

# Modello Fisico di Laboratorio

per la modellazione dei processi di infiltrazione,  
di innesco e propagazione dei movimenti franosi

*A cura di*  
**Giovanna Capparelli**  
**Pasquale Napoli**  
**Gennaro Spolverino**  
**Pasquale Versace**



Anno **5** Numero **7**  
**Luglio 2018**

**a cura di**  
Giovanna Capparelli  
Pasquale Napoli  
Gennaro Spolverino  
Pasquale Versace

**Editing**  
Pasquale Napoli  
Gennaro Spolverino

## *Quaderni del CAMILab*

Pubblicazione periodica a cura del

**Laboratorio di Cartografia Ambientale e Modellistica Idrogeologica**  
Università della Calabria - Direttore: *Prof. Ing. Pasquale Versace*

Centro di Competenza del Dipartimento di Protezione Civile  
(Decreto del 26.01.2005 emanato ai sensi della Direttiva del 25.02.2004)

87036 Arcavacata di Rende (CS) – Ponte P. Bucci cubo 41/B

Tel.: 0984 496 621/592/617

Fax 0984 496619

[www.camilab.unical.it](http://www.camilab.unical.it)

[camilab@libero.it](mailto:camilab@libero.it)

Questo volume è stato realizzato in collaborazione con  
Consorzio **Interuniversitario per l'Idrologia**





Sistema  
Integrato di  
Laboratori per  
l'Ambiente



# **Modello Fisico di Laboratorio**

**per la modellazione dei processi di infiltrazione,  
di innesco e propagazione dei movimenti franosi**

Giovanna Capparelli  
Pasquale Napoli  
Gennaro Spolverino  
Pasquale Versace



*Il modello fisico descritto in questo volume è stato realizzato anche grazie all'impegno e alla decisiva collaborazione degli Amici, dell'Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli,*

***Professori***

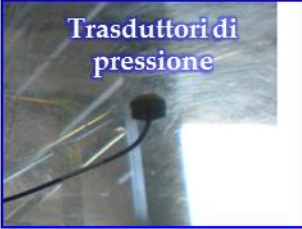
***Emilia Damiano, Roberto Greco e Lucio Olivares.***

*Con loro condividiamo tutti i risultati ad oggi conseguiti e lavoriamo per l'ulteriore potenziamento del sistema.*

Videocamere



Trasduttori di pressione



Nebulizzatori



Tensimetri



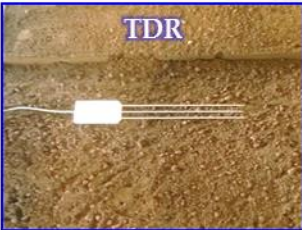
Pluviometri



Laser



TDR









# SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>9</b>
<b>1. DESCRIZIONE DEL DISPOSITIVO .....</b>	<b>11</b>
1.1. COMPONENTE MECCANICA.....	13
1.2. SENSORISTICA .....	18
1.2.1. TENSIOMETRI.....	21
1.2.2. TRASDUTTORI DI PRESSIONE .....	24
1.2.3. TDR Device.....	26
1.2.4. TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO A TECNOLOGIA LASER.....	27
1.2.5. SISTEMA DI ACQUISIZIONE IMMAGINI E TECNICA PIV .....	29
1.2.6. SISTEMA PIOGGIA .....	32
1.2.7. PLUVIOMETRI.....	34
<b>2. SET-UP DEGLI STRUMENTI.....</b>	<b>35</b>
2.1. UTILIZZO E CALIBRAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE.....	37
2.1.1. TENSIOMETRI.....	37
2.1.1.1. CALIBRAZIONE DEI TENSIOMETRI .....	38
2.1.2. TRASDUTTORI DI PRESSIONE .....	42
2.1.2.1. CALIBRAZIONE DEI TRASDUTTORI .....	42
2.1.3. TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO .....	46
2.1.4. TDR.....	47

2.1.4.1. VALUTAZIONE DELLA FORMA D'ONDA E CALCOLO DELL'OFFSET DELLE SONDE TDR .....	48
----------------------------------------------------------------------------------------	----

### **3. ESEMPI DI SPERIMENTAZIONE.....53**

3.1. OPERAZIONI PRELIMINARI ALLA POSA IN OPERA DEL TERRENO .....	55
3.2. RICOSTITUZIONE DEL DEPOSITO .....	57
3.3. PROVA DI INFILTRAZIONE .....	59
3.4. PROVA CON UN DEPOSITO OMOGENEO .....	60
3.4.1. RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE.....	62
3.4.1.1. FASE DI INFILTRAZIONE IN DEPOSITO ORIZZONTALE .....	62
3.4.1.2. FASE DI EVAPORAZIONE IN DEPOSITO ORIZZONTALE .....	65
3.4.1.3. FASE DI RIDISTRIBUZIONE IN DEPOSITO INCLINATO .....	67
3.4.1.4. FASE DI INFILTRAZIONE IN DEPOSITO INCLINATO.....	68
3.5. IMPIEGO DI RETI PARAMASSI.....	72

### **BIBLIOGRAFIA.....77**

Per osservare e comprendere il comportamento delle frane indotte da pioggia è possibile avviare sperimentazione in sito o sviluppare analisi di laboratorio attraverso modelli fisici in scala.

Questi ultimi, in particolare, si basano sulla riproduzione delle caratteristiche fisiche dei fenomeni di studio e delle condizioni al contorno che ne controllano le dinamiche. Esistono diverse configurazioni, che differiscono essenzialmente nelle dimensioni, nella strumentazione installata e nelle intrinseche potenzialità di esecuzione.

Vari autori hanno utilizzato dei modelli fisici per l'analisi dei fenomeni franosi (Iverson e LaHusen, 1989; Eckersley, 1990; Spence e Guymmer, 1997; Wang e Sassa, 2001; Okura et al., 2002; Lacerda et al., 2003; Olivares et al., 2009).

Questi modelli in scala, oltre ad evidenti utilità di carattere scientifico, sono particolarmente utili per tutti quei casi difficili da monitorare strumentalmente, perché rendono possibile l'osservazione dei comportamenti che sottendono i processi di rottura e le fasi transitorie che precedono.

Gli schemi maggiormente usati riproducono lo schema tipico del pendio indefinito e controllano, grazie ad una adeguata sensoristica, varie grandezze necessarie alla comprensione del fenomeno quali la suzione, il grado di saturazione, i piccoli spostamenti.

La possibilità di realizzare e mettere in opera modelli fisici di grandi dimensioni consente di analizzare volumi di terreno maggiori, di riprodurre

più fedelmente il fenomeno naturale limitando al massimo gli effetti al contorno.

Con questo intento, presso il laboratorio CamiLab dell'Università della Calabria nell'ambito del progetto SILA – PONA3\_00341, Sistema Integrato di Laboratori per l'Ambiente – è stato realizzato un canale artificiale di grandi dimensioni in grado di riprodurre l'innescò delle frane indotto da una forzante pluviometrica, di analizzare le grandezze correlate e di osservare l'evoluzione post-rottura.

Il modello fisico, descritto in dettaglio nella monografia, è stato progettato in modo da conferire al canale grande flessibilità e versatilità nell'utilizzo.

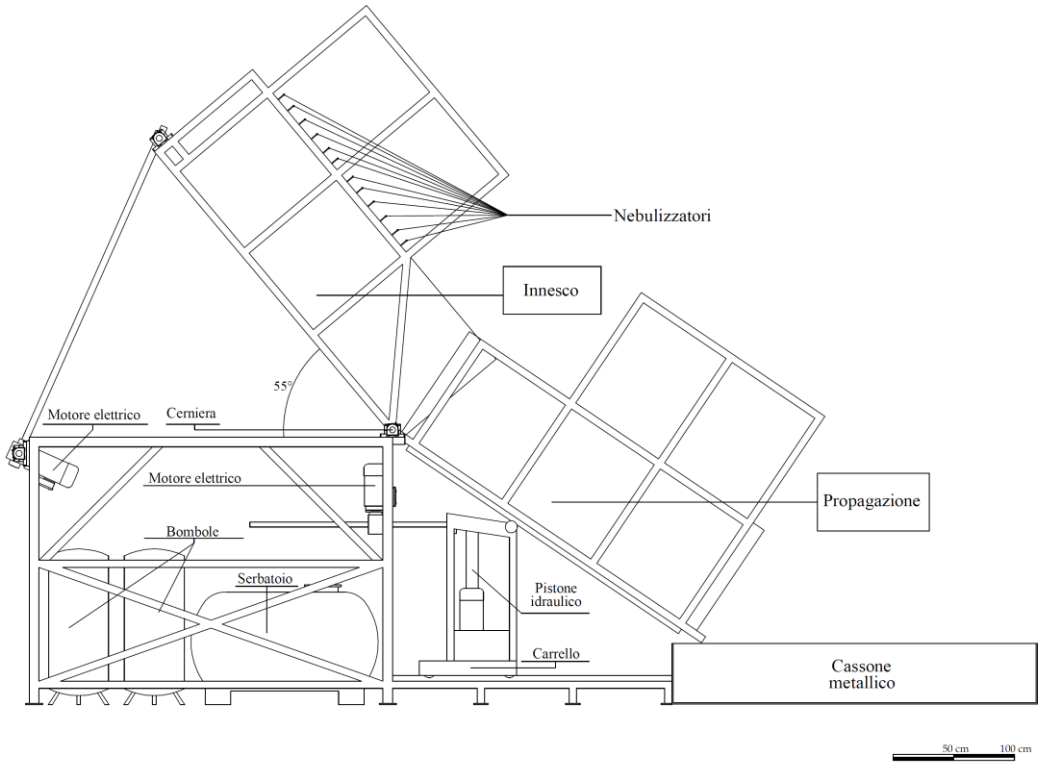
È attrezzato di sensoristica per la misura delle principali grandezze fisiche che governano i processi di deformazione e di rottura, di un impianto di video registrazione, di laser per la misura degli spostamenti e di dispositivi per la valutazione delle velocità coinvolte. La presenza di due canali indipendenti consente, inoltre, di analizzare anche la fase di propagazione e di prevedere il posizionamento di strutture di impatto per valutare eventuali strategie di mitigazione.

I paragrafi che seguono riportano una descrizione dettagliata del modello in scala, descrivendo la componente meccanica, la sensoristica di cui si compone attualmente, le modalità d'uso e le tecniche di taratura. A titolo di esempio si descrivono alcune prove effettate e i relativi risultati.



## **1. DESCRIZIONE DEL DISPOSITIVO**

a



b

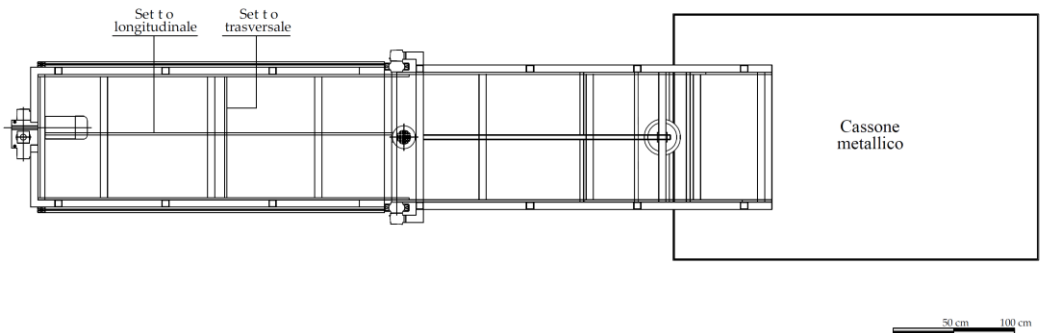


Figura 1: Schema del modello fisico: a) sezione; b) pianta.

## 1.1. COMPONENTE MECCANICA

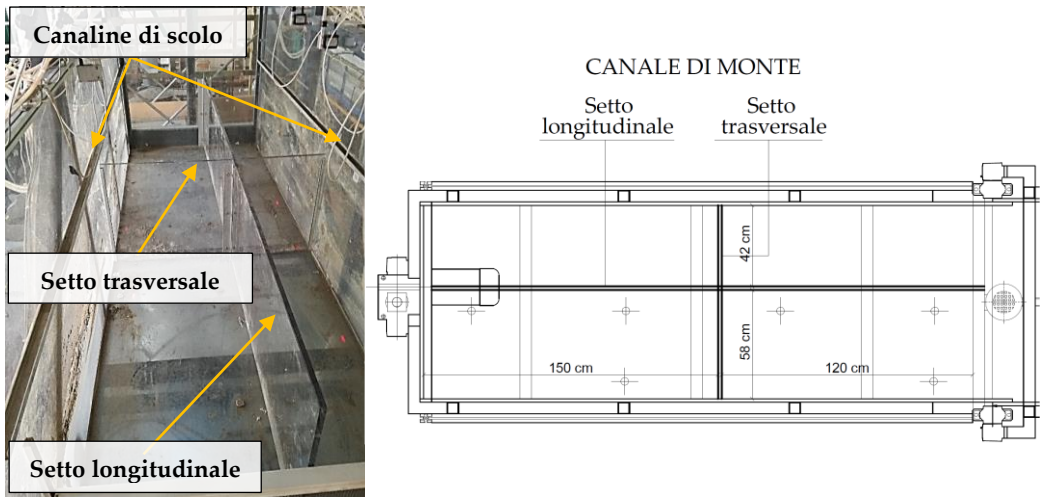
Il canale presenta una sezione rettangolare costante per tutto lo sviluppo longitudinale. La struttura, sostenuta da tubolari metallici, ha altezza 1 m, una lunghezza complessiva di 6 m, divisi 3 m per l'innescò e 3 m per la propagazione ed una larghezza pari a 1 m.

In Figura 1 sono riportate le sezioni e la pianta della struttura, con riferimento alla sola componente meccanica, in Figura 2 le foto della vista laterale e frontale del canale.

Nel canale di monte sono installate canaline di scolo che raccolgono l'acqua di gocciolamento dalle pareti laterali e possono essere installati alcuni setti, disposti longitudinalmente e verticalmente gli assi. Questo consente non solo di realizzare campi di studio di dimensioni ridotte ma di condurre anche prove in parallelo (Figura 3).

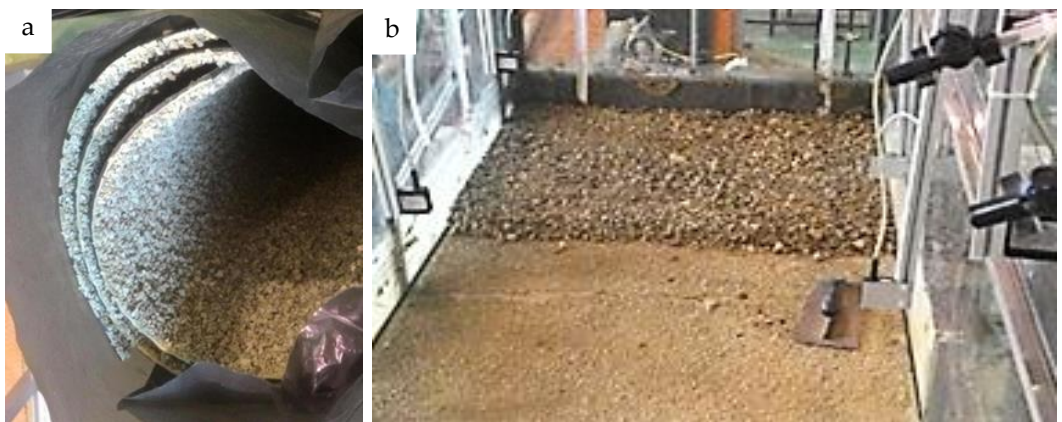


Figura 2: Modello fisico: a) vista laterale; b) vista frontale.



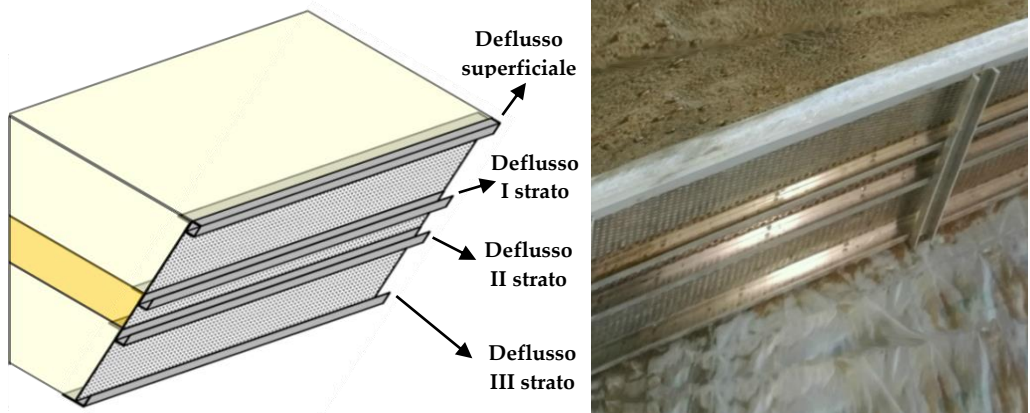
**Figura 3: Particolare delle canaline di scolo, dei setti longitudinali e trasversali.**

Sia le pareti laterali che quella di fondo sono realizzate con pannelli di plexiglas trasparente per garantire la visione e la ripresa del movimento durante la frana. È possibile riprodurre sia il caso di fondo impermeabile che il caso di fondo permeabile. Nel primo caso viene posto un elemento attritivo ed impermeabile, che funge da interfaccia con il terreno di prova, rappresentato da un telo in materiale plastico sul quale sono incollati dei granelli di ghiaia; nel secondo caso, si applica un geotessile o una georete permeabile.



**Figura 4: a) Fondo impermeabile e attritivo. b) Posa del materiale sul fondo impermeabile.**





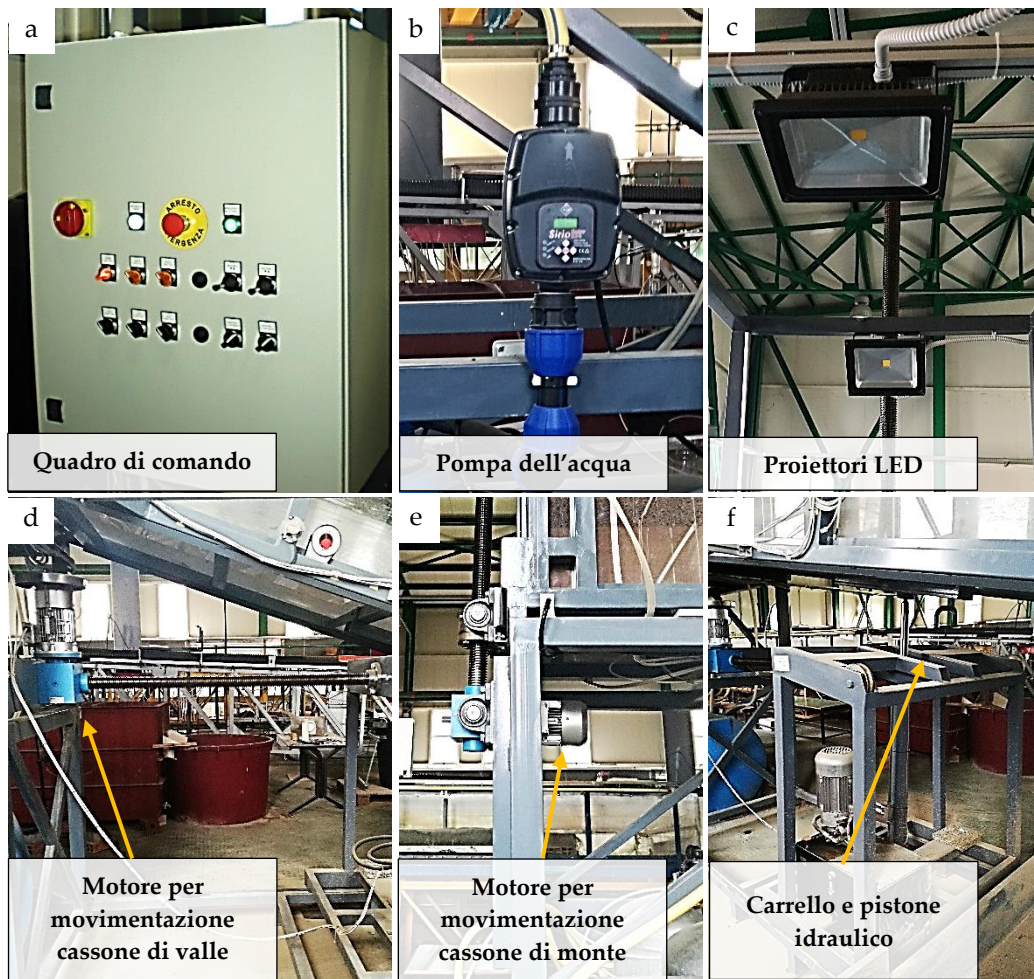
**Figura 5: Griglia drenante posta al piede del pendio con installate le canaline di raccolta dell'acqua per la misura dei deflussi.**

Per trattenere il deposito, al piede del pendio ricostruito, viene posta una griglia drenante. È possibile inserire griglie di diversa altezza, in base allo spessore del deposito ricostruito. La griglia è formata da una lastra metallica forata, sulla quale viene posizionato un geotessile permeabile che ne consente il drenaggio. Inoltre, sulla parte frontale della griglia, trasversalmente al pendio, è possibile montare delle canaline di raccolta dell'acqua, per misurare sia il deflusso superficiale, sia i deflussi dai singoli strati di terreno. In Figura 5 si riporta un esempio di griglia per una prova che ha previsto tre strati, con relativa installazione delle canaline per la misura dei deflussi.

La pioggia artificiale viene realizzata con un sistema di nebulizzazione di particelle d'acqua mediante 24 ugelli, ed alimentata da un serbatoio principale da 1000 litri e quattro serbatoi ausiliari da 200 litri. L'impianto di pioggia, inoltre, integra quattro sensori di pressione e 3 pluviometri ausiliari. La disposizione degli ugelli è stata ottimizzata al fine di garantire la massima uniformità della pioggia, di minimizzare l'erosione superficiale e l'interferenza con il sistema di riprese video.

Il range di pressione varia tra 0.1 e 7 bar con un intensità che può variare a seconda degli ugelli adoperati. La variazione massima, per ogni singolo ugello, va da 0.28 a 6.13 mm/h su 3 m<sup>2</sup>. La regolazione è descritta nel successivo paragrafo 1.2.6. Oltre l'impianto artificiale di pioggia sul canale sono installati ulteriori sistemi di acquisizione che permettono la raccolta dei dati da una serie di sensori per un totale di 48 canali provenienti da tensiometri, sonde di pressione neutra, sensori laser per il rilievo del livello del terreno, sensori ausiliari (d'inclinazione e di pressione) e pluviometri.

I singoli sensori sono collocati in diverse posizioni e ciascuno di essi può essere posizionato per operare su diverse configurazioni di misura e simulazioni. A completamento dell'opera sono stati installati una serie di sistemi di attuazione e controllo motorizzati, pneumatici e idraulici comprendenti (Figura 6):



**Figura 6:** a) Il quadro di comando elettrico per la movimentazione dei cassoni e il comando di luci e pompe. b) Pompa dell'acqua per il caricamento dei serbatoi pressurizzati. c) Proiettori LED. d) e) Motori elettrici per la movimentazione dei cassoni di valle e di monte. f) carrello per la movimentazione di valle e centralina idraulica per l'ampliamento dell'angolo del cassone.

- il quadro di comando elettrico per la movimentazione dei cassoni e il comando di luci e pompe;
- il sistema di pompaggio dell'acqua per il caricamento dei serbatoi pressurizzati;
- un sistema d'illuminazione con 6 proiettori LED;
- il sistema di motori con riduttori e martinetti per movimentare i cassoni;
- una centralina idraulica per l'ampliamento dell'angolo del cassone di sviluppo e propagazione;
- una serie di sensori e finecorsa ausiliari per l'intero sistema.

Il sistema di acquisizione a 48 canali (Figura 7) è basato su PC "dedicato", collegato serialmente a:

- un box basato su di una scheda di acquisizione NI;
- una serie di centraline di acquisizione dati DSI.



**Figura 7: Centraline di acquisizione.**

## 1.2. SENSORISTICA

---

Come anticipato, la strumentazione presente sul canale artificiale è in grado di misurare le principali grandezze che controllano il fenomeno fisico, grazie all'installazione delle seguenti apparecchiature:

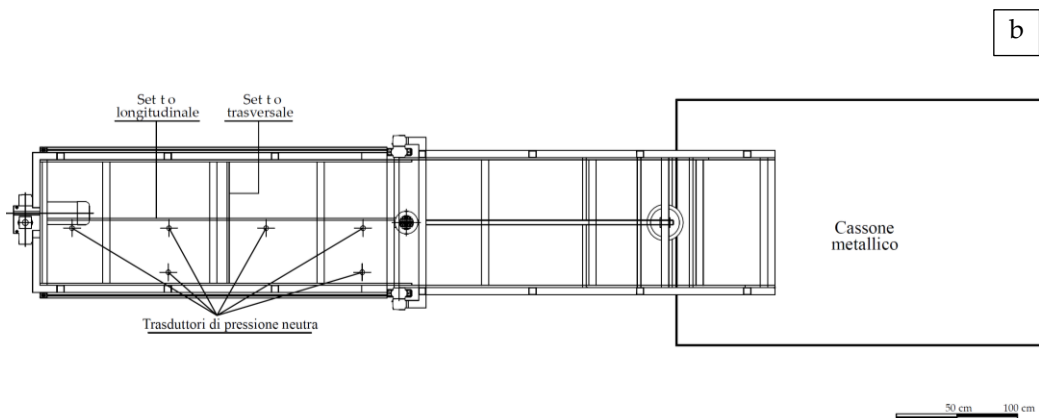
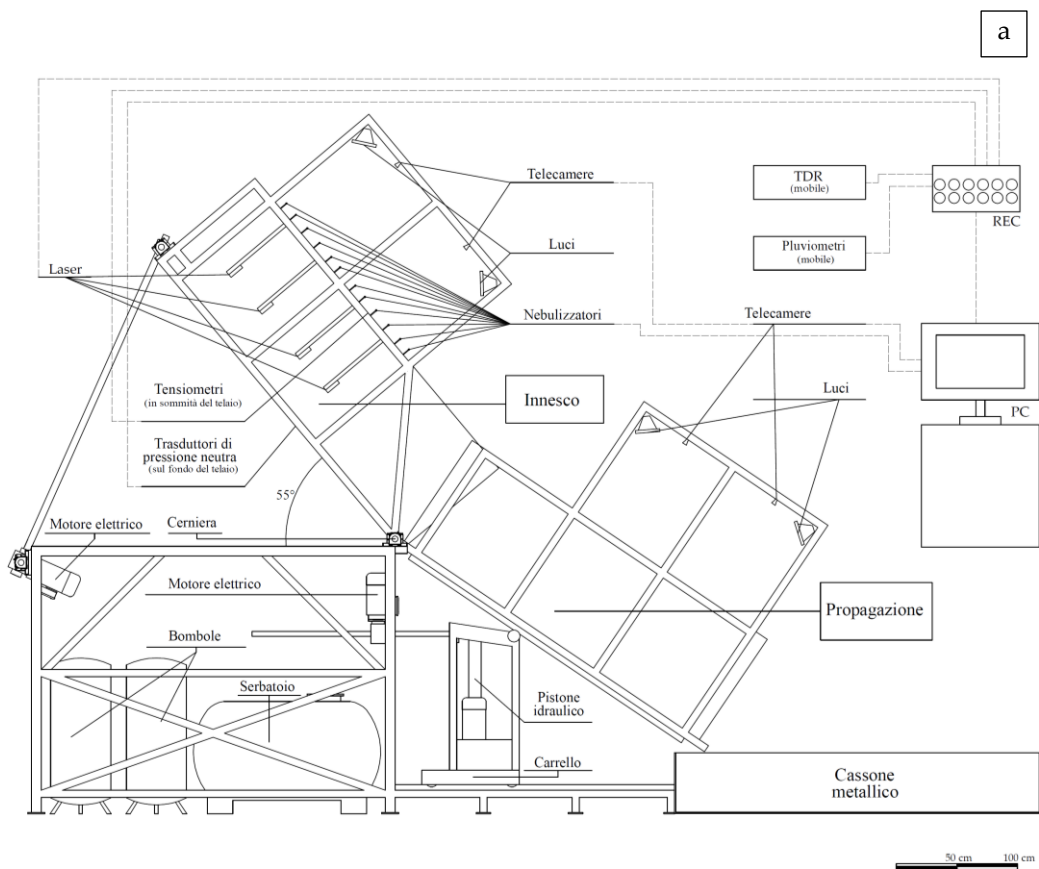
- Tensimetri (usati per la valutazione della suzione);
- Trasduttori di pressione (usati per la valutazione della pressione neutra);
- TDR device (usato per la valutazione del contenuto d'acqua del terreno);
- Impianto di pioggia (usato per simulare un evento di pioggia);
- Sensori laser (usati per la valutazione del profilo del terreno e degli spostamenti  $u_z$ <sup>1</sup>);
- Videocamere ad elevata risoluzione (usate per la valutazione degli spostamenti lungo  $u_x$  e  $u_y$ <sup>2</sup>).

Il disegno in Figura 8 richiama i suddetti sensori ed il relativo posizionamento lungo la struttura. Questa componente sensoristica è essenziale per misurare e monitorare le principali grandezze che controllano e regolano il fenomeno delle frane indotte dall'infiltrazione della pioggia.

---

<sup>1</sup> Rappresentano gli spostamenti nella direzione ortogonale.

<sup>2</sup> Rappresentano gli spostamenti nella direzione  $x$  e  $y$  (in pianta).



**Figura 8: Schema del modello fisico e sensoristica: a) sezione; b) pianta.**

In Tabella 1 è riportato lo schema più completo della strumentazione con le relative proprietà più significative.

Misurazione	Dispositivo	Fabbricazione/Tipo	Sensore	Dimensioni sensore		Trasduttore	Campo di funzionamen.	Linearità	Isteresi	Uscita	Frequenza di campionam.	
				Diametro	Altezza							
Suzione di matrice	Tensimetro	Soil Moisture Corp/2100F	Coppa in ceramica	6 mm	25 mm	Trasduttore corrente	0 - 100 Pa	0,0025	< 1%	4 - 20 mA	750 Hz	
Contenuto d'acqua volumetrico	Dispositivo	Fabbricazione/Tipo	Sensore	Dimensioni barre del sensore		Tempo di risposta del generatore di impulsi & circuito di campionamento	Massima risoluzione spaziale	Intervallo operativo di temperatura	Risoluzione di temporizzaz.			
				Diametro	Lunghezza					1 cm a $\theta = 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$	2 cm a $\theta = 0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$	12.2 ps
				2 mm	75 mm					2 cm a $\theta = 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$	4 cm at $\theta = 0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$	12.2 ps
				3 mm	150 mm					4 cm a $\theta = 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$	8 cm at $\theta = 0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$	12.2 ps
Apparato TDR volumetrico	Dispositivo	Fabbricazione/Tipo	Sensore	5 mm	300 mm	≤ 300 ps						
				2,2 mm	80 mm							1 cm a $\theta = 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$
Spostamento verticale	Dispositivo	Fabbricazione/Tipo	Sensore	Dimensioni dell'alloggiamento		Campo di misura	Risoluzione	Linearità	Uscita	Intervallo operativo	Frequenza di campionam.	
				62 mm - 17 mm - 50 mm	100 mm							0.03 %
Spostamenti ux - uy	Dispositivo	Fabbricazione/Tipo	Sensore	Dimensioni dell'alloggiamento		Frequenza dei fotogrammi	Risoluzione	Dimensioni pixel	Uscita video	Area dell'immagine	Consumo di energia	
				42 mm - 29 mm - 29 mm	22 fps							1296 da 966
Accessori: Obiettivo C-Mount High Res - 1/2" - 4 mm - F/1.4 w/lock Basler Digital I/O cable with HRS 6-pin connector, 10 m Mega-Pixel Lens Fixed FL 8 mm - 2/3" - f/1.1 - f/16												
Misurazione	Dispositivo	Fabbricazione/Tipo	Sensore	Dimensioni sensore		Campo di funzionamen.	Risoluzione - Precisione	Intervallo op. di temper.	Uscita	Temperatura compensata		
				Diametro	Altezza							0.3 % - ±1%
Pressione dell'acqua	Trasduttore di pressione dei	TE Connectivity Measurement Specialties	SENSOR 2PSIG 1/2NPT .5-	12.7 mm	25.4 mm	0 - 13.79 kPa	0.3 % - ±1%	-20 /70 °C	0 - 5 V	0 - 40°C		
Misurazione	Dispositivo	Fabbricazione/Tipo	Sensore	Dimensioni sensore		Campo di funzionamento	Risoluzione	Risoluzione	Risoluzione massima temporale			
				Diametro	Altezza							1 mm/h
Intensità di pioggia	Pluviometro	Oregon Scientific PCR800	Vaschetta basculante	87 mm	107 mm	0 - 999 mm/h	1 mm/h	1 mm/h	1 min			

Tabella 1: Principali caratteristiche dei dispositivi.

### 1.2.1. TENSIOMETRI

La misura della suzione è effettuata mediante una serie di tensiometri del tipo small-tip (modello 2100F – Soilmoisture Equipment Corp.).

Il corpo è formato da un tubo rigido di plastica trasparente sul quale sono alloggiati una capsula per lo spurgo del circuito dall'aria e un trasduttore ad acquisizione automatica. La punta porosa in ceramica, lunga 2.5 cm ed avente diametro di 6 mm, con valore di ingresso dell'aria nominale di 100 kPa, è collegata al corpo tensiometrico mediante un tubo capillare protetto da un tubo esterno di nylon della lunghezza di 2 m. (Figura 9). I tensiometri sono installati nel terreno e il loro funzionamento si basa sull'interazione di equilibrio tra la capsula ceramica porosa riempita di acqua e il terreno circostante. Quando il terreno che circonda il bulbo è saturo il suo potenziale matriciale è nullo ed il trasduttore segna un valore pari a zero; più il terreno si prosciuga, tanto più il potenziale matriciale diviene elevato e l'acqua contenuta nello strumento è richiamata verso l'esterno attraverso le pareti del bulbo poroso: il trasduttore indica allora valori progressivamente crescenti di depressione. Questi tensiometri non sono in grado di misurare potenziali matriciali maggiori di 1 bar, il range di misurazione della suzione infatti, varia tra 0 e 100 cb. Il modello di tensiometri utilizzati semplifica notevolmente sia le operazioni di installazione che di saturazione, quest'ultima indispensabile per un corretto funzionamento del sensore.

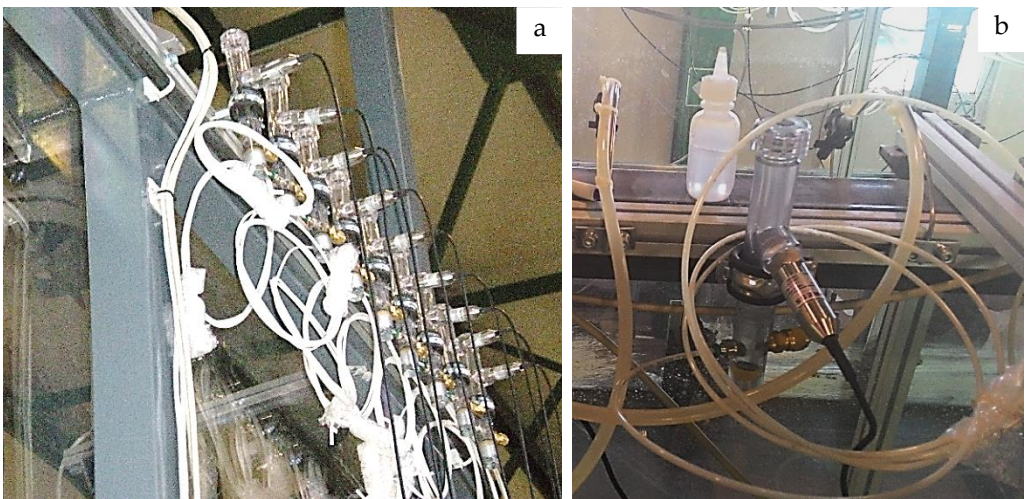
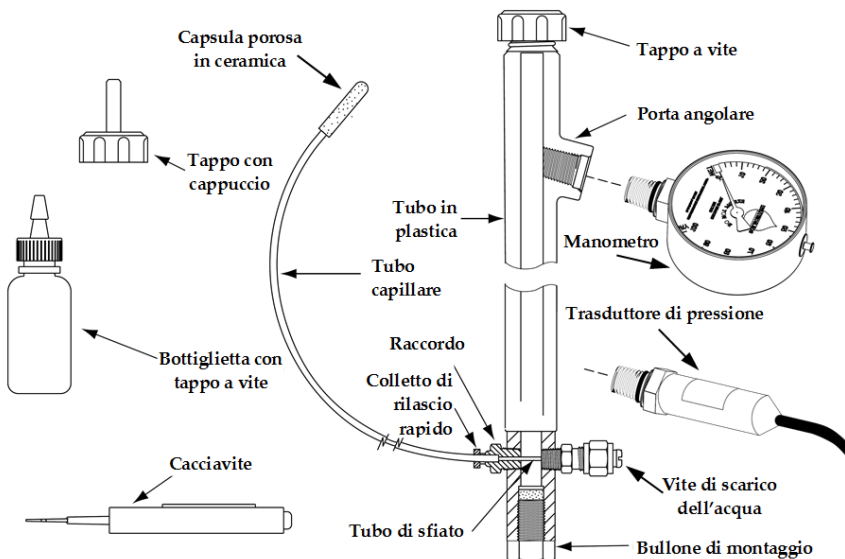


Figura 9: a) Tensiometri installati sulla struttura del canale. b) Particolare di un tensiometro.

È infatti sufficiente riempire il serbatoio, grazie all'uso di una semplice pompa manuale, e rimuovere tutta l'aria accumulata nello strumento procedendo sia dalla capsula di spurgo, sia adoperando una depressione in capo al corpo principale.

In suoli morbidi, come si incontrano facilmente su terreni di prova, i tensiometri vengono installati inserendo la capsula porosa alla profondità prefissata. È necessario che l'operazione venga fatta in modo che si arrechi il minimo disturbo al terreno. Dopo l'installazione, al fine di evitare che l'acqua di superficie scorra nel foro lungo le pareti del tubicino, sarà opportuno ripristinare il deposito riempiendo l'eventuale apertura prodotta dall'inserimento dello strumento. Dopo l'installazione, per poter leggere corretti valori di suzione, sarà necessario attendere che i tensiometri si stabilizzino, vale a dire che si raggiunga l'equilibrio tra la capsula porosa e il terreno circostante. Questo intervallo è dovuto al disturbo arrecato al suolo dalle procedure di installazione, ed è tanto più lungo, quanto più asciutto è il suolo. Passato questo periodo iniziale il tensiometro sarà in grado di leggere con molta accuratezza i valori di suzione e di seguirne le variazioni in tempo pressoché reale.



**Figura 10: Parti del tensiometro.**

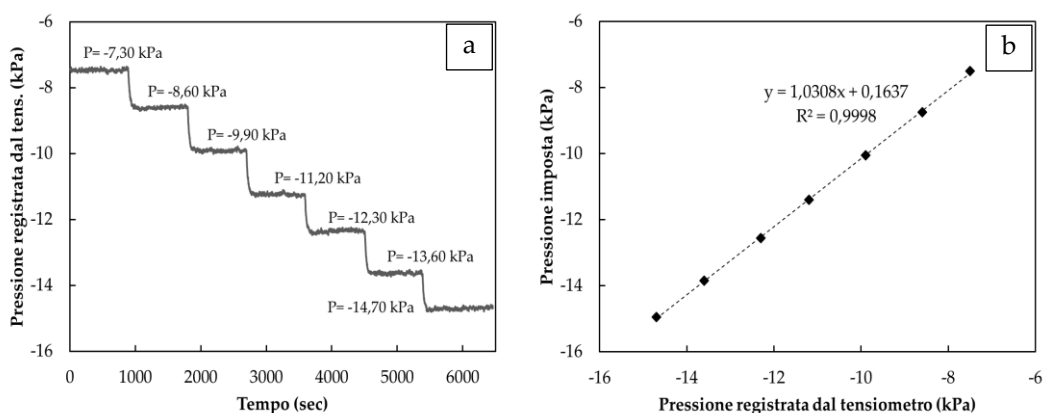
Sui tensiometri sono installati dei trasduttori di pressione collegati a delle centraline SDI che permettono di rendere il processo automatizzato e



archiviare i dati in un data logger. Per la valutazione delle grandezze di interesse è utilizzato un software dedicato, con il quale è possibile scegliere la frequenza di acquisizione. Per eliminare eventuali errori strumentali, ogni tensiometro va opportunamente calibrato. La calibrazione consiste nel confrontare i valori di pressione registrati dal sensore con i diversi valori di pressione applicati. Si inseriscono le capsule porose all'interno di un becher graduato pieno di acqua, posizionato ad una quota inferiore rispetto al trasduttore e si annota la pressione imposta, ossia la differenza di quota tra il pelo libero dell'acqua all'interno del becher e il sensore. Si acquisiscono i valori registrati dal tensiometro in diverse configurazioni, facendo variare di volta in volta la pressione applicata. In questo modo si hanno diversi valori di pressione applicata con i corrispondenti valori registrati ed è, quindi, possibile costruire una curva di regressione che associa valori registrati con valori reali di pressione.

Pressione imposta	
[cm]	[kPa]
-75	-7,5
-87,5	-8,75
-100,5	-10,05
-114	-11,4
-125,5	-12,55
-138,5	-13,85
-149,5	-14,95

**Tabella 2: Valori numerici delle pressioni applicate.**



**Figura 11: Esempio di calibrazione di un tensiometro: a) risposta, in termini di valori di pressione, registrata dallo strumento alle diverse pressioni imposte; b) curva di calibrazione del tensiometro utilizzato.**

Un esempio di calibrazione di un tensiometro installato sul canale artificiale è riportato in Figura 11 e in Tabella 2. In particolare, in Tabella 2 sono riportate le diverse pressioni applicate, nelle Figure 11 a/b rispettivamente i valori di pressione registrati dallo strumento e la curva di calibrazione ricavata con una funzione di regressione.

### **1.2.2. TRASDUTTORI DI PRESSIONE**

Un trasduttore di pressione misura la pressione di un liquido o di un gas, tramite un segnale elettrico inviato ad un ricevitore in formato analogico.

Per la misura delle pressioni neutre positive e per il monitoraggio delle eventuali sovrappressioni indotte dalla rottura del pendio nel corso delle prove vengono adoperati trasduttori di pressione neutra. Il principio si basa sulla deformazione fisica dell'estensimetro presente nella membrana del trasduttore: la resistenza elettrica è proporzionale alla pressione applicata, che viene tradotta in segnale elettrico. I trasduttori semplificano notevolmente la procedura di elaborazione e registrazione dei dati poiché il segnale elettrico proveniente dal trasduttore può essere digitalizzato ed inviato ad un computer. Questa caratteristica ha portato nel tempo alla adozione dei trasduttori al posto dei manometri convenzionali, anche nelle misure di pressioni stazionarie, specialmente quando si ha necessità di misurare numerose pressioni. Il modello di trasduttori installati (LM31-00000F-2 PSIG - TE Connectivity Measurement Specialties) è un sensore in acciaio inox con un raccordo isolante in PVC (Figura 12).

I trasduttori sono ubicati in appositi alloggiamenti sul fondo del canale e, prima della posa in opera del terreno, devono essere saturati. La membrana è protetta da una piastra porosa che impedisce l'inclusione di particelle di terreno. La pressione operativa per la serie in esame è di 13.79 kPa (2PSI) con quella massima di 137.9 (20PSI). La precisione è  $\pm 0.3\%$ , il range totale d'errore  $\pm 3\%$ , la temperatura di funzionamento è -20 / 70 °C. Anche i trasduttori di pressione devono essere calibrati. La procedura è abbastanza semplice e consiste nell'applicare al di sopra della cella di carico una colonna d'acqua di altezza nota e registrare il segnale in uscita dal sensore una volta che si sia stabilizzato. In questo modo si ha il valore di pressione imposta con il rispettivo valore di pressione misurato. Facendo variare l'altezza di colonna d'acqua, è possibile avere una serie di valori che interpolati con una regressione lineare, ci restituiscono la curva di calibrazione.

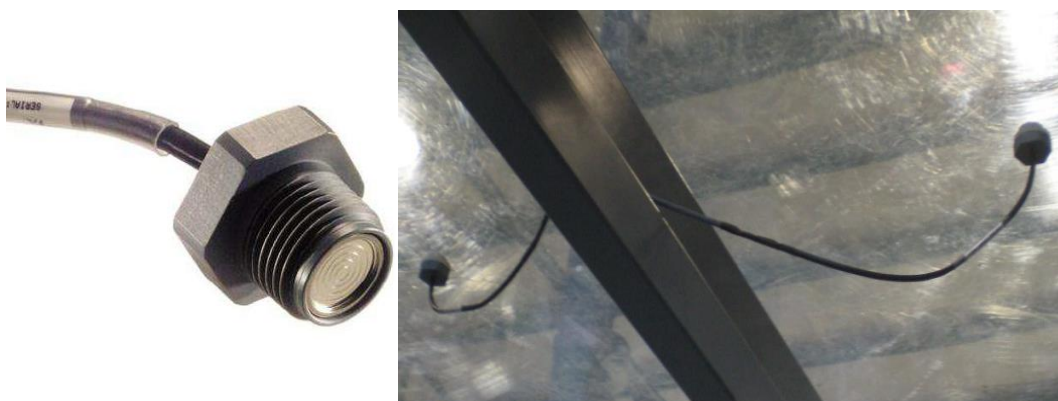


Figura 12: Trasduttori di pressione LM31-00000F-2 PSIG installati sul fondo del canale.

Pressione imposta	
[cm]	[kPa]
0	0
9	0,9
12	1,2
15	1,5
21	2,1

Tabella 3: Valori numerici delle pressioni applicate.

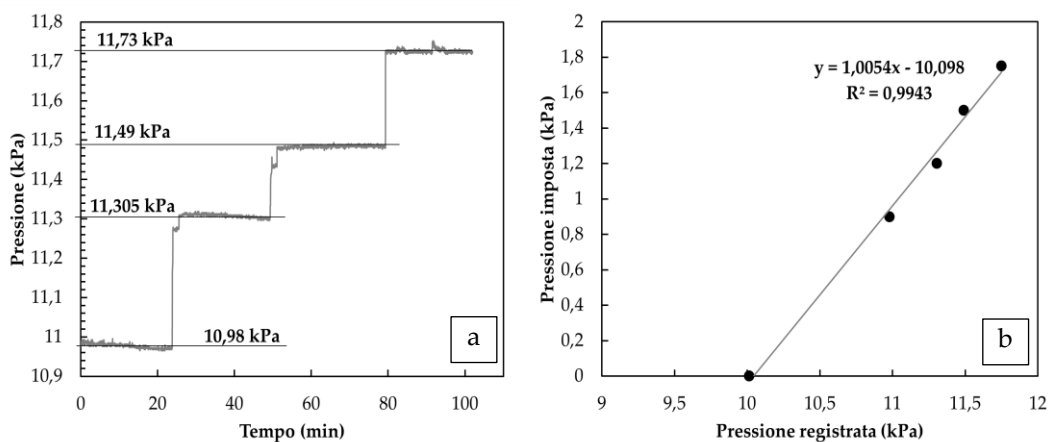


Figura 13: Esempio di calibrazione di un Trasduttore di pressione: a) risposta, in termini di valori di pressione, registrata dello strumento alle diverse pressioni imposte; b) curva di calibrazione del trasduttore utilizzato.

Un esempio di calibrazione di un trasduttore di pressione installato sul canale artificiale è riportato nella Figura 13 e in Tabella 3. In particolare, in Tabella 3 sono riportate le diverse pressioni applicate, nelle Figure 13 a/b rispettivamente i valori di pressione registrati dallo strumento e la curva di calibrazione ricavata con una regressione lineare.

### 1.2.3. TDR Device

La Riflettometria nel Dominio del Tempo (TDR) è una delle più usate tecniche di misura del contenuto d'acqua e della conducibilità elettrica del terreno sia per prove di laboratorio, sia per misure di campo (Dasberg & Dalton, 1985; Topp & Davis, 1985; German et al., 1997, Greco, 2006). Con il TDR si definisce il contenuto d'acqua volumetrico ( $\theta$ ) in maniera indiretta, in quanto le sonde non misurano esplicitamente la quantità d'acqua presente nel terreno, ma ne determinano la costante dielettrica relativa ( $\epsilon_r$ ). La tecnica si basa sulla misura del tempo che impiega un'onda elettromagnetica nel percorrere una sonda metallica immersa nel terreno. La velocità di propagazione dell'onda ( $V_p$ ) dipende dalla permittività dielettrica del terreno, che a sua volta dipende dalla quantità d'acqua presente nel campione. Il sistema di misura è illustrato in Figura 14 ed è composto da un datalogger collegato ad un sistema costituito da un generatore di impulsi a gradino e da un oscilloscopio che a sua volta è connesso ad un multiplexer, da cui possono collegarsi 8 sonde.

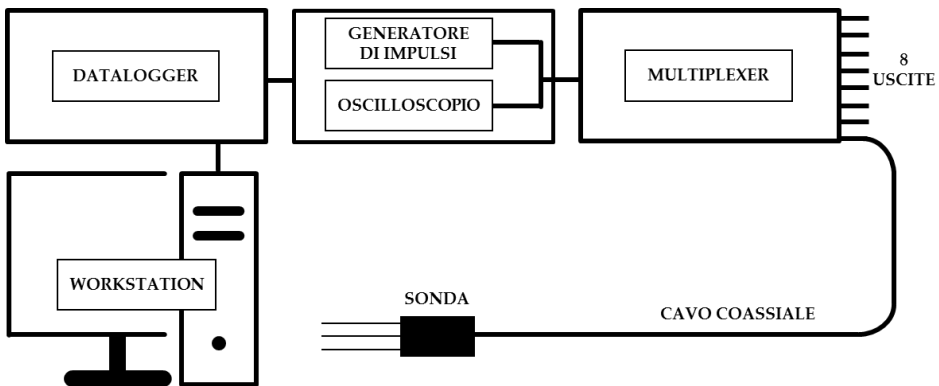
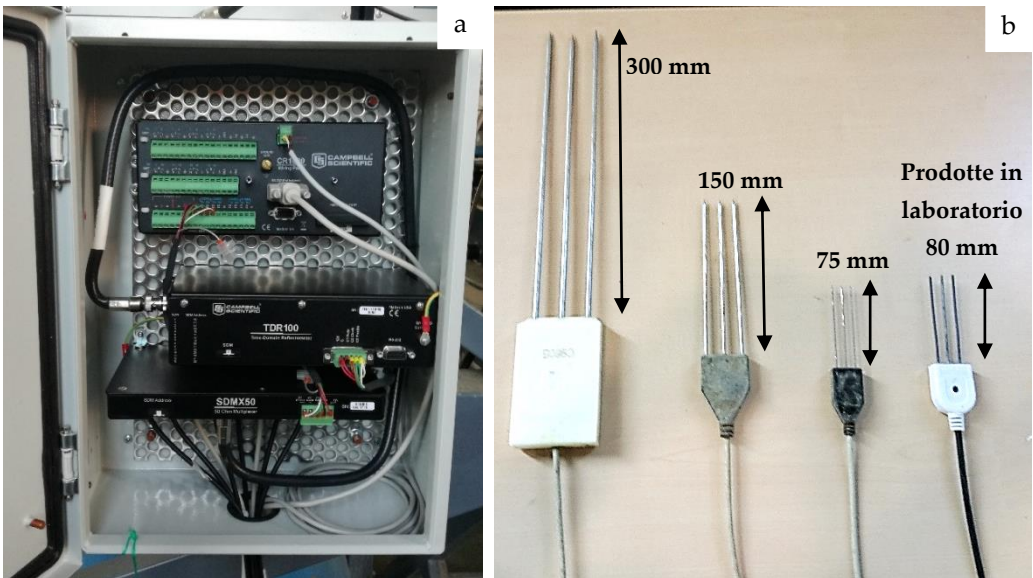


Figura 14: Apparecchiatura TDR.

La strumentazione presente sul canale consiste in un TDR100-Based System Campbell Scientific connessa a diverse tipologie di sonde di diversa dimensione. Inoltre sono state realizzate anche sonde TDR "home-made"

sulla stessa forma di quelle già installate, ma con dimensioni ridotte (Figura 15). La scelta di sonde di dimensioni più contenute permette di ottenere migliori misurazioni puntuali del contenuto d'acqua e arrecare un minimo disturbo al terreno. Tutte le tipologie di sonde sono realizzate con 3 barre metalliche, considerato il numero ottimale, visto che adottando più barre la qualità dei risultati migliora in maniera poco rilevante (Zegelin et al., 1992).

La disposizione delle sonde può avvenire sia in orizzontale che in verticale e la scelta viene fatta a seconda della stratigrafia del terreno in esame.



**Figura 15: a) Multiplexer e il riflettometro TDR100 controllato dal datalogger. b) Sonde TDR.**

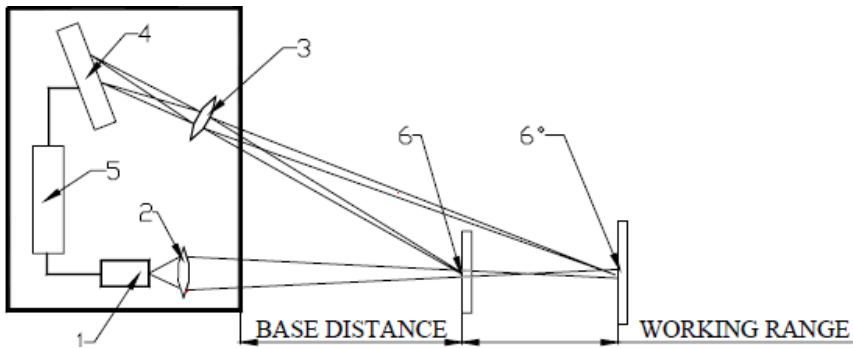
#### **1.2.4. TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO A TECNOLOGIA LASER**

Per monitorare gli spostamenti lungo il profilo ortogonale, il canale artificiale è stato dotato di sensori laser a triangolazione, modello LCL45/100 U-485 BI5M. Questo sistema di misura si basa su una semplice relazione geometrica. Un diodo laser emette un raggio che colpisce il target di misura, il raggio di luce riflessa viene trasmesso attraverso una lente ad una matrice o un vettore (sensore digitale) o ad un dato puntuale (sensore analogico).

L'intensità del fascio riflesso dipende dalla capacità riflessiva dell'oggetto da misurare. La distanza viene determinata con estrema precisione utilizzando

semplici calcoli trigonometrici con una risoluzione inferiore alle frazioni di micrometro. Schematicamente (Figura 16):

- la radiazione di un semiconduttore laser (1) è focalizzata da un obiettivo (2) su un oggetto (6);
- la radiazione riflessa dall'oggetto viene raccolta da una lente (3), su un array CMOS lineare (4);
- un processore di segnale (5) calcola così la distanza dall'oggetto.



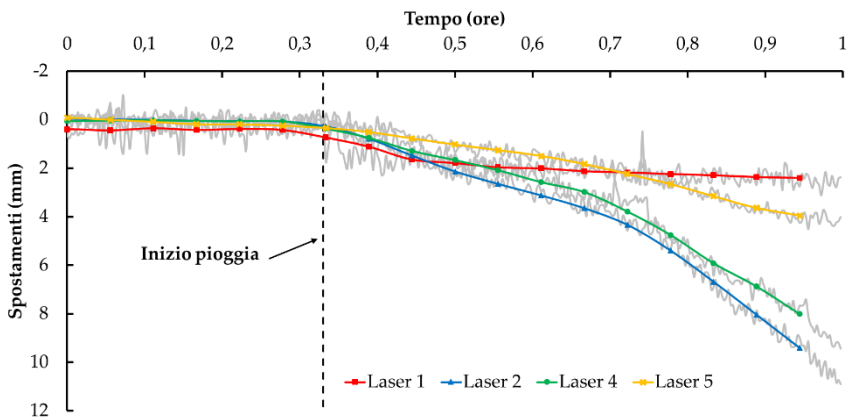
**Figura 16: Schema funzionamento sistema laser.**

I sensori laser puntuali sono spesso utilizzati per il loro semplice funzionamento e per la facilità di allineamento con il target grazie allo spot laser visibile. A seconda della versione, il principio ottico consente misure a distanze maggiori di 1 m, mantenendo tuttavia un buon campo di precisione. In base all'accuratezza richiesta, sono disponibili versioni con campi di misura molto piccoli e precisi e campi di misura via via crescenti, garantendo comunque prestazioni elevate.



**Figura 17: Sensore laser installato (modello LCL45/100 U-485 BI5M).**

Per il modello installato (Figura 17) si hanno ottimi risultati in termini di precisione e risoluzione anche nelle misurazioni veloci, dovuto al numero di sensori installati ( $n = 6$ ) e alla loro buona disposizione nel canale. Infatti la base di misura è di 45 mm con un range di lavoro di 100 mm e un errore di risoluzione di 0.03%, come indicato nella scheda tecnica che accompagna lo strumento. È da considerare, tuttavia, che nelle applicazioni si è osservato che la presenza delle particelle d'acqua e la rugosità dovuta al terreno producono un rumore che genera valori compresi nel range del decimo di millimetro e, pertanto poco significativi. In Figura 18 vengono mostrati i valori misurati dai laser durante una simulazione di pioggia.



**Figura 18: Andamento spostamenti rilevati dai Laser installati sul canale artificiale.**

Dopo l'inizio della pioggia, i laser registrano valori di spostamento crescenti che corrispondono ad un abbassamento del piano campagna. In particolare dal grafico si evince che gli abbassamenti raggiungono l'ordine del centimetro (laser 2).

### **1.2.5. SISTEMA DI ACQUISIZIONE IMMAGINI E TECNICA PIV**

Oltre al monitoraggio degli spostamenti ortogonali alla superficie del deposito, è possibile conoscere anche la variazione longitudinali o in pianta, grazie ad un sistema di acquisizione immagini con relativo sistema PIV (Particle Image Velocimetry) dedicato. Per l'acquisizione delle immagini vengono adoperate videocamere (model ICX445 – Basler) ad elevata risoluzione (1296 x 966), posizionate n. 2 zona di innesco, n. 2 nella zona di propagazione e n. 2 lateralmente al canale, grazie a supporti metallici

sporgenti. Le videocamere sono dotate di due obiettivi (C-Mount High Res - 1/2" - 4 mm - F/1.4 w/lock e Mega-Pixel Lens Fixed FL 8 mm - 2/3" - f/1.1 - f/16) e un cavo digitale di 10 metri.

Il sistema PIV dedicato permette una valutazione ottica del campo di moto del deposito durante le varie fasi della sperimentazione. Fornisce, in una determinata sezione, la proiezione del campo di velocità istantanea dei sedimenti.

Dal confronto di due immagini successive si valuta la velocità dalla relazione spazio (pixel che intercorrono tra la posizione della stessa particella tra due fotogrammi successivi) - tempo (tempo di acquisizione dei due fotogrammi). Il laser emette due impulsi, distanziati da un intervallo  $\Delta t$ , che illuminano le particelle e le rendono visibili alla camera. Essa, a mezzo di un sincronizzatore, scatta due foto in corrispondenza del segnale emesso dal laser. Le due immagini sono sottoposte a processi di correlazione dove si mettono a confronto per ogni area (griglia di misura 32x32 o 64x64 pixel) il movimento delle particelle in essa. L'elevata densità delle particelle garantisce che siano soddisfatti i processi di correlazione. Tali processi, infatti, restituiscono valori di media spaziale di velocità all'interno della griglia di misura.

$$\bar{U} = \frac{\Delta x}{\Delta t}; \quad V = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (1)$$

Il software di acquisizione della PIV provvede al processamento delle immagini catturate, correlando e validando il campo di moto. Per ottenere grandezze compatibili con il fenomeno reale, risulta determinante la scelta della frequenza di acquisizione dei fotogrammi. Infatti, l'intervallo tra due scatti deve garantire la ripresa delle particelle nelle due immagini consecutive. Inoltre, anche nel caso di flusso bidimensionale, se l'intervallo è troppo lungo, si ha una perdita di informazioni tra le due immagini e la velocità che si ottiene non è più assimilabile alla velocità istantanea, ma è invece una velocità media. Invece se l'intervallo è eccessivamente breve lo spostamento è troppo piccolo e i disturbi dovuti al "rumore" e alla non perfetta correlazione tra le coppie di finestre diventano dominanti rispetto allo spostamento reale stesso: come effetto, si ha un campo di velocità che non corrisponde a quello reale. Il valore del  $\Delta t$  dovrà oscillare nell'ordine di  $\sim 10 \mu s$ . Attraverso l'acquisizione di immagini ad alte risoluzioni, si possono riconoscere le singole particelle di terreno e individuare lo sviluppo dei processi generati durante la simulazione. I file output che fornisce il software PIVview2C sono ottenibili a



seconda del formato richiesto e delle grandezze desiderate. Essenzialmente si ottengono schermate con i valori di velocità e di spostamento con i relativi file di testo.

Di seguito, si riportano due immagini relative a istanti successivi di una prova con i risultati della simulazione mediante software PIVview2C. Dapprima vengono mostrate le immagini relative al campo di velocità e successivamente delle immagini a saturazione che presentano gli andamenti degli spostamenti.

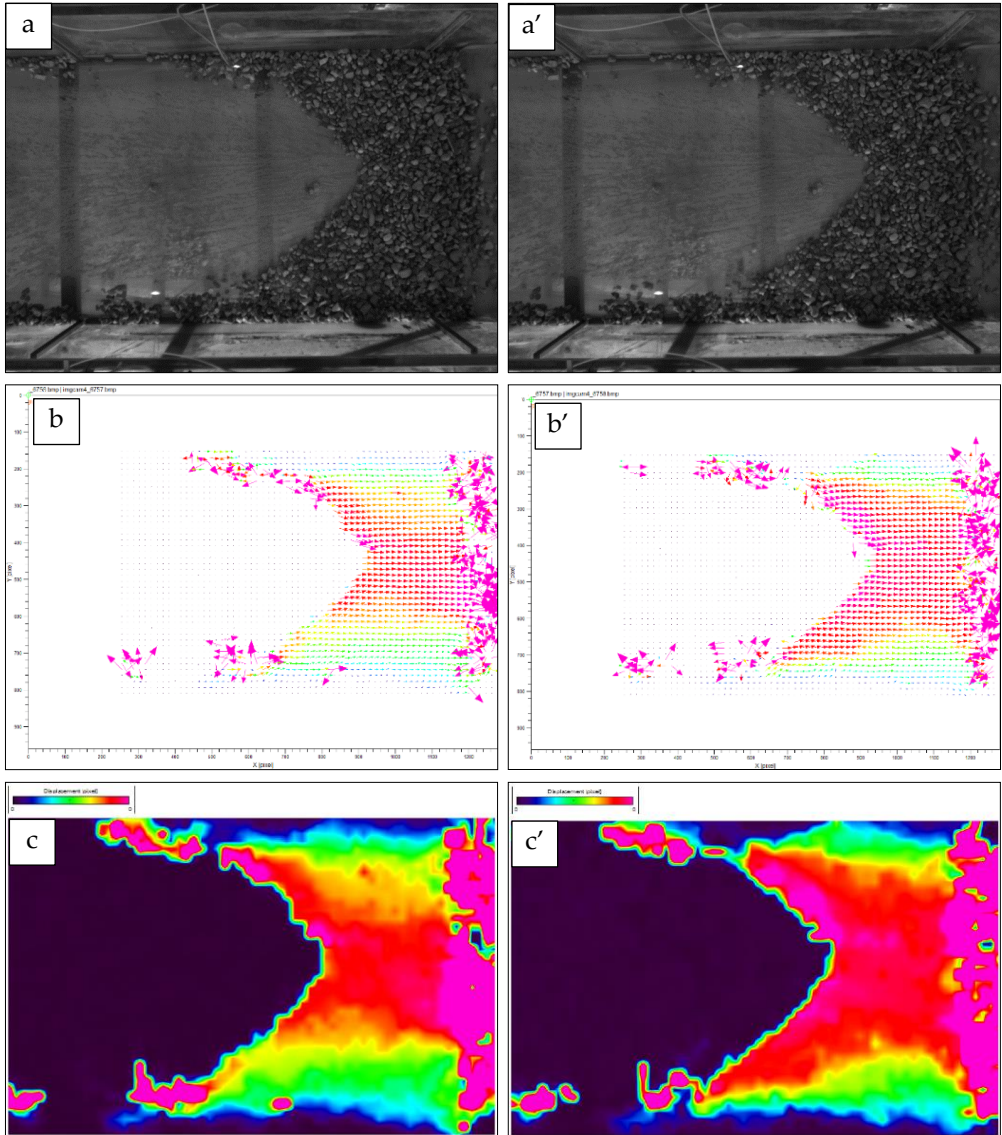


Figura 19: a) a') Istanti successivi di una prova. b) b') Campo di velocità. c) c') Campo di spostamento.

### 1.2.6. SISTEMA PIOGGIA

Il sistema integra un simulatore di pioggia con 24 ugelli, un serbatoio principale da 1000 litri e quattro serbatoi ausiliari da 200 litri ciascuno (Figura 20). L'impianto di pioggia dispone di quattro sensori di pressione e tre pluviometri. L'afflusso è attivato per mezzo di quattro valvole proporzionali (regolazione flusso) e di quattro valvole on/off (*duty cycle*). La separazione in quattro circuiti è stata introdotta per compensare le variazioni di pressione dovuta alla diversa quota degli ugelli in conseguenza dell'assetto della canalina d'innesci. Specialmente a basse pressioni, le differenze dovute alla quota incidono in modo importante sulla uniformità dell'erogazione e perciò la suddivisione in quattro circuiti garantisce una maggiore omogeneità. I flussi sono monitorati da sensori di pressione e la regolazione della portata è basata sul controllo della pressione proveniente da un compressore e un serbatoio esterno al sistema. La regolazione avviene attraverso valvole proporzionali direttamente sui quattro serbatoi ausiliari. Le valvole on/off sono posizionate sui distributori e consentono una repentina attivazione e spegnimento dell'erogazione per regolare il *duty cycle* e interrompere l'erogazione. Gli ugelli possono essere di due tipi, contraddistinti come color Viola e color Arancio, con flussi differenti in rapporto alle diverse pressioni.

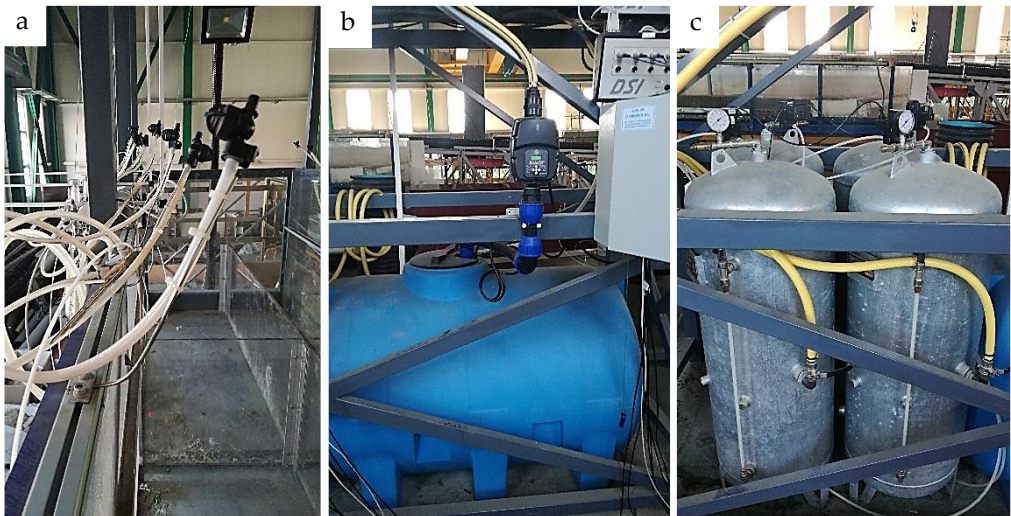
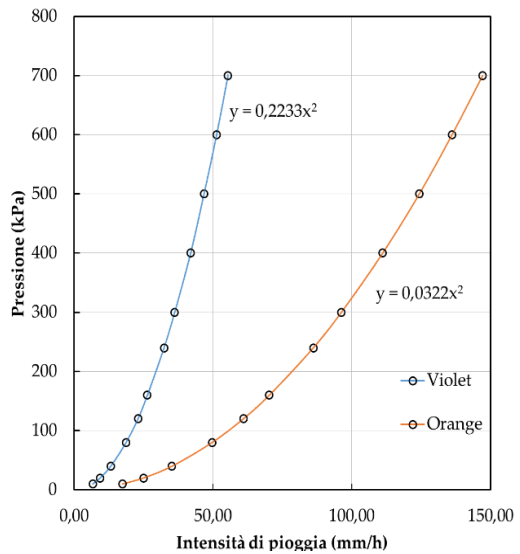


Figura 20: Sistema pioggia: a) ugelli nebulizzatori; b) serbatoio principale; c) serbatoi ausiliari con regolazione di pressione.

Ugelli	Violet		Orange	
	l/h	mm/h	l/h	mm/h
Pres. (kPa)				
10	19,90	6,72	52,75	17,52
20	28,13	9,36	74,59	24,96
40	39,77	13,20	105,50	35,28
80	56,23	18,72	149,18	49,68
120	68,88	23,04	182,71	60,96
160	79,54	26,40	210,98	70,32
240	97,42	32,40	258,41	86,16
300	108,91	36,24	288,91	96,24
400	125,76	42,00	333,60	111,12
500	140,59	46,80	372,98	124,32
600	154,03	51,36	408,58	136,08

**Tabella 4: Relazione tra intensità di pioggia e pressione.**



**Figura 21: Relazione tra intensità di pioggia e pressione.**

La relazione fra flusso e pressione è diagrammata in Figura 21 ed esplicitata numericamente in Tabella 4, dove il flusso d'acqua da un singolo ugello (tipo viola o arancio) è espresso sia in l/h, sia in equivalenti mm/h sulla superficie dell'intero canale di monte, ossia 3 metri quadri.

Per regolare la portata in un range più ampio, è possibile il controllo in *duty cycle* (attivazione parzializzata nel tempo) e/o la totale chiusura di alcuni ugelli attraverso rubinetti localizzati presso i diversi distributori. Per la regolazione dell'erogazione, quattro gruppi di sei ugelli ciascuno sono collegati a un collettore corredato di sensore di pressione, in tal modo è possibile regolare la pressione di erogazione di sei ugelli in maniera indipendente in modo da ottimizzare i flussi a quattro diverse quote. Il PC di acquisizione e controllo monitora i quattro sensori di pressione e regola conseguentemente la pressione sui quattro serbatoi ausiliari dosando la portata dei gruppi di ugelli. La regolazione avviene attraverso valvole proporzionali direttamente sui quattro serbatoi. L'intensità di pioggia utilizzata varia a seconda della sperimentazione da sviluppare e in base allo ietogramma di riferimento.

### 1.2.7. PLUVIOMETRI

Per misurare l'andamento della pioggia si utilizzano dei pluviometri. Il sistema ad oggi dispone n. 5 pluviometri (modello PCR800 – Oregon Scientific) a vaschetta basculante collegati ad una centralina di acquisizione, che permette la registrazione e il salvataggio automatico dei dati.

Il pluviometro è composto da un cono di raccolta e da una bilancia a doppia vaschetta collegata a un magnete che attiva un relé che a sua volta genera un impulso registrato da un contatore. Ogni bilancia equivale a 1.3 mm di pioggia.

Questi strumenti, quando necessario, possono essere facilmente adoperati per la misura dei deflussi che si generano all'interno del sistema. Infatti, se collocati a valle del sistema delle canaline di raccolta, attraverso l'uso di tubi predisposti a convogliare l'acqua in uscita dagli strati, restituiscono i deflussi superficiali e sub-superficiali. La Figura 22 mostra due pluviometri installati all'interno del canale artificiale, posizionati per misurare l'intensità di pioggia.



Figura 22: Pluviometri PRC 800 – Oregon scientific.



## 2. SET-UP DEGLI STRUMENTI



## 2.1. UTILIZZO E CALIBRAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE

Per una corretta interpretazione dei risultati occorre preventivamente, avviare e sviluppare opportune azioni di calibrazione. Questa sezione descrive le modalità di utilizzo della strumentazione installata sul modello fisico da laboratorio e le relative procedure per la loro calibrazione.

### 2.1.1. TENSIOMETRI

Il trasduttore, montato sul corpo tensiometrico, ha un campo di misura compreso tra  $-100+0$  kPa. I tensiometri vengono installati nel deposito ricostituito di terreno inserendo la capsula porosa alla profondità prefissata. Prima della loro installazione gli strumenti devono essere mantenuti, in modo da assicurarsi che il corpo tensiometrico sia saturo, e che lo strumento non riporti danni.

Bisogna prestare attenzione a non danneggiare il trasduttore e le punte ceramiche durante la fase di disimballaggio e preparazione. In particolare, le punte ceramiche non debbono essere messe in contatto con grassi o altre sostanze che potrebbero occluderne i pori. Dopo l'assemblaggio, che deve essere fatto in modo da garantire la tenuta stagna del dispositivo, si procede a riempire il corpo tensiometrico con acqua distillata e deareata, tenendo le punte ceramiche immerse nell'acqua (Figura 23 a).

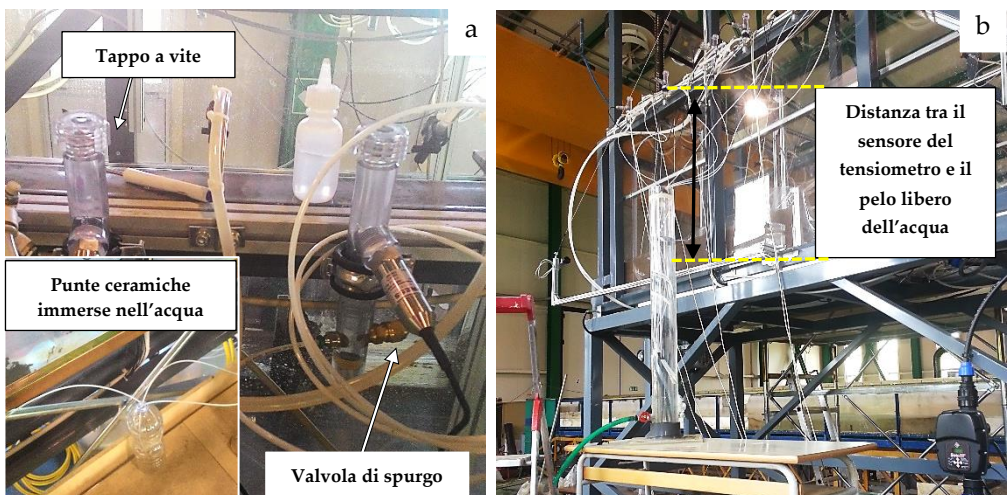


Figura 23: a) Fase di saturazione dei tensiometri. b) Fase di calibrazione.

Una volta riempito, si posiziona il beccuccio della bottiglietta in dotazione piena di acqua all'imbocco della valvola di spurgo, dopo averne rimosso la vite di chiusura e, serrando il beccuccio all'imbocco della valvola, si stringe la bottiglietta per applicare una pressione allo strumento, in modo da saturare il tubicino collegato e far fuoriuscire le bolle d'aria. Si richiude poi la valvola di spurgo e con la stessa bottiglietta si adopera una depressione in capo al corpo principale per rimuovere le eventuali altre bolle d'aria.

Le misure effettuate nel corso della prova devono essere depurate dall'eventuale differenza di quota esistente tra il dispositivo di misura (punta ceramica) e di lettura (trasduttore di pressione). Dopo ogni prova gli strumenti vengono nuovamente mantenuti e le piastre porose vengono tenute in acqua distillata e deaerata fino all'utilizzo successivo. Risulta opportuno sottolineare che, qualora nel corso di una fase di evaporazione o di equalizzazione della suzione in un terreno caratterizzato da un contenuto d'acqua molto basso si dovesse verificare la desaturazione di uno o più strumenti, occorre procedere al loro spurgo prima di proseguire con le operazioni di prova. In tal caso, essendo la capsula porosa a contatto con il terreno si provvede alla disinstallazione dello strumento, alla sua manutenzione ed alla successiva reinstallazione, oppure si effettua la sola operazione di riempimento d'acqua del corpo tensiometrico e pompaggio dell'acqua verso la capsula a circuito idraulico aperto. Ciò non assicura la completa eliminazione delle bolle d'aria e, pertanto, la successiva misurazione potrebbe essere affetta da errore. In tal caso, occorre a fine prova, e se non sono intervenuti ulteriori problematiche, ricalibrare lo strumento nella nuova condizione.

#### ***2.1.1.1. CALIBRAZIONE DEI TENSIOMETRI***

Gli strumenti vengono tarati tenendo le punte immerse in acqua e posizionando il corpo del tensiometro ed il dispositivo di lettura ad un'altezza nota al di sopra della punta in modo da creare una depressione pari all'altezza della colonna d'acqua in testa alla punta.

Facendo variare la distanza tra punto di misura (piastra porosa) e dispositivo di misura (trasduttore di pressione), si inducono differenti valori di suzione (Figura 23 b) che vengono registrati ad intervalli di tempo di 1 secondo. La correlazione tra valori registrati e suzione imposta fornisce, per ciascuno strumento, lo zero e la costante di taratura.



Nelle Figure 24 e 25 si riportano a sinistra le registrazioni effettuate dai tensiometri nel corso della procedura di taratura, a destra i risultati delle tarature effettuate con le relative regressioni. Nei grafici a sinistra, ad ogni tratto orizzontale corrisponde la misura relativa a ciascun carico imposto (Tabella 5), mentre i tratti sub-verticali indicano le fasi nelle quali viene variata la suzione, da cui è possibile dedurre il tempo di risposta degli strumenti se tale variazione di carico è applicata in maniera pressoché istantanea. Nelle condizioni ambientali in cui si è effettuata la taratura ( $t = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) la precisione di ogni tensiometro è dell'ordine di 0.1 kPa.

Carico imposto		Tensiometri posti sul lato destro del canale					
(cm)	(kPa)	Tens. 1 (kPa)	Tens. 2 (kPa)	Tens. 3 (kPa)	Tens. 4 (kPa)	Tens. 9 (kPa)	Tens. 10 (kPa)
-75,5	-7,55	-9,45	-7,65	-7,5	-7,65	-7,2	-6,7
-88,5	-8,85	-10,7	-8,9	-8,7	-8,9	-8,5	-7,9
-100	-10	-11,8	-9,95	-9,8	-10	-9,65	-9
-111,5	-11,15	-12,9	-11,1	-10,9	-11,1	-10,7	-10
-124	-12,4	-14,1	-12,3	-12,1	-12,35	-11,9	-11,3
-138	-13,8	-15,45	-13,7	-13,4	-13,6	-13,4	-12,5
-149,5	-14,95	-16,55	-14,8	-14,5	-14,95	-14,4	-13,6

Carico imposto		Tensiometri posti sul lato sinistro del canale					
cm	kPa	Tens. 5 [kPa]	Tens. 6 [kPa]	Tens. 7 [kPa]	Tens. 8 [kPa]	Tens. 11 [kPa]	Tens. 12 [kPa]
-75	-7,5	-7,7	-7,1	-7,5	-8,35	-7,3	-7,8
-87,5	-8,75	-8,8	-8,3	-8,6	-9,5	-8,4	-8,9
-100,5	-10,05	-10,1	-9,65	-9,9	-10,8	-9,75	-10,2
-114	-11,4	-11,5	-11	-11,2	-12,1	-11,05	-11,5
-125,5	-12,55	-12,6	-12,1	-12,3	-13,2	-12,1	-12,7
-138,5	-13,85	-13,85	-13,3	-13,6	-14,5	-13,4	-13,9
-149,5	-14,95	-15	-14,4	-14,7	-15,6	-14,5	-15

**Tabella 5: Corrispondenza tra i carichi imposti e i carichi registrati dai tensiometri durante la fase di taratura.**

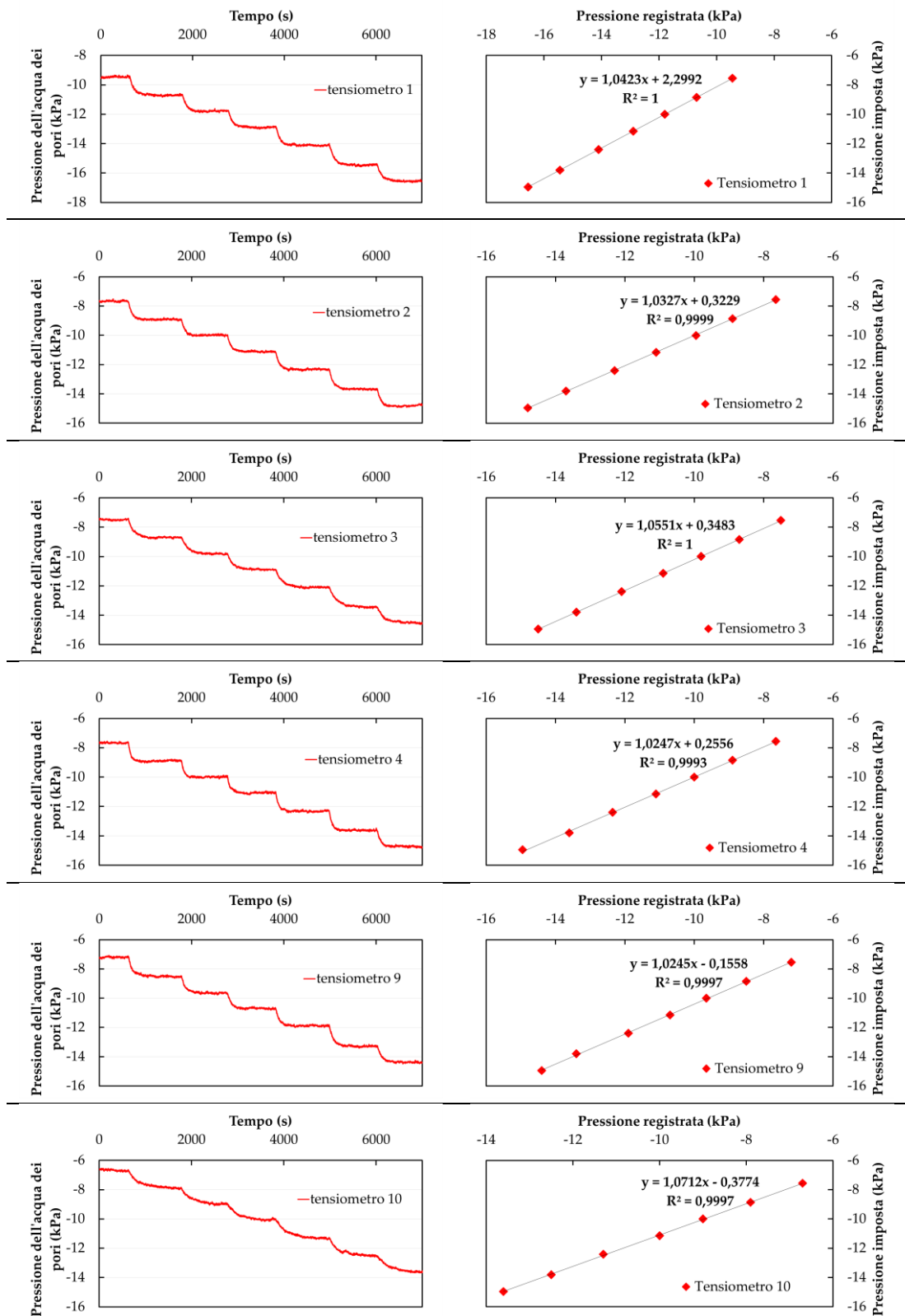


Figura 24: Grafici di sinistra - Valori registrati dai Tensiometri nel corso della procedura di taratura.  
 Grafici di destra - Regressione tra valori di suzione imposti e valori registrati.

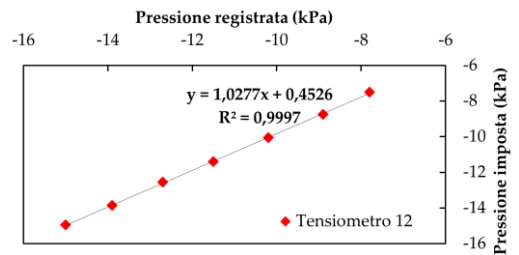
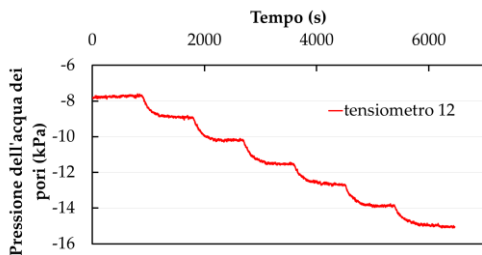
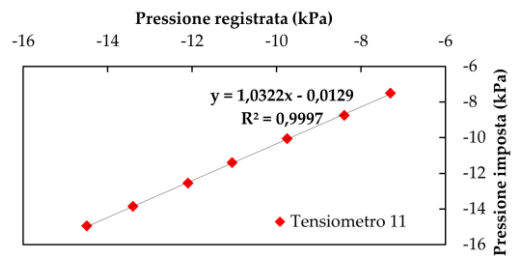
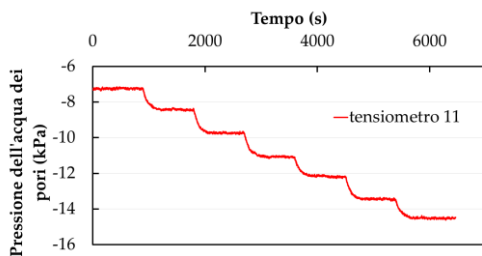
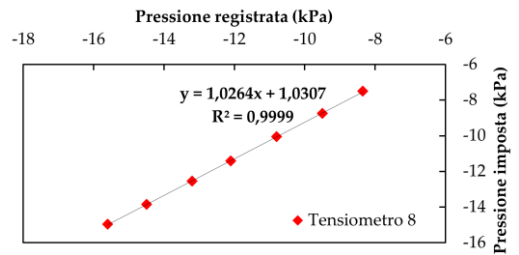
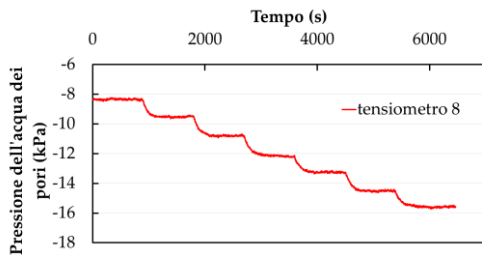
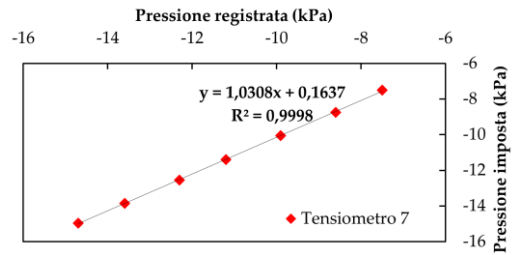
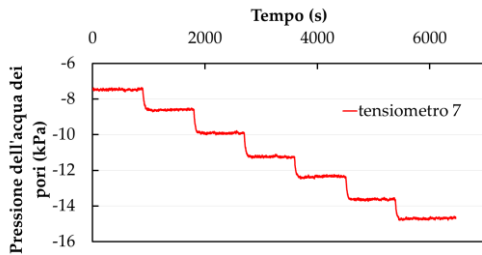
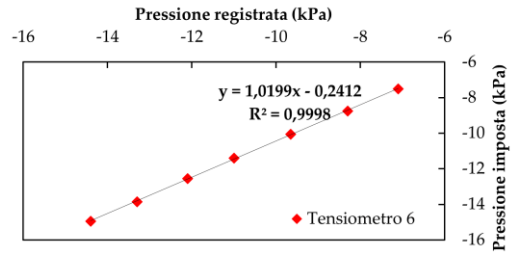
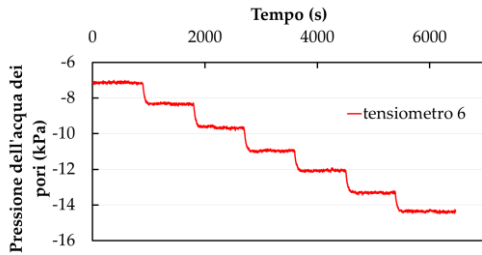
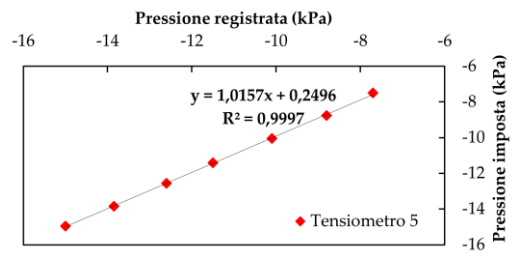
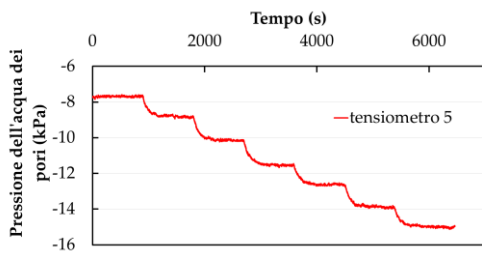


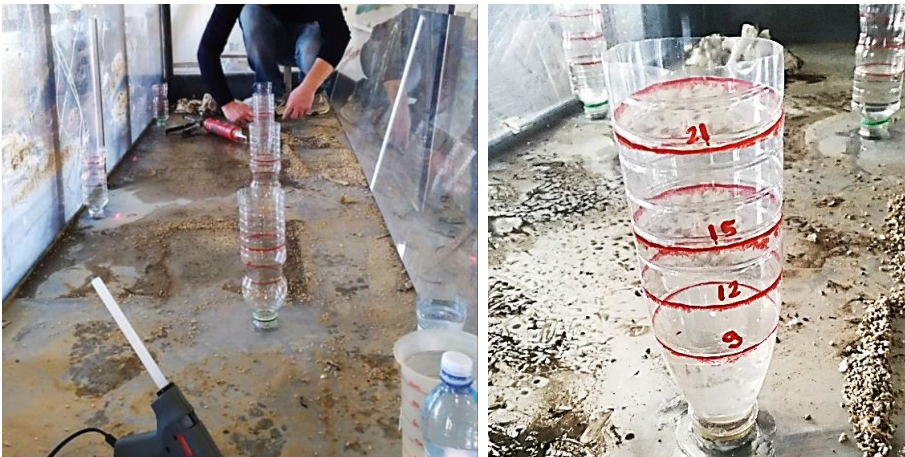
Figura 25: Grafici di sinistra - Valori registrati dai Tensiometri nel corso della procedura di taratura. Grafici di destra - Regressione tra valori di suzione imposti e valori registrati.

### **2.1.2. TRASDUTTORI DI PRESSIONE**

I trasduttori di pressione neutra installati sul fondo del canale artificiale sono caratterizzati da un fondo scala ridotto ed una sensibilità elevata in maniera da essere in grado di leggere pressioni neutre dell'ordine del millimetro in colonna d'acqua e con tempi di risposta ridotta. I trasduttori sono ubicati in appositi alloggiamenti sul fondo del canale: bisogna accertarsi che il foro di alloggiamento dei trasduttori sia a tenuta stagna, per evitare che l'eventuale carico idraulico si dissipi. Si verifica quindi che non si formino gocce d'acqua al di sotto dei trasduttori e, nel caso contrario, si richiudono le eventuali fessure operando con gomma siliconica. Poiché i dispositivi, appena alimentati, possono risentire degli effetti termici legati al riscaldamento dei circuiti, è opportuno che i trasduttori vengono posti in carico ed alimentati alcune ore prima del loro utilizzo.

#### **2.1.2.1. CALIBRAZIONE DEI TRASDUTTORI**

Gli strumenti vengono tarati applicando al di sopra della cella di carico una colonna d'acqua di altezza nota e registrando il segnale in uscita dal sensore una volta che si sia stabilizzato. Variando successivamente diverse volte l'altezza della colonna d'acqua e ripetendo le misurazioni si individua la relazione di calibrazione. Analogamente a quanto descritto per i tensiometri, anche in questo caso la procedura di calibrazione consente di verificare la precisione dello strumento ed il suo tempo di risposta. La Figura 26 mostra il modo in cui è stata applicata la pressione agli strumenti.



**Figura 26: Contenitori posti sui trasduttori di pressione per la taratura.**

Sono stati predisposti contenitori con altezze contrassegnate sopra le celle di carico, fissandole con colla a caldo e silicone per assicurarne la tenuta stagna. Sono state poi registrate le misure di volta in volta, riempiendo i contenitori ai diversi livelli indicati. È stata prestata attenzione durante la fase di immersione del sensore affinché non restasse intrappolata aria all'interno della camera di misura. Si è ritenuto opportuno che il sistema, prima della procedura di calibrazione, fosse lasciato in carico per alcuni giorni, in ambiente a temperatura e umidità controllata, per evitare derive degli strumenti e far disciogliere in acqua l'aria rimasta eventualmente intrappolata nella camera di misura. I grafici di Figura 27 sono relativi alla fase di carico durata circa 5 giorni.

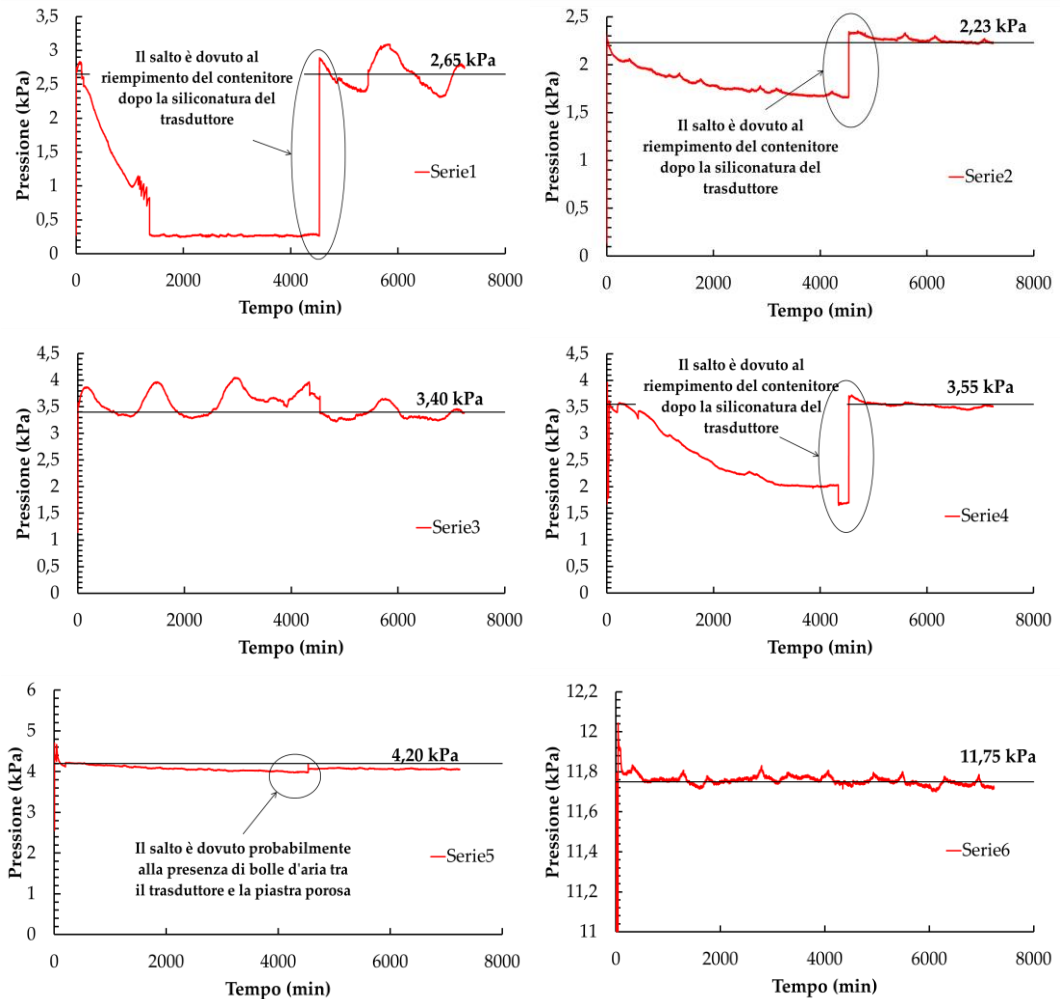


Figura 27: Fase di carico dei trasduttori di pressione.

Come si evince dai grafici, in fase di taratura i trasduttori 1-2-4 non erano installati a tenuta stagna. L'acqua gocciolava dal fondo dei trasduttori e il livello idrico all'interno dei contenitori si è abbassato. Dopo tre giorni, si è proceduto a siliconare il fondo dei trasduttori e si è ripristinato il livello idrico all'interno dei contenitori. Come si nota dai grafici, quest'intervento ha impedito che continuasse la fuoriuscita del liquido.

Una volta certi della tenuta del sistema, si è proceduto ad imporre sui sensori delle altezze di colonna d'acqua e registrare i relativi valori. Nella Figura 28 sono riportati i valori registrati durante la fase di taratura.

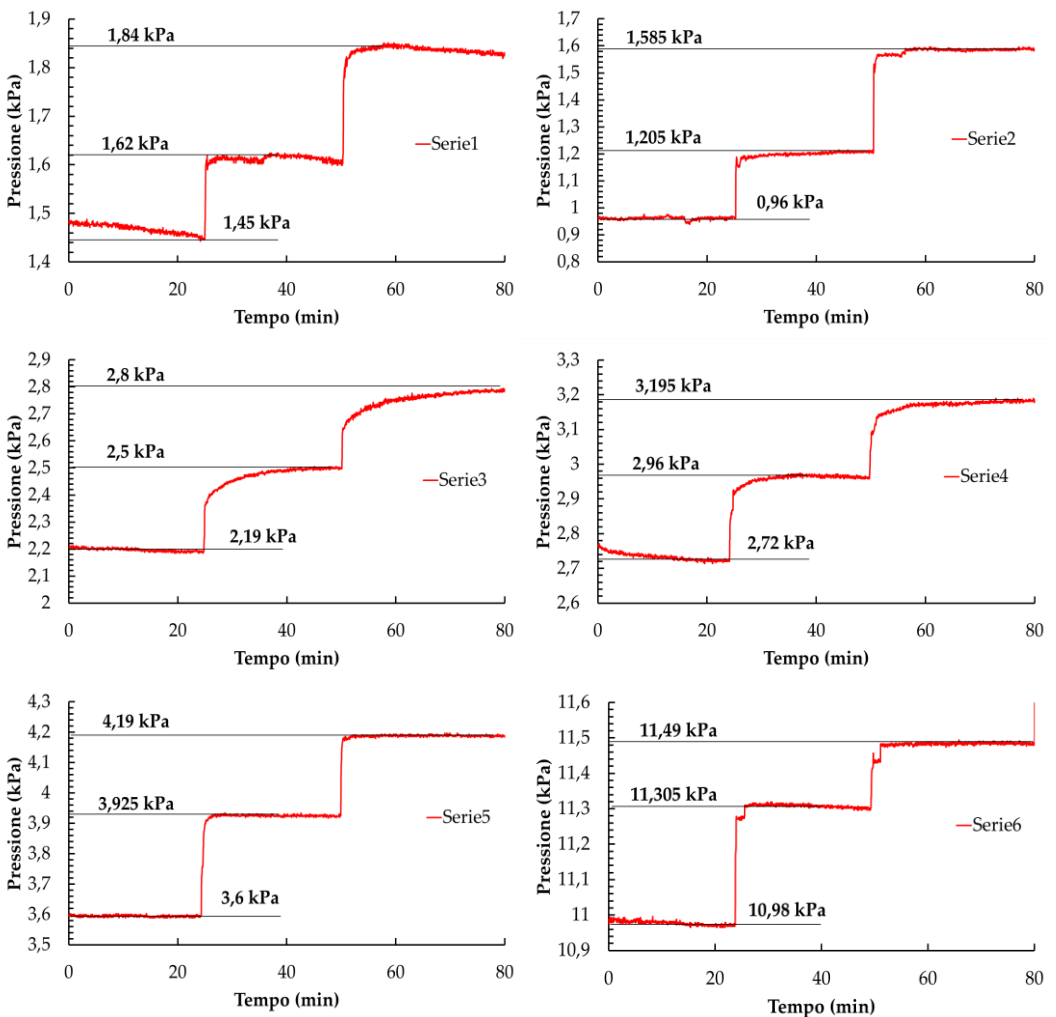


Figura 28: Valori registrati durante la fase di taratura

Dai grafici si nota che tutti i trasduttori hanno una risposta quasi immediata all'aumento di carico ad eccezione del trasduttore 3 che impiega più tempo a stabilizzarsi. Utilizzando tutte le coppie di valori, imposti e registrati, sono state costruite le curve di calibrazione (Figura 29).

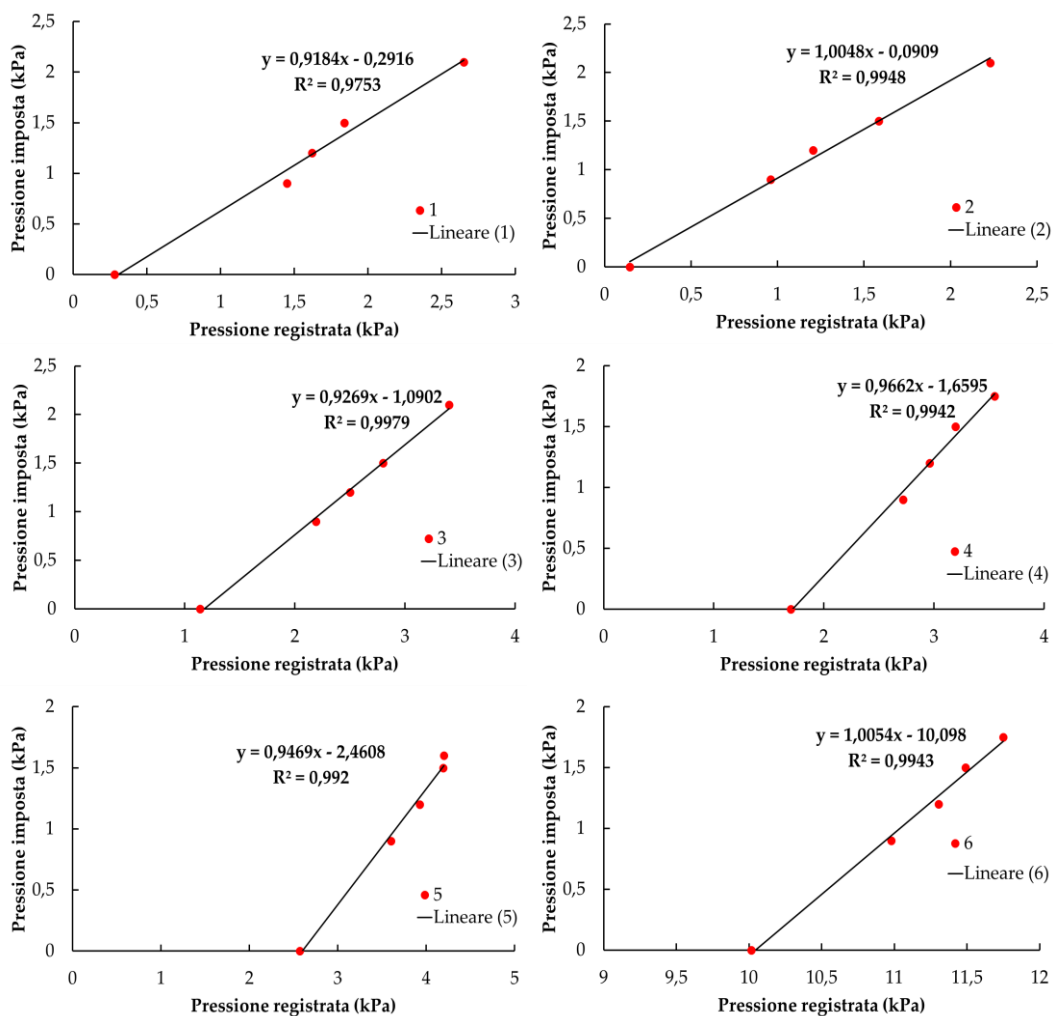


Figura 29: Curve di calibrazione dei trasduttori di pressione

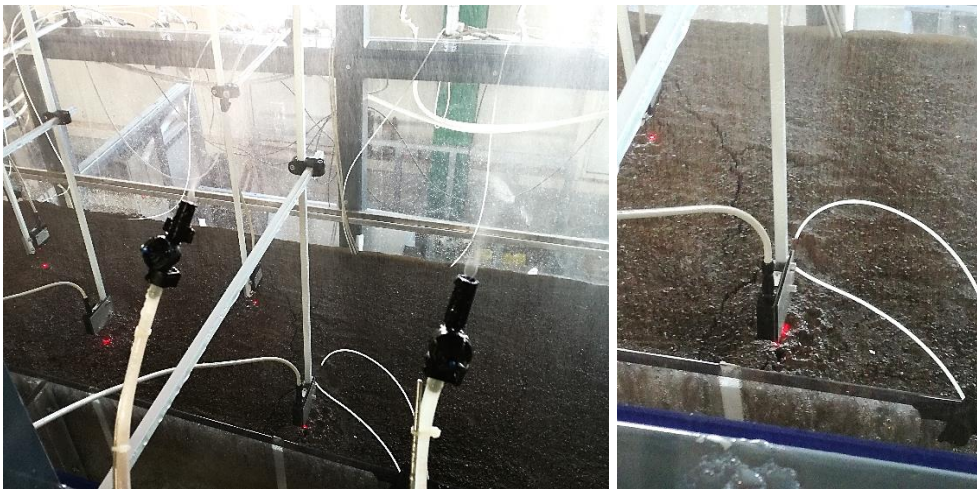
La Tabella 6 riporta i carichi imposti con i rispettivi dati registrati dai trasduttori.

Carico Imposto		Pressione Registrata dai trasduttori di pressione					
cm	kPa	Trasd. 1 [kPa]	Trasd. 2 [kPa]	Trasd. 3 [kPa]	Trasd. 4 [kPa]	Trasd. 5 [kPa]	Trasd. 6 [kPa]
0	0	0,28	0,145	1,14	1,7	2,57	10,015
9	0,9	1,45	0,96	2,19	2,72	3,6	10,98
12	1,2	1,62	1,205	2,5	2,96	3,925	11,305
15	1,5	1,84	1,585	2,8	3,195	4,19	11,49
16	1,6	-	-	-	-	4,2	-
17,5	1,75	-	-	-	3,55	-	11,75
21	2,1	2,65	2,23	3,4	-	-	-

**Tabella 6: Corrispondenza tra i carichi imposti e i carichi registrati dai trasduttori durante la fase di taratura.**

### 2.1.3. TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO

Gli spostamenti verticali della superficie del terreno sono misurati, come si è detto, mediante trasduttori di spostamento a tecnologia laser per misure senza contatto. I trasduttori utilizzati non necessitano di target metallici. Essi utilizzano il principio della triangolazione ottica mediante la proiezione di una luce modulata sull'obbiettivo prefissato e sono dotati di sensori (CCDarray) in grado di misurare l'intensità della luce diffusa riflessa e trasmessa al sensore da una lente ricevente inclinata rispetto all'asse ottico del laser. Il campo di temperatura operativo è compreso tra 0 e 55 °C.



**Figura 30: Disposizione dei sensori laser durante una fase di pioggia.**



Occorre assicurarsi che gli strumenti siano disposti con l'asse ottico ortogonale alla superficie da monitorare (Figura 30). Deviazioni dalla ortogonalità comprese tra 5° e 15° corrispondono ad errori nella valutazione della distanza di circa 0.5% del campo di misura, che si elevano all'1% per deviazioni comprese tra 15° e 30°.

La rugosità della superficie del deposito conduce, ovviamente, ad un rumore di fondo nella risposta dello strumento che comunque risulta tollerabile nelle correnti applicazioni, in quanto dell'ordine del decimo di millimetro. L'alimentazione dei sensori deve avere inizio circa 30 minuti prima dell'inizio della prova per ottenere una distribuzione di temperatura uniforme all'interno del sensore evitando errori di misura.

La costante di taratura dello strumento è fornita dal produttore.

#### 2.1.4. TDR

La strumentazione a supporto della tecnica della riflettometria nel dominio del tempo (Time Domain Reflectometry, TDR) è costituita da un generatore di impulsi a gradino, da un oscilloscopio e da sonde formate da aste metalliche (elettrodi) da inserire nel suolo, collegate a dei cavi coassiali.

Per determinare il contenuto d'acqua volumetrico, viene fatta propagare un'onda elettromagnetica a fronte ripido e se ne misura il tempo di propagazione ( $t$ ).

Noto il tempo che impiega l'onda a propagarsi nel terreno ( $t$ ) e la lunghezza della sonda TDR ( $L$ ), è possibile definire la velocità di propagazione:

$$V_p = \left(\frac{2L}{t}\right) \quad (2)$$

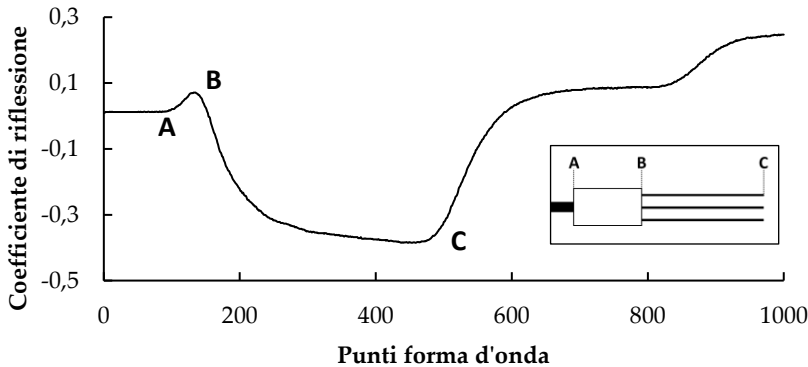
Calcolata la  $V_p$ , è possibile determinare la costante dielettrica relativa del terreno mediante l'equazione (3) ricavata dalla teoria delle linee di trasmissione (Kraus e Fleisch, 1999), dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{V_p}\right)^2 \quad (3)$$

Dunque la tecnica richiede una procedura per definire il tempo di propagazione del segnale generato o viceversa la sua velocità di propagazione.

### 2.1.4.1. VALUTAZIONE DELLA FORMA D'ONDA E CALCOLO DELL'OFFSET DELLE SONDE TDR

Per definire la velocità di propagazione del segnale, si analizza una generica linea di trasmissione registrata dall'oscilloscopio (Figura 31). Sulla traccia dell'onda si identificano tre punti: il punto A, relativo alla variazione di impedenza tra il cavo e il manico della sonda; il punto B, che identifica il passaggio dell'onda dal manico agli elettrodi; il punto C, che rappresenta la riflessione alla fine del circuito aperto.



**Figura 31: Tipica forma d'onda registrata con la tecnica TDR**

La lunghezza BC, proporzionale al tempo di transito del segnale nel suolo e alla costante dielettrica apparente, può essere convertito in distanza equivalente ( $L_a$ ) utilizzando una velocità relativa di propagazione ( $v$ ), impostata sull'apparecchiatura TDR. In pratica si utilizzano le seguenti relazioni:

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{c}{v}; v = \frac{2L}{t_{BC}} \quad (4)$$

da cui si ricava l'equazione (5), dove la lunghezza elettrica delle sonde registrata dal TDR  $L_a$  è pari a  $c \cdot t_{BC} / 2$ .

$$\epsilon_r = \left( \frac{L_a}{L} \right)^2 \quad (5)$$

Nell'analisi della traccia dell'onda si devono determinare dunque i confini delle riflessioni, punti B e C, il tempo di transito dell'impulso e la lunghezza

BC. La strumentazione utilizzata ne permette l'identificazione automatica, attraverso un metodo di differenziazione numerica. La traccia misurata viene smussata numericamente e viene calcolata la derivata prima. Per identificare il punto A, si traccia una retta tangente al punto di flesso, coincidente con il massimo della curva derivata, intersecata con una linea tangente alla curva nel tratto iniziale. Allo stesso modo, per determinare il punto C si traccia una retta tangente al secondo punto di flesso della seconda curva ascendente, punto di massimo relativo della curva derivata, intersecata con una retta tangente alla curva (Figure 32 e 33). L'ubicazione del punto B invece, è funzione del tipo di sonda utilizzata ed è generalmente identificato dal picco dopo la prima ripida risalita del segnale. Per definire in maniera rigorosa la posizione di questo punto, è possibile utilizzare l'approccio proposto da Heimovaara (1993). Il criterio consiste nell'eseguire due misure ponendo la sonda in acqua e aria e nell'identificare i punti di inizio e fine della riflessione con il metodo delle tangenti. Il punto di inizio così individuato, non si riferisce al contatto delle aste con il corpo della sonda, ma è relativo al cambio di impedenza registrato nel passaggio dell'onda dal cavo al manico. Essendo note la costante dielettrica dell'acqua ( $\epsilon_r=80$ ) e dell'aria ( $\epsilon_r=1$ ), è possibile definire i rispettivi tempi di propagazione dell'onda e quindi le rispettive lunghezze equivalenti (equazione 6).

$$t = 2L\sqrt{\epsilon_r}/c; \quad L_a = c \cdot t/2 \quad (6)$$

Si identifica quindi un "offset" (tratto AB) da sottrarre alla lunghezza totale della riflessione (tratto AC), in modo da avere una ampiezza uguale a quella equivalente calcolata (tratto BC).

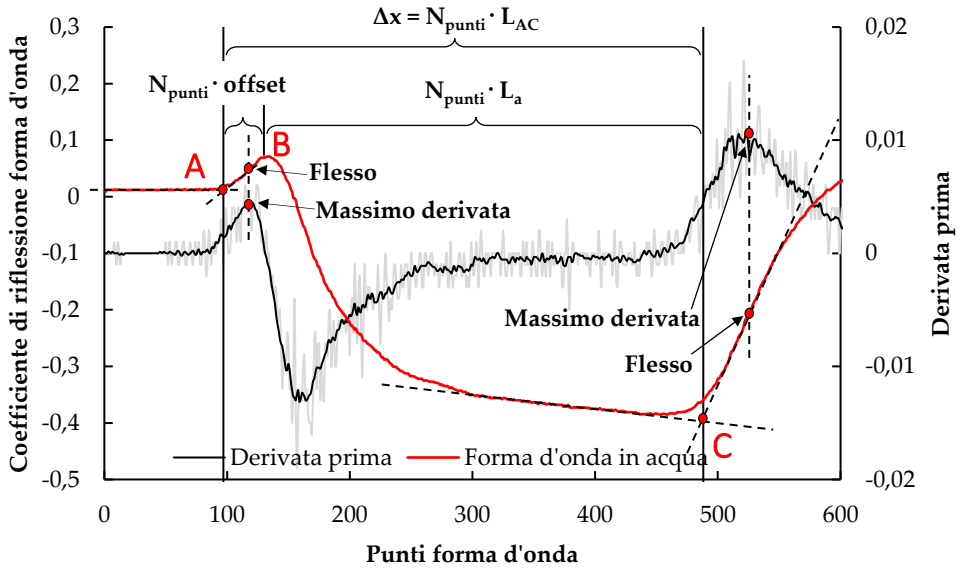


Figura 32: Forma d'onda con la sonda in acqua e individuazione della lunghezza apparente.

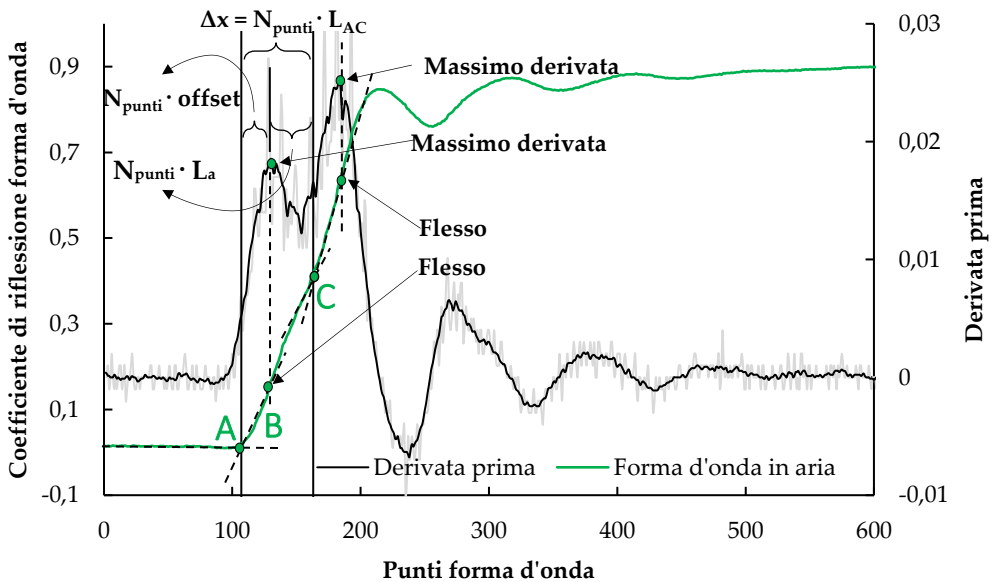
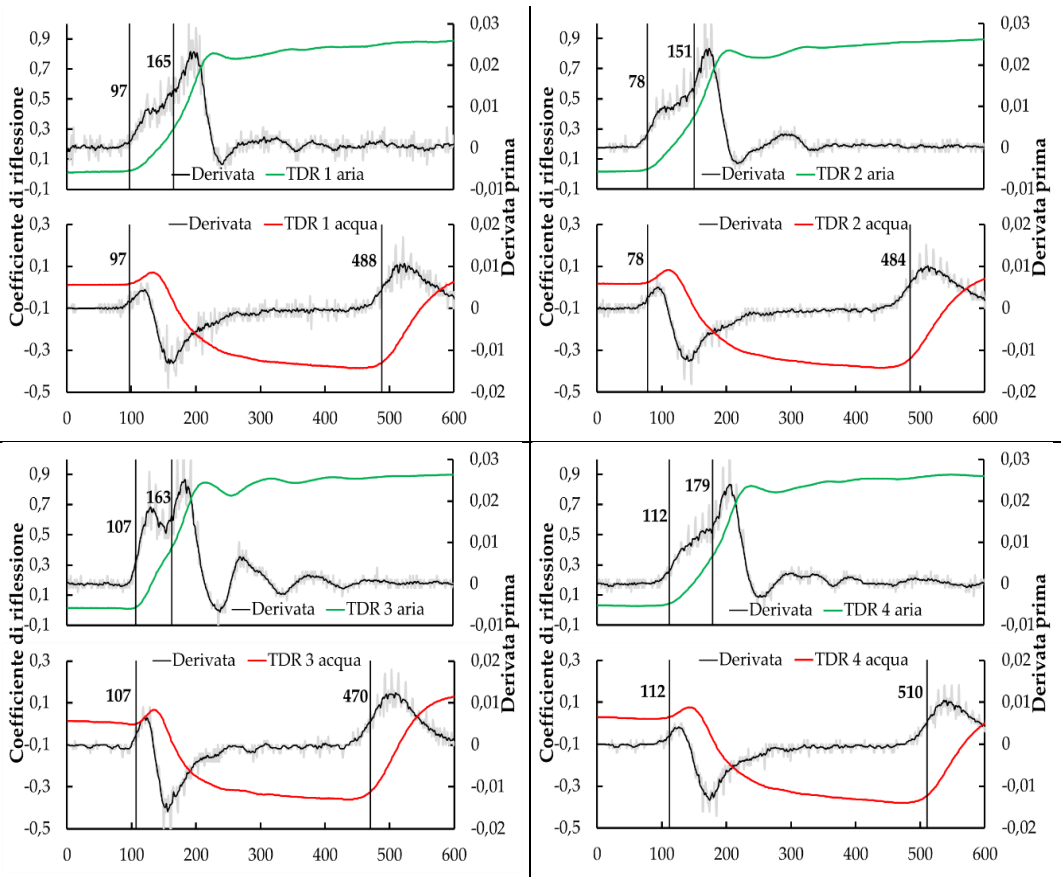


Figura 33: Forma d'onda con la sonda in aria e individuazione della lunghezza apparente.

Questa procedura, che permette di definire l'offset caratteristico dello strumento, risulta fondamentale per realizzare una corretta taratura delle sonde e dunque per una corretta valutazione delle grandezze da stimare. Di seguito si riportano i grafici utilizzati per la valutazione dell'offset delle sonde realizzate in laboratorio (Figura 34).



**Figura 34 (prima parte): Valutazione della lunghezza apparente per tutte le sonde TDR.**

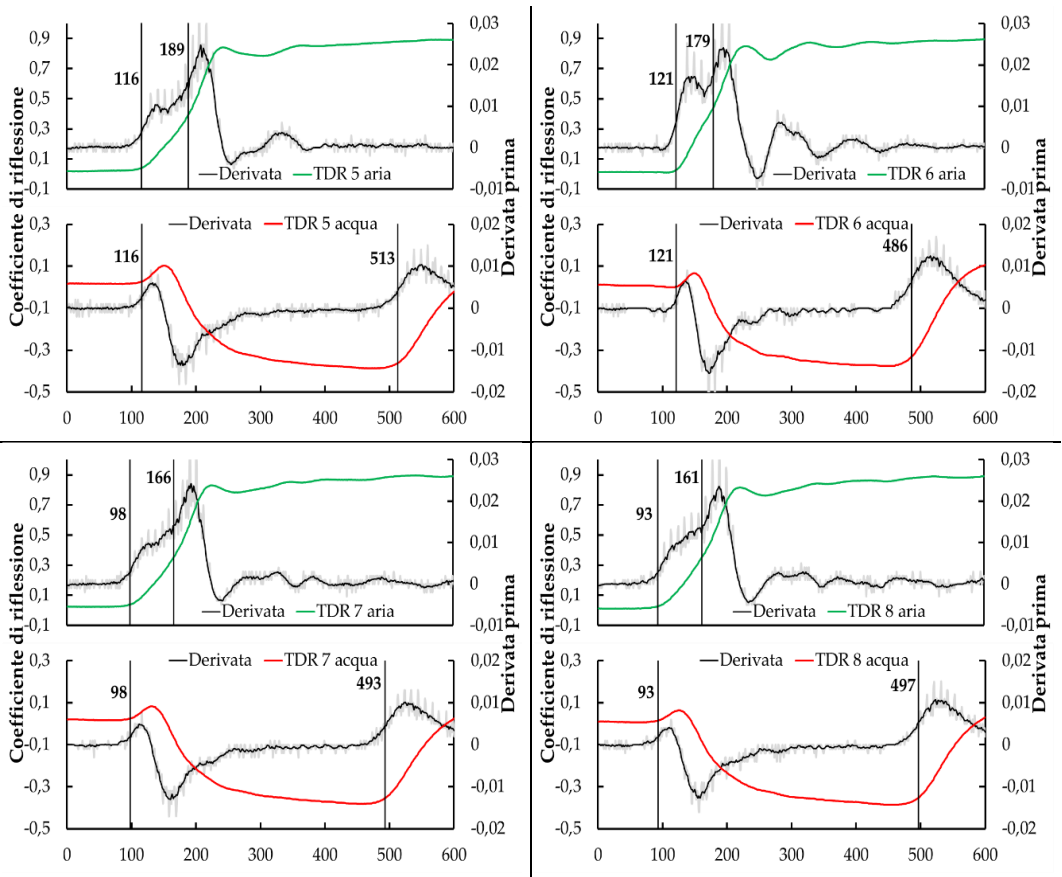


Figura34 (seconda parte): Valutazione della lunghezza apparente per tutte le sonde TDR.



### 3. ESEMPI DI SPERIMENTAZIONE





### 3.1. OPERAZIONI PRELIMINARI ALLA POSA IN OPERA DEL TERRENO

La ricostituzione del deposito nel canale viene effettuata utilizzando la tecnica del moist-tamping che consente di ottenere valori di porosità del terreno maggiori rispetto a quelli che si otterrebbero con la tecnica della deposizione a secco. Ciò è di particolare importanza quando si voglia effettuare una sperimentazione su terreni caratterizzati da porosità in sito molto elevate che si vogliono riprodurre nella sperimentazione in scala ridotta.

Prima di poter effettuare la ricostituzione del deposito sono, tuttavia, necessarie alcune operazioni preliminari. Il materiale, prelevato in sito ad un contenuto d'acqua che può essere fortemente variabile a seconda delle condizioni ambientali in cui si effettua il prelievo, viene portato al contenuto d'acqua prestabilito mediante o un processo naturale di essiccamento, oppure mediante aggiunta di acqua nebulizzata sul terreno e successivo mescolamento (Figura 35 a).



**Figura 35:** a) Operazione di bagnatura e rimescolamento del terreno per portarlo ad un contenuto d'acqua prestabilito. b) Operazioni di setacciatura.

Successivamente, dopo essere stato setacciato in modo da eliminare frammenti di radici, materiale grossolano ed altre inclusioni, viene posto in contenitori ermetici (Figura 35 b). Dopo aver atteso un tempo di almeno 24 h, sufficiente per l'omogeneizzazione del miscuglio, viene misurato il contenuto d'acqua. La procedura viene ripetuta fino a quando non si ottiene il contenuto d'acqua prestabilito. A tal punto il terreno rimane chiuso all'interno di contenitori ermetici fino al suo utilizzo durante la fase di posa in opera. Schematicamente:

- si seleziona e posiziona sul fondo del canale la guaina impermeabile o la rete drenante (a seconda del tipo di condizione idraulica al contorno che si vuole imporre) assicurandosi che siano lasciati scoperti i fori di alloggiamento dei trasduttori di pressione neutra (Figura 36 a);
- si seleziona il sostegno al piede del deposito di altezza corrispondente allo spessore del terreno da porre in opera e lo si posiziona nelle guide di alloggiamento appositamente predisposte lungo le pareti laterali del canale (Figura 36 b);
- si verifica il grado di riempimento dei serbatoi d'acqua per la riproduzione della pioggia artificiale ed il funzionamento del sistema di nebulizzazione dell'acqua. È opportuno utilizzare acqua distillata per evitare la formazione di incrostazioni calcaree nel circuito idraulico ed in particolar modo all'interno degli ugelli per l'erogazione dell'acqua;
- si fissano lungo le pareti laterali del canale scale graduate a distanza di circa 20 cm l'una dall'altra da utilizzare come ausilio per la corretta posa in opera e livellazione degli strati di terreno.



**Figura 36: a) Posa della guaina impermeabile. b) Posizionamento del sostegno al piede.**

## 3.2. RICOSTITUZIONE DEL DEPOSITO

La ricostituzione del deposito avviene con il canale in posizione orizzontale. Il terreno viene steso, con l'ausilio di una spatola, in strati di altezza di 2 cm in maniera da evitare la formazione di zone disomogenee e verificando ogni volta il peso di materiale utilizzato per il singolo strato al fine di controllare il valore della porosità ottenuta. A tal fine è opportuno, per ogni strato di materiale posto in opera, prelevare un piccolo campione di terreno per determinarne il contenuto d'acqua. Nel caso in cui il prefissato peso di materiale da porre in opera occupi un volume maggiore di quello corrispondente all'assegnata porosità, si effettua una leggera compattazione dello strato fino al raggiungimento dell'altezza desiderata.

Nel corso della fase di ricostituzione del deposito, raggiunta l'altezza prestabilita, si posizionano le sonde TDR adagiandole sulla superficie del terreno (Figura 37 a) avendo cura di segnare la loro posizione in modo da non calpestarle durante la ricopertura ed il completamento della ricostituzione del deposito di terreno. Completata la posa in opera del terreno si posizionano i sensori laser e i tensiometri, previa loro manutenzione e calibrazione spingendo la capsula porosa all'interno del terreno perpendicolarmente alla superficie del deposito fino alla profondità prefissata.



**Figura 37: a) ricostruzione del deposito per strato con posa della sonda TDR. b) installazione delle capsule porose dei tensiometri.**

Dopo l'inserimento della piastra porosa occorre riempire con terreno l'intercapedine che si forma tra il tubicino del corpo tensiometrico (di diametro inferiore rispetto a quello della piastra) ed il terreno circostante per evitare che si creino delle vie preferenziali d'infiltrazione d'acqua (Figura 37 b).

Si riproduce una pioggia di bassa intensità (20-30 mm/h) per 2-4 min (la durata dipende dallo spessore del deposito; Figura 38 a).

Al termine del processo si sigilla il deposito mediante un telo di plastica (Figura 38 b) per evitare che durante la fase di equalizzazione dei menischi si verifichi un fenomeno di evaporazione che eviterebbe il raggiungimento di una condizione di equilibrio. Tutta la fase di equalizzazione della suzione viene monitorata mediante le letture ai tensiometri. In genere è sufficiente un tempo di 48-72 ore per ottenere la redistribuzione e l'omogeneizzazione del contenuto d'acqua all'interno del deposito di terreno.

Al termine della fase di equalizzazione della suzione, si posizionano i trasduttori di spostamento laser sulla superficie del terreno ed i pluviometri e, qualora si debba effettuare una prova su modello di pendio, si inclina il canale fino alla pendenza prestabilita.



**Figura 38: a) Fase di pioggia a bassa intensità con il deposito in posizione orizzontale. b) Copertura con telo di plastica del deposito.**

In quest'ultimo caso, dopo aver eseguito l'inclinazione del canale, si attende il tempo necessario affinché il deposito raggiunga una nuova condizione di equilibrio (in genere più di 24 h).

Si verifica il funzionamento di tutti gli strumenti e dello spazio di archiviazione disponibile sul PC di acquisizione.

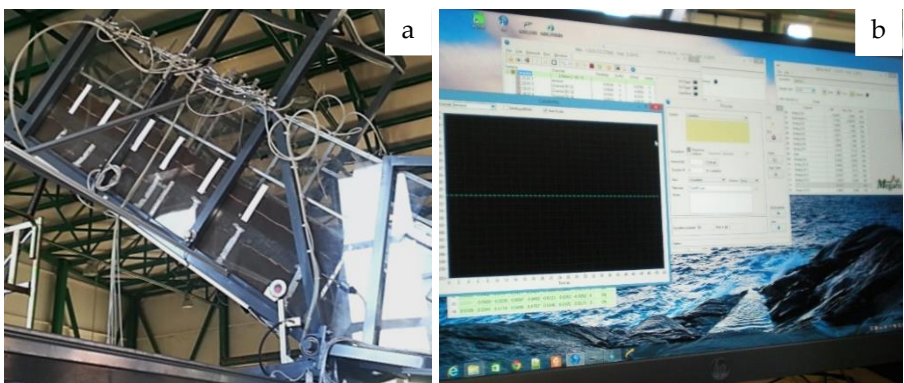
### 3.3. PROVA DI INFILTRAZIONE

Dopo aver inclinato il canale (Figura 39), prima dell'esecuzione di una prova, si rimuove il telo impermeabile di copertura del deposito e si avviano i programmi di acquisizione dati verificandone i settaggi.

Si alimentano i sensori almeno 30 minuti prima dell'inizio della prova. Si predispone un quaderno di prova dove si riportano le caratteristiche geometriche e fisiche iniziali del modello, l'esatta ubicazione degli strumenti di misura, le condizioni al contorno imposte, la nomenclatura dei file di acquisizione ed i settaggi utilizzati.

La prova ha inizio con la riproduzione della pioggia di prestabilita intensità. Nel corso dell'esecuzione della prova si monitorano in tempo reale gli andamenti della suzione alle differenti profondità in modo da assicurarsi il raggiungimento del valore di suzione minimo prestabilito, nel caso in cui non si voglia raggiungere la saturazione del terreno, o l'approssimarsi di una condizione di completa saturazione.

Contestualmente si registrano sul quaderno di prova eventuali osservazioni sulla fenomenologia del processo e/o eventuali anomalie di funzionamento della strumentazione.



**Figura 39: a) Inclinazione del deposito. b) Controllo dei sensori e del software di acquisizione.**

### 3.4. PROVA CON UN DEPOSITO OMOGENEO

Per la sperimentazione è stato utilizzato del terreno piroclastico della zona di Sarno, nel sud Italia, distante circa 15 km in linea d'aria dal cratere del vulcano Vesuvio. Nel Maggio del 1998, in tale area, colate di fango di vaste dimensioni travolsero l'abitato, provocando un'ingente numero di vittime. Nella zona si riscontrano stratigrafie composte da calcari ricoperti da una coltre stratificata di depositi piroclastici. Quest'ultimi sono il prodotto delle diverse fasi eruttive del complesso vulcanico Somma-Vesuvio, dei campi Flegrei e di altri vulcani presenti nella Regione non più attivi. Le ceneri, fuoriuscite dall'eruzione e successivamente trasportate dal vento, percorrono grandi distanze depositandosi anche a chilometri dalla zona di eruzione, fornendo una stratigrafia non univoca per l'intera area (Del Prete et al., 1998; De Vita et al., 2006; Cascini et al., 2008). In genere si tratta di depositi incoerenti, granulometricamente variabili dalle sabbie, sabbie limose e limi (ceneri) alle ghiaie e sabbie con ghiaia (pomici).

All'interno del canale è stato ricostruito un deposito omogeneo di cenere piroclastica riconducibile all'eruzione pliniana di "Pollena" del 472 a.C..

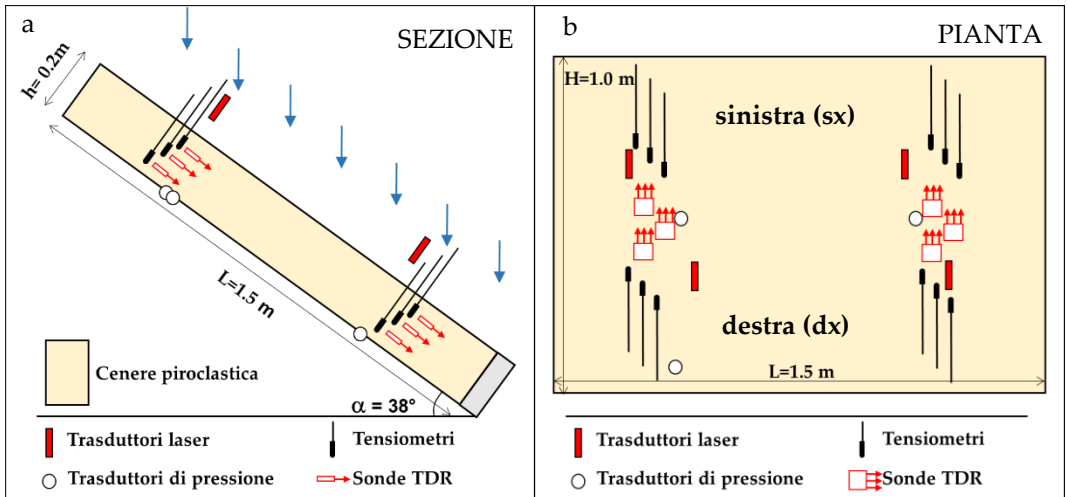


Figura 40: a) Schema della posizione dei sensori in sezione. b) Schema della posizione dei sensori in pianta.

Il pendio era formato da uno strato di cenere vulcanica di 20 cm di spessore, impegnava l'intera larghezza del canale (100 cm) ed era lungo 150 cm. Tale geometria permette di assimilare il deposito ad un pendio indefinito. Alla base del modello è stato realizzato un contatto impermeabile e scabro per simulare condizioni simili a quelle di un pendio naturale. Al piede del pendio è stata collocata una griglia drenante rivestita con geotessile.

La cenere è stata fatta passare ad un setaccio con maglie di 0.4 cm per eliminare la contaminazione grossolana che c'è stata durante la fase di prelievo. Il pendio artificiale è stato ricostituito all'interno del canale per strati, con la tecnica del "moist-tamping", con una porosità delle ceneri vulcaniche compresa tra il 68% e il 76%, tipica delle condizioni in sito. Il contenuto d'acqua volumetrico della cenere ( $\theta$ ) era circa del 20%. All'interno del pendio artificiale, sono stati installati 12 tensiometri per la misura della suzione, e 6 sonde TDR per la misura del contenuto d'acqua volumetrico. I sensori sono stati installati alle profondità di 5 cm, 11 cm e 17 cm al di sotto del piano campagna, sia nella zona di monte, sia in quella di valle del deposito.

Sul fondo del canale erano predisposti tre trasduttori di pressione neutra, mentre sono stati installati 4 trasduttori di spostamento a tecnologia laser per la misura degli spostamenti ortogonali alla superficie del pendio. La Figura 41 mostra, in maniera schematica, l'ubicazione dei sensori installati all'interno del deposito.

La pioggia è stata generata mediante un sistema di nebulizzazione posizionato circa 100 cm al di sopra del piano di scivolamento. La disposizione degli ugelli nebulizzatori garantisce l'uniformità della pioggia ed evita l'erosione superficiale.

Sono stati eseguiti diversi test:

- 1) La prima prova è stata eseguita con il deposito in posizione orizzontale; è stata simulata una pioggia costante di intensità notevole (circa 220 mm/h) che si è protratta per circa 50 minuti<sup>3</sup>. Tale prova è stata eseguita per attivare fenomeni di infiltrazione, al fine di stabilizzare il pendio prima di inclinarlo.
- 2) In seguito, si è lasciato il deposito in evaporazione naturale per circa 14 giorni, acquisendo i valori registrati dai diversi sensori.

---

<sup>3</sup> Questa prova è stata eseguita mentre era installata una prima versione del sistema pioggia, che consentiva una pioggia di maggiore intensità.

- 3) Successivamente, il pendio è stato inclinato a 38°, lasciandolo in evaporazione per circa 8 giorni, in modo da far ridistribuire i valori di suzione e contenuto d'acqua nella nuova configurazione.
- 4) Infine, si è simulata una nuova fase di infiltrazione, con pioggia costante di intensità circa di 220 mm/h che è durata fino alla rottura del pendio (circa 40 minuti).

Le principali caratteristiche delle varie fasi della sperimentazione sono riassunte nella Tabella 7.

Prova	Angolo di inclinazione (gradi)	Intensità di pioggia (mm/h)	Durata
Infiltrazione dep. orizzontale	0	220	50 minuti
Evaporazione	0	0	14 giorni
Ridistribuzione	38	0	8 giorni
Rottura	38	220	40 minuti

**Tabella 7: Principali caratteristiche delle varie fasi della sperimentazione.**

### **3.4.1. RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE**

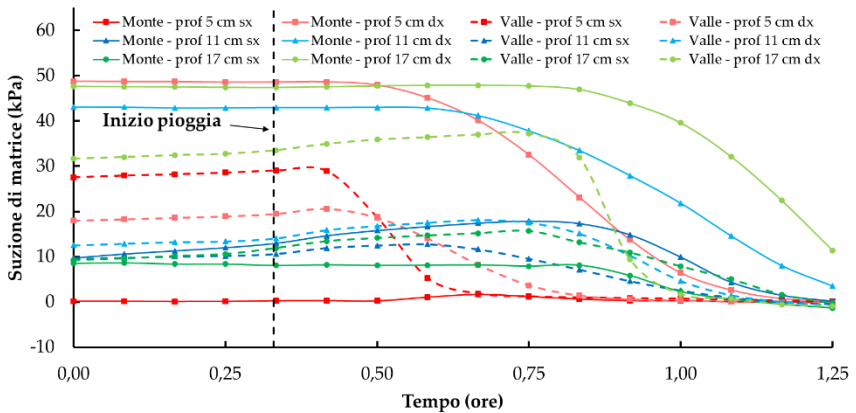
Durante le diverse prove, sono stati acquisiti i valori puntuali di suzione e di contenuto d'acqua volumetrico sia nella zona di monte, sia nella zona di valle a diverse profondità. Sono stati misurati anche gli spostamenti in direzione ortogonale alla superficie del pendio, prodotti dalla variazione di stato tensionale e la pressione dell'acqua sul fondo del canale. La frequenza di acquisizione è stata variata in funzione del tipo di prova. In particolare, durante le fasi che prevedevano la simulazione della pioggia e la relativa infiltrazione dell'acqua nel suolo, poiché i valori monitorati variavano velocemente, la frequenza di acquisizione è stata dell'ordine dei secondi; mentre durante le fasi di evaporazione, le variazioni sono state decisamente più lente, e quindi si è scelto di acquisire i valori con intervalli dell'ordine delle ore. Di seguito si riportano i principali risultati delle varie fasi della sperimentazione.

#### **3.4.1.1. FASE DI INFILTRAZIONE IN DEPOSITO ORIZZONTALE**

Con il deposito in posizione orizzontale, è stata simulata una pioggia di notevole intensità (circa 220 mm/h). Durante questa fase si sono monitorate tutte le grandezze di interesse. La Figura 41 riporta l'andamento della suzione

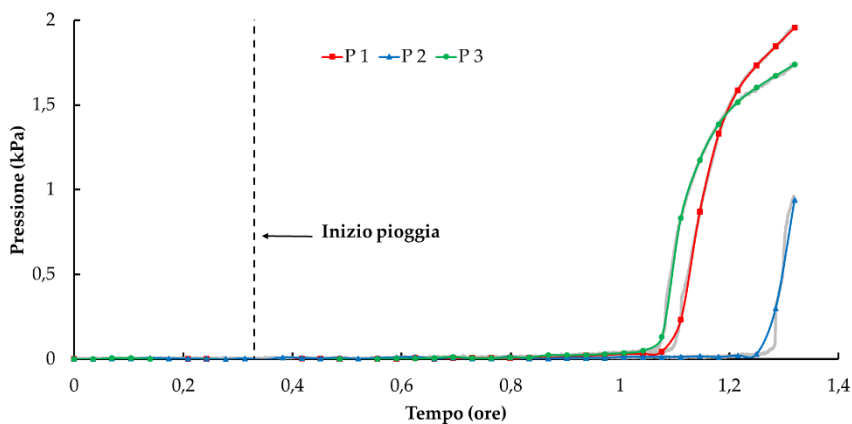


di matrice nel tempo. Come si può osservare dal grafico, i valori di suzione registrati prima della pioggia erano molto eterogenei. Questa forte disomogeneità dei valori, probabilmente, era dovuta alla non perfetta adesione delle piastre porose dei tensiometri al terreno. Durante la fase di installazione dei sensori, infatti, si è proceduto ad infilare le piastre porose e i tubi ad esse collegati, all'interno di fori opportunamente predisposti. Dopo l'installazione, si è proseguito a riempire i fori, ma non si è avuta certezza che il terreno aderisse alle piastre. Gli eventuali vuoti che si sono creati in corrispondenza delle piastre porose, si sono riempiti successivamente, per effetto dei processi di infiltrazione che si sono generati dopo la pioggia simulata. La Figura 41 mostra infatti, che i valori di suzione, successivi la pioggia, dopo una fase di assestamento, convergono tutti verso gli stessi valori.

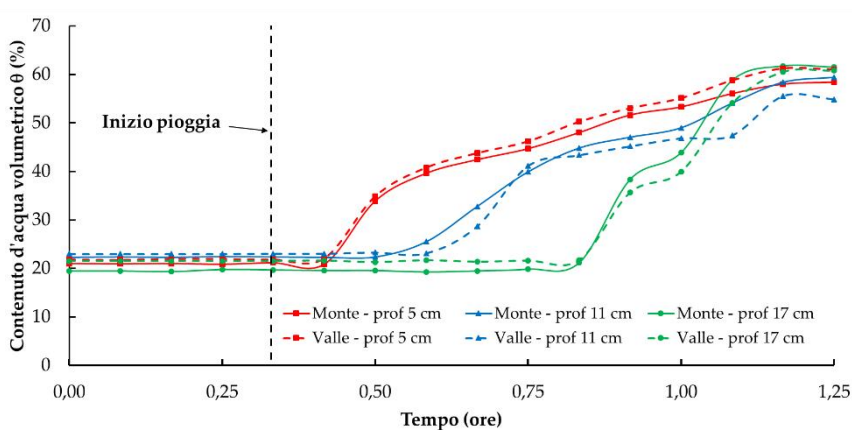


**Figura 41: Andamento della suzione nel tempo durante la prima fase.**

La Figura 42 mostra l'andamento delle pressioni neutre registrate dai trasduttori di pressione sul fondo del canale, mentre la Figura 43 riporta l'andamento del contenuto d'acqua volumetrico del terreno, rilevato attraverso le sei sonde TDR. L'elaborazione delle misure TDR è stata effettuata mediante una relazione di calibrazione specificamente ricavata per ceneri vulcaniche provenienti dal pendio di Cervinara (AV), originate dalla stessa eruzione vulcanica responsabile dei depositi piroclastici di Sarno, di caratteristiche fisico-mineralogiche simili a quelle del terreno utilizzato per la realizzazione del deposito in canale (Greco e Guida, 2010).



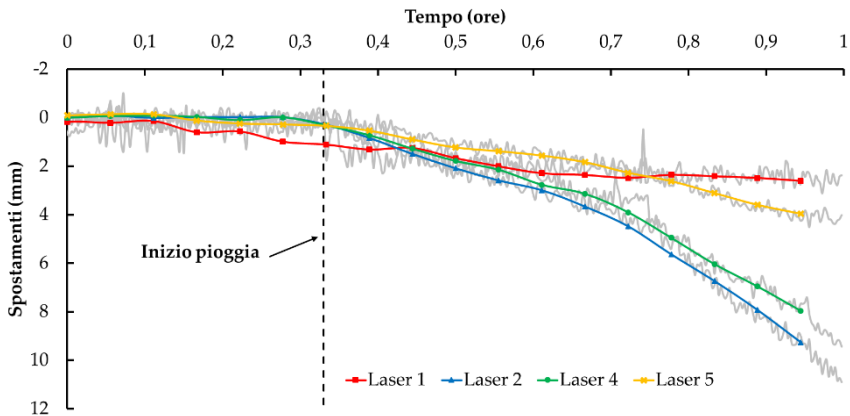
**Figura 42:** Andamento delle pressioni dell'acqua registrate dai trasduttori di pressione sul fondo del canale durante la prima fase.



**Figura 43:** Andamento del contenuto d'acqua volumetrico nel tempo durante la prima fase.

Come si evince dalla Figura 43, il contenuto d'acqua volumetrico iniziale, registrato alle diverse profondità, appare sostanzialmente omogeneo. Questa configurazione ha fatto sì che il fronte umido avanzasse verticalmente in modo omogeneo. Sia i trasduttori di pressione neutra posti sul fondo del canale, sia la maggior parte dei tensiometri, hanno indicato il raggiungimento di condizioni di completa saturazione di quasi l'intero deposito. I valori di contenuto d'acqua volumetrico indicano che al termine della prova la porosità del deposito si aggirava intorno al 60%, indice di una condizione piuttosto addensata per il tipo di terreno investigato (si ricorda che in campo si osservano frequentemente porosità intorno al 75%). Tale valore non deve

sorprendere, giacché i terreni piroclastici molto sciolti manifestano, quando inumiditi fino a condizioni prossime alla saturazione, il fenomeno del collasso volumetrico: sotto la sola azione degli stati tensionali derivanti dal peso proprio, subiscono una notevole diminuzione di volume. L'insorgere di tale fenomeno durante la fase di infiltrazione realizzata in canale è testimoniata dalla Figura 44, in cui è riportato l'andamento degli spostamenti subiti dal piano campagna durante la prova sperimentale, misurati attraverso i trasduttori laser.



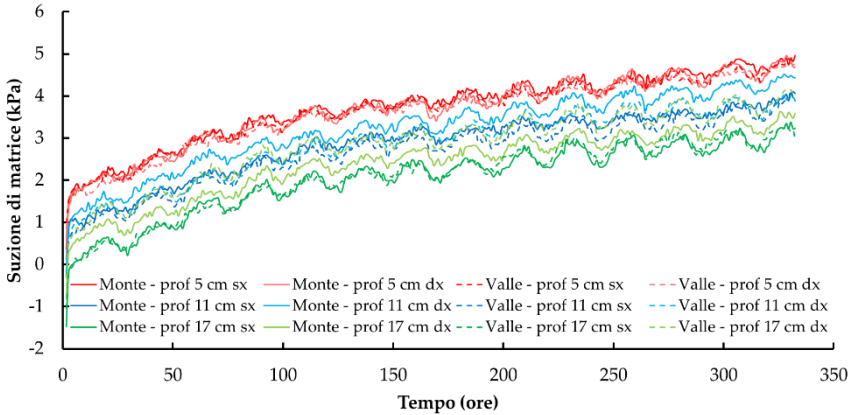
**Figura 44: Andamento degli spostamenti subiti dal piano campagna durante la prova sperimentale.**

La Figura 44, infatti, mostra come la superficie del terreno si sia abbassata di alcuni centimetri. L'intervallo di spostamento è compreso tra i circa 2 cm registrati dal laser L1, fino a poco più di 1 cm registrato dal laser L2. Considerato lo spessore iniziale del deposito di circa 20 cm, tale abbassamento corrisponde ad una diminuzione di porosità, rispetto al valore iniziale, dell'ordine di alcune unità percentuali (fino a circa il 5% in corrispondenza dei trasduttori L2 e L4).

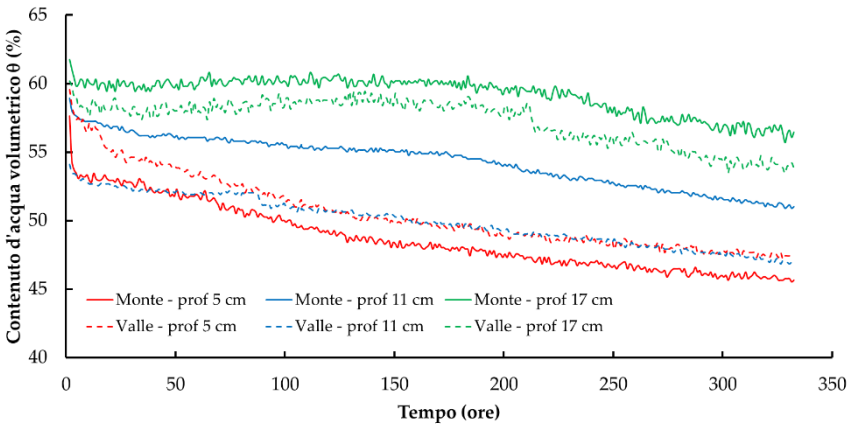
### **3.4.1.2. FASE DI EVAPORAZIONE IN DEPOSITO ORIZZONTALE**

Al termine della fase di infiltrazione, il deposito è stato lasciato in evaporazione naturale. Questa fase è durata circa due settimane, in quanto le condizioni ambientali all'interno del laboratorio (umidità relativa dell'aria alta), hanno prodotto un processo evaporativo molto lento. La Figura 45 mostra l'andamento della suzione rilevata dai diversi tensiometri all'interno del deposito. Dall'immagine si evince che, dopo una breve fase iniziale di rapido aumento delle suzioni, il fenomeno è evoluto in maniera estremamente

lenta. Il grafico mostra, altresì, la variazione di suzione che si è avuta nell'alternanza del giorno e della notte. Al termine di questa fase, si sono registrati valori di suzione compresi tra i 2 kPa (registrate dalle sonde più profonde) e i 5 kPa (registrati dalle sonde più superficiali).



**Figura 45: Andamento della suzione nel tempo della seconda fase.**



**Figura 46: Andamento del contenuto d'acqua volumetrico nel tempo della seconda fase.**

La Figura 46 invece, mostra l'andamento del contenuto d'acqua volumetrico registrato dai TDR durante la fase di evaporazione. Dopo una breve fase iniziale di rapida diminuzione del contenuto d'acqua, anche quest'immagine mostra un'evoluzione lenta del fenomeno. A fine prova, i valori di contenuto d'acqua volumetrico erano compresi tra il 45% e il 57%. La relativa ampiezza dell'intervallo di valori di conducibilità, se confrontata con il molto più ristretto intervallo dei valori di suzione, ci indicano che le curve di ritenzione

idrica del terreno impiegato, hanno un andamento estremamente ripido in prossimità della saturazione, tipico dei terreni a tessitura grossolana, che fa sì che a piccole variazioni della pressione capillare corrispondano notevoli variazioni di contenuto d'acqua. Gli andamenti dei valori forniti dalle sonde poste più in basso mostrano come il flusso evaporativo abbia impiegato oltre una settimana prima di interessare significativamente anche la parte più profonda del deposito.

### 3.4.1.3. FASE DI RIDISTRIBUZIONE IN DEPOSITO INCLINATO

Quando la suzione registrata all'interno del deposito si è assestata su valori compresi tra 3 kPa e 5 kPa, rappresentativi di condizioni tali da permettere al terreno di resistere agevolmente all'applicazione di un incremento significativo di tensione tangenziale, si è proceduto ad inclinare il pendio fino ad un angolo di circa 38°. L'azione della gravità, conseguente alle variazioni di quota, hanno innescato un processo di redistribuzione della suzione e del contenuto d'acqua volumetrico. L'intera fase è durata circa 8 giorni, ma come si può notare dalla Figura 47, che mostra l'andamento della suzione nel tempo, la variazione significativa c'è stata già nella prima ora. Successivamente i valori di suzione sono variati in maniera lenta, variazione prodotta dall'evaporazione che si è instaurata nella nuova configurazione. Inoltre, la figura mostra che, per effetto della gravità, i valori di suzione registrati da tutti i sensori posti a valle sono più bassi di circa 4 kPa rispetto a quelli di monte.

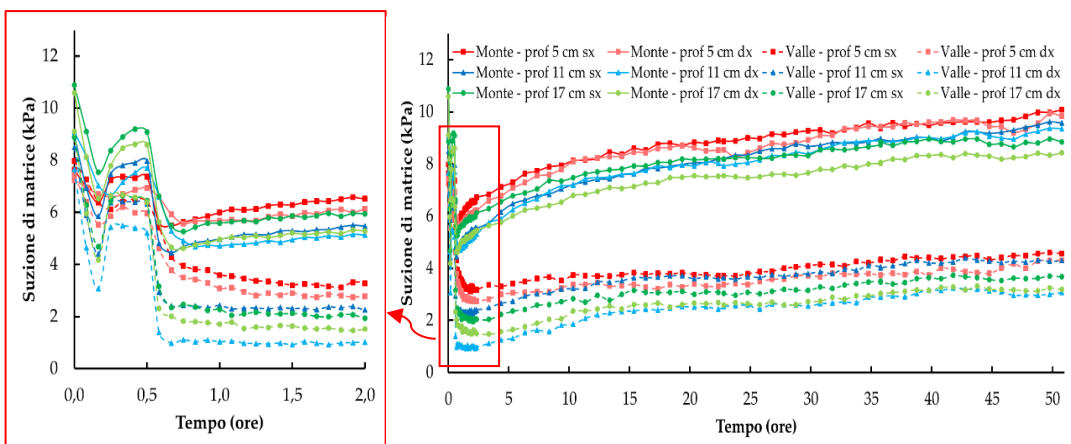
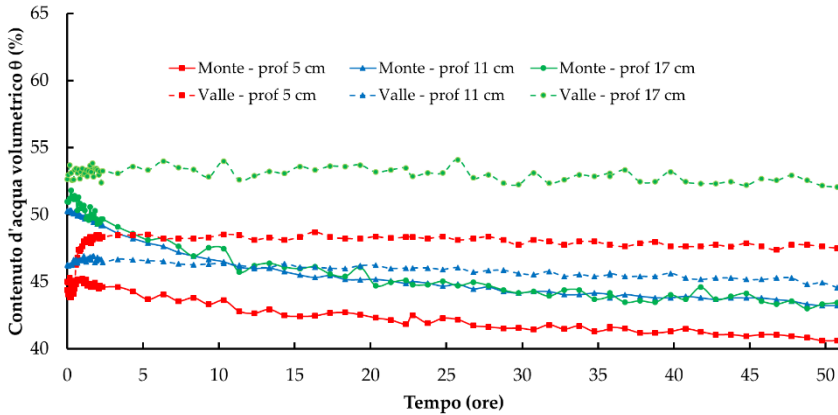


Figura 47: Andamento della suzione nel tempo durante la terza fase.

È possibile notare la variazione di quota anche osservando l'andamento del contenuto d'acqua volumetrico riportato in Figura 48. Anche in questo caso, dopo una breve fase transitoria di redistribuzione del contenuto d'acqua volumetrico, i valori sono variati in maniera lenta, variazione prodotta dall'evaporazione che si è instaurata nella nuova configurazione.



**Figura 48: Andamento del contenuto d'acqua volumetrico nel tempo della terza fase.**

#### 3.4.1.4. FASE DI INFILTRAZIONE IN DEPOSITO INCLINATO

Una volta certi che la redistribuzione legata alla variazione di configurazione geometrica fosse terminata, è stato dato inizio a una ulteriore fase di infiltrazione, con pioggia artificiale di notevolissima intensità (circa 220 mm/h), finalizzata al raggiungimento delle condizioni di innesco di una frana lungo il pendio artificiale. La Figura 49 riporta l'andamento della suzione durante l'ultima fase di infiltrazione, dal quale si rileva con tutta evidenza il rapido raggiungimento di condizioni di saturazione in corrispondenza di buona parte dei 12 tensiometri (nella Figura, al fine di renderla più leggibile, sono riportati i valori relativi ai soli tensiometri installati al lato destro, considerato che i valori registrati da quelli installati a sinistra hanno avuto il medesimo andamento). È possibile, altresì, notare il momento in cui le curve relative ai tensiometri posti nella zone di valle a 5 cm e 11 cm di profondità hanno una rapida variazione di pendenza, ossia quando si stacca una porzione di pendio e si innesca una piccola frana superficiale.

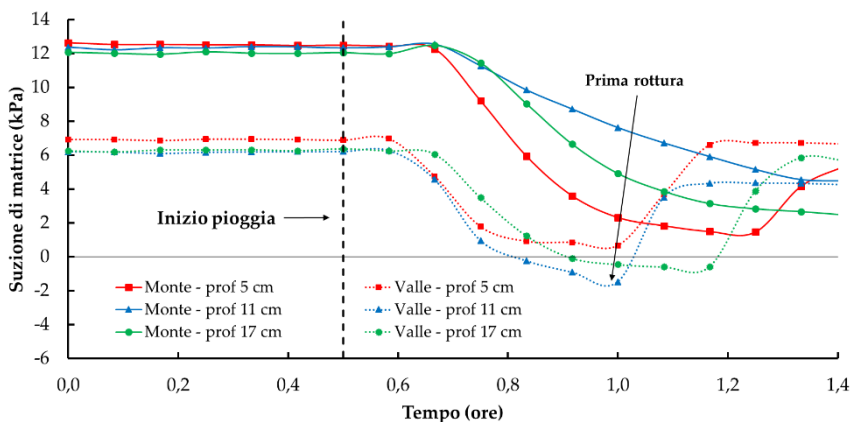
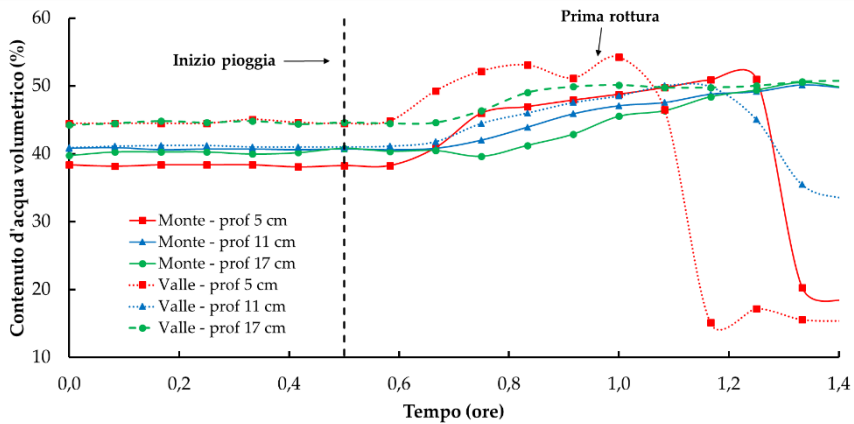


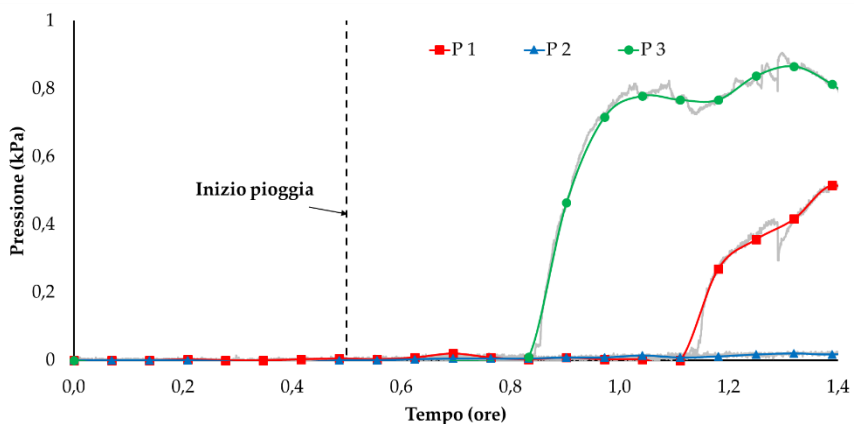
Figura 49: Andamento della suzione nel tempo della quarta fase.

In Figura 50 sono altresì riportati gli andamenti del contenuto d'acqua volumetrico del terreno, misurati con le sei sonde TDR. Risulta evidente, anche in questa fase di infiltrazione a canale inclinato, il progressivo avanzare di un fronte di inumidimento dall'alto, sebbene si osservino delle differenze tra la zona di monte e quella di valle del pendio, dove, forse anche a causa della non perfetta omogeneità della distribuzione spaziale della pioggia artificiale, ma soprattutto per il flusso sub-superficiale parallelo al pendio, l'incremento del contenuto d'acqua appare anticipato. Va inoltre rilevato che tutte le sonde TDR, pur essendoci assoluta evidenza del raggiungimento di condizioni di completa saturazione di buona parte del deposito, hanno misurato valori di contenuto d'acqua tra il 50% e il 55%. Ciò va senza dubbio attribuito alla compattazione subita dal deposito durante le precedenti fasi della sperimentazione, che avevano portato ad una riduzione dello spessore dai 20 cm iniziali fino a circa 18 cm, corrispondenti ad una riduzione della porosità stimabile intorno al 10%. Anche da questo grafico è possibile notare il momento in cui si stacca una piccola frana, facendo variare bruscamente l'inclinazione della curva relativa al TDR posto nella parte più superficiale di valle. In questo caso la frana ha portato a giorno il TDR e da quel punto in poi i valori misurati dal sensore non sono rappresentativi del contenuto d'acqua reale.



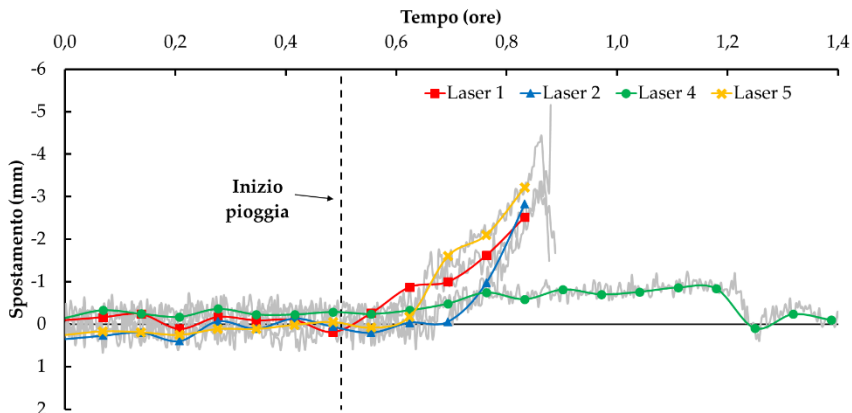
**Figura 50: Andamento del contenuto d’acqua volumetrico nel tempo della quarta fase.**

In Figura 51 e in Figura 52 si riportano rispettivamente gli andamenti delle pressioni dell’acqua registrate sul fondo del canale dai trasduttori di pressione e l’andamento degli spostamenti ortogonali alla superficie del pendio registrati dai traduttori di spostamento laser. In Figura 51 è possibile osservare come il deposito fosse quasi tutto saturo, infatti i trasduttori (fatta eccezione per il P2) hanno registrato un aumento di pressione dovuto alla formazione di un battente d’acqua sul fondo del canale. Mentre la Figura 52 mostra che durante questa fase, il pendio evidenzia un rigonfiamento di pochi millimetri.



**Figura 51: Andamento delle pressioni registrate sul fondo del canale della quarta fase.**





**Figura 52: Andamento degli spostamenti ortogonali del pendio della quarta fase.**

Infine, la Figura 53 evidenzia l'aspetto del deposito a fine prova; si nota chiaramente la nicchia di distacco della frana e la superficie erosa.



**Figura 53: Deposito a fine prova**

La rottura del pendio, coerentemente con la configurazione addensata assunta dal deposito durante le precedenti fasi della sperimentazione, non ha portato all'innescio di una colata di fango. Essa si è bensì manifestata come una progressiva erosione degli strati più superficiali del terreno, inizialmente e prevalentemente concentrata nella zona di valle del pendio, dove l'intenso flusso sub-superficiale determinava il raggiungimento di condizioni di

maggiore umidità e, allo stesso tempo, favoriva la mobilizzazione del terreno. Le prime rotture locali hanno cominciato a manifestarsi dopo circa 20 minuti dall'inizio della pioggia artificiale, e solo successivamente si sono estese al punto da interessare i punti nei quali erano installati alcuni dei tensiometri e delle sonde TDR.

### 3.5. IMPIEGO DI RETI PARAMASSI

Come descritto nei paragrafi precedenti il modello permette di definire differenti configurazioni in relazione agli obiettivi da perseguire. Oltre all'analisi delle condizioni di innesco e propagazione in terreni coesivi, è possibile esaminare anche il comportamento di terreni granulari sciolti, mediante l'inserimento di ulteriore strumentazione. Installando sul canale opportuni supporti (Figura 54 a), è possibile collegare barriere paramassi in piccola scala (Figura 54 b) e simulare il comportamento di un debris flow. Un flusso di detriti composto da aggregati di particelle di dimensioni note può essere innescato nel canale di monte modificandone l'assetto iniziale. Usando questa configurazione sperimentale, si possono effettuare diversi test variando di volta in volta l'inclinazione del canale di valle (facendo variare dunque la velocità di propagazione) o la configurazione delle barriere.

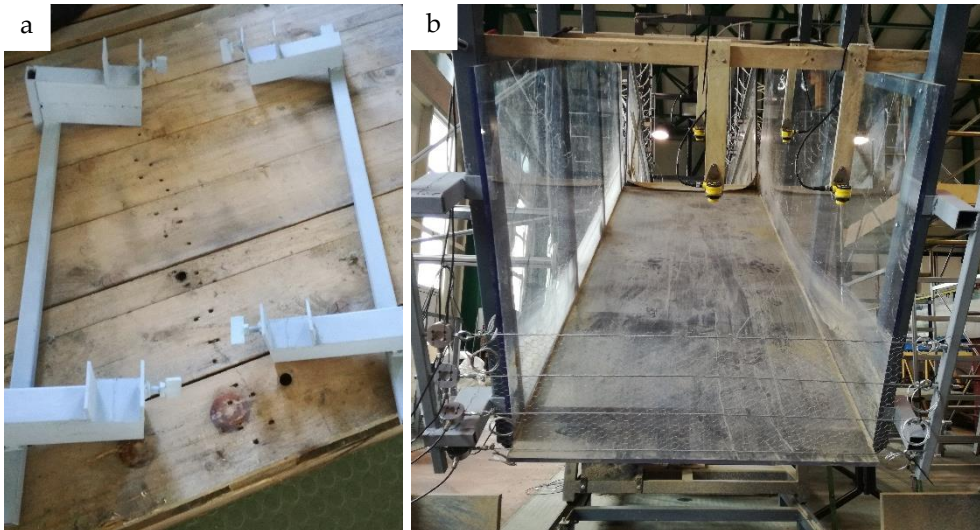
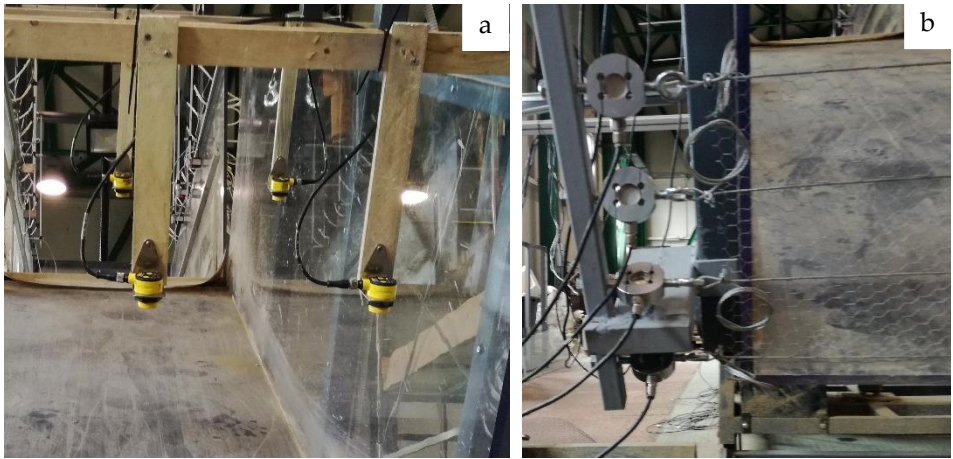


Figura 54: a) Supporti per il montaggio delle barriere. b) Barriera paramassi installata sul canale.



**Figura 55: a) Sensori altimetrici ad ultrasuoni. b) Celle di carico.**

In tal modo grazie alla strumentazione già presente e a quella di supporto installabile, si possono identificare tutte le grandezze necessarie per una perfetta definizione della barriera e per la comprensione del fenomeno. Infatti grazie alle telecamere ad elevata risoluzione con software PIV dedicato è possibile definire la velocità raggiunta dai flussi, mentre attraverso sensori altimetrici ad ultrasuoni (Figura 55 a) si identifica l'altezza raggiunta dal flusso. A completamento delle strumentazione possono essere installate una serie di celle di carico (Figura 55 b) che permettono la lettura delle forze presenti sulle funi (corde), che compongono la barriera, durante e dopo l'impatto con il flusso detritico.

Di seguito si riportano alcune immagini relative alle prove realizzate sul canale in collaborazione con l'Università di Parma utilizzando un materiale detritico con pezzatura variabile. Le diverse prove sono state realizzate senza l'influenza dell'evento meteorico e l'innescò è avvenuto inclinando il canale di monte.



Figura 56: Prova eseguita in collaborazione con l'Università di Parma. Configurazione iniziale.



Figura 57: Prova eseguita in collaborazione con l'Università di Parma. Configurazione a fine prova



Figura 58: Prova eseguita in collaborazione con l'Università di Parma. Configurazione del canale a fine prova.



## BIBLIOGRAFIA

- Bin Zhang, Chanjuan Han, Xiong (Bill) Yu, 2015. A non-destructive method to measure the thermal properties of frozen soils during phase transition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*; Volume 7, Issue 2, pages 155-162.
- Cascini L., Cuomo S., Guida D., 2008. Typical source areas of May 1998 flow-like mass movements in the Campania region, Southern Italy. *Engineering Geology* 96 107–125
- Dasberg, S., Dalton, F.N. Time domain reflectometry field measurement of soil water content and electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49, 293-297.
- Del Prete M., Guadagno, F. M. & Hawkins, A. B., 1998. Preliminary report on the landslides of 5 May 1998, Campania, southern Italy. *Bull. Engineering Geology and the Environment*, vol. 57, 113-129.
- De Vita P., Di Clemente E., Rolandi M. & Celico P., 2007. Engineering geological Models of the initial landslides occurred on the April 30th, 2006 at the mount di Vezzi (Ischia Island, Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Env.*, 2, 119, 141.
- Eckersley J.D., 1990. Instrumented laboratory flowslides. *Géotechnique* 40, 3, pp. 489-502.
- German, P.F., Di Pietro, L., Singh, V.P. Momentum of flow in soils assessed with TDR moisture readings. *Geoderma*, 1997, 80, 153-168.
- Greco, R. Soil water content inverse profiling from single TDR waveforms, *Journal Hydrol.*, 2006, 317, 325-339.
- Greco, R., Guida, A. Determinazione sperimentale del legame tra permittività dielettrica e contenuto d'acqua in piroclastici campane. *Convegno nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 14 – 17 Settembre 2010, Palermo.
- Iverson R.M. & LaHusen R.G., 1989. Dynamic pore pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials. *Science*, 246, pp. 796-799.
- Kraus J.D., Fleisch D.A., 1999. *Electromagnetics with applications*. McGraw-Hill.
- Lacerda W.A. & Avelar A.S., 2003. Flume tests on sand subjected to seepage with the influence of hidden barriers. *Proc. Int. Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfills*, Sorrento.

- Okura Y., Ochiai H., Sammori T., 2002. Flow failure caused by monotonic liquefaction. Proc. Int. Symp. Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, 21-25 January 2002, Kyoto University, Kyoto, pp. 155-172.
- Olivares L., Damiano E., Greco R., Zeni L., Picarelli L., Minardo A., Guida A., Bernini R., 2009. An Instrumented Flume to Investigate the Mechanics of Rainfall-Induced Landslides in Unsaturated Granular Soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, No. 2
- Spence K.J. & Guymer I., 1997. Small-scale laboratory flowslides. *Géotechnique* 47, 5, pp. 915-932.
- Wang G. & Sassa K., 2001. Factors affecting rainfall-induced landslides in laboratory flume tests. *Géotechnique* 51, 7, pp. 587-599.
- Topp, G.C., Davis, J.L., & Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 1980, 16, 574-582.
- Zegelin S.J., White I., Russel G.F., 1992. A Critique of the Time Domain Reflectometry Technique for Determining Field Soil-Water Content. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*, SSSA Special Publication n. 30, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 187-208.







Prototipo realizzato da  
GISA s.r.l.  
MEGARIS





Lab. di  
Cartografia  
Ambientale e  
Modellistica Idrogeologica

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA