentato il consumo tipico in corrente al variare della tensione di alimentazione. La portata di misura dell'accelerometro è ± 5 g mentre il valore di overload è identificato essere 10000 g.

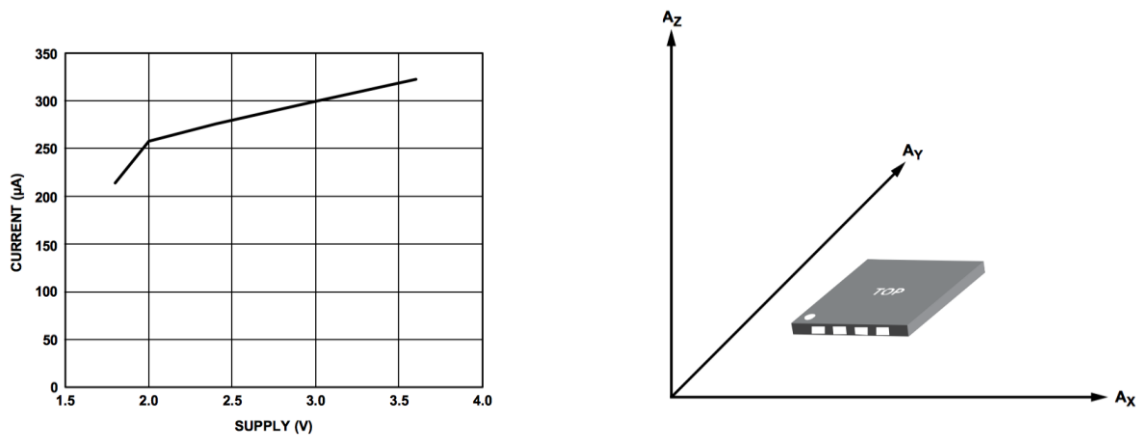


Figura 5.8 a) Consumo in corrente tipico del sensore ADXL335 in funzione della tensione di alimentazione b) Orientazione degli assi nell'accelerometro (Analog Devices, 2009).

I segnali in uscita sono di tipo analogico e proporzionali al valore di accelerazione rilevato. La corretta operatività del sensore è garantita nell'intervallo di temperatura che va da -40° a $+85^\circ$. Tali caratteristiche consentono l'impiego del sensore in dispositivi di monitoraggio in real-time, come il Gflow, pensati per operare in assenza di corrente elettrica e quindi alimentati a batteria e installati in siti caratterizzati da elevate escursioni termiche. Nella Tabella 5.2 vengono riassunte le principali caratteristiche tecniche del sensore ADXL335.

Tabella 5.2 Datasheet dell'accelerometro Analog Devices ADXL335.

Parametro	Condizioni	Valore minimo	Valore tipico	Valore massimo	Unità
Campo di misura	Ogni asse	± 3	± 5		g
Non linearità	% F.S.		± 0.3		%
Errore allineamento sensore			± 1		$^\circ$
Sensibilità (X_{out} , Y_{out} , Z_{out})	Ogni asse ($V_s = 3$ V)	270	300	330	mV/g
Risoluzione	Datalogger MKR WIFI 1010		0.0097		g
Variazione sensibilità dovuta alla temperatura	Ogni asse ($V_s = 3$ V)		± 0.01		%/ $^\circ$ C
BIAS rispetto a 0 g (X_{out} , Y_{out})	($V_s = 3$ V)	1.35	1.5	1.65	V
BIAS rispetto a 0 g (Z_{out})	($V_s = 3$ V)	1.2	1.5	1.8	V

Bandwidth (X _{out} , Y _{out})	No filtri esterni	1600	Hz
Bandwidth (Z _{out})	No filtri esterni	550	Hz
Tensione di alimentazione		1.8	3.6
Corrente di alimentazione		350	μA
Temperatura di esercizio		-40	+85

*V_s è la tensione di alimentazione del sensore

5.2.1.1.1 Calibrazione

A differenza del sistema Rockfall Safety Network in cui si è effettuata una taratura dei singoli sensori nel prototipo Gflow, per convertire i dati grezzi campionati dall'accelerometro ADXL335 in unità fisiche g, si è scelto di impiegare la formula di calibrazione suggerita dalla società produttrice e successivamente effettuare prove per valutarne l'efficacia. In particolare è stata valutata l'accuratezza nell'identificare accelerazioni dinamiche note e variazioni di orientazione del sensore. La procedura consigliata prevede di calcolare la componente di accelerazione di ogni asse a partire dalla tensione di alimentazione del sensore e dalla risoluzione del convertitore analogico-digitale impiegato.

$$a_{g_a} = \frac{\frac{a_{ADC_a} \cdot V_s}{R_{adc}} - \frac{V_s}{2}}{S_s} \quad [5.1]$$

Dove:

- a_{g_a} è la componente di accelerazione lungo l'asse a in unità fisiche g;
- a_{ADC_a} è la componente di accelerazione lungo l'asse a in unità elettriche ADC;
- V_s è la tensione di alimentazione dell'accelerometro che nel caso del Gflow è pari a 3.3 V;
- R_{adc} è la risoluzione del convertitore analogico-digitale. L'ADC impiegato nel prototipo è impostato a 10 bit per cui suddivide il segnale analogico in 2^{10} livelli e quindi la sua risoluzione corrisponde a 1024 ADC;
- S_s rappresenta la sensibilità espressa in V dell'accelerometro ADXL335 che corrisponde a 330 mV/g.

5.3 Test sul prototipo Gflow

Durante la fase di sviluppo il prototipo Gflow è stato sottoposto a diversi test per valutarne i pregi e i limiti. Tali prove sono state di fondamentale importanza per poter:

1. Definire un valore iniziale da assegnare alla soglia hardware e software;
2. Valutare l'accuratezza del sistema nel misurare accelerazioni di tipo dinamico e di tipo statico utilizzando la formula di calibrazione suggerita dai produttori del sensore basata solamente sulle caratteristiche del sistema di acquisizione e del convertitore analogico-digitale;
3. Valutare l'impatto critico e i limiti di applicazione del prototipo.

5.3.1 Test di valutazione della soglia critica

Come è stato descritto nei paragrafi precedenti, il risveglio del prototipo Gflow dalla modalità Low Power è scatenato dall'individuazione di una variazione di tensione, misurata mediante due comparatori presenti nel microprocessore SAM-D21, nei pin analogici ai quali sono collegati i cavi che trasmettono i segnali letti dall'accelerometro lungo il proprio asse x e y . In questo caso il valore della soglia, che chiameremo soglia analogica, è definibile da software e una volta impostata non può essere modificata da remoto. Il termine "soglia analogica" deriva dal fatto che il controllo avviene sui segnali in tensione a monte del convertitore analogico-digitale. All'accensione straordinaria del prototipo viene letto l'accelerometro triassiale con una frequenza di acquisizione definita e vengono registrati su di un Array 150 valori per ogni asse dell'accelerometro. Successivamente viene verificato che i dati presenti nell'Array non superino una seconda soglia basata sulla risultante delle accelerazioni misurate lungo i tre assi, denominata soglia software che, a differenza di quella hardware, può essere modificata da remoto anche dopo l'installazione in sito, poiché il prototipo è stato programmato per interagire con un'apposita sezione del database.

Eventuali superamenti di entrambe le soglie, non legate ad eventi di colate detritiche, possono avere risvolti negativi sulla corretta operatività del modulo. Il singolo raggiungimento, ad esempio, della soglia analogica non inficia la funzionalità del modulo ma superamenti ripetuti nel tempo possono portare ad un consumo maggiore della batteria rispetto a quello stimato con cui è stato dimensionato il sistema di alimentazione fotovoltaico. Lo stesso discorso vale per il superamento continuo della soglia software che può portare, inoltre, ad un consumo eccessivo di dati di trasmissione e, nel caso in cui il modulo sia impostato per scatenare una lettura straordinaria di una centralina esterna al canale, potrebbe sollecitare in modo anomalo il sistema di sostentamento dell'intero impianto di monitoraggio.

Il superamento di una soglia, non legato a fenomeni di colate detritiche, può avvenire a seguito di eventuali spikes letti dal sensore (in questo caso i falsi allarmi possono essere identificati a valle mediante appositi algoritmi basati sul confronto di dati registrati da più sensori) oppure a seguito della lettura di valori di accelerazioni reali che agiscono sul modulo causati, ad esempio, dall'azione del vento sulla struttura oppure dalle precipitazioni ecc. La soglia, in questo caso, è difficile a priori da definire poiché le condizioni al contorno variano da sito a sito. Per ovviare a tale problematica si consiglia di installare il sistema in un periodo in cui non si prevedono fenomeni di colate, impostare un valore di partenza (soglia critica) e successivamente tararlo in funzione dei dati di accelerazione

raccolti. Per come è progettato il sistema ad oggi la soglia software può essere definita con una risoluzione di 0.1 g.

Per poter individuare un valore minimo di partenza da assegnare alla soglia hardware e software non superabile dal rumore del segnale accelerometrico in condizioni statiche si sono effettuati tre test.

5.3.1.1 Definizione soglia critica hardware

La soglia analogica è basata sulla variazione dei segnali X_{out} e Y_{out} nel tempo. Per evitare di impostare un valore troppo basso raggiungibile dal naturale fluttuare dei due segnali in condizioni statiche si è effettuato un test per valutarne la stabilità nel tempo. Il prototipo testato è stato posto in laboratorio ad una temperatura costante di 19 °C e interrogato per un intervallo di tempo di 68 secondi mediante un pc, impostato con una frequenza di acquisizione pari a quella di esercizio di 175 Hz. Il campionamento in continuo ha consentito la registrazione di 11900 valori per ogni asse.

I dati, in unità elettriche ADC, sono stati convertiti in unità g e si è successivamente calcolata la variazione di accelerazione tra una misura e la seguente. Nei grafici in Figura 5.9 sono rappresentate rispettivamente le variazioni di accelerazione rilevate lungo l'asse x e lungo l'asse y . Come si può notare la risoluzione dello strumento risulta essere pari a 0.0097 g, valore che deriva dalla risoluzione del convertitore analogico-digitale. Per entrambi gli assi il valore massimo registrato è risultato essere di 29 mg che espresso in tensione risulta 0.009 V.

Il valore minimo di accelerazione, causato dall'interazione con un flusso detritico su di una rete flessibile, registrato durante le prove presentate nel capitolo 1 risulta essere di 0.10 g. Tale valore può essere preso in considerazione come soglia minima hardware (0.033 V) poiché risulta superiore alla variazione massima di 0.029 g misurata durante il test. La differenza tra i due valori risulta di 60 mg.

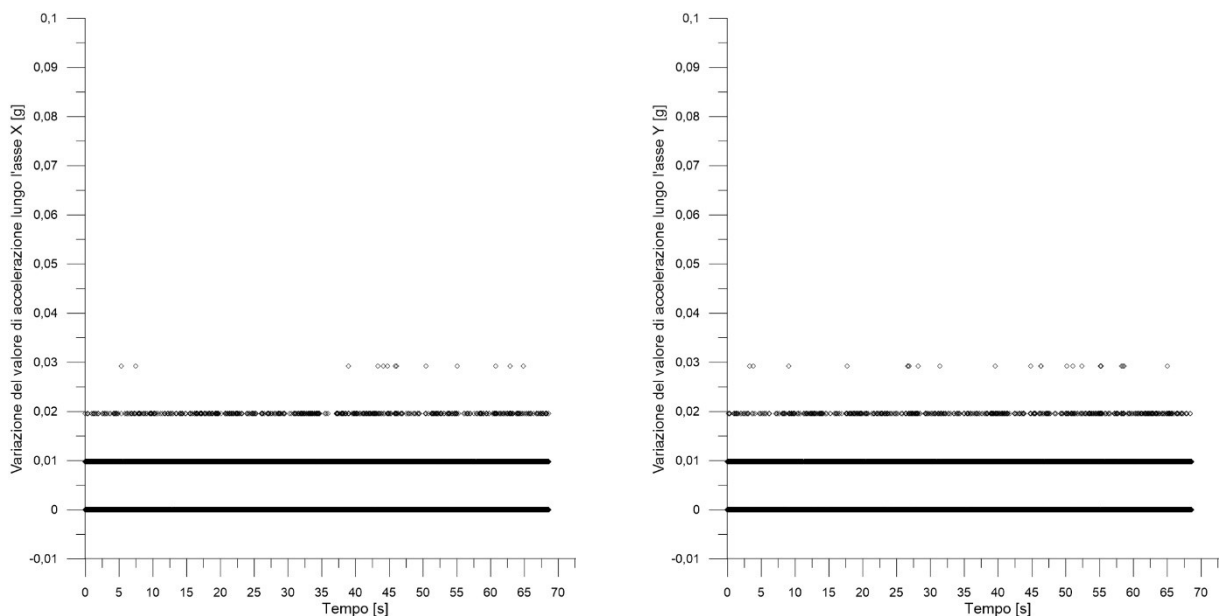


Figura 5.9 Variazione del valore di accelerazione lungo l'asse x e y letti dall'accelerometro ADXL335 nel tempo. I segnali sono stati campionati in ADC e successivamente convertiti in g.

5.3.1.2 Definizione soglia critica software.

A differenza della soglia hardware che si basa su di una accelerazione relativa, quella software viene impostata sulla risultante delle accelerazioni in termini assoluti. Gli accelerometri per loro natura registrano le tre componenti di accelerazione terrestre lungo i tre assi. Orientando un sensore accelerometrico lungo diverse giaciture si genera una variazione delle componenti di accelerazione mentre, al contrario, la risultante rimane costante e pari alla forza di gravità. Imponendo un valore di soglia sulla risultante è possibile installare il prototipo sulla rete senza preoccuparsi dell'inclinazione della stessa. L'imposizione di un limite su di una risultante assoluta presuppone di conoscere la sua variazione misurata dal sensore, in condizioni statiche e a temperatura costante e variabile.

5.3.1.2.1 Test a temperatura costante

Nella prima prova il prototipo Gflow è stato posto in laboratorio in una posizione fissa e alla temperatura costante di 18°. Durante il test si sono campionati 12494 dati di accelerazione ad una frequenza di 4 Hz mediante un pc collegato attraverso una comunicazione di tipo seriale, lasciando immutate le condizioni al contorno e riducendo al minimo eventuali disturbi esterni. Successivamente si è calcolato il campo di variazione della risultante delle accelerazioni come differenza tra il valore massimo e minimo registrato.

$$W_r = a_{r_{max}} - a_{r_{min}} \quad [5.2]$$

Dove:

- W_r è il campo di variazione della risultante delle accelerazioni;
- $a_{r_{max}}$ è la risultante massima delle accelerazioni nel dataset considerato;
- $a_{r_{min}}$ è la risultante minima delle accelerazioni nel dataset considerato;

Nel grafico in Figura 5.10 viene rappresentata la risultante delle accelerazioni registrata nel tempo. Come si può notare la risoluzione minima dello strumento, in questo caso, risulta essere di 0.01 g, valore che deriva dalla scelta di prendere in considerazione solamente due cifre decimali nel calcolo della risultante all'interno del software sviluppato su Arduino. Tale scelta deriva dalla volontà di ridurre al minimo lo spazio in byte occupato da ogni singola misura, nella variabile registrata nella memoria flash. Inoltre, il convertitore analogico digitale discretizza la portata dell'accelerometro di $\pm 5g$ in 1024 ADC e il minimo valore misurabile risulterebbe essere di 0.0097 g, valore che si discosta di solamente 0.3 mg rispetto al valore preso in considerazione. Tale errore di accuratezza è trascurabile per l'applicazione. Durante il test non sono stati individuati spikes e il campo di variazione della risultante delle accelerazioni è risultata essere di 40 mg. Il valore medio del dataset μ è risultato pari a 1 g, il valore massimo e minimo rispettivamente di 1.02 g e 0.98 g e la deviazione standard pari a 6 mg. La soglia minima impostabile sul prototipo Gflow risulta di 1.1 g. La differenza tra il valore massimo campionato e tale valore è risultata pari a 80 mg.

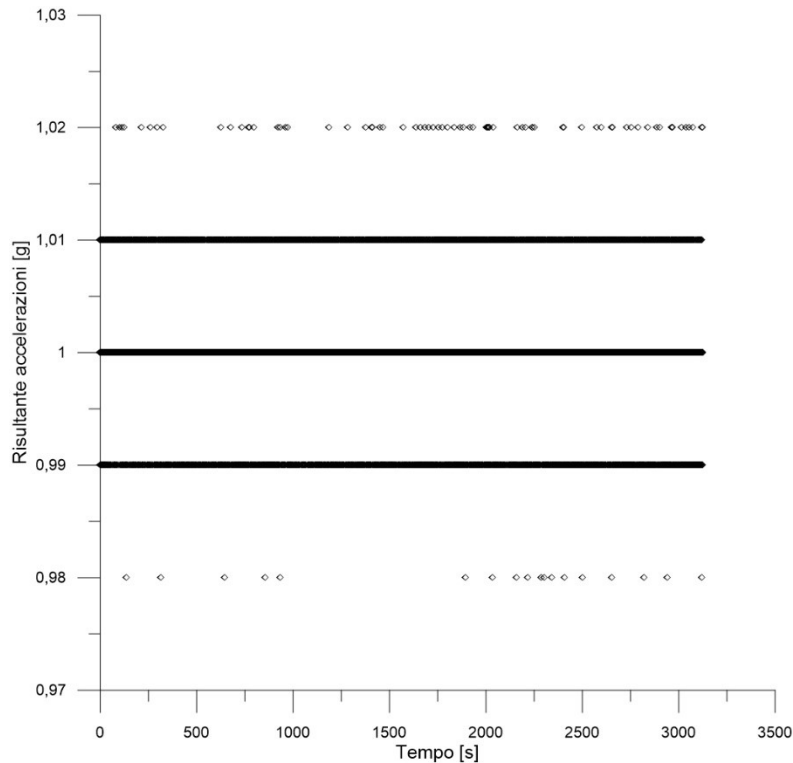


Figura 5.10 Risultato del test per valutare il campo di variazione della risultante delle accelerazioni mantenendo inalterate le condizioni di misura.

5.3.1.2.2 Test a temperatura variabile

Nel secondo test si è valutata l'interferenza della temperatura sulla stabilità del segnale. Il prototipo è stato posto all'interno di una cella climatica e in maniera del tutto simile al primo test è stato collegato mediante un cavo seriale ad un pc esterno, avente la funzione di acquisitore, che ha permesso il campionamento dei dati. Durante il test si è seguito il procedimento seguente:

1. La camera è stata portata alla temperatura n ;
2. Raggiunta la temperatura desiderata si è atteso 30 minuti al fine di ridurre eventuali errori dovuti all'inerzia termica del modulo;
3. Si è arrestata la camera per evitare che il sensore MEMS potesse misurarne le vibrazioni;
4. Si è effettuata un'acquisizione di 3000 dati ad una frequenza di 333.33 Hz.

La procedura è stata ripetuta per le seguenti temperature $-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35$. Nel grafico in Figura 5.11 sono rappresentati i risultati del test. La risultante delle accelerazioni è risultata dipendente dalla temperatura e i due parametri appaiono in controfase. Alle temperature più basse registrate corrispondono i valori più alti di accelerazione campionati e viceversa. Il valore che si avvicina di più alla soglia minima configurabile risulta essere di 1.05 g ed è stato registrato ad una temperatura di -10 . Non è stato possibile effettuare letture a temperature inferiori poiché -10 è il limite raggiungibile dalla camera climatica. Il campo di variazione del segnale registrato a temperatura -5 e $+5$ è risultato superiore di 10 mg rispetto ai risultati ottenuti nella prova precedente. Per le restanti temperature il range della risultante delle accelerazioni è risultato uguale o inferiore al dato ottenuto dalla precedente prova.

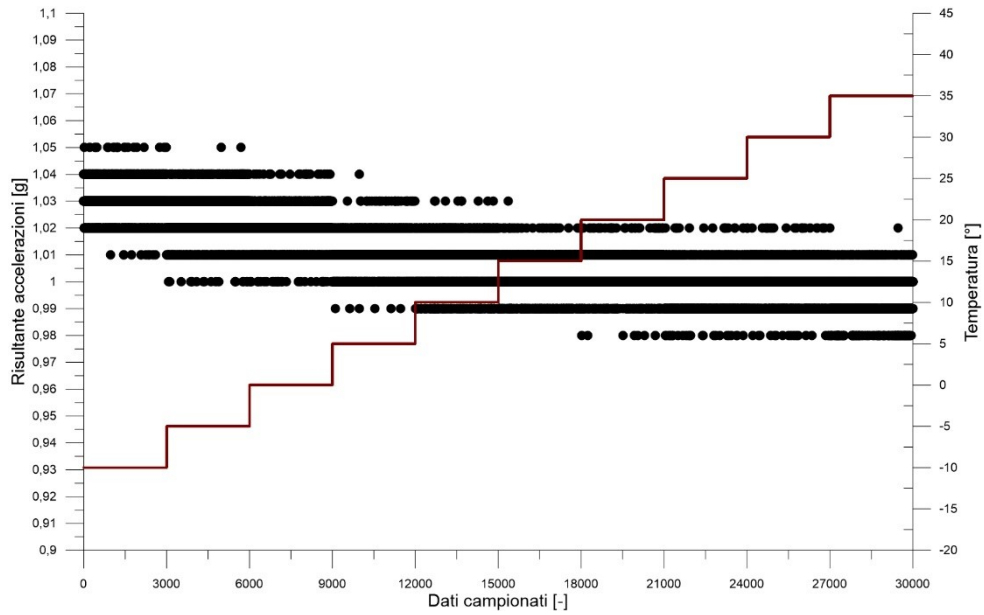


Figura 5.11 Variazione della risultante delle accelerazioni al variare della temperatura.

Graficando la media delle risultanti di accelerazione ottenute per ogni condizione termica in funzione della temperatura misurata è possibile notare che la relazione tra i due parametri non è lineare ma può essere rappresentata meglio da una polinomiale di secondo grado avente coefficiente di determinazione R^2 pari a 0.982 ed equazione:

$$a_{r_g} = 1.0171 - 0.0011 \cdot t + 1.6123 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 \quad [5.3]$$

Dove:

- a_{r_g} è la risultante in g delle accelerazioni;
- t è la temperatura in °C al quale è sottoposto il sensore accelerometrico;

Tutti i valori registrati durante la prova sono risultati inferiori alla soglia minima configurabile di 1.1 g. La differenza minima tra la soglia e i dati registrati è stato in questo caso di 50 mg.

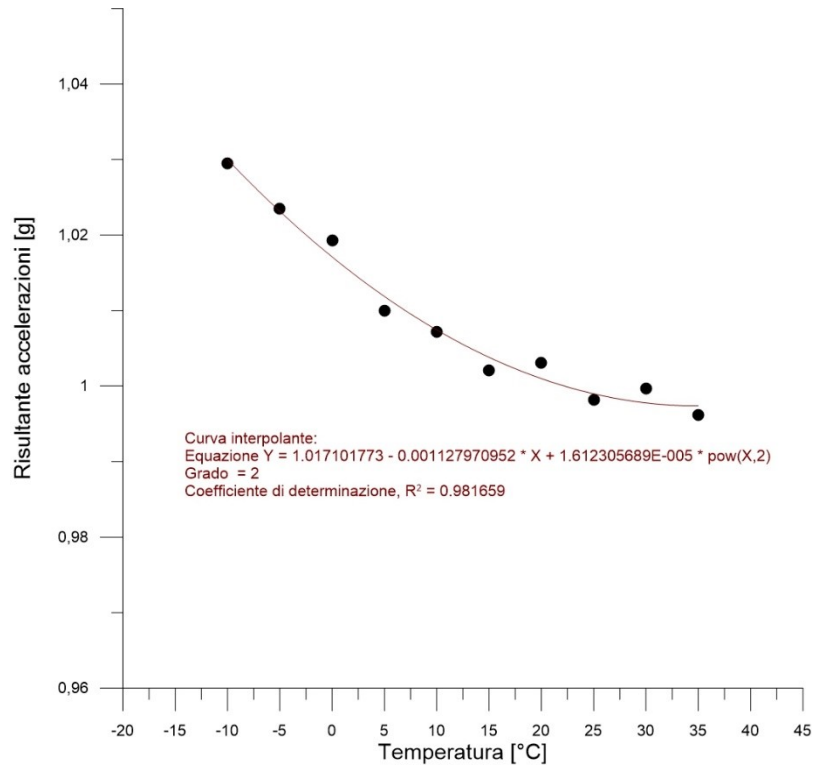


Figura 5.12 Relazione tra la risultante delle accelerazioni e la temperatura.

Dai test effettuati si può sostenere che la risultante assoluta delle accelerazioni appare dipendente dalla temperatura e il suo valore risulta indirettamente proporzionale alla stessa. In entrambe le prove, a temperatura costante e variabile, i dati registrati non hanno mai superato la soglia minima impostabile a 1.10 g. Tale valore può essere quindi utilizzato come soglia di partenza da calibrare durante la successiva fase di monitoraggio.

5.3.2 Test di valutazione dell'accuratezza del prototipo Gflow nella misura di accelerazioni dinamiche.

Per valutare l'accuratezza del prototipo Gflow nell'identificare accelerazioni dinamiche si sono effettuati cinque test di laboratorio. Durante le prove il prototipo è stato sottoposto a vibrazioni periodiche, mediante uno shaker elettrodinamico e, in parallelo, è stata monitorata l'effettiva accelerazione imposta attraverso l'impiego di un secondo accelerometro ad alta risoluzione. L'elemento sensibile impiegato per tale scopo è l'accelerometro modello 356A16, realizzato dalla società PCB Piezotronics, che è stato posizionato sulla superficie esterna dello scatolare di protezione del modulo Gflow e disposto con la medesima orientazione nello spazio del sensore analizzato. Per l'acquisizione dei dati si è utilizzata una scheda prodotta dalla società National Instruments che ha consentito il campionamento ad una frequenza di 10240 Hz. Come è mostrato in Figura 5.13, il prototipo Gflow è stato posto al di sopra della piastra vibrante e solidarizzato ad essa mediante l'impiego di cera.

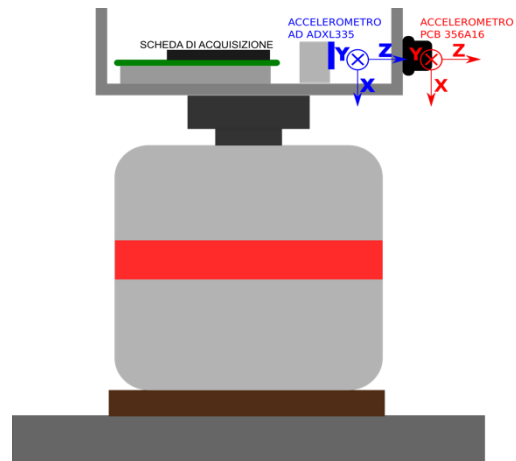
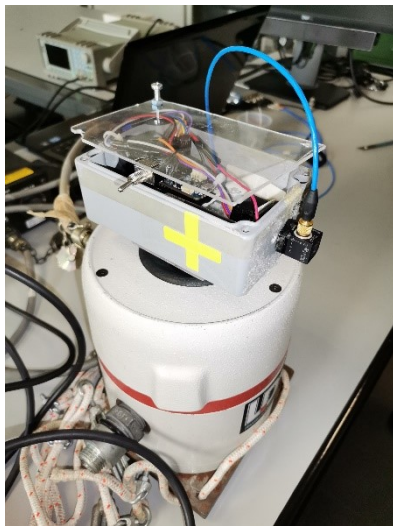


Figura 5.13 Attraverso uno shaker elettrodinamico sono state imposte al prototipo vibrazioni costanti nel tempo e in parallelo è stata misurata in continuo l'accelerazione imposta con un accelerometro ad alta risoluzione PCB PIEZOTRONICS 356A16.

L'asse x di entrambi gli accelerometri è stata rivolta nella medesima direzione del moto generato dallo shaker. Per tale motivo la comparazione tra i sensori è avvenuta sul segnale di accelerazione individuato lungo tale asse. Il sensore PCB 356A16 è caratterizzato da una risoluzione di 0.0001 g e risulta essere di due ordini di grandezza superiore rispetto al sensore ADXL. Per tale motivo la curva di accelerazione registrata mediante tale dispositivo è stata considerata quella di riferimento.

Tabella 5.3 Scheda tecnica del sensore PCB 356A16.

Parametro	Condizioni	Valore	Unità
Campo di misura	Ogni asse	± 50	g
Non linearità	% F.S.	≤ 1	%
Sensibilità (X_{out} , Y_{out} , Z_{out})	Ogni asse	100	mV/g
Risoluzione (da 1 a 10000 Hz)	Ogni asse	0.0001	g rms
Bandwidth (Y_{out} , Z_{out})		5000	Hz
Bandwidth (X_{out})		4500	Hz
Accelerazione massima sopportabile		7000	g
Tensione di alimentazione		12	V
Corrente di alimentazione		Da 2 a 20	mA
Temperatura di esercizio		Da -54°C a 80 °C	°C
Peso		737	g

Durante i test si è seguito il seguente procedimento:

- 1) Si è attivato lo shaker;
- 2) Si è impostata l'accelerazione di picco mediante la regolazione della velocità di oscillazione;
- 3) Si è avviata la registrazione dei dati accelerometrici provenienti dal sensore PCB 356A16.
- 4) Si è attivato il Gflow che in automatico ha registrato 150 valori con una frequenza di 175 Hz e li ha inviati al server FTP. Da sottolineare che in tutti e cinque i test il prototipo ha riconosciuto correttamente il superamento della soglia software.

La registrazione sulla memoria flash ha consentito la misura delle accelerazioni imposte per un totale di 0.85 secondi. Per poter effettuare un confronto tra i segnali si è individuato nei dati registrati dall'accelerometro PCB 356A16 il momento in cui è iniziato il campionamento del prototipo Gflow e, a partire da tale istante, è stato estrapolato un segnale della durata di 1 secondo. L'operazione è stata resa possibile dalla conoscenza del tempo di inizializzazione del prototipo e dalla presenza di un picco evidente sul segnale dell'accelerometro PCB 356A16 in corrispondenza della sua accensione. Successivamente è avvenuto l'allineamento tra i segnali campionati dai due accelerometri. Dal punto di vista qualitativo, in tutte e cinque le prove, i dati registrati dal prototipo hanno rilevato correttamente l'andamento nel tempo delle accelerazioni imposte. Per effettuare un confronto quantitativo tra i due segnali e individuare l'accuratezza del prototipo si è calcolato l'errore relativo e assoluto commesso dal Gflow nell'identificare i valori limite registrati dall'accelerometro PCB 356A16 con le seguenti formule:

$$\varepsilon_{max_n} = \left| a_{max_{PCB_n}} - a_{max_{ADXL_n}} \right| \quad [5.4]$$

Dove:

- ε_{max_n} è l'errore assoluto compiuto dall'accelerometro ADXL nella misura dell'accelerazione massima rilevata dal sensore PCB 356A16 nel periodo n considerato;
- $a_{max_{PCB_n}}$ è il valore di accelerazione massimo rilevato dal sensore PCB 356A16 relativo al periodo n ;
- $a_{max_{ADXL_n}}$ è il valore di accelerazione massimo rilevato dal sensore ADXL335 relativo al periodo n ;

$$\varepsilon_{rmax_n} = \frac{\varepsilon_{max_n}}{a_{max_{PCB_n}}} \cdot 100 \quad [5.5]$$

Dove:

ε_{rmax_n} rappresenta l'errore relativo compiuto dall'accelerometro ADXL335 nella misura dell'accelerazione massima rilevata dal sensore PCB356A16 nel periodo n considerato;

$$\varepsilon_{min_n} = \left| a_{min_{PCB_n}} - a_{min_{ADXL_n}} \right| \quad [5.6]$$

Dove:

- ε_{min_n} è l'errore assoluto compiuto dall'accelerometro ADXL nella misura dell'accelerazione minima rilevata dal sensore PCB 356A16 nel periodo n considerato;
- $a_{min_{PCB_n}}$ è il valore di accelerazione minimo rilevato dal sensore PCB 356A16 relativo al periodo n ;
- $a_{min_{ADXL_n}}$ è il valore di accelerazione minimo rilevato dal sensore ADXL335 relativo al periodo n ;

$$\varepsilon_{rmin_n} = \frac{\varepsilon_{min_n}}{a_{max_{PCB_n}}} \cdot 100 \quad [5.7]$$

Dove:

ε_{rmin_n} rappresenta l'errore relativo compiuto dall'accelerometro ADXL335 nella misura dell'accelerazione minima rilevata dal sensore PCB356A16 nel periodo n considerato.

Nel primo test si è imposta un'oscillazione meccanica caratterizzata da un periodo di 0.1 secondi (frequenza 10 Hertz) e un'ampiezza tale da generare sul sistema testato un'accelerazione compresa tra - 0.55 g e + 0.55 g. La media degli errori assoluti compiuti nell'identificazione delle accelerazioni massime risulta essere di 28.65 mg, con un valore massimo di 44.16 mg individuato durante la misura del picco numero nove. L'errore relativo medio compiuto nella misura delle accelerazioni minime risulta essere di 19.88 mg. La media degli errori assoluti misurati sui 9 picchi positivi risulta essere del 5.20%, mentre sugli otto picchi negativi risulta essere del 3.61%. Nella Tabella 5.4 sono rappresentati gli errori assoluti calcolati, relativi ai singoli periodi.

Tabella 5.4 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione lungo x massima e minima registrata dal sensore PCB 356A16 durante il test 1.

Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{max\ p1}$	$\epsilon_{max\ p2}$	$\epsilon_{max\ p3}$	$\epsilon_{max\ p4}$	$\epsilon_{max\ p5}$	$\epsilon_{max\ p6}$	$\epsilon_{max\ p7}$	$\epsilon_{max\ p8}$	$\epsilon_{max\ p9}$
35.78	24.18	38.08	19.17	29.00	23.69	27.37	16.42	44.16
Errore assoluto nella misura dell'accelerazione minima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{min\ p1}$	$\epsilon_{min\ p2}$	$\epsilon_{min\ p3}$	$\epsilon_{min\ p4}$	$\epsilon_{min\ p5}$	$\epsilon_{min\ p6}$	$\epsilon_{min\ p7}$	$\epsilon_{min\ p8}$	
21.29	1.79	24.68	16.23	35.68	25.38	23.70	10.33	-

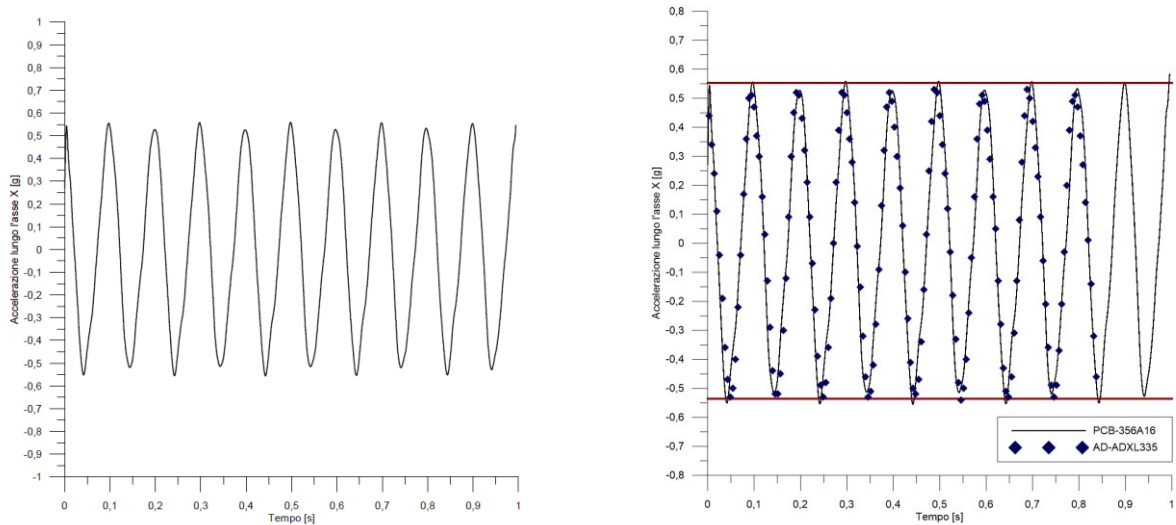


Figura 5.14 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il Test 1 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri.

Nel secondo test il prototipo è stato sottoposto ad una vibrazione meccanica caratterizzata da una frequenza di 10 Hertz e un'accelerazione compresa tra - 0.4 g e + 0.4 g. La media degli errori assoluti commessi nell'identificazione delle accelerazioni massime risulta essere di 19.88 mg, mentre risulta essere di 18.33 mg nella misura dei valori minimi. L'errore massimo viene compiuto nella misura del picco positivo numero uno. La differenza misurata in questo caso risulta essere di 40.60 mg. La media degli errori relativi misurati sui 9 picchi positivi risulta essere del 5.00%, mentre sugli otto picchi negativi risulta essere del 4.56%. In Tabella 5.5 sono rappresentati gli errori assoluti nella misura dell'accelerazione massima e minima relativa a ciascun periodo e misurata dal sensore PCB 356A16 durante il test 2.

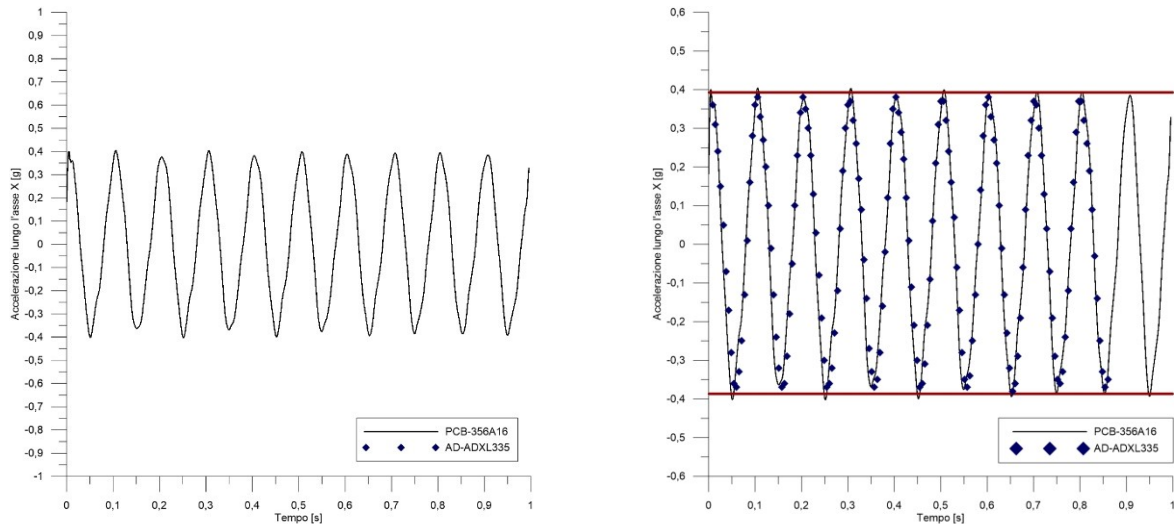


Figura 5.15 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 2 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri. Le linee rosse nel grafico rappresentano rispettivamente la media dei valori massimi e dei valori minimi registrati dall’accelerometro PCB 356A16 nell’intervallo di tempo considerato.

Tabella 5.5 Errore assoluto nella misura dell’accelerazione massima e minima registrata dal sensore PCB 356A16 durante il test 2.

Errore assoluto nella misura dell’accelerazione massima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{max p1}$	$\epsilon_{max p2}$	$\epsilon_{max p3}$	$\epsilon_{max p4}$	$\epsilon_{max p5}$	$\epsilon_{max p6}$	$\epsilon_{max p7}$	$\epsilon_{max p8}$	$\epsilon_{max p9}$
40.60	23.54	3.96	23.09	1.61	29.24	8.63	23.36	24.90
Errore assoluto nella misura dell’accelerazione minima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{min p1}$	$\epsilon_{min p2}$	$\epsilon_{min p3}$	$\epsilon_{min p4}$	$\epsilon_{min p5}$	$\epsilon_{min p6}$	$\epsilon_{min p7}$	$\epsilon_{min p8}$	
31.89	6.34	32.36	1.73	29.13	6.07	13.62	25.50	

Nel terzo test si è imposta un’oscillazione meccanica caratterizzata da un periodo di 0.1 secondi (frequenza 10 Hertz) e un’ampiezza tale da generare sul sistema testato un’accelerazione compresa tra - 0.3 g e + 0.3 g. La media degli errori assoluti nell’identificazione delle accelerazioni massime è risultata essere di 9.46 mg, mentre risulta essere di 17.22 mg nella misura dei valori minimi. L’errore massimo viene compiuto nella misura del secondo picco negativo. La differenza misurata in questo caso risulta essere di 39.42 mg. La media degli errori relativi misurati sui 9 picchi positivi risulta essere del 3.03%, mentre sugli otto picchi negativi risulta essere del 5.65%. In Tabella 5.6 è rappresentata la differenza tra i valori massimi e la differenza tra i valori minimi registrati dai due accelerometri in ciascuno periodo.

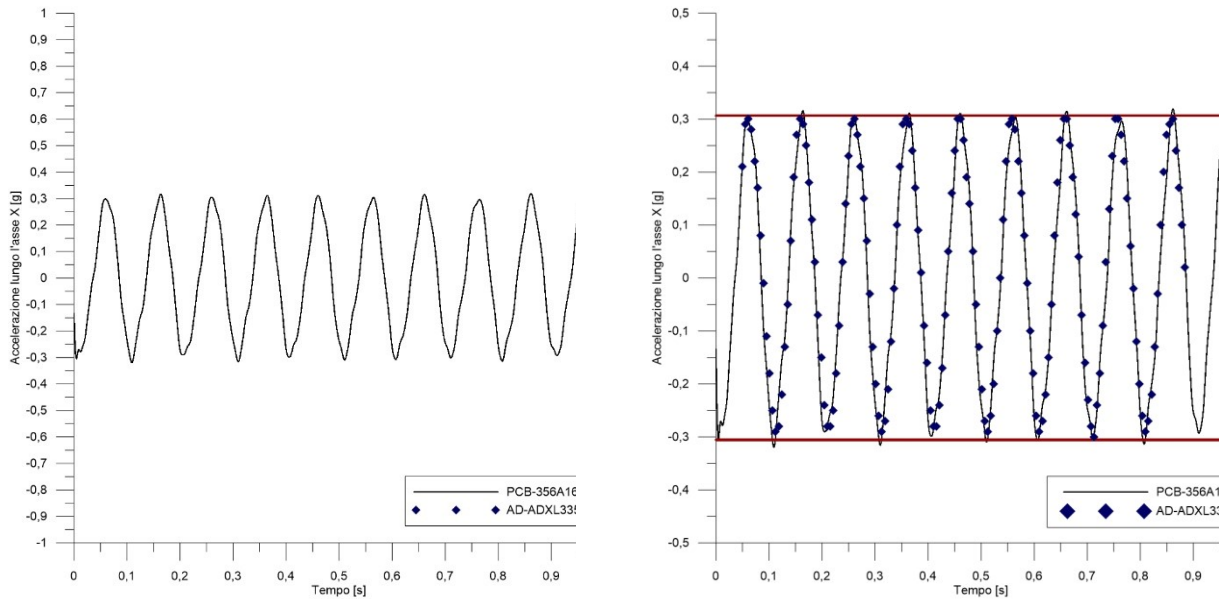


Figura 5.16 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 3 b) Sovrapposizione dei segnali campionati durante il test 3 dai due accelerometri.

Tabella 5.6 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima e minima lungo x registrata dal sensore PCB 356A16 durante il test 3.

Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{max_{p1}}$	$\epsilon_{max_{p2}}$	$\epsilon_{max_{p3}}$	$\epsilon_{max_{p4}}$	$\epsilon_{max_{p5}}$	$\epsilon_{max_{p6}}$	$\epsilon_{max_{p7}}$	$\epsilon_{max_{p8}}$	$\epsilon_{max_{p9}}$
1.60	15.91	4.64	11.14	10.58	3.77	14.78	3.98	18.75
Errore assoluto nella misura dell'accelerazione minima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{min_{p1}}$	$\epsilon_{min_{p2}}$	$\epsilon_{min_{p3}}$	$\epsilon_{min_{p4}}$	$\epsilon_{min_{p5}}$	$\epsilon_{min_{p6}}$	$\epsilon_{min_{p7}}$	$\epsilon_{min_{p8}}$	
14.64	39.42	0.19	35.84	8.84	19.53	7.31	12.02	-

Nel quarto test il prototipo è stato sottoposto ad una vibrazione meccanica caratterizzata da una frequenza di 10 Hertz ed è stata impostato un valore di ampiezza in modo da indurre sul sistema testato un'accelerazione compresa tra -0.2 g e + 0.2 g. La media degli errori assoluti nell'identificare le accelerazioni massime risulta essere di 12.58 mg, mentre risulta essere di 15.71 mg nella misura dei valori minimi. L'errore massimo viene compiuto nella misura nel quinto picco negativo. La differenza misurata in questo caso risulta essere di 24.06 mg. La media degli errori relativi misurati sui 9 picchi positivi risulta essere del 6.19%, mentre sugli otto picchi negativi risulta essere del 7.74%.

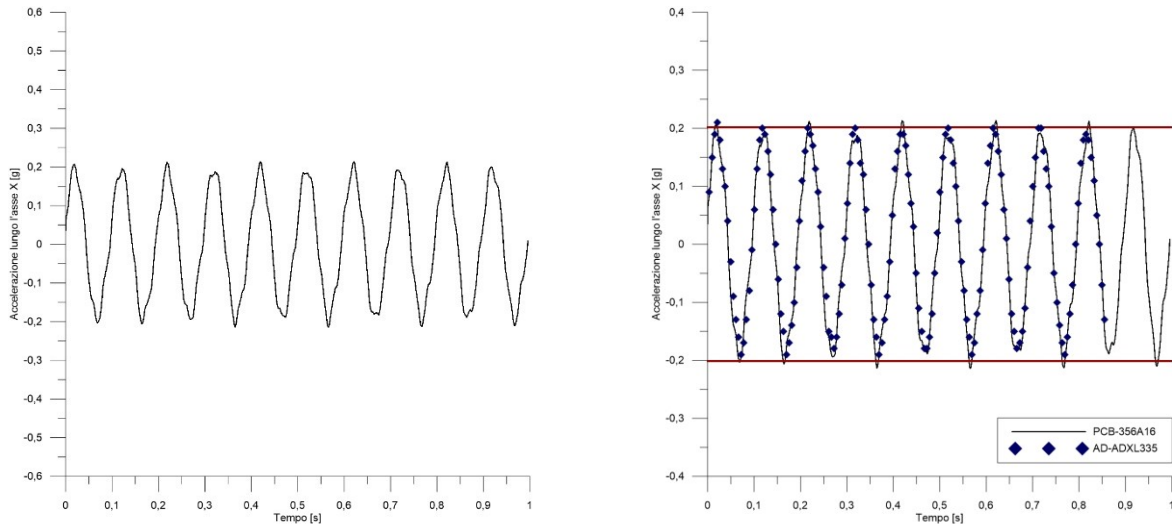


Figura 5.17 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 4 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri. Le linee rosse nel grafico rappresentano rispettivamente la media dei valori massimi e dei valori minimi registrati dall’accelerometro PCB 356A16 nell’intervallo di tempo considerato.

Tabella 5.7 Errore assoluto nella misura dell’accelerazione massima e minima lungo x misurata dal sensore PCB 356A16 durante il test 4.

Errore assoluto nella misura dell’accelerazione massima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{max_{p1}}$	$\epsilon_{max_{p2}}$	$\epsilon_{max_{p3}}$	$\epsilon_{max_{p4}}$	$\epsilon_{max_{p5}}$	$\epsilon_{max_{p6}}$	$\epsilon_{max_{p7}}$	$\epsilon_{max_{p8}}$	$\epsilon_{max_{p9}}$
3.16	4.51	11.80	12.51	22.96	14.65	13.24	8.34	22.06
Errore assoluto nella misura dell’accelerazione minima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{min_{p1}}$	$\epsilon_{min_{p2}}$	$\epsilon_{min_{p3}}$	$\epsilon_{min_{p4}}$	$\epsilon_{min_{p5}}$	$\epsilon_{min_{p6}}$	$\epsilon_{min_{p7}}$	$\epsilon_{min_{p8}}$	
12.98	16.28	14.34	23.59	8.71	24.06	2.74	22.97	

Nell’ultimo test si è imposta un’oscillazione meccanica caratterizzata da un periodo di 0.1 secondi (frequenza 10 Hertz) e un’ampiezza tale da generare sul sistema testato un’accelerazione compresa tra - 0.1 e + 0.1 g. La media degli errori assoluti nell’identificazione delle accelerazioni massime è risultata essere di 4.27 mg, mentre risulta essere di 14.62 mg nella misura dei valori minimi. L’errore massimo viene compiuto nella misura del sesto picco negativo. La differenza misurata in questo caso risulta essere di 26.66 mg. La media degli errori relativi misurati sui 9 picchi positivi risulta essere del 4.35%, mentre sugli otto picchi negativi risulta essere del 10.76%. In Tabella 5.8 è rappresentata la differenza tra i valori massimi e la differenza tra i valori minimi registrati dai due accelerometri in ciascun periodo.

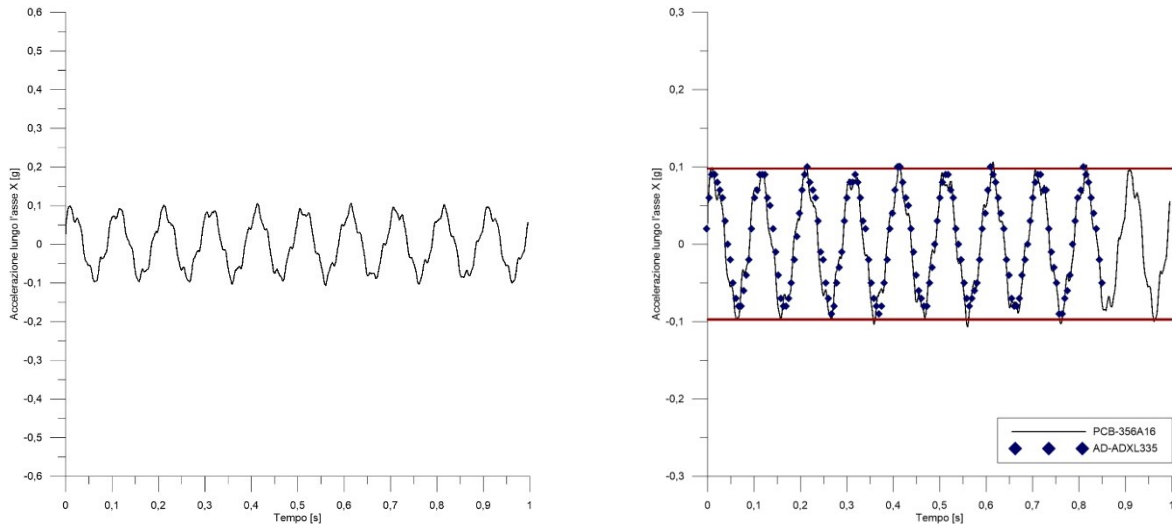


Figura 5.18 a) Segnale estrapolato dai dati di accelerazione registrati dal sensore PCB 356A16 durante il test 5 b) Sovrapposizione dei segnali campionati dai due accelerometri nel test 5.

Tabella 5.8 Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima e minima lungo x misurata dal sensore PCB 356A16 durante il test 5.

Errore assoluto nella misura dell'accelerazione massima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{max_{p1}}$	$\epsilon_{max_{p2}}$	$\epsilon_{max_{p3}}$	$\epsilon_{max_{p4}}$	$\epsilon_{max_{p5}}$	$\epsilon_{max_{p6}}$	$\epsilon_{max_{p7}}$	$\epsilon_{max_{p8}}$	$\epsilon_{max_{p9}}$
9.49	2.24	0.69	4.00	4.78	2.75	6.18	5.97	2.36
Errore assoluto nella misura dell'accelerazione minima relativa al periodo n rilevata dal sensore PCB 356A16 [mg]								
$\epsilon_{min_{p1}}$	$\epsilon_{min_{p2}}$	$\epsilon_{min_{p3}}$	$\epsilon_{min_{p4}}$	$\epsilon_{min_{p5}}$	$\epsilon_{min_{p6}}$	$\epsilon_{min_{p7}}$	$\epsilon_{min_{p8}}$	
16.85	16.22	6.62	13.66	15.08	26.66	9.21	12.65	

In Tabella 5.9 sono sintetizzati i risultati ottenuti durante le prove. La media degli errori assoluti risulta essere di 16.06 mg, tale valore può essere preso in considerazione come accuratezza del sensore, mentre la media degli errori relativi è risultata essere pari al 5.60%.

Tabella 5.9 Errori assoluti e relativi ottenuti durante le prove.

		p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	Media errori assoluti [mg]	Media errori relativi [%]
Test 1	$\epsilon_{max_{pn}}$ [mg]	35.78	24.18	38.08	19.17	29.00	23.69	27.37	16.42	44.16	28.65	5.20
	$\epsilon_{min_{pn}}$ [mg]	21.29	1.79	24.68	16.23	35.68	25.38	23.70	10.33	-	19.88	3.61
Test 2	$\epsilon_{max_{pn}}$ [mg]	40.60	23.54	3.96	23.09	1.61	29.24	8.63	23.36	24.90	19.88	5.00
	$\epsilon_{min_{pn}}$ [mg]	31.89	6.34	32.36	1.73	29.13	6.07	13.62	25.50	-	18.33	4.56
Test 3	$\epsilon_{max_{pn}}$ [mg]	1.60	15.91	4.64	11.14	10.58	3.77	14.78	3.98	18.75	9.46	3.03
	$\epsilon_{min_{pn}}$ [mg]	14.64	39.42	0.19	35.84	8.84	19.53	7.31	12.02	-	17.22	5.65
Test 4	$\epsilon_{max_{pn}}$ [mg]	3.16	4.51	11.80	12.51	22.96	14.65	13.24	8.34	22.06	12.58	6.19
	$\epsilon_{min_{pn}}$ [mg]	12.98	16.28	14.34	23.59	8.71	24.06	2.74	22.97	-	15.71	7.74
Test 5	$\epsilon_{max_{pn}}$ [mg]	9.49	2.24	0.69	4.00	4.78	2.75	6.18	5.97	2.36	4.27	4.35
	$\epsilon_{min_{pn}}$ [mg]	16.85	16.22	6.62	13.66	15.08	26.66	9.21	12.65	-	14.62	10.76

5.3.3 Test di valutazione dell'accuratezza dell'accelerometro nell'utilizzo statico

Il prototipo Gflow è nato con la funzione di registrare accelerazioni sulle reti flessibili e inviare dati superata una soglia predefinita. Durante lo sviluppo del prototipo però ci si è resi conto che, effettuando una trasmissione solamente in occasione di eventi eccezionali, non si poteva controllare da remoto l'effettiva operatività del modulo, rischiando di portare avanti un'attività di monitoraggio con un dispositivo scarico o danneggiato. Per tale motivo si è deciso di prevedere una trasmissione ordinaria di un pacchetto di dati al cui interno sono presenti informazioni sul livello della batteria del prototipo, sulla potenza del segnale WiFi e sulla media dei valori di accelerazione registrati. La successiva prova è servita per analizzare la possibilità di effettuare la misura dell'inclinazione della rete mediante il medesimo sensore MEMS impiegato per il monitoraggio dinamico utilizzando la formula di calibrazione [5.1].

Nel test il dispositivo Gflow è stato fissato al medesimo dispositivo utilizzato per la taratura delle ampole elettrolitiche impiegate nel sistema RSN. Successivamente si sono imposte, lungo le due direzioni x e y , rotazioni note misurate con un'elettrolivella ad alta risoluzione e in parallelo sono stati registrati i dati di accelerazione letti dal prototipo. Come convenzione sono state considerate positive le rotazioni in senso orario guardando il prototipo come in Figura 5.19. Successivamente i dati campionati dal Gflow sono stati convertiti da unità fisiche g a valori angolari mediante la seguente formula:

$$\alpha_a = \sin^{-1}(a_{g_a}) \quad [5.8]$$

Dove:

- α_a è l'angolo di inclinazione del prototipo lungo l'asse a in gradi;
- a_{g_a} è la componente di accelerazione lungo l'asse a in unità fisiche g calcolata con la formula [5.1].

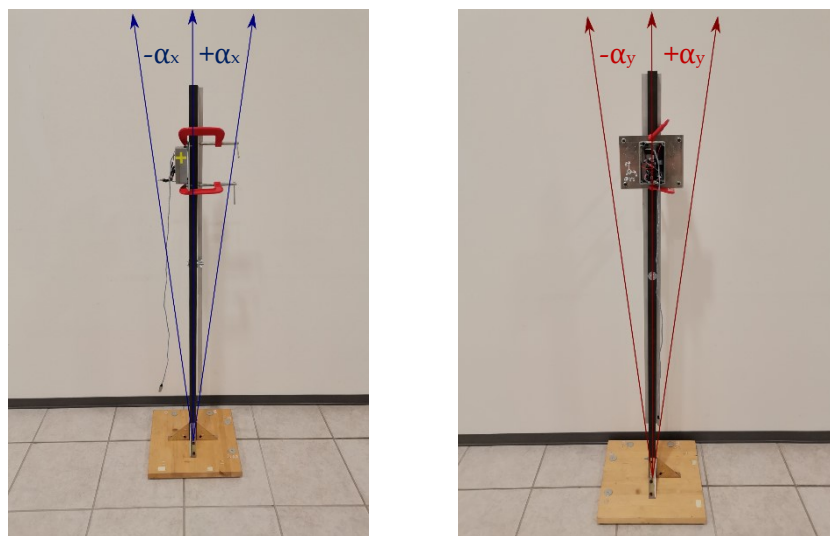


Figura 5.19 Lo strumento Gflow è stato fissato al sistema di calibrazione e successivamente sono state imposte rotazioni note lungo i due assi x e y .

Una volta ottenuti i dati angolari, si è calcolato l'errore assoluto rispetto alla misura registrata dall'elettrolivella, considerata come misura di riferimento. L'accuratezza per l'asse x , calcolata come media degli errori assoluti, è risultata essere di 0.19° mentre l'errore massimo è risultato essere di 0.40° . L'accuratezza per l'asse y , calcolata come media degli errori assoluti, è risultata essere di 0.12° mentre l'errore massimo è risultato essere di 0.17° . I risultati sono stati ottenuti riferendosi al valore ottenuto dalla media delle 150 misure eseguite per ciascun angolo imposto. Per applicazioni che necessitano di una risoluzione maggiore dei valori così calcolati, come ad esempio il monitoraggio strutturale, si consiglia l'impiego di un'unità di acquisizione caratterizzata da una maggior risoluzione (numero di bit) oppure di utilizzare un sensore avente un fondo scala inferiore.

Tabella 5.10 Errore assoluto nella misura dei valori di inclinazione lungo x registrati dall'elettrolivella.

	Rotazione imposta sull'asse x misurata dall'elettrolivella [$^\circ$]							
	16.40	13.60	8.20	3.10	-0.15	-3.90	-8.50	-12.50
α_x [$^\circ$]	16.27	13.18	7.80	2.85	-0.15	-4.15	-8.53	-12.47
ε_{xGflow} [$^\circ$]	0.13	0.42	0.40	0.25	0.00	0.03	0.25	0.03

Tabella 5.11 Errore assoluto nella misura dei valori di inclinazione lungo y registrati dall'elettrolivella.

	Rotazione imposta sull'asse y registrata dall'elettrolivella [$^\circ$]							
	14.10	9.00	2.90	0.06	-0.28	-2.70	-7.60	-12.40
α_y [$^\circ$]	14.25	9.17	3.05	0.23	0.01	-0.14	-2.61	-7.51
ε_{yGflow} [$^\circ$]	0.15	0.17	0.15	0.12	0.05	0.14	0.09	0.09

5.3.4 Test di valutazione dell'impatto critico

In questo paragrafo verranno descritti i test che si sono effettuati sul prototipo indirizzati ad individuare quello che è l'impatto critico. Con tale termine si intende quell'azione che genera un'accelerazione sulla barriera avente una durata inferiore rispetto al tempo di inizializzazione del Gflow. Infatti, il passaggio del dispositivo dalla modalità Low Power alla modalità Operational genera un ritardo nella prima lettura possibile. Per calcolare tale intervallo di tempo il prototipo Gflow è stato fissato ad una rete di tipo flessibile su cui sono state imposte accelerazioni impulsive misurate in parallelo da un secondo accelerometro interrogato in continuo. Confrontando i valori campionati dai due accelerometri è stato possibile definire l'istante in cui il prototipo Gflow ha iniziato la registrazione dei dati e, di conseguenza, è stato calcolato il tempo massimo di inizializzazione del prototipo.

I test effettuati sono risultati utili anche per determinare il comportamento del prototipo sottoposto ad accelerazioni superiori al fondo scala che risulta di ± 5 g. La scelta di adottare tale limite deriva dalla risoluzione ridotta del convertitore AD e dalla volontà di poter impostare una soglia più bassa e misurare accelerazioni con una risoluzione di 10 mg. Il prototipo Gflow, infatti, nasce come sistema di allertamento e trigger per sistemi di monitoraggio esterni e deve essere in grado di individuare anche le minime accelerazioni sulla barriera causate da un fenomeno di colata, ad esempio da un'onda precursore. Come conseguenza si ha che i valori di accelerazione superiori al campo di misura vengono registrati con un valore pari al fondo scala.

La rete flessibile è stata realizzata impiegando due cavi in acciaio inox AISI 316 L33 aventi diametro 4 mm, disposti ad una distanza di 10 centimetri e collegati tra loro mediante una rete a tripla torsione. Successivamente la rete è stata fissata ad una struttura reticolare fissa ad un'altezza di 2.70 m dal piano campagna. Il collegamento è avvenuto mediante l'impiego di quattro golfari fissati alla struttura nei quali sono state ancorate le estremità dei cavi in acciaio mediante l'impiego di morsetti. La lunghezza della rete collocata sulla struttura è risultata essere di 3.01 m. Da sottolineare che durante il test non si è voluto simulare una barriera flessibile in scala ma la struttura è servita solamente come mezzo per trasferire le accelerazioni, dovute ad impatti impulsivi, al modulo.

Il prototipo è stato posto ad una distanza di 2.60 m dall'estremo destro della rete e orientato come in Figura 5.20. Il fissaggio del modulo è avvenuto impiegando la medesima filosofia prevista in sito, interponendo la rete tra due piastre collegate tra loro, mediante un sistema di bulloni. Lo spessore delle lamine utilizzate è inferiore rispetto a quelle previste in sito che avranno, oltre al compito di fissare il modulo, quello di proteggerlo dall'impatto diretto del flusso. Alla medesima rete, rispettivamente ad una distanza dall'estremo destro di 0.80 m, 1.60 m e 2.40 m, sono stati posti 2 moschettoni collegati alle due funi principali. Tali punti verranno rispettivamente chiamati punti di carico A, B, C.

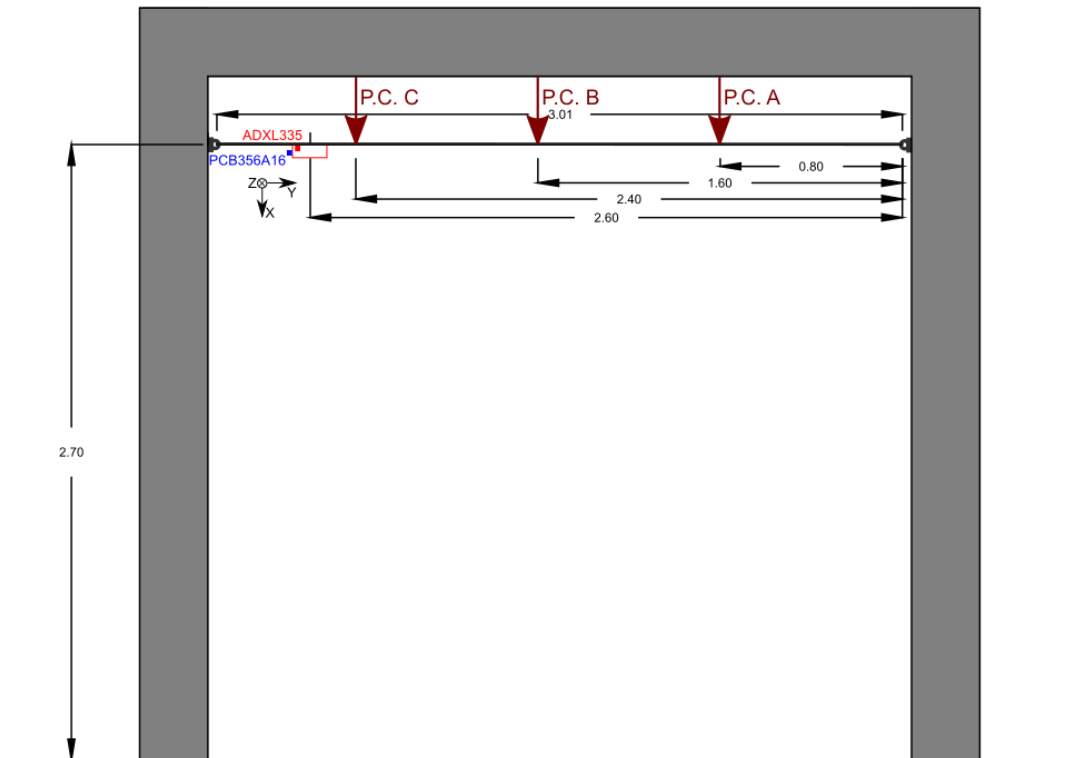


Figura 5.20 Disposizione e orientazioni degli accelerometri durante la prova.

Le accelerazioni impulsive sono state imposte alla rete rilasciando da un'altezza definita, che corrisponde alla quota di installazione della rete, zavorre di peso noto collegate ai moschettoni mediante un ulteriore cavo di acciaio di diametro 2 mm con cui è stata regolata la lunghezza di caduta libera, prima del trasferimento del carico alla rete. In particolare si sono svolti tre test in cui sono state applicate tre configurazioni di carico diverse CC1, CC2, CC3.

Tramite l'impiego di una fotocamera modello CANON EOS 5D, disposta frontalmente alla struttura, si è effettuata la registrazione video delle prove con la quale è stato possibile ricostruire l'effettiva velocità di impatto delle zavorre sulla rete. Le caratteristiche tecniche della camera impiegata sono sintetizzate in Tabella 5.12. Durante le prove si è utilizzato un obiettivo fisso caratterizzato da un'apertura di 20 mm.

L'elaborazione dei video è avvenuta impiegando il software TRACKER (Brown e Cox, 2009) sviluppato all'interno del progetto OSP (Open Source Physics). Tale applicazione consente di estrapolare informazioni riguardanti il moto, la velocità e l'accelerazione di particelle all'interno di un video in un piano bidimensionale. Il principio di calcolo si basa sull'analisi della distanza percorsa da un oggetto nel passaggio tra un frame e il seguente. Conoscendo la distanza percorsa e il tempo di campionamento della camera è stato possibile calcolare la velocità media dell'oggetto nel passaggio tra un frame e il successivo e conseguentemente l'accelerazione dello stesso. La corretta individuazione dello spostamento dell'oggetto analizzato presuppone la definizione di un fattore di scala al video che può essere assegnato conoscendo le coordinate o la distanza tra due punti fissi all'interno della scena. Come si può notare dalla Figura 5.21 sulla superficie del telaio in acciaio, al quale è fissata la struttura flessibile, sono stati posti target a distanze note. La definizione del fattore di scala si è basata sulla lunghezza del segmento avente estremi coincidenti con i target

T1 e T2 dislocati nella zona superiore sinistra del telaio. Per attestare che il video fosse stato scalato correttamente si è effettuato un ulteriore controllo, confrontando l'effettiva distanza tra gli altri target e il valore misurato nel video. L'errore massimo è risultato essere di circa 1 cm ed è stato misurato tra i target T6 e T7. Successivamente è stato definito il sistema di riferimento avente origine nel target T1 e inclinazione pari all'angolo del segmento T1 – T2.

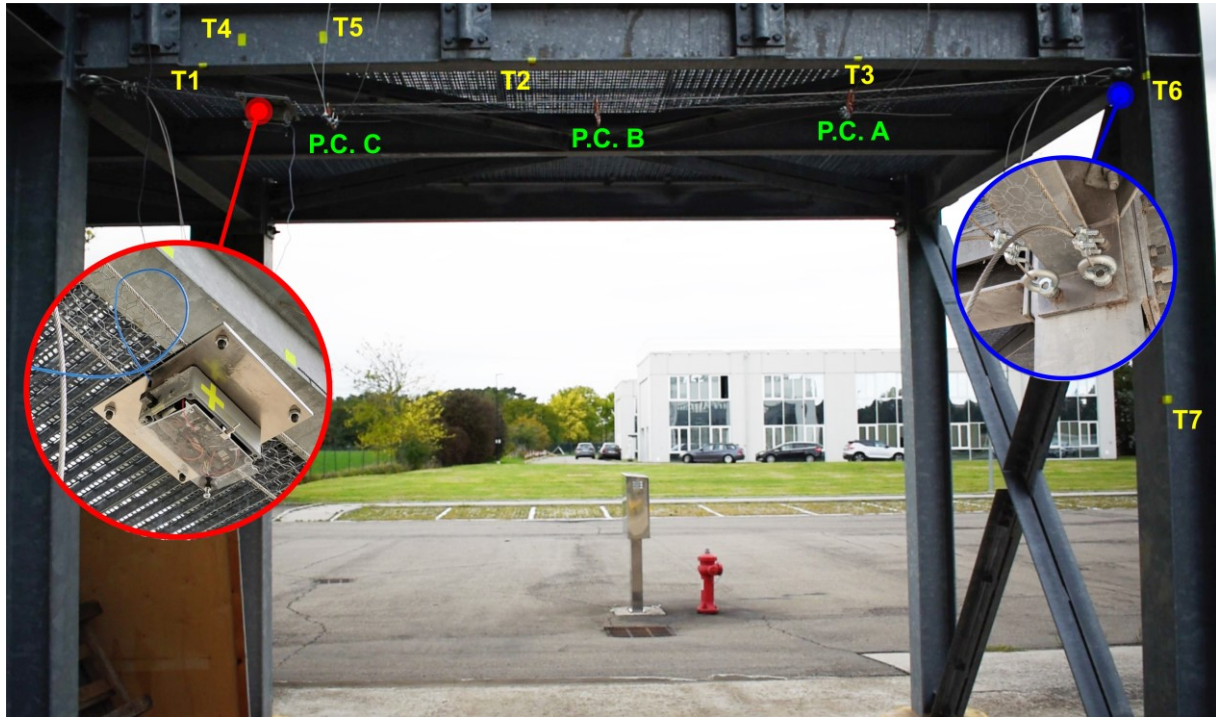


Figura 5.21 La rete flessibile è stata fissata al telaio in acciaio mediante l'impiego di golfari. Sulla superficie del telaio sono stati posti target a distanze predefinite.

L'individuazione della posizione delle zavorre nei frame è avvenuta manualmente identificando un punto di riferimento sulla superficie del peso, coincidente con un target riflettente applicato su di esso. Attraverso l'elaborazione è stato possibile ricostruire la posizione e la velocità delle zavorre nel tempo. Nell'elaborato verranno rappresentati solamente i dati calcolati lungo l'asse y che coincide con la direzione della gravità poiché i risultati lungo l'asse trasversale possono essere considerati trascurabili essendo le zavorre caratterizzate da un moto in caduta libera.

Tabella 5.12 Scheda tecnica Canon Eos 5D.

Sensore immagine	CMOS/ 36X24
Pixel effettivi	Ca. 21.1 Megapixel
Pixel reali	Ca. 22 Megapixel
Rapporto	3:2
Processore immagini	DIGIC4
Messa a fuoco tipo	Sensore CMOS con TTL-CT-SIR
Velocità otturatore	30-1/8.000 sec
Dimensioni immagine max .jpg	5616×3744
Dimensioni immagine max .Raw	5616×3744

Dimensioni (L x A x P)	152 x 113.5 x 75 mm
Peso (solo corpo fotocamera)	810 g
Mirino tipo	Pentaprisma
Copertura (verticale/orizzontale)	Ca. 98%
Ingrandimento	Ca. 0.71 π
Campo visivo	Ca. 21 mm (dal centro dell'oculare)
Correzione diottrie	Da -3 a +1 (1/m) (diottrie)

Il sistema di acquisizione e l'accelerometro impiegato per monitorare in continuo le accelerazioni agenti sul Gflow sono i medesimi utilizzati durante il test di valutazione dell'accuratezza del prototipo in condizioni dinamiche. Il sensore PCB 356A16 è stato fissato esternamente alla scatola di protezione del prototipo e disposto con la medesima orientazione dell'accelerometro ADXL335. Durante le prove il segnale proveniente dal sensore è stato acquisito con una frequenza pari a 10240 Hz.

Per individuare il tempo di inizializzazione del prototipo si è effettuato un confronto sulla componente di accelerazione lungo l'asse x registrata dai due accelerometri, direzione in cui sono state individuate le accelerazioni maggiori.

L'elaborazione dei dati è avvenuta impiegando il Toolbox Signal Processing sviluppato dalla società MathWorks®.

L'analisi è avvenuta per fasi:

1. Si è estrapolato dal dataset registrato dal sensore PCB 356A16 il segnale di accelerazione misurato lungo l'asse x durante l'impatto. La durata dell'intervallo preso in considerazione è di 1.5 secondi;
2. Essendo il sensore PCB 356A16 un accelerometro impostato per misurare le accelerazioni relative si è sottratto dal segnale campionato dall'accelerometro ADXL335 la componente di gravità;
3. Si è effettuato l'allineamento dei segnali. Dal punto di vista qualitativo, in tutte e tre i test il prototipo ha rilevato correttamente l'andamento nel tempo delle accelerazioni imposte che si trovavano all'interno del proprio campo di misura (-5g + 4g)
4. Si è identificato l'istante t_0 in cui l'accelerometro PCB 356A16 ha effettuato la prima misura di accelerazione superiore alla soglia analogica impostata sul prototipo e pari a 0.1 g;
5. Si è identificato l'istante t_1 in cui è stata effettuata la prima misura dal prototipo Gflow;
6. Si è calcolato il tempo di inizializzazione come la differenza tra t_1 e t_0 .

Nei successivi paragrafi sono riportati i risultati ottenuti nei tre test effettuati.

5.3.4.1 Risultati test 1 (combinazione di carico CC1)

Nel primo test si è imposta sulla rete la combinazione di carico CC1. Tale configurazione prevede di imporre un'accelerazione sulla rete collegando una zavorra P1, avente peso 5 Kg e altezza di caduta pari a 1.10 metri, al punto di carico A. In Figura 5.22 viene rappresentata la posizione e la velocità nel tempo del peso P1 dal momento in cui viene rilasciato fino all'istante immediatamente dopo l'impatto (80 ms). L'asse y del sistema di riferimento utilizzato (che rimane il medesimo per tutte e tre le prove) ha origine nel punto di rilascio del peso e verso positivo in direzione della gravità. La velocità ha verso positivo anch'essa nella medesima direzione. Dal grafico è possibile notare che la velocità massima raggiunta, che coincide con quella di impatto, è pari a 4.7 m/s e viene rilevata a 1.12 m dal punto di rilascio. Successivamente avviene una decelerazione di 1 m/s causata dalla reazione della rete flessibile.

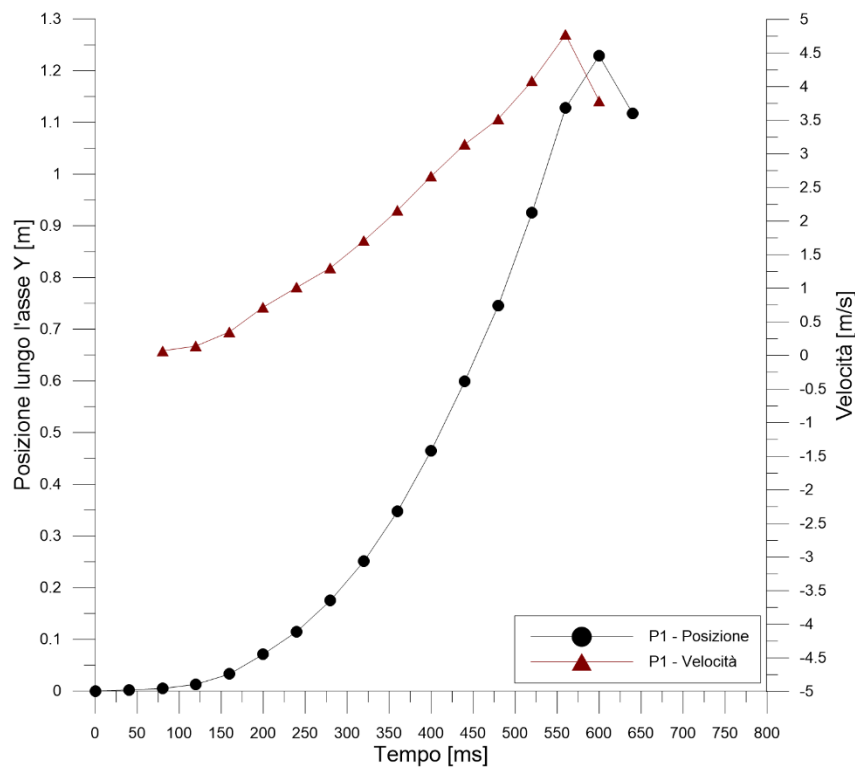


Figura 5.22 Ricostruzione dello spazio percorso e della velocità del peso P1 nel test 1 attraverso l'elaborazione video.

Il picco massimo positivo rilevato dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 1 ha valore 26.54 g mentre il valore minimo registrato è risultato pari a -35 g. I successivi incrementi di accelerazione sono dovuti ad ulteriori impatti del medesimo peso che una volta impattata la struttura viene respinto dalla risposta elastica della rete ad una quota inferiore rispetto a quella di rilascio e successivamente ricade su di essa per effetto della gravità.

Nel grafico in Figura 5.24 viene rappresentato in rosso il segnale letto dal prototipo Gflow sovrapposto al segnale estrapolato dai dati registrati dall'accelerometro PCB 356A16. Il superamento della soglia analogica è avvenuto all'istante t_0 pari a 138.19 ms. Il prototipo Gflow ha registrato il

primo dato di accelerazione all'istante t_1 pari a 179 ms. Il tempo di inizializzazione durante il test 1 è risultato essere di 40.81 ms.

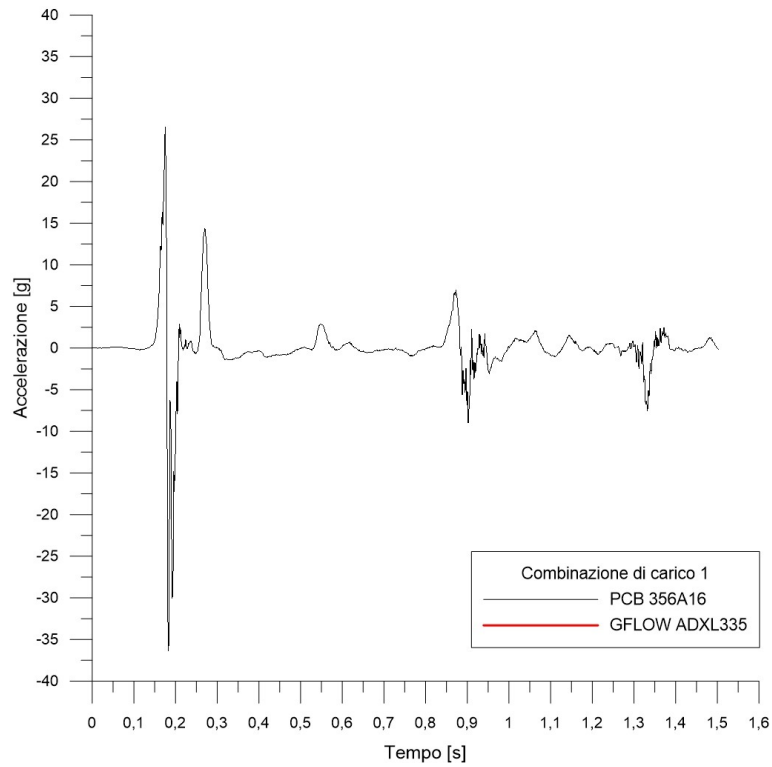


Figura 5.23 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 1.

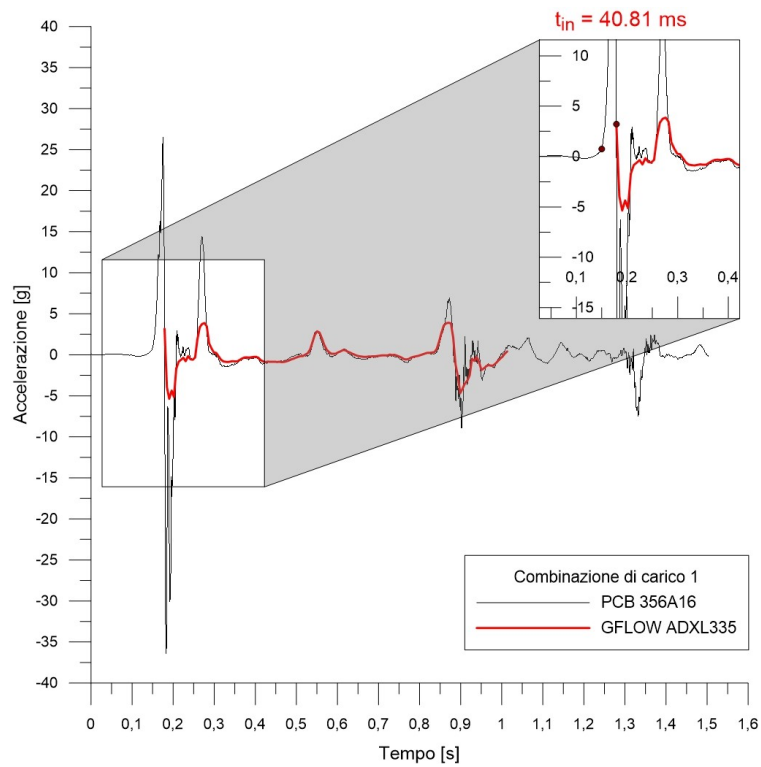


Figura 5.24 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dai due accelerometri impiegati. Il tempo di inizializzazione del prototipo nel test 1 è risultato essere pari a 40.81 ms.

5.3.4.2 Risultati test 2 (combinazione di carico CC2)

Nel secondo test si è imposta sulla rete una seconda combinazione di carico CC2. Tale configurazione prevede di imporre un'accelerazione sulla rete collegando due zavorre P1 e P2 rispettivamente nel punto di carico A e B, aventi uguale peso di 5 Kg e altezza di caduta libera pari a 1.10 metri. In Figura 5.25 viene rappresentata la posizione e la velocità nel tempo del peso P1 e P2 dal momento in cui vengono rilasciati fino all'istante immediatamente dopo l'impatto (80 ms). Dal grafico è possibile notare che la velocità massima raggiunta dal peso P1, che coincide con quella di impatto, è pari a 4.4 m/s e viene rilevata a 1.15 m dal punto di rilascio. Successivamente avviene una decelerazione di 0.9 m/s causata dalla reazione della rete flessibile. La velocità massima raggiunta dal peso P2, coincidente con quella di impatto, è pari a 4.4 m/s e viene rilevata a 1.18 m dal punto di rilascio. Successivamente avviene una decelerazione di 1 m/s causata dalla reazione della rete flessibile.

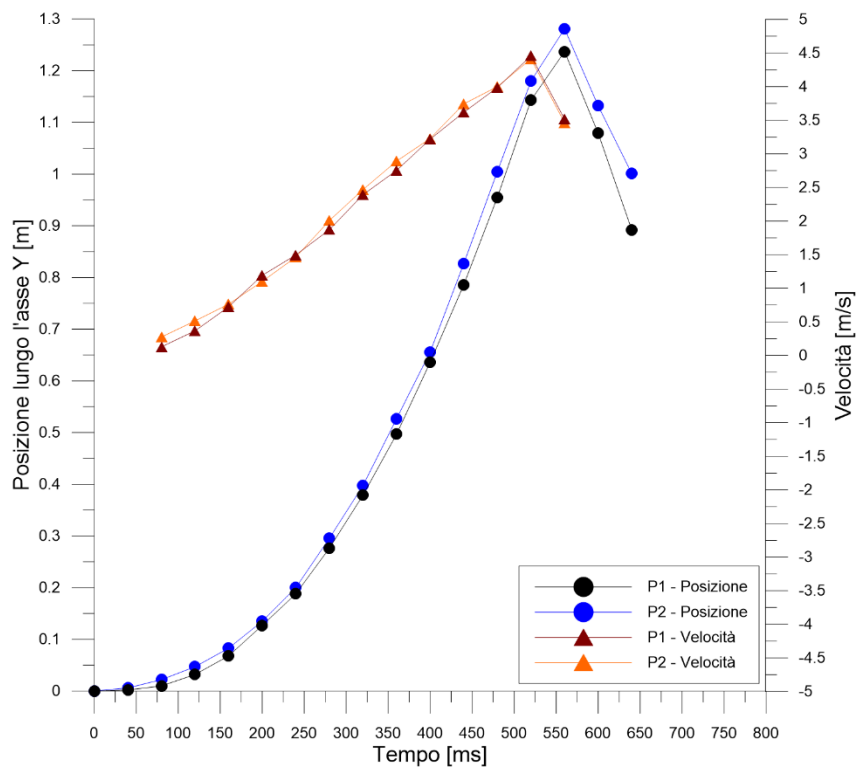


Figura 5.25 Ricostruzione attraverso l'elaborazione video dello spazio percorso e della velocità dei pesi P1 e P2 nel test 2.

Il picco massimo positivo rilevato dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 2 ha valore 18.16 g mentre il valore minimo registrato è risultato pari a -23.24 g. I successivi incrementi di accelerazione sono dovuti ad ulteriori impatti del medesimo peso come nel primo test.

Nel grafico in Figura 5.27 viene rappresentato in rosso il segnale letto dal prototipo Gflow sovrapposto al segnale estrapolato dai dati registrati dall'accelerometro PCB 356A16. Il superamento della soglia analogica è avvenuto all'istante t_0 pari a 201.76 ms. Il prototipo Gflow ha registrato il primo dato di accelerazione all'istante t_1 pari a 248 ms. Il tempo di inizializzazione durante il test 2 è risultato essere quindi di 46.24 ms.

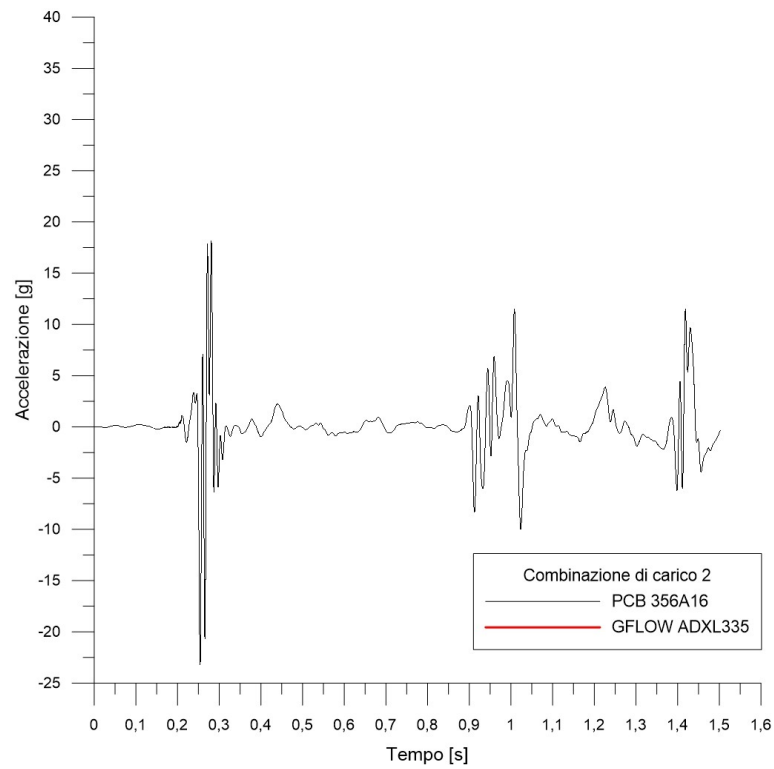


Figura 5.26 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 2.

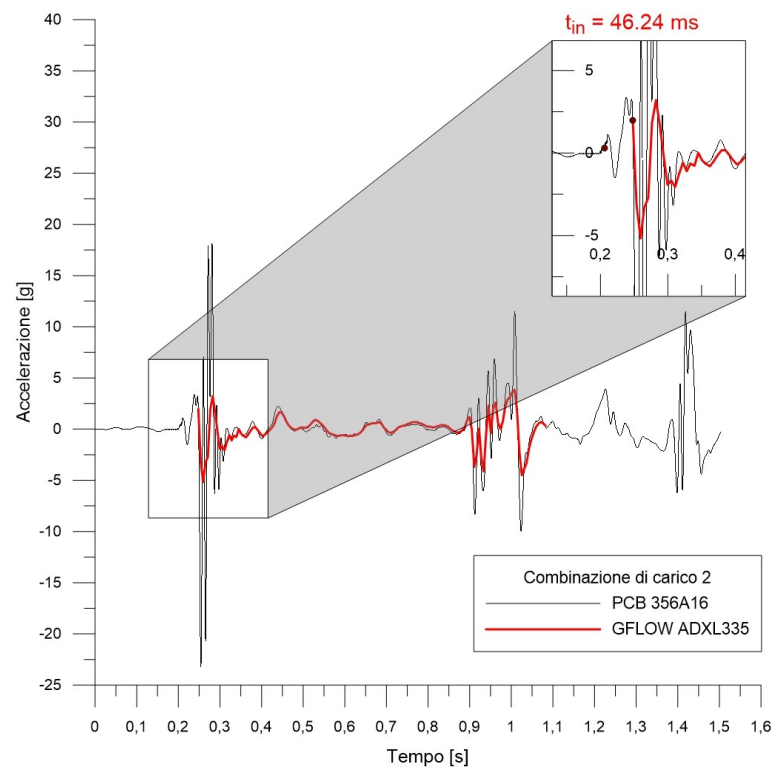


Figura 5.27 Il tempo di inizializzazione nel test 2 è risultato essere pari a 46.24 ms.

5.3.4.3 Risultati test 3 (combinazione di carico CC3)

Nel terzo test si è imposta sulla rete la combinazione di carico CC3. Tale configurazione prevede di imporre un'accelerazione sulla rete collegando rispettivamente tre zavorre P1, P2 e P3, aventi il medesimo peso di 5 Kg e altezza di caduta pari a 1.10 metri, ai punti di carico A, B, C. In Figura 5.28 viene rappresentata la posizione e la velocità nel tempo delle tre zavorre dal momento in cui vengono rilasciate fino all'istante immediatamente dopo l'impatto (80 ms). Dal grafico è possibile notare che i 3 pesi hanno impattato la rete e raggiunto la velocità massima nel medesimo istante. I valori di picco registrati nel test 3 sono compresi nel range tra 4.6 m/s e 4.9 m/s.

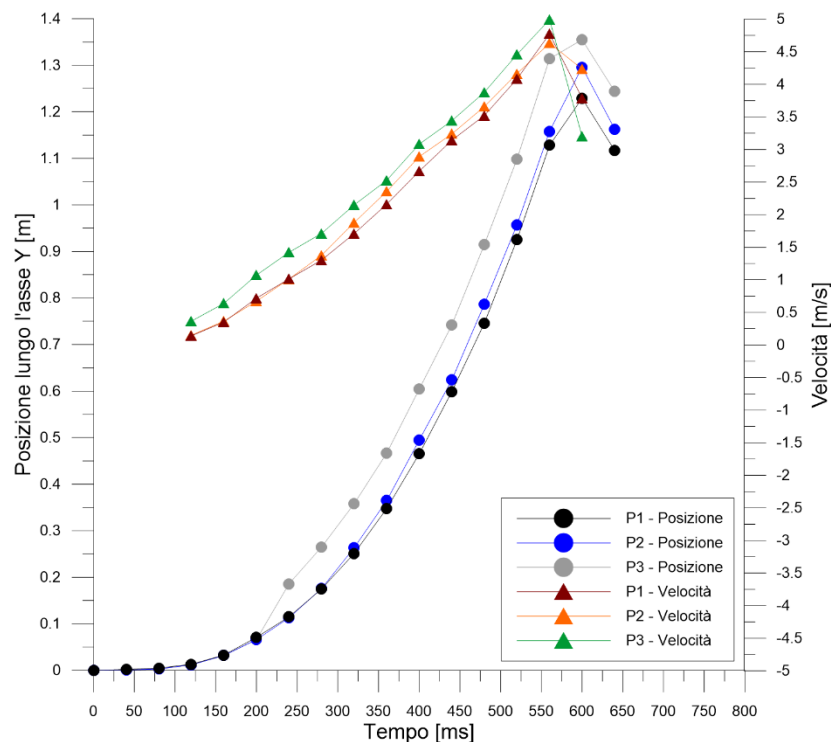


Figura 5.28 Ricostruzione attraverso l'elaborazione video dello spazio percorso e della velocità del peso P1 nel test 3.

Il picco massimo positivo rilevato dall'accelerometro durante l'impatto nel test 3 ha valore 44.69 g mentre il valore minimo registrato è risultato pari a -57,77 g. I successivi incrementi di accelerazione sono dovuti ad ulteriori impatti delle medesime zavorre.

Nel grafico in Figura 5.30 viene rappresentato in rosso il segnale letto dal prototipo Gflow sovrapposto al segnale estrapolato dai dati registrati dall'accelerometro PCB 356A16. Il superamento della soglia analogica è avvenuto all'istante t_0 pari a 180.76 ms. Il prototipo Gflow ha registrato il primo dato di accelerazione all'istante t_1 pari a 231 ms. Il tempo di inizializzazione durante il test 3 è risultato essere quindi di 50.20 ms.

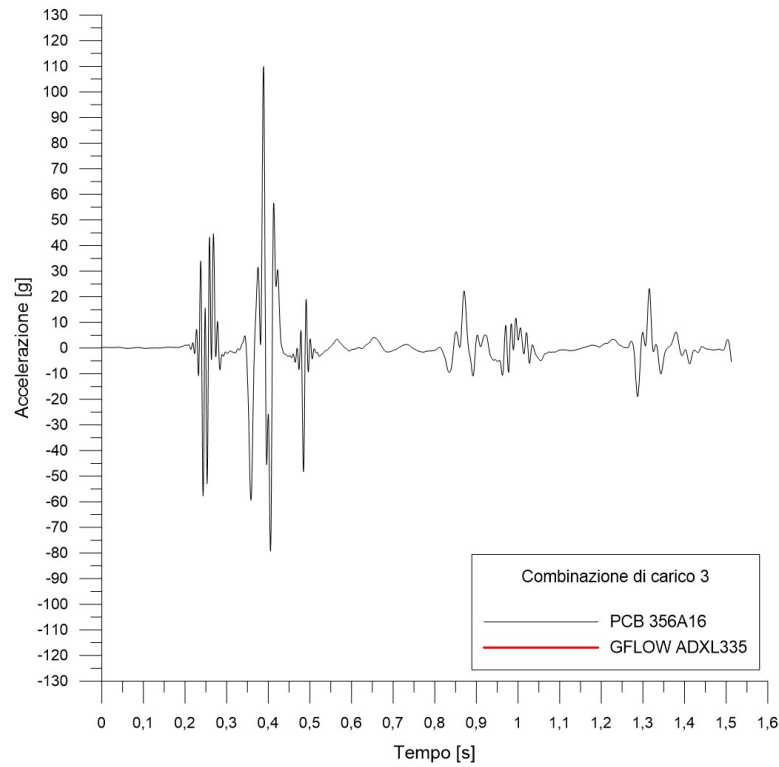


Figura 5.29 Accelerazioni lungo l'asse x rilevate dall'accelerometro PCB 356A16 durante il test 3.

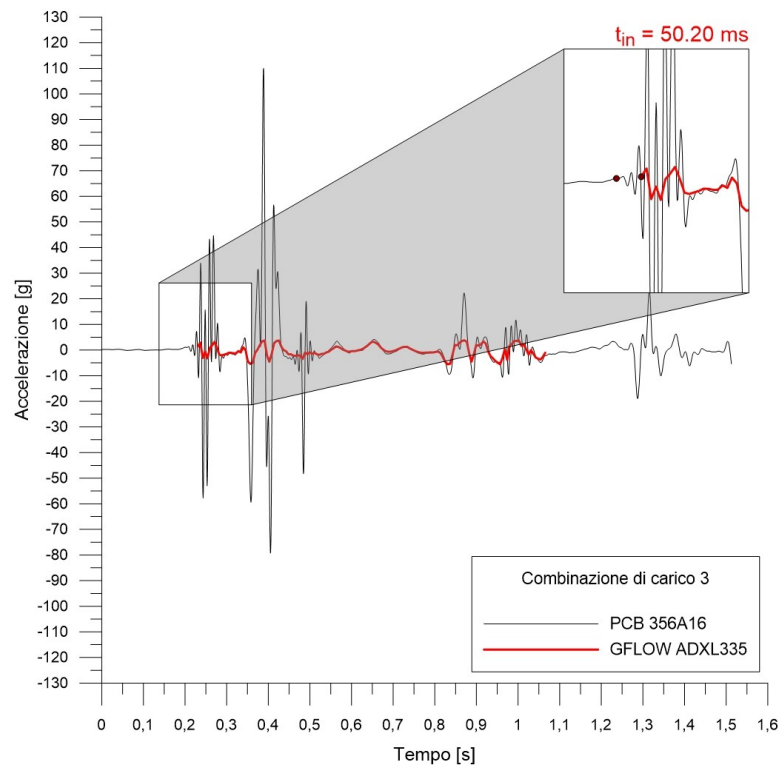


Figura 5.30. Il tempo di inizializzazione del prototipo nel test 3 è risultato essere pari a 50.20 ms.

Tenendo conto dei risultati ottenuti in tutti i diversi test, risulta che l'intervallo di tempo medio tra il rilevamento di una soglia di superamento e l'inizio della registrazione dei dati da parte del

modulo Gflow è di 45.75 ms. La Tabella 5.13 riassume i risultati dei test per tutte e tre le configurazioni. Dai risultati ottenuti è possibile sostenere che il Gflow è in grado di rilevare impatti aventi una durata superiore ai 50.20 ms, valore di inizializzazione massimo rilevato durante le prove.

Tabella 5.13 Sintesi dei risultati.

Test	Configurazione di carico	Superamento soglia t_0 [ms]	Attivazione prototipo Gflow t_1 [ms]	Tempo di inizializzazione t_m [ms]
1	CC1	138.19	179.00	40.81
2	CC2	201.76	248.00	46.24
3	CC3	180.80	231.00	50.20

5.4 Modulo Eyeflow

Il modulo Eyeflow è basato su due schede di sviluppo di tipo commerciale: MKR FOX 1200 distribuita dalla società Arduino e Raspberry Pi 3.

Il sistema è pensato come il modulo Gflow per operare a basso consumo energetico. In condizioni normali l'unica periferica operativa è la scheda MKR FOX 1200 che si trova in modalità Low Power. La periferica è programmata per uscire dalla modalità a basso consumo e per attivare l'alimentazione della seconda scheda secondo un tempo di risveglio configurato dall'utente o in seguito ad un impulso inviato dal Gflow. Inoltre è possibile configurare la durata della fornitura dell'alimentazione della seconda scheda sia in occasione di risvegli ordinari che straordinari.

La gestione della telecamera avviene mediante l'impiego della scheda Raspberry Pi 3 e dell'applicativo open source MotionEyeOS.

Tramite tale sistema è possibile:

1. Gestire molteplici tipologie di telecamere (IP e USB);
2. Definire la frequenza di campionamento dei fotogrammi. Tramite tale opzione è possibile decidere il numero di foto da effettuare ad ogni accensione. Da tenere in considerazione che il tempo di inizializzazione della scheda è di circa 10 secondi per cui se si vogliono effettuare 10 foto consecutive, ad esempio, con una frequenza di campionamento di un minuto è necessario prevedere un tempo di alimentazione di almeno 11 minuti;
3. Registrare video;
4. Effettuare lo storage dei dati sulla memoria SD del Raspberry oppure su una memoria in cloud;
5. Rinominare i file secondo uno standard definito. Tale opzione risulta di fondamentale importanza per l'importazione dei dati sul database;
6. Inviare i file acquisiti su di un server FTP mediante rete WiFi;
7. Impostare la risoluzione delle immagini e dei video;



Figura 5.31 Sistema prototipale Eyeflow.

5.4.1 Test di affidabilità prototipo Eyeflow

Per testare l'affidabilità del sistema di gestione si è confezionato un prototipo al quale è stata collegata una telecamera Raspberry PiNoIR Camera Rev. 1.3. I componenti elettronici sono stati posti all'interno di uno scatolare e installati mediante l'impiego di fascette ad una struttura metallica esterna. Durante il test si è impostato una frequenza di risveglio di 24 ore per una durata di 12 minuti e una frequenza di acquisizione pari a 5 minuti che ha consentito di realizzare 2 fotogrammi al giorno. La periferica è stata alimentata mediante un sistema fotovoltaico costituito da una batteria tampone da 12 V e un pannello da 10 W. L'invio dei dati è avvenuto mediante rete WiFi generata da un modem posto a circa 15 metri dal dispositivo. La prova è iniziata il 1/10/2019 e terminata il 24/12/2019. Per tutta la durata del test il sistema ha correttamente campionato e inviato i dati.



Figura 5.32 Fotogrammi realizzati durante la prova di affidabilità del prototipo Eyeflow.

CONCLUSIONI

L'attività di ricerca presentata in questo elaborato si è concentrata sullo sviluppo di due sistemi di monitoraggio automatici a controllo delle barriere flessibili paramassi e paracolate. Tali opere, grazie alla loro elevata deformabilità, permeabilità e versatilità di installazione, sono sempre più utilizzate nella mitigazione del rischio da frane rapide. Le elevate prestazioni in termini di efficienza strutturale e affidabilità sono garantite, però, solamente attraverso una manutenzione delle stesse costante e immediata nel caso di un impatto. Le attività ispettive da parte degli enti gestori di tali strutture, quando effettuate, avvengono con cadenze semestrali se non annuali. Non è raro quindi durante questi sopralluoghi ritrovare le reti riempite di detriti e i dispositivi frenanti parzialmente o totalmente plasticizzati e quindi con una capacità dissipativa energetica ridotta se non annullata.

Da qui nasce l'esigenza di sviluppare sistemi automatici che forniscano informazioni sul tasso di lavoro delle strutture alle pubbliche amministrazioni per la pianificazione degli interventi di manutenzione e che allertino i responsabili del monitoraggio, nell'immediato, nel caso venga rilevato un impatto sulle reti.

Nel capitolo 3 è stato presentato un nuovo approccio per il controllo remoto delle opere paramassi nel tempo basato sul monitoraggio della rotazione dei montanti attraverso l'impiego di sensori MEMS ed elettrolitici, del carico sui controventi di monte attraverso celle di carico estensimetriche e dell'allungamento della rete attraverso un dispositivo elettromeccanico. I parametri da controllare sono stati scelti in base ai dati raccolti durante i test di certificazione delle strutture. Il primo risultato ottenuto durante le attività di ricerca è stato lo sviluppo di un sistema di monitoraggio totalmente automatico, denominato Rockfall Safety Network. I sensori individuati comunicano con una centralina attraverso una trasmissione radio di tipo Smart Mesh, successivamente i dati raccolti vengono inviati attraverso una rete UMTS al centro di calcolo, dove vengono salvati su di un database MySQL ed elaborati mediante un software automatico. I risultati dell'elaborazione vengono successivamente resi fruibili agli enti gestori delle strutture mediante una piattaforma dinamica web ad accesso controllato. Il sistema sviluppato consente di stimare l'eventuale accumulo di materiale sulle reti attraverso la misura del carico residuo sui tiranti di monte, il tasso di lavoro delle diverse porzioni della barriera attraverso la misura della rotazione dei montanti, conseguenza dell'attivazione dei freni e, in parallelo, permette di rilevare nell'immediato eventuali impatti sulla rete controllandone in continuo l'allungamento. Inoltre, la disposizione di molteplici dispositivi lungo la medesima barriera consente di individuare le zone di versante maggiormente attive nel tempo.

L'automatismo che caratterizza il sistema permette inoltre di allertare, mediante l'invio di sms o e-mail o attraverso l'attivazione di dispositivi di allertamento remoti, gli enti responsabili del monitoraggio. Nell'elaborato sono state descritte le fasi di sviluppo dei singoli componenti hardware, le procedure di calibrazione dei sensori e il principio di funzionamento del software automatico che, oltre a consentire l'elaborazione automatica dei dati, permette di individuare eventuali malfunzionamenti dei sensori attraverso appositi algoritmi automatici.

Per testare il sistema RSN sviluppato si sono strumentate due barriere paramassi di nuova produzione, modello RAV_8/A da 5000 kJ e prodotte dalla ditta Incofil Tech S.r.l., installate in un sito pilota situato nel comune di Vobarno. Le due barriere, aventi un'estensione di 60 m e 40 m, disposte lungo due allineamenti differenti, sono state monitorate attraverso l'impiego di 5 moduli BPM dotati di un sensore MEMS ed un'ampolla elettrolitica, 5 celle di carico e 2 dispositivi elettromeccanici prototipali. La registrazione dei dati è stata avviata il 22 gennaio 2019 ed è tuttora in corso. Durante le attività di monitoraggio si sono riscontrate diverse criticità che hanno permesso di individuare soluzioni e modificare il sistema per un suo utilizzo a lungo termine. In particolare le problematiche principali hanno riguardato la funzionalità dei moduli radio nel tempo e l'invio di impulsi del dispositivo Trigger in occasione di eventi temporaleschi. La prima criticità è stata risolta in collaborazione con la ditta produttrice dei moduli radio attraverso una modifica del firmware di gestione dei dispositivi e del sistema di alimentazione. La seconda problematica è stata risolta attraverso l'implementazione nel software RSN di un sistema di gestione automatico degli allertamenti, non più basato solamente sulle attivazioni del trigger ma anche sui dati registrati da più sensori disposti nella medesima barriera. Nel periodo di monitoraggio non si sono registrati fenomeni di caduta massi che hanno raggiunto le barriere strumentate. Le celle disposte sui controventi di monte hanno registrato incrementi o decrementi di forza sui tiranti dovuti alla redistribuzione dei carichi sulla struttura avvenuti nei sei mesi successivi all'installazione o dovute alle deformazioni termiche dei componenti della barriera. Le rotazioni registrate dalle ampole elettrolitiche, con un valore massimo pari a 0.394° rilevato nella barriera di valle, sono imputabili agli effetti della temperatura sui sensori e sulla struttura metallica. Le entità delle rotazioni dei montanti misurate dal MEMS sono risultate inferiori rispetto alle ampole elettrolitiche poiché il sensore viene calibrato tenendo conto degli effetti della temperatura sul suo segnale. In ogni caso le rotazioni e i carichi misurati risultano nettamente inferiori rispetto alla soglia impostata nel sistema di allertamento e quindi trascurabili.

Nel capitolo 5 è stato presentato lo sviluppo di nuovo sistema per il monitoraggio delle opere flessibili paracolate, denominato Gflow Safety Network. La tecnologia è composta da due dispositivi il Gflow e l'EyeFlow. Il primo componente viene installato a contatto con la rete e ne consente il monitoraggio in continuo delle accelerazioni. Mediante i dati registrati è possibile identificare eventuali impatti o l'accumulo di materiale sulla struttura che ha determinato una rotazione della rete. Il secondo dispositivo viene disposto esternamente al canale ed è funzionale alla gestione di una telecamera e alla riduzione dei consumi legati all'utilizzo della stessa. Entrambi i dispositivi sono caratterizzati da un basso consumo energetico, trasmettono i dati mediante una rete WiFi e sono stati sviluppati utilizzando schede commerciali low cost. Il sistema nasce dall'esigenza di effettuare un controllo in real-time delle reti flessibili e di attivare una lettura straordinaria di sistemi di monitoraggio caratterizzati da consumi energetici maggiori e da frequenze di campionamento ridotte. Nell'ultima parte dell'elaborato sono state descritte le prove effettuate per valutare le caratteristiche e i limiti del sistema prototipale sviluppato. Dai test effettuati è emerso che il prototipo Gflow è in grado di individuare impatti aventi una durata superiore a 50.20 ms. Utilizzando la formula di calibrazione suggerita dalla ditta produttrice basata sulle caratteristiche della scheda di acquisizione, l'accuratezza media nella misura di accelerazioni dinamiche sull'asse x è risultata di 16.06 mg mentre nell'impiego statico è risultata pari a 0.19° sull'asse x e 0.17° sull'asse y . Inoltre, le caratteristiche del sistema consentono la definizione di una soglia di attivazione

hardware pari a 0.1 g sugli assi x e y e una soglia software pari a 1.10 g sulla risultante delle accelerazioni.

SVILUPPI FUTURI

Gli sviluppi della ricerca in futuro prevedono di:

1. Installare e testare un sistema prototipale Gflow Safety Network in sito per valutarne l'efficacia e l'affidabilità a lungo termine. La predisposizione della tecnologia prototipale su di una barriera flessibile era prevista nella primavera 2020 ma è stata rimandata a causa di ritardi dovuti all'emergenza Covid 19;
2. Proseguire con lo sviluppo di un applicativo automatico per la gestione e l'elaborazione dei dati provenienti dal sistema RSN; il software ad oggi è a livello sperimentale;
3. Sviluppare un'apposita sezione nella piattaforma di rappresentazione web dedicata alla visualizzazione dei dati registrati dal GSN;
4. Analizzare l'efficacia del sistema di allertamento, integrato nel software RSN, basato su controlli incrociati nel riconoscere un eventuale impatto sulla barriera. Il sistema di gestione degli allertamenti nel periodo di monitoraggio considerato ha consentito di filtrare la totalità dei falsi allarmi ma allo stesso tempo non è mai stata testata la sua efficacia nel riconoscere in automatico un impatto;
5. Studiare l'applicabilità del prototipo Gflow nelle barriere paramassi;
6. Perfezionare il sistema di impermeabilizzazione delle celle di carico per aumentarne l'affidabilità a lungo termine;
7. Durante le operazioni di sostituzione delle batterie i dispositivi BPM devono essere smontati dalla sede di installazione. Effettuandone il riposizionamento risulta impossibile orientarli, con una precisione del centesimo di grado, nella medesima direzione precedente all'intervento. Tale errore di riposizionamento nei grafici presenti nella piattaforma di rappresentazione può essere confuso con una rotazione, dovuta ad un evento di caduta massi. In futuro si prevede di implementare nel software RSN un algoritmo automatico che permetta di eliminare in automatico tale errore sulla base delle date degli interventi di manutenzione fornite dagli enti gestori mediante la piattaforma di rappresentazione;
8. Implementare un sistema di ricarica fotovoltaico nei moduli BPM in modo da ridurre al minimo le operazioni di manutenzione sul sistema.

BIBLIOGRAFIA

- Analog Devices. Datasheet Accelerometer ADXL335. Datasheet 2009.
- Arattano M. On the use of seismic detectors as monitoring and warning systems for debris flows. *Natural Hazards* 1999;20:197–213. <https://doi.org/10.1023/A:1008061916445>.
- Arattano M, Marchi L. Systems and sensors for Debris-flow monitoring and warning. *Sensors* 2008;8:2436–52. <https://doi.org/10.3390/s8042436>.
- Armanini A, Fraccarollo L, Larcher M. 142 : Debris Flow. *Encyclopedia of Hydrological Sciences* 2005.
- Berger F, Dorren L, Kleemayr K, Maier B, Planinsek S, Bigot C, et al. Eco-Engineering and Protection Forests Against Rockfalls and Snow Avalanches. *Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks* 2013. <https://doi.org/10.5772/56275>.
- Bertoldi G. Colate detritiche: dinamiche degli apporti di sedimento a scala integrata di bacino. Tesi di dottorato 2014.
- Brighenti R, Segalini A, Ferrero AM. Debris flow hazard mitigation: A simplified analytical model for the design of flexible barriers. *Computers and Geotechnics* 2013;54:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.05.010>.
- Brown D, Cox AJ. Innovative Uses of Video Analysis. *The Physics Teacher* 2009;47:145–50. <https://doi.org/10.1119/1.3081296>.
- Calcagno E. Analisi numerica dell' interazione tra flussi granulari e briglie filtranti: applicazione al caso di Saint Vincent (Aosta). 2019.
- Cavalli M, National I, Arattano M, National I, Comiti F. Protocol for Debris-flow Monitoring 2013. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3636.7525>.
- Collins BD, Stock GM. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. *Nature Geoscience* 2016;9:395–400. <https://doi.org/10.1038/ngeo2686>.
- Crosta GB, Agliardi F. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Science* 2003;3:407–22. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-407-2003>.
- Cruden DM, Varnes DJ. Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, Washington DC* 1996:36–75.
- D'Amato J, Hantz D, Guerin A, Jaboyedoff M, Baillet L, Mariscal A. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2016;16:719–35. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-719-2016>.
- Dai FC, Lee CF, Ngai YY. Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineering Geology* 2002;64:65–87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
- DeNatale JS, Iverson RM, Major JJ, LaHusen RG, Fiegel GL, Duffy JD. Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flows. *US Geol Surv Open File Rep, 99* 1999;205:38.
- Dorren LKA. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 2003;27:69–87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>.

- Federico Soatto. Le Colate di Detriti. 2014.
- Fell R, Corominas J, Bonnard C, Cascini L, Leroi E, Savage WZ. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning ITA. *Engineering Geology* 2008;102:85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>.
- Ferraiolo F, Giacchetti G. Rivestimenti corticali: alcune considerazioni sull'applicazione delle reti di protezione in parete rocciosa 2016.
- Frattini P, Crosta GB. Valutazione dell'accettabilità del rischio da frana e analisi costi-benefici 2006;4:49–56. <https://doi.org/10.1474/GGA.2006-04.0-06.0134>.
- Genevois R, Tecca PR, Berti M, Simoni A, Wieczorek GF, Naeser. Debris-flow in the Dolomites: Experimental data from a monitoring system. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* 2000:283–91.
- Giani GP, Giacomini A, Migliazza M, Segalini A. Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2004;37:369–89. <https://doi.org/10.1007/s00603-004-0027-2>.
- Grignaffini C, Segalini A, Carri A, Capparelli G. Understanding Slow Moving Landslide Behaviour : validation of numerical model from on site monitoring outcomes 2018:2018.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics* 2007;98:239–67. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>.
- Herrera G, Mateos RM, García-Davalillo JC, Grandjean G. Landslide databases in the Geological Surveys of Europe. *Landslides* 2018;15:359–79. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0902-z>.
- Hoffmann K. Applying the Wheatstone Bridge Circuit. *Nuclear Instruments and Methods* 1978;150:597–8.
- Hübl J, Hungr O, Fiebigler G. Debris-flow mitigation measures. 2015. <https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5>.
- Hübl J, Schimmel A, Koschuch R. Evaluation of Different Methods for Debris Flow Velocity Measurements at the Lattenbach Creek. *Interpraevent* 2018 2018:2–8.
- Hübl J, Suda J, Proske D, Kaitna R, Scheidl C. Debris Flow Impact Estimation. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering* 2009:137–48.
- Hungr O, Evans SG, Bovis MJ, Hutchinson JN. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 2001;7:221–38. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>.
- Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 2014;11:167–94. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- Hungr O, Morgan GC, Van Dine DF, Lister DR. Debris flow defenses in British Columbia. *GSA Reviews in Engineering Geology* 1987;7:201–22. <https://doi.org/10.1130/REG7-p201>.
- Hürlimann M, Coviello V, Bel C, Guo X, Berti M, Graf C, et al. Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews* 2019;199:102981. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>.
- Hürlimann M, Rickenmann D, Graf C. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal* 2003;40:161–75. <https://doi.org/10.1139/t02-087>.

- Itakura Y, Inaba H, Sawada T. A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. *Natural Hazards and Earth System Science* 2005;5:971–7. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-971-2005>.
- Iverson RM. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics* 1997;35:245–96. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>.
- Jaboyedoff M, Baillifard F, Philipposian F, Rouiller JD. Assessing fracture occurrence using «weighted fracturing density»: A step towards estimating rock instability hazard. *Natural Hazards and Earth System Science* 2004;4:83–93. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-83-2004>.
- Jaboyedoff M, Labiouse V. Technical note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Science* 2011;11:819–28. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-819-2011>.
- Jakob M, Hungr O. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. vol. 53. 2013. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Jiang R, Fei W ping, Zhou H wei, Huo M, Zhou J wen, Wang J mei, et al. Experimental and numerical study on the load and deformation mechanism of a flexible net barrier under debris flow impact. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2020;79:2213–33. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01692-y>.
- Kark Hoffman. An Introduction to Measurements using Strain Gauges. *Strain* 2001;37:127–127. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2001.tb01242.x>.
- Kobal M. STATE OF THE ART ON ROCKFALL MODELLING Report on the State of the Art of rockfall modelling in the Alps 2018.
- Lee HC, Liu CJ, Yang J, Huang JT, Fang YM, Lee BJ, et al. Using mobile wireless sensors for in-situ tracking of debris flows. *SenSys'08 - Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems* 2008:407–8. <https://doi.org/10.1145/1460412.1460476>.
- Maccaferri. *Case History Rev:01*, 2009.
- McArdell BW, Bartelt P, Kowalski J. Field observations of basal forces and fluid pore pressure in a debris flow. *Geophysical Research Letters* 2007;34. <https://doi.org/10.1029/2006GL029183>.
- Muller I, Brito RM De, Pereira CE. *Load Cells in Force Sensing Analysis – Theory and a Novel Application* 2010.
- Nagl G, Hübl J. Advancing Culture of Living with Landslides. *Advancing Culture of Living with Landslides* 2017:465–71. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1>.
- P. Frattini, G. Crosta and FA. *Rockfall characterization and modeling* 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9780511740367.023>.
- Pierson TC, Costa JE. A rhéologie classification of subaerial sediment-water flows. *GSA Reviews in Engineering Geology* 1987;7:1–12. <https://doi.org/10.1130/REG7-p1>.
- Ritchie AM. Evaluation of Rockfall and Its Control. In *Highway Research Record 17, Stability of Rock Slopes*, Highway Research Board, National Research Council, Washington, DC 1963:13–28.
- Sara Grebl. *Celle di carico elettriche e idrauliche* 2007.
- Sarno L, Papa M, Tai Y, Carravetta A, Martino R. A reliable PIV approach for measuring velocity profiles of highly sheared granular flows. *LATEST TRENDS in ENGINEERING MECHANICS, STRUCTURES, ENGINEERING GEOLOGY* 2014:134–41.

-
- Sassa K, Guzzetti F, Yamagishi H, Arbanas Z, Casagli N, McSaveney M, et al. Landslide Dynamics – a Review. vol. 1. 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6>.
- Scaioni M, Arosio D, Longoni L, Papini M, Zanzi L. Integrated Monitoring and Assessment of Rock Fall. *Sesto Forum Italiano di Scienze della Terra* 2007;618–29.
- Segalini A, Carini C, Cristalli L. Monitoring Underground Landslide Displacement : A New MUMS Based Device. *Landslide Science and Practice: Early Warning, Instrumentation and Monitoring* 2011;2. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31445-2-11>.
- Segalini A, Carri A, Savi R. Role of Geotechnical Monitoring: State of the Art and New Perspectives 2017;19–26. https://doi.org/10.35123/geo-expo_2017_3.
- Segalini A, Carri A, Savi R, Cavalca E, Alessio C, Kalamaras G. Tunnel restoration in unstable rock masses: Numerical analysis and validation of monitoring data from innovative instrumentation. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses* 2018;1:747–54.
- Segalini A, Chiapponi L, Drusa M, Pastarini B. New inclinometer device for monitoring of underground displacements and landslide activity. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina* 2014;16:58–62.
- Segalini A, Savi R, Cavalca E, Valletta A, Carri A. Innovative Application of IoT Technologies to Improve Geotechnical Monitoring Tools and Early Warning Performances. vol. 1. Springer International Publishing; 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61118-7_12.
- Spaggiari L. Flexible barriers against rapid events : interaction with moving masses and structural behavior control 2018.
- Stähli M, Sättele M, Huggel C, McArdell BW, Lehmann P, Van Herwijnen A, et al. Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2015;15:905–17. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-905-2015>.
- Stead D. Dynamics of Rockslides and Rockfalls. vol. 66. 2002. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(02\)00028-5](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(02)00028-5).
- Takahashi T. A Review of Japanese Debris Flow Research. *International Journal of Erosion Control Engineering* 2009;2:1–14. <https://doi.org/10.13101/ijece.2.1>.
- Tamotsu Takahashi. Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures by Tamotsu Takahashi. vol. 165. 2008. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0342-8>.
- Tan D-Y, Yin J-H, Feng W-Q, Qin J-Q, Zhu Z-H. Large Scale Physical Modelling Study of a Flexible Barrier under the Impact of Granular Flows. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* 2018:1–39. <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-131>.
- Tan DY, Yin JH, Qin JQ, Zhu ZH, Feng WQ. Experimental study on impact and deposition behaviours of multiple surges of channelized debris flow on a flexible barrier. *Landslides* 2020;17:1577–89. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01378-7>.
- Telford WM, Geldart LP, Sheriff RE. *Applied Geophysics* Second Edition 1990.
- Tubino M, Lanzoni S. Rheology of debris flows: experimental observations and modelling problems. *Excerpta* 1993;7:201–35.
- Turnbull B, Bowman ET, McElwaine JN. Debris flows: Experiments and modelling. *Comptes Rendus Physique* 2015;16:86–96. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2014.11.006>.
- Vagnon F. Design of active debris flow mitigation measures: a comprehensive analysis of existing
-

-
- impact models. *Landslides* 2020;17:313–33. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01278-5>.
- Valagussa A, Frattini P, Crosta GB. Earthquake-induced rockfall hazard zoning. *Engineering Geology* 2014;182:213–25. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.009>.
- Varnes D. Slope Movement Types and Processes. Transportation Research Board Special Report 1978.
- Vogel T, Labiouse V, Masuya H. Rockfall protection as an integral task. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)* 2009;19:304–12. <https://doi.org/10.2749/101686609788957856>.
- Volkwein A. Flexible debris flow barriers – Design and application. *WSL Ber* 2014:29.
- Volkwein A., Schellenberg K, Labiouse V, Agliardi F, Berger F, Bourrier F, et al. Rockfall characterisation and structural protection - A review. *Natural Hazards and Earth System Science* 2011;11:2617–51. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>.
- Volkwein Axel, Wendeler C, Guasti G. Design of flexible debris flow barriers. *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings* 2011:1093–100. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-118>.
- Volta F. Il ruolo delle barriere paramassi nella mitigazione del rischio da frana nella provincia autonoma di Bolzano 2011.
- Wendeler C, McArdell BW, Volkwein A, Denk M, Gröner E. Debris flow mitigation with flexible ring net barriers - Field tests and case studies. *WIT Transactions on Engineering Sciences* 2008;60:23–31. <https://doi.org/10.2495/DEB080031>.
- Wendeler C, Volkwein A, Roth A, Denk M, Wartmann S. Field measurements used for numerical modelling of flexible debris flow barriers. *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings* 2007:681–7.
- Wyllie DC, Mah CW. *Rock Slope Engineering*. CRC Press; 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315274980>.
- Ye J, Kurashima Y, Kobayashi T, Tsuda H, Takahara T, Sakurai W. An efficient in-situ debris flow monitoring system over a wireless accelerometer network. *Remote Sensing* 2019;11:1–17. <https://doi.org/10.3390/rs11131512>.
-

Ringraziamenti:

Questo spazio lo dedico alle persone che, con il loro supporto, mi hanno aiutato nella redazione di questo elaborato.

In primis vorrei ringraziare il Prof. Andrea Segalini che in questi tre anni di dottorato è stato per me una vera e propria guida, sempre pronto e disponibile a fornirmi consigli e suggerimenti. Lo ringrazio soprattutto per avermi trasmesso la passione per il monitoraggio geotecnico e per avermi insegnato ad affrontare la professione dell'ingegnere, in modo serio ma non serio.

Ringrazio i miei colleghi e vicini di scrivania, Andrea e Alessandro per il loro supporto durante lo sviluppo del software automatico RSN, per aver ascoltato con pazienza i miei continui e giornalieri cambiamenti di idee sullo sviluppo dei prototipi e sui test da effettuare ma soprattutto per gli splendidi giri in bicicletta e corsette post lavoro. P.S. Non andrete mai più forte di me!

Un grazie di cuore va al mio collega Edoardo Cavalca, con cui ho condiviso l'intero percorso di dottorato. Lo ringrazio per i regolari scambi di idee sulle attività di ricerca da svolgere ma soprattutto per le mille avventure passate insieme in trasferta.

Ringrazio l'Ing. Laura Spaggiari per il supporto nello sviluppo del sistema RSN e soprattutto per la compagnia durante i sopralluoghi sul Monte Cingolo in condizioni meteo proibitive.

Un ringraziamento particolare va all'Ing. Luca Chiapponi per i suoi utili e indispensabili consigli durante le fasi di test del prototipo Gflow.

Ringrazio tutto il Team GEI Elettronica per la disponibilità dimostrata durante le fasi di modifica dei moduli radio.

Un sentito grazie va alla mia compagna Ambra per la pazienza dimostrata nel sopportarmi nel periodo di stesura della tesi e per aver sempre sostenute le mie idee.

Non posso non menzionare la mia famiglia che da sempre mi sostiene nella realizzazione dei miei progetti. Non finirò mai di ringraziarvi per avermi permesso di arrivare fin qui.

Ringrazio i tecnici di laboratorio Eustacchio, Vittorio e Andrea per la loro costante disponibilità e soprattutto per le lunghe chiacchierate e risate alle macchinette del caffè.

Ed infine ringrazio i miei amici Marco e Alessio per essere stati sempre presenti in questo percorso e per il loro supporto morale nei momenti di difficoltà.