

Analisi sperimentale del comportamento idrologico di un versante argilloso instabile: interpretazione con flusso non parallelo al versante

Lorenzo Masini

Laureato in Scienze Geologiche, Università di Bologna, vincitore del Premio di Laurea “Gianfranco Bruzzi” - edizione 2009

1. INTRODUZIONE

Il presente elaborato è il risultato di un lavoro svolto in collaborazione con il collega Dott. Cumoli (Cumoli, 2009). L'analisi del comportamento idraulico di una coltre argillosa è stata effettuata tramite l'installazione di un sistema di monitoraggio al fine di registrare la risposta del terreno agli eventi di precipitazione in termini di altezza di pressione.

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di individuare un moto di filtrazione vario all'interno della coltre stessa che giustificasse i dati di monitoraggio.

Alla fase di inquadramento geologico della zona è succeduta la fase disposta a determinare la caratterizzazione geomorfologica del bacino d'interesse, nella quale è stata posta particolare attenzione alla geometria del bacino e all'interpretazione dell'evoluzione del dissesto. I fenomeni di instabilità presenti sono stati infatti analizzati sia mediante l'osservazione di foto aeree sia in campagna tramite l'ausilio di apparecchiatura GPS al fine di poter confrontare i dati storici con le evidenze morfologiche riscontrate in sito. Identificate ed analizzate le genesi e le forme del versante si è passati all'installazione di un sistema di monitoraggio, costituito da tre verticali di misura, atto a rilevare e registrare le pressioni positive dell'acqua all'interno del primo metro di coltre, al fine di osservare la presenza di una falda sospesa.

I dati sperimentali sono stati comparati a dati teorici derivati dal calcolo numerico effettuato mediante un modello idrologico. La comparazione ha evidenziato la presenza di un substrato permeabile al di sotto della coltre che influenza notevolmente il moto di filtrazione all'interno dello strato indagato.

2. ASSETTO GEOLOGICO LOCALE

La successione stratigrafica presente nell'area di tesi comprende diverse formazioni appartenenti sia al dominio ligure che a quello epiligure. La Carta Geologica fornita dal sito della regione Emilia-Romagna (Fig. 1) evidenzia comunque che i fenomeni franosi interessano in particolare i litotipi argillosi del dominio ligure, che rappresenta le falde più alte degli Appennini Settentrionali e rappresenta la sequenza deposizionale formatasi tra il Giurassico e l'inizio dell'Eocene (Betelli & De Nardo, 2001).

In particolare la litologia presente è ascrivibile alla Formazione delle Argille a Palombini, argilliti e argilliti silto-

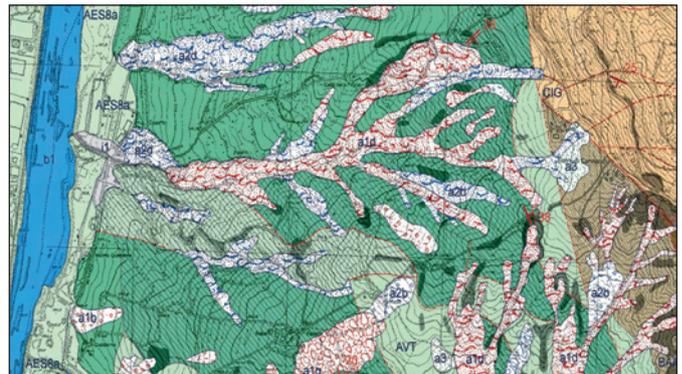


Figura 1 - Stralcio della Carta Geologica dell'Appennino emiliano-romagnolo a scala 1:10,000, Sezione: Vergato 237100.

se sovrastate dalla potente coltre eluvio-colluviale che si è generata da tale complesso di base.

3. CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA

Lo studio geomorfologico della zona d'interesse è coinciso con la fase preliminare di questo lavoro nella quale è stata effettuata un'accurata analisi dei versanti compresi tra il Comune di Vergato e il Comune di Grizzana Moranti, in provincia di Bologna, al fine di individuare un'area non ancora interessata da importanti movimenti franosi, ma facente comunque parte di una zona di alimentazione di un bacino di colata per analizzarlo come potenziale versante in frana.

La necessità di analizzare in dettaglio i meccanismi di flusso che si esplicano in una coltre superficiale ha reso indispensabile identificare una zona caratterizzata da un'acclività omogenea e non troppo elevata tale da permettere l'infiltrarsi dell'acqua, da vegetazione scarsa che ne limitasse il trattenimento e, soprattutto, caratterizzato da una morfologia atta a farla confluire verso valle senza generare forte dispersione laterale.

Il bacino si sviluppa nella parte Ovest dell'Appennino Settentrionale, è compreso tra una quota minima di 210 m ed una quota massima di 509 m, in prossimità dell'abitato di Serra di Carviano.

Le pendenze medie nell'area di studio variano dai 10° nella parte più a valle fino a valori di circa 19° nelle zone in prossimità dell'abitato di Serra di Carviano.

Il corso principale che ha inciso l'intera valle è il fiume Reno che, in destra idraulica, interagisce con litotipi

prettamente argillosi ascrivibili alle “Argille scagliose”; questa zona è caratterizzata dall’evoluzione di depositi alluvionali e di conoidi torrentizie sulle quali si appoggiano le estremità inferiori, ovvero il piede, dei corpi di frana.

Tutta l’area è interessata da movimenti gravitativi, sia attivi sia quiescenti, tipicamente classificati come colamenti lenti con una potenziale origine per scorrimento traslativo o rotazionale in terra.

Il materiale coinvolto nel movimento è generalmente una coltre superficiale di alterazione della Formazione delle Argille a Palombini il cui spessore varia da punto a punto e nella zona di alimentazione è dell’ordine dei pochi metri.

Dal punto di vista geomorfologico, in questo tipo di terreni il modellamento dei versanti avviene principalmente per due motivi: per erosione ad opera di acque correnti superficiali e per fenomeni di tipo gravitativo come scorrimenti rotazionali e traslativi e, nella maggior parte dei casi, colate.

In questa zona le frane sono i meccanismi di trasporto in massa più evidenti nell’ambito dell’evoluzione geomorfologica dei rilievi: imprimono modificazioni importanti sui versanti e determinano cambiamenti nell’aspetto dei pendii anche in tempi brevi.

4. ANALISI MULTITEMPORALE DELLE FOTO AEREE

4.1 Evoluzione del dissesto

Il rilievo e l’elaborazione dello stato del dissesto e della sua evoluzione è stata effettuata tramite l’analisi multitemporale di foto aeree e il rilevamento di campagna, mentre la rappresentazione dei risultati è stata realizzata mediante il software ESRI ArcGis.

Per i singoli anni studiati (1971, 1976, 1991, 1999, 2003, 2008) sono stati cartografati gli elementi caratteristici dei movimenti franosi quali la scarpata, il corpo di frana e le aree rivegetate.

1971

Nell’anno 1971 (Fig. 2) sono identificabili due principali corpi di frana (F1 e F2) di forma allungata tipica di una colata, che si originano uno in prossimità di Serra di Carviano, e l’altro nei pressi di Strada del Casetto, in prossimità del lago di Casigno. Si sviluppano in direzione Est-Ovest e sono alimentati da due fenomeni di minor entità (F3 e F4). Nell’analisi sono stati riconosciuti sette coronamenti di frana e un piccolo corpo di frana (F5) in prossimità del Rio Rabatta.

I corpi di accumulo sono caratterizzati da assenza di vegetazione, ciò rappresenta l’evidenza di un movimento abbastanza recente.

1976

Dall’analisi delle foto del 1976 (Fig. 3) sono stati riscontrati alcuni cambiamenti nella morfologia e nello stato di dissesto dei corpi franosi. Segni di movimento nella frana che si origina dell’abitato di Serra di Carviano (F1) sono ben visibili solo nella parte centrale del corpo. Sono invece presenti due aree rivegetate e a monte il fenomeno non è più chiaramente riconoscibile, inoltre non sono più identificabili le scarpate di frana ed anche

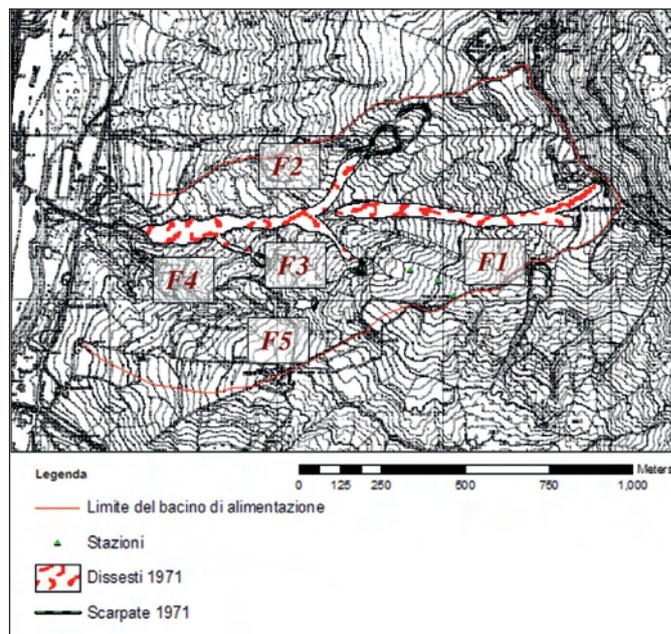


Figura 2 – Stato del dissesto del 1971 analizzato da foto aeree.

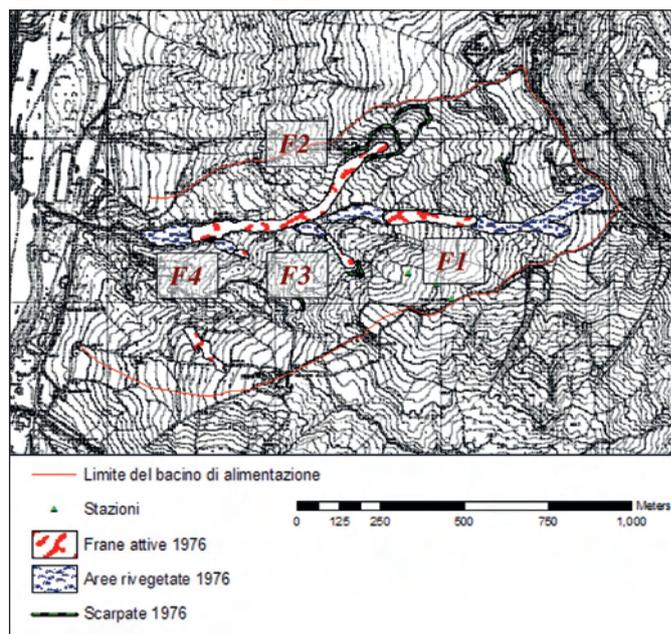


Figura 3 – Stato del dissesto del 1976 analizzato da foto aeree.

nella zona di contatto con la seconda frana principale è presente un forte rimboschimento.

La frana F2 è caratterizzata da una zona di rivegetazione lungo il piede mentre si presenta particolarmente attiva nella zona di scarpata con lo spostamento della corona in direzione della strada del Casetto.

Una parziale rivegetazione è visibile anche nei corpi F3 e F4, e si sviluppa un movimento isolato in prossimità dei casolari di Rabatta.

1991

Nel 1991 il corpo di frana F1 è pressoché totalmente rivegetato e il processo di rimboschimento continua ad evolversi anche nel piede della frana F2.

Questo corpo presenta sempre un'intensa attività nella zona di scarpata, con l'arretramento del corpo stesso ed un'evoluzione della corona che arretra sempre in direzione della strada del Casetto.

1999

Dalle ortofoto del 1999 si riscontra una parziale riattivazione del movimento F3, il corpo principale F2 è sempre caratterizzato da un intenso spostamento, estendendosi verso monte, del corpo di frana e un arretramento della corona ormai a contatto della strada. Al piede continua il processo di rivegetazione.

2003

Dalle foto del 2003 (Fig. 4) non compaiono grosse diffe-

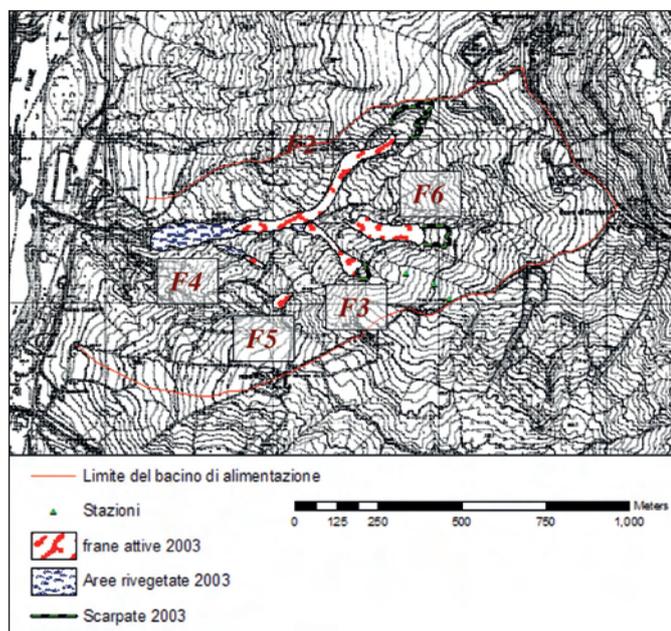


Figura 4 – Stato del disseto del 2003 analizzato da ortofoto.

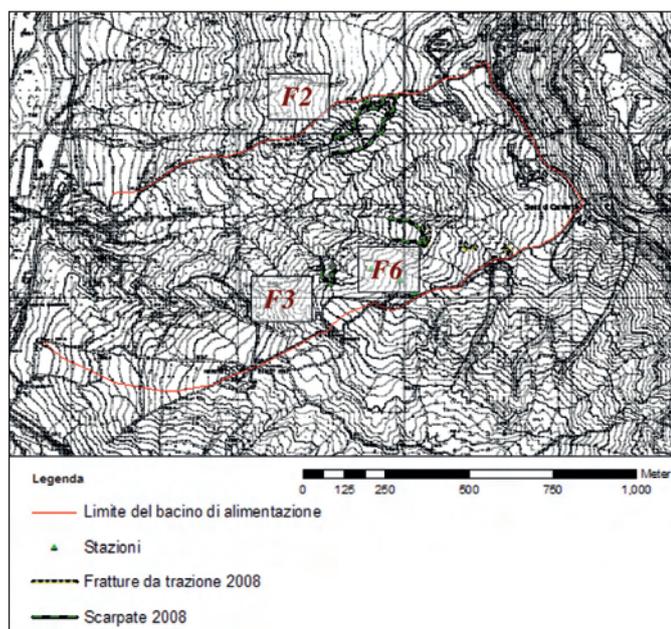


Figura 5 – Stato del disseto del 2008 analizzato tramite elaborazione GPS.

renze con l'analisi del dissesto del 1999. Il corpo di frana F3 si presenta attivo caratterizzato anch'esso da uno spostamento verso monte della corona, ma in particolare si può notare la presenza di un nuovo movimento franoso, F6, che si sviluppa in direzione est-ovest e coinvolge un'area piuttosto estesa (Circa 17,500 m²).

2008

Per lo studio dello stato attuale del dissesto (2008, Fig. 5) è stato effettuato un rilievo di campagna mediante l'utilizzo di un GPS "Trimble" GeoXM su supporto palmare. Il rilevamento è servito per determinare l'esatta posizione dei fenomeni evidenziati dalle foto aeree ed è stato effettuato percorrendo i margini delle corone di distacco.

L'attenzione è stata volta alle zone di corona al fine di determinare un'attività dei movimenti franosi rappresentata da retrogressioni delle aree di scarpata.

Si è potuto quindi attestare che i movimenti franosi F2, F3 ed F6 sono caratterizzati da intense modificazioni e forti arretramenti dei coronamenti nelle zone di alimentazione.

Il corpo di frana F6 ha subito un arretramento della corona di circa 30 metri negli ultimi 5 anni e presenta molte fratture di trazione nella zona più a monte. Anche queste fratture sono rappresentative dell'attività retrogressiva caratteristica di questo tipo di movimenti.

Dal 2003 al 2008 si può notare un arretramento della scarpata appartenente al movimento franoso F3 di circa 40 metri.

Se consideriamo l'evoluzione del movimento di frana principale F2 dal 1976 ad oggi si può attestare che il corpo di frana non ha subito forti variazioni, ma che il movimento, anche in questo caso, si è intensificato nella zona di alimentazione con un arretramento della corona di circa 50 metri, spostandosi fino alla "strada del Casetto", ed in alcuni casi andando ad interessare alcune condutture (Fig. 6).

5. IL SISTEMA DI MONITORAGGIO

La strumentazione utilizzata per il sistema di monitoraggio è costituita da nove sensori di pressione Honeywell e tre datalogger Campbell Scientific, Inc. Sono state



Figura 6 – Corona di frana del corpo principale F2 in prossimità della strada del Casetto.

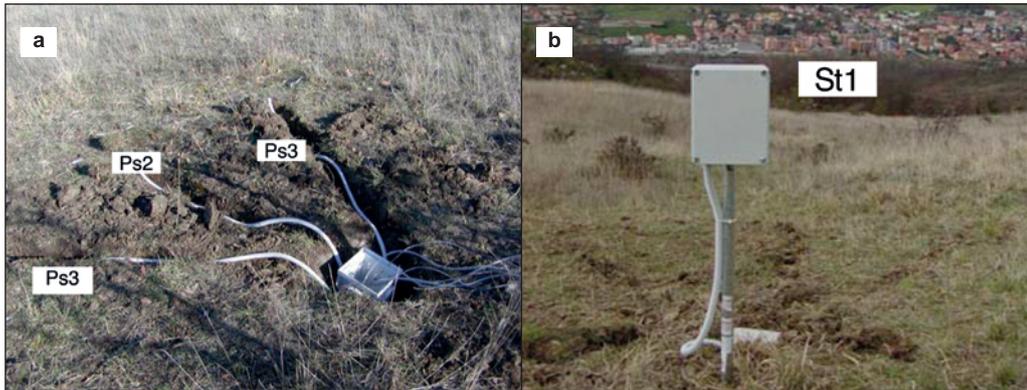


Figura 7 – a) Sensori di pressione installati nella stazione St1, convergono tutti nel pozzetto per poi collegarsi alla centralina; b) stazione St1 nella quale è situata la centralina di acquisizione.

così realizzate tre stazioni di acquisizione disposte lungo la linea di massima pendenza del versante e caratterizzate ognuna dalla presenza di una centralina di acquisizione alla quale sono stati collegati tre sensori posti alla profondità di 30 cm, 70 cm, e 100 cm dal piano campagna (Fig. 7).

Le caratteristiche del sistema installato in sito sono tali da rendere attendibili solo le misure di pressione positive, i sensori infatti si trovano posizionati dentro tasche di sabbia e non sono in grado di misurare la suzione.

Come prassi in un controllo di tipo strumentale, prima di dare il via alla campagna di rilevamento è stata effettuata un'accurata calibrazione dei sensori di pressione; lo scopo di questo fase è stato duplice: verificare il corretto funzionamento del sensore e determinare le equazioni di calibrazione che permettono di trasformare le misure in Volt in altezza di pressione dell'acqua.

L'installazione del sistema di monitoraggio è avvenuta nel mese di marzo del 2008, le tre stazioni sono state disposte in modo da rilevare un eventuale flusso sub-superficiale parallelo al versante all'interno della coltre. Il principale quesito a cui si cerca di rispondere, infatti, è se la coltre argillosa si comporta come un acquifero sospeso su di un substrato relativamente impermeabile, cioè se l'acqua che si infila dalla superficie si accumula alla base della coltre e fluisce verso valle con un gradiente simile a quello del versante.

A tale scopo, una prima verticale di misura (St1) è stata posizionata in prossimità del crinale, una seconda (St2) più a valle di circa 60 m e una terza (St3) ancora più a valle di circa 150 m (Fig. 8). Se esiste un moto di filtrazione parallelo al versante si dovrebbe vedere un netto aumento dell'altezza di falda da St1 a St3, all'aumentare cioè del bacino di alimentazione.

Visto il fine del monitoraggio, la posizione ideale del

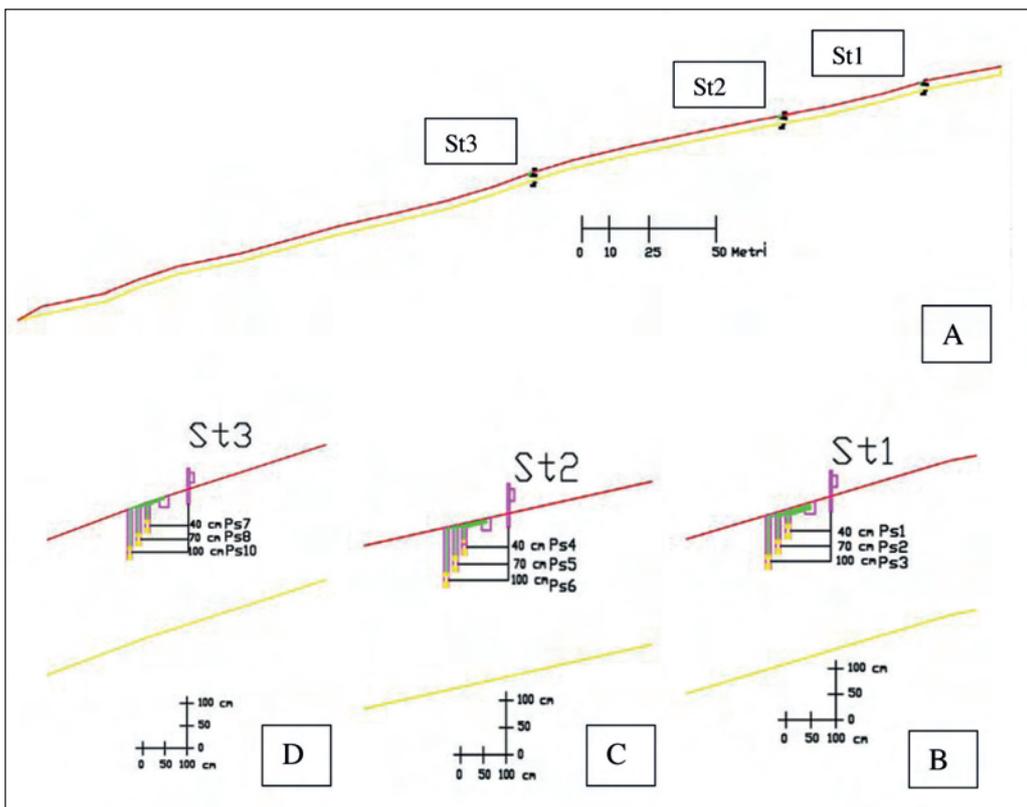


Figura 8 – A) Sezione del versante di monitoraggio; B) Ingrandimento St1; C) Ingrandimento St2; D) Ingrandimento St3.

seniore più profondo sarebbe, in ogni verticale, la base della coltre. Nel nostro caso però, avendo dovuto effettuare le perforazioni con trivella manuale, non è stato possibile scendere oltre il metro. Si tratta chiaramente di una profondità molto ridotta, ma considerando il limitato spessore della coltre visibile nella scarpata di frana circostante e la presenza di terreno pseudo-scaglioso verso il fondo delle perforazioni, è possibile che i tre sensori più profondi non siano lontani dal contatto coltre-substrato.

Il periodo di monitoraggio copre un intervallo di tempo di 8 mesi; per quanto breve sia il periodo monitorato, esso ha compreso buona parte delle due stagioni piovose (quella primaverile e quella invernale) e l'intera stagione secca estiva.

6. INTERPRETAZIONE DEI DATI

Dai dati ricavati dalla campagna di indagine è stata effettuata una prima analisi dei dati osservando le variazioni di pressione registrate dalle singole stazioni in funzione dell'altezza di precipitazione locale ricavata dai dati pluviometrici riferiti alla stazione presente nei pressi di Vergato e scaricati dal sito web dell'A.R.P.A.

I sensori della stazione St1 hanno avuto un andamento simile in tutto il periodo di acquisizione. In particolare il sensore Ps1 (Z=30 cm) ha registrato una pressione dei pori con valori spesso intorno allo zero e solo occasionalmente picchi in corrispondenza dei più importanti eventi piovosi. Il sensore Ps2 (Z=70 cm) ha raggiunto l'equilibrio con il terreno in sito soltanto nel mese di luglio reagendo positivamente soltanto alle ultime precipitazioni.

Il sensore Ps3 (Z=100 cm) risente delle variazioni di pressione sin dalle prime variazioni anche se raggiunge la stabilità anch'esso nel periodo di luglio (Fig. 9).

Nella stazione St2 i sensori Ps4 (Z=40 cm) e Ps5 (Z=70 cm) hanno un comportamento pressoché analogo lungo tutta la serie di dati equilibrandosi con il terreno già nel mese di marzo.

I dati registrati dal sensore Ps6 (Z=100 cm) risultando eccessivamente elevati nei mesi di maggio e giugno indicano che lo stato di equilibrio non viene raggiunto prima della fine di luglio (Fig. 10).

Sono stati riscontrati dei problemi nella stazione St3 in quanto soltanto il sensore più superficiale Ps7 mostra una serie valori di attendibili, costanti intorno allo zero nel periodo estivo, e positivi in corrispondenza degli eventi a maggior altezza di precipitazione. Il Ps8 è stato invece escluso a causa del probabile malfunzionamento della membrana di silicio, si nota infatti che la curva caratterizzante l'andamento delle pressioni del suddetto sensore registra un'alternanza di valori di pressione uguale a 0 e -1,5 Volt. Il Ps10 infine evidenzia un comportamento anomalo nei mesi di settembre e ottobre mentre risponde alle precipitazioni nei mesi primaverili e invernali (Fig. 11). Allo stato attuale è difficile dire se tale sensore funziona correttamente o meno è necessaria una serie temporale più lunga per rispondere a questo quesito.

Si può concludere che la tavola d'acqua si trova di norma a profondità maggiori di 100 cm: il fatto che i

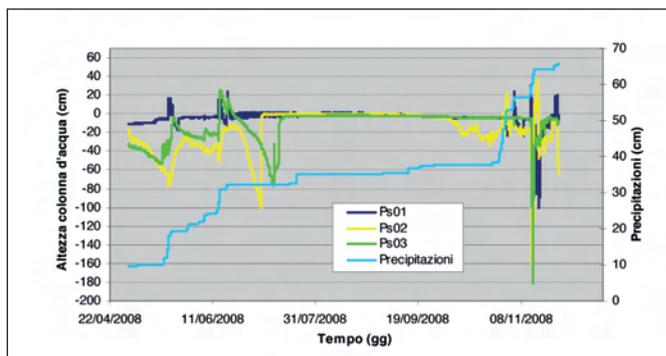


Figura 9 – Grafico dell'andamento complessivo dei sensori relativi alla stazione St1.

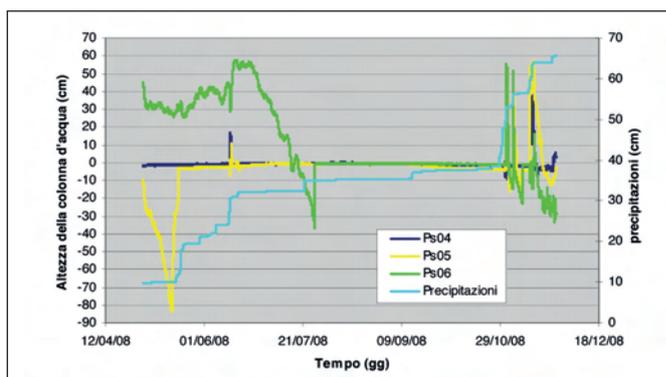


Figura 10 – Grafico dell'andamento complessivo dei sensori relativi alla stazione St2.

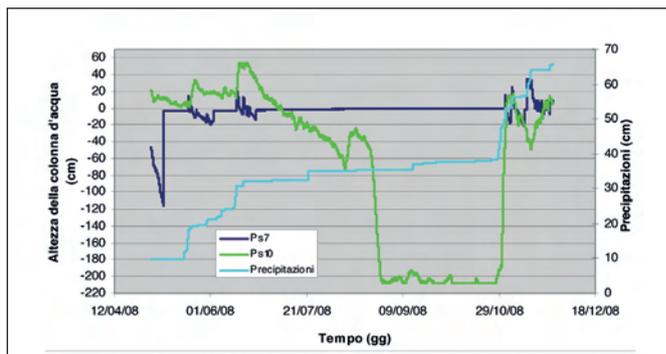


Figura 11 – Grafico dell'andamento complessivo dei sensori relativi alla stazione St3.

sensori rispondano quasi istantaneamente ad ogni singolo evento di precipitazione caratterizzanti le stagioni primaverili e invernali fa supporre che la falda in questi periodi si trovi a profondità non molto superiori al metro a differenza della stagione estiva nella quale i sensori non risentono mai dei cambiamenti di pressione dei pori dovuti agli eventi piovosi.

Dopo aver analizzato i dati nel loro andamento complessivo si è passati allo studio della risposta dei sensori ai singoli eventi di precipitazione. Quasi tutti i sensori rispondono chiaramente ai singoli eventi di precipitazione, mostrando un aumento positivo di pressione dei pori. Questo indica che il terreno si trova generalmente in condizioni di tensio-saturazione o vicino alla saturazione, e che la superficie di falda non è molto profonda

PRECIPITAZIONE					STAZIONE 1			STAZIONE 2			STAZIONE 3		
Evento	Data inizio	Data fine	Variazione (Hcm)	Intensità media (mm/hh)	Ps1	Ps2	Ps3	Ps4	Ps5	Ps6	Ps7	Ps8	Ps10
1	17/05/08 19.30	23/05/08 15.00	9,52	0,06	x		x				x	O	X
2	29/05/08 05.00	30/05/08 12.30	1,8	0,05							x	O	
3	02/06/08 12.30	08/06/08 11.00	2,84	0,05	?		x					O	
4	12/06/08 07.00	18/06/08 05.00	7,98	0,05	x	x	x	x	x	x	x	O	
5	02/07/08 17.30	02/07/08 18.30	0,3	0,3	x							O	
6	21/07/08 11.00	22/07/08 04.30	2,66	0,15								O	
7	01/09/08 14.30	01/09/08 19.00	0,16	0,03								O	
8	13/09/08 08.30	14/09/08 16.00	1,48	0,04								O	
9	24/10/08 22.30	25/10/08 03.30	0,44	0,08								O	
10	27/10/08 03.30	06/11/08 06.00	18	0,07	x	x	x	x	x	x	x	O	

Tabella 1 – Tabella di comparazione tra l'evento piovoso e la risposta dei sensori. x: il sensore ha risentito dell'evento; o: sensore guasto.

rispetto alla quota di indagine del sensore più profondo. Di seguito viene riportato uno schema riassuntivo generale che mette in relazione il fenomeno piovoso con l'effettiva risposta dei sensori (Tab. 1).

In generale si riscontra una notevole sensibilità degli strumenti a precipitazioni con altezza almeno pari a 2 cm. Si evince infatti dalla tabella riassuntiva che gli eventi con intensità e durata modeste vengono registrati solo saltuariamente dai sensori.

Il primo evento riconosciuto avviene tra i giorni 17/05/2008 e 23/05/2008 con un'altezza di precipitazione di 9,52 cm. Nella stazione St1 si registrano pressioni positive solo per il sensore superficiale Ps1; il sensore Ps3, anche se nel range delle pressioni negative, mostra un andamento caratteristico di una fase di saturazione, mentre il sensore Ps2 mostra variazioni che non sembrano attendibili. Gli andamenti dei sensori Ps2 e Ps3 non sono visibili in quanto hanno valori negativi.

I sensori della stazione St2 non risentono delle precipitazioni che caratterizzano l'evento 1: il Ps4 e Ps5 rimangono costanti intorno allo zero mentre il Ps6 è caratterizzato da oscillazioni non significative. I sensori Ps4 e Ps5 non sono visibili in quanto sono nel dominio delle pressioni negative.

Entrambi i sensori della stazione St3 rispondono positivamente all'evento, anche se si riscontra una risposta immediata del sensore più superficiale Ps7 ed una risposta tardiva del sensore più profondo Ps10 (Fig. 12).

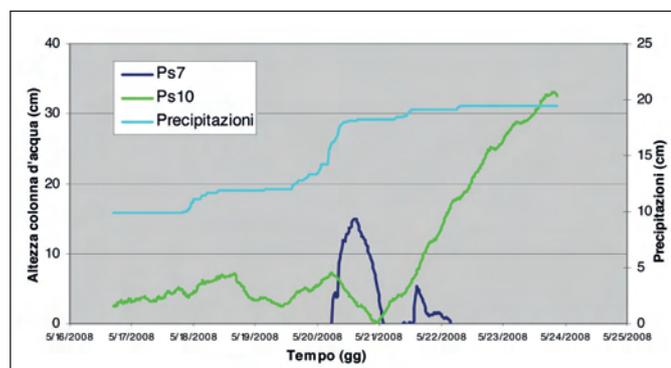


Figura 12 – Risposta dei sensori costituenti la stazione St3 all'evento n°1.

Nell'evento n°1 si riscontrano quindi risposte analoghe nella stazione St1 e St3: i sensori posti a profondità di 30 cm rispondono in modo veloce e chiaro, quelli più profondi in modo più lento e con un certo ritardo, quando i sensori più superficiali già mostrano una diminuzione della pressione dei pori. Questo tipo di comportamento è caratteristico della propagazione di un'onda di pressione dall'alto verso il basso e contrasta con l'ipotesi classica di saturazione del terreno dal basso per l'innalzamento di una falda sospesa nella coltre.

L'evento 4 si è verificato tra il 12/06/2008 e il 18/06/2008 con un'altezza di precipitazione di 7,98 cm ed è caratterizzato da due nette fasi impulsive.

Nella stazione St1 il sensore posto alla profondità di 30 cm risponde istantaneamente ad entrambe le fasi, mentre il sensore più profondo inizia a risentire delle variazioni di pressione solo in un secondo momento, quando il sensore superficiale Ps1 è già in fase di calo. Il sensore intermedio Ps2 invece, benché mostri un chiaro aumento della pressione dei pori, rimane nel dominio negativo e quindi non può essere considerato attendibile. Il sensore Ps2 non è visibile in quanto ha valori negativi.

I sensori della stazione St2 rispondono in maniera netta solo al primo impulso di precipitazione e solo il Ps5 risente del secondo impulso mostrando una piccola variazione positiva seguita da una registrazione negativa, tipica della fase di desaturazione e stabilizzandosi subito intorno allo zero.

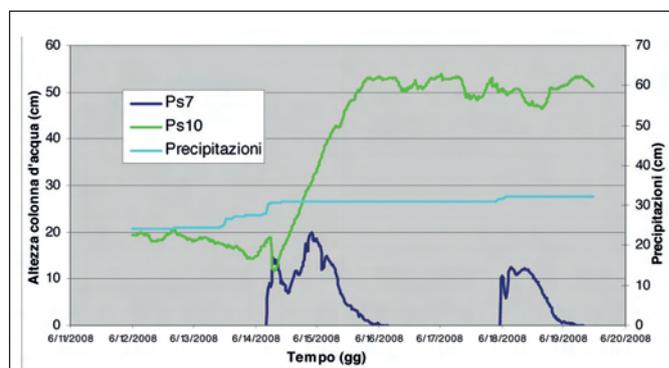


Figura 13 – Risposta dei sensori costituenti la stazione St3 all'evento n°4.

Osservando il comportamento del sensore più superficiale Ps4 si evidenzia un aumento della pressione dei pori: a questa risposta segue solo in secondo momento il sensore intermedio Ps5, mentre il sensore profondo Ps6 risponde con un brusco calo dell'andamento risalendo solo a precipitazione terminata.

La stazione ST3 risponde positivamente alle precipitazioni (Fig. 13) ed anche qui il sensore più superficiale (Ps7) risente prima delle variazioni di pressione dovute alle precipitazioni rispetto a quello più profondo (Ps10). In sintesi, anche l'evento 4, così come l'evento 1 descritto precedentemente, viene registrato immediatamente dai sensori più superficiali e solo in una seconda fase da quelli più profondi. Anche qui si assiste quindi alla propagazione di un'onda di pressione che va dagli strati più superficiali a quelli più profondi.

L'ultimo evento che ha prodotto risposte chiare nei sensori è avvenuto nel periodo tra il 28/10/08 ed il 26/11/08. L'altezza totale di precipitazione è di 27,78 cm e l'evento è caratterizzato da 4 fasi impulsive, delimitate nei grafici all'interno di aree distinte.

I sensori della St1 non risentono allo stesso modo delle precipitazioni: il Ps1 è l'unico che risponde ad ogni impulso di precipitazione, mentre il Ps2 ed il Ps3 rispondono solo in parte. Durante il primo impulso (Fig. 14 [1° impulso]) il Ps1 ed il Ps2 mostrano una risposta istantanea, mentre il Ps3 rimane costante con valori intorno allo zero. Del secondo impulso (Fig. 14 [2° impulso]) ne risente solo il Ps1. Anche durante il terzo impulso (Fig. 14 [3° impulso]) il Ps1 ha una risposta positiva immediata mentre il Ps2 ed il Ps3 registrano dati negativi per poi avere una risposta positiva mentre il Ps1 è già in fase calante.

L'ultimo impulso di pioggia (Fig. 14 [4° impulso]) viene registrato solo dal Ps1, che anche in questo caso risente positivamente delle precipitazioni mentre i due sensori più profondi mostrano un brusco calo della pressione.

Da questi dati sembra evidente un meccanismo di flusso per propagazione dall'alto verso il basso come riconosciuto per gli eventi precedenti.

La stazione ST2 risente in modo evidente di questo evento di precipitazione, con risposte molto accentuate di tutti e tre i sensori.

Il primo impulso fa registrare dati positivi ai sensori, ma in questo caso sono il Ps5 ed il Ps6 che per primi risen-

tono delle precipitazioni e solo in un secondo momento il sensore superficiale Ps4 registra una risposta positiva. Anche durante il secondo impulso i sensori hanno lo stesso comportamento, con una prima risposta del Ps6 e del Ps5 e solo in seguito del Ps4.

Durante il terzo impulso di pioggia si osserva invece una risposta positiva ed immediata del Ps4 e del Ps5 e solo tardivamente del sensore più profondo Ps6.

Nell'ultimo impulso di precipitazione il sensore più superficiale ha una risposta immediata, mentre il Ps5 comincia a rispondere in un secondo momento, il Ps6 invece registra dati negativi.

In questo evento la verticale St2 sembra mostrare due comportamenti diversi: in un primo momento le registrazioni fanno supporre ad una saturazione dal basso verso l'alto ed in un secondo un comportamento contrario con una saturazione dall'alto verso il basso, analoga a quella vista finora.

Nella ST3 i due sensori registrano entrambi tutti i singoli impulsi di pioggia.

In ogni caso si osserva una prima risposta del sensore più superficiale Ps7 ed una risposta più tardiva del sensore profondo Ps10.

Come nei casi precedenti questo comportamento sembra indicare una saturazione del terreno dall'alto verso il basso con una risposta del Ps10 che avviene soltanto durante la fase discendente del Ps7.

Gli eventi n° 5, 6, 7, 8, 9, avvenuti durante la stagione estiva, sono caratterizzati da intensità elevate, ovvero con altezze di precipitazione modeste di breve durata.

Il terreno prossimo alla superficie si trova in questo periodo in condizioni secche e per questo motivo i sensori non hanno reagito in maniera chiara a nessun evento di precipitazione (Fig. 15).

Da questa prima analisi, anche se i dati acquisiti non sono molti e le risposte dei sensori sono complesse e fortemente variabili, è possibile comunque trarre alcune interessanti indicazioni sul flusso che caratterizza la coltre argillosa monitorata:

- lungo tutto il versante la falda si trova generalmente al di sotto dei sensori (0,9 - 1 m);
- la maggior parte dei sensori risponde in maniera quasi istantanea ai singoli eventi di precipitazione (questo indica che il terreno è di norma vicino alle condizioni di saturazione o tensio-saturazione);
- l'aumento della pressione dei pori in seguito ai singoli

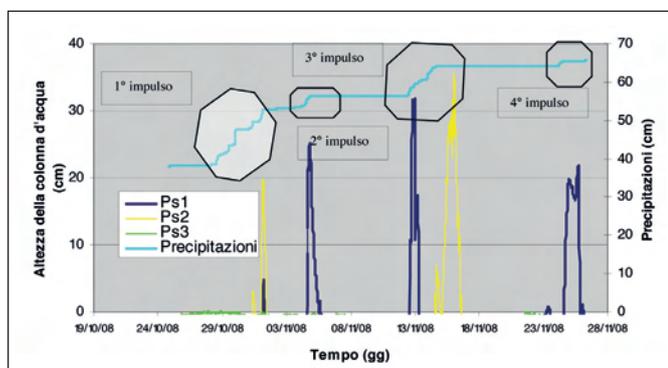


Figura 14 – Risposta dei sensori costituenti la stazione St1 all'evento n°10.

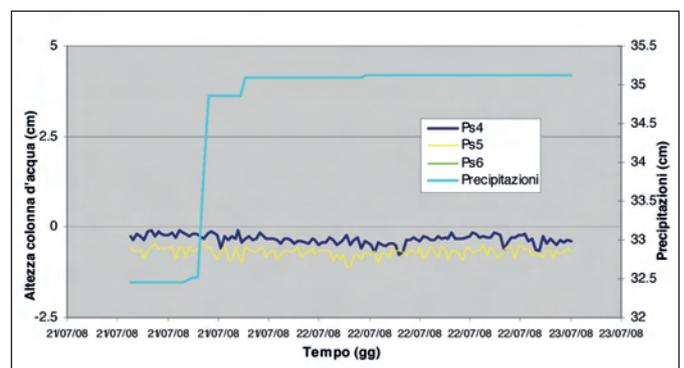


Figura 15 – Risposta dei sensori della St2 durante una precipitazione estiva.

eventi piovosi sembra causato dall'infiltrazione d'acqua nel terreno che crea un'onda di pressione che si propaga dall'alto verso il basso;

- non sono evidenti accumuli d'acqua di falda da monte verso valle in tutte le stagioni;
- l'effettivo meccanismo di flusso risulta molto complesso in quanto il terreno presenta eterogeneità quali discontinuità e fratture da essiccamento, che fungono da macropori e condizionano il flusso sub-superficiale. Ad esempio, durante il periodo estivo, l'acqua infiltrandosi in queste vie preferenziali viene portata direttamente in profondità, determinando una risposta più rapida dei sensori più profondi.

7. ANALISI DI FILTRAZIONE CON MOTO NON PARALLELO AL VERSANTE

I dati raccolti in campagna indicano una falda generalmente posizionata al di sotto di un metro anche nelle due stagioni piovose: quella primaverile e quella invernale. I dati sperimentali rivelano però che il terreno si trova sempre in condizioni di saturazione o tensio-saturazione in quanto i sensori rispondono di norma istantaneamente all'evento piovoso.

Gli studi effettuati nella tesi del collega Dott. Cumoli (Cumoli, 2009) si basano sullo studio del comportamento del terreno registrato da tale sistema di monitoraggio mediante l'applicazione di due modelli: uno analitico (il modello di Shalstab) e uno numerico (implementato nel software SEEP/W, Geostudio International) supponendo un moto di filtrazione parallelo al pendio.

I risultati dell'analisi mostrano che la falda si dovrebbe trovare in prossimità del piano campagna per valori di permeabilità di 1×10^{-5} m/s; 1×10^{-6} m/s; 1×10^{-7} m/s. Solo per valori di permeabilità di 1×10^{-4} m/s essa rimane al di sotto del metro, come indicano i dati di monitoraggio.

L'ipotesi di una permeabilità così elevata non può essere ritenuta plausibile in quanto la coltre analizzata è un'argilla limosa che, secondo le misure effettuate in campagna col permeametro di Guelph, ha una permeabilità inferiore a quella ipotizzata di almeno due ordini di grandezza. In linea teorica, è possibile che la permeabilità della coltre sia maggiore di quella misurata a causa della presenza di fessure e macropori, un valore di 1×10^{-4} m/s appare però decisamente troppo elevato, specie se riferito ad un metro di terreno di coltre, e probabilmente non è accettabile. Si è ritenuto opportuno quindi ricercare la principale causa di discordanza tra il dato teorico e quello reale non in un'anomala permeabilità della coltre, ma bensì nella presenza di un bedrock non perfettamente impermeabile. La presenza di micropori e fessurazioni, rendendo permeabile il bedrock, potrebbe infatti influenzare il moto di filtrazione all'interno della coltre; questo, non essendo più parallelo al versante ma convergente verso il substrato, provocherebbe una diminuzione di pressione interstiziale ed un allontanamento dell'acqua dalla coltre superficiale.

L'analisi del moto di filtrazione all'interno della coltre superficiale è stata effettuata sempre in via numerica utilizzando il software SEEP/W geostudio 2004.

La sezione utilizzata per effettuare l'analisi è riportata in figura 16.

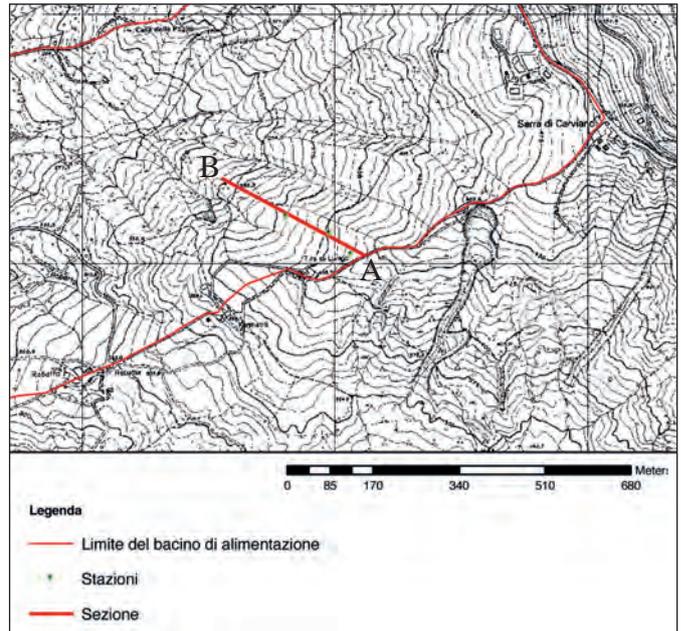


Fig. 16 – Sezione utilizzata nell'analisi numerica.

Le condizioni al contorno usate nel software SEEP/W per determinare la filtrazione all'interno della coltre sono:

- Spessore della coltre di 3 metri;
- Precipitazione pari a $1,38 \times 10^{-8}$ m/s in superficie;
- Pressione dell'acqua nulla al piede del tratto di versante analizzato (giustificata dalla presenza di una brusca scarpata che con ogni probabilità interrompe la continuità della coltre);
- Conduttività idraulica satura pari a 1×10^{-7} m/s, valore ritenuto tipico per i terreni in esame.

In una prima analisi si è cercato di applicare un valore di flusso unitario verso il bedrock omogeneo per tutta la sezione. I risultati ottenuti con tale condizione al contorno sono però apparsi di difficile interpretazione in quanto la posizione della falda variava in modo molto disomogeneo all'interno del versante.

Le numerose variazioni di pendenza e la particolare geometria della coltre, hanno fatto supporre che per rappresentare correttamente il comportamento del versante bisogna analizzare separatamente le tre sezioni corrispondenti alle 3 verticali di monitoraggio.

SEZIONE 1

La sezione 1 comprende la porzione di coltre a monte nella quale è stata posizionata la stazione St1.

Per analizzare questo settore di versante bisogna innanzitutto considerare che, trovandoci vicino al crinale, l'area che contribuisce all'accumulo d'acqua sulla verticale St1 è poco estesa. Un altro elemento fondamentale è la pendenza del pendio che è abbastanza elevata già nei primi metri di sezione.

Con l'applicazione alla base della sezione di un flusso in uscita pari a $-1,04 \times 10^{-8}$ m/s si può osservare dalla figura 17 che nella coltre si genera un moto con direzione parzialmente rivolta verso il substrato (direzione dei vettori).

Sulla verticale della stazione St1 la falda è posizionata a circa un metro dal piano campagna (Fig. 17).

Per comprendere meglio la distribuzione della pressione dell'acqua nell'intorno della stazione St1 si può osservare il grafico altezza geometrica-altezza di pressione in figura 18.

Da questo grafico si nota che nel primo metro di coltre, ovvero nella porzione indagata dai sensori, la pressione è nulla o negativa. Il terreno è comunque prossimo alla tavola d'acqua ed è saturo per capillarità.

In queste condizioni il terreno risponderrebbe in modo molto veloce ad un evento di precipitazione, come effettivamente visto nei dati di monitoraggio.

SEZIONE 2

La sezione 2 comprende la porzione centrale del versante nella quale è stata installata la stazione St2.

Questo settore di versante ha una pendenza meno acclive della precedente, ma essendo più a valle, ha un'area contribuente ovviamente maggiore e ciò comporta un maggior accumulo d'acqua.

In questa porzione di pendio è stato imposto alla base un flusso in uscita di $-1,346 \times 10^{-8}$ m/s e, come nel caso precedente, si genera un moto di filtrazione parzialmente rivolto verso il substrato. In questo caso però il flusso è più inclinato ed ha una velocità molto minore.

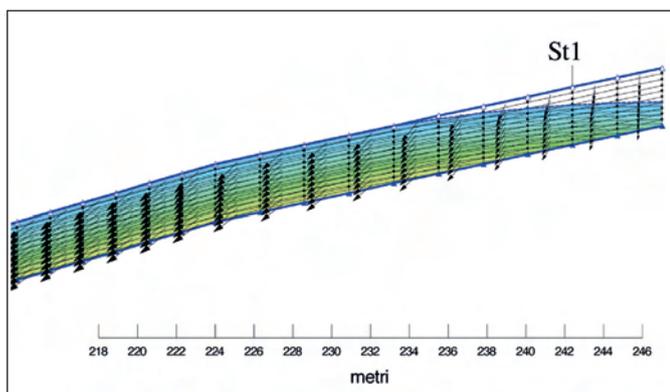


Figura 17 – Sezione 1: i vettori indicano direzione e velocità del flusso.

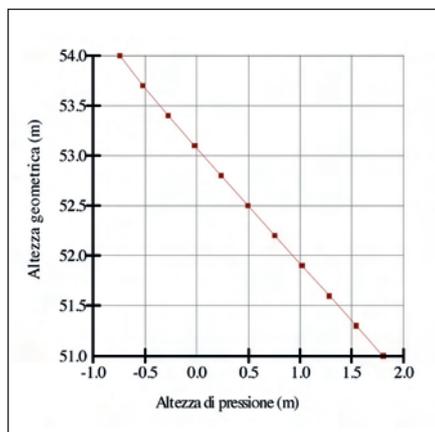


Figura 18 – Rapporto tra lo spessore e l'altezza di pressione lungo la verticale della stazione St1.

Dall'analisi del grafico corrispondente si può dedurre che il terreno si trova in condizioni idrauliche analoghe alla sezione 1. Nel primo metro di coltre le altezze di pressione vanno da nulle a negative, mentre nei successivi due metri le pressioni aumentano passando da nulle a positive, ma seguendo una distribuzione non idrostatica.

Un terreno in queste condizioni idrauliche, tende a reagire velocemente agli eventi piovosi, facendo registrare pressioni positive nel primo metro di spessore esclusivamente durante la precipitazione.

SEZIONE 3

Questa sezione interessa la parte più a valle della coltre indagata ed è caratterizzata dalla presenza della stazione St3.

La pendenza in questa ultima porzione torna ad essere più alta, ma in questa zona l'area che contribuisce ad alimentare la falda è rappresentata da tutto il versante indagato.

In questa porzione è stato inizialmente imposto alla base del bedrock un valore di flusso in uscita pari a $-1,3702 \times 10^{-8}$ m/s, ottenendo una direzione del flusso pseudo-verticale senza accumulo d'acqua nei 3 metri di coltre (Fig. 19).

La distribuzione della pressione interstiziale nell'intorno della stazione St3 è descritta in figura 20. Da questa

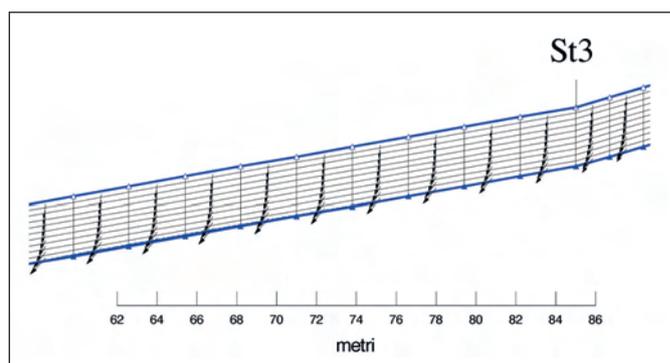


Figura 19 – Sezione 3: flusso in uscita pari a $-1,3702 \times 10^{-8}$ m/s; i vettori indicano direzione e velocità del flusso.

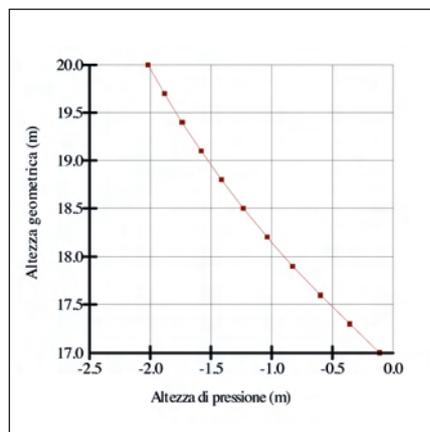


Figura 20 – Rapporto tra lo spessore e l'altezza di pressione lungo la verticale della stazione St3 con flusso in uscita dal bedrock pari a $-1,3702 \times 10^{-8}$ m/s.

curva si nota che le pressioni sono negative in tutta la coltre, il terreno non è quindi in condizioni di tensio-saturazione come descritto dai dati sperimentali.

Allo scopo di ottenere un versante saturo caratterizzato da pressioni interstiziali analoghe ai dati di monitoraggio sembrerebbe opportuno diminuire il valore di flusso in uscita del bedrock.

Variando però di un'unità l'ultimo decimale, imponendo quindi come valore $-1,3701 \times 10^{-8}$ m/s si ottengono dei risultati diametralmente opposti.

Si è riscontrato che la falda è a piano campagna e la distribuzione della pressione è pressoché idrostatica.

Dai risultati ottenuti nella modellazione della sezione 3 non si riesce quindi a rappresentare la distribuzione delle pressioni registrata durante il monitoraggio e tale incongruenza è dovuta probabilmente ad una instabilità del modello numerico legata alla natura stazionaria dell'analisi, dove differenze minime di flusso in entrata e uscita causano variazioni notevoli nella distribuzione delle pressioni dei pori.

Per ovviare a questo problema è stata considerata una differente condizione al contorno alla base della coltre. Si è infatti tentato di riprodurre la perdita all'interno del substrato facendola calcolare direttamente al modello. È stato quindi aggiunto, in tutto il modello, uno strato di spessore 10 m, a permeabilità inferiore rispetto alla coltre sovrastante in maniera tale da poter simulare la presenza di un bedrock (Fig. 21). Come condizione al contorno è stato necessario imporre alla base di tale strato una altezza di pressione nulla, al fine di riuscire a calcolare la distribuzione della pressione interstiziale allo stato stazionario.

Assegnando al substrato una permeabilità di 1×10^{-10} m/s si può notare come si generi un moto di flusso solo nella coltre superficiale ed esso sia parallelo al pendio (Fig. 22). Si ritrovano quindi le condizioni idrauliche osservate nel lavoro di tesi svolto dal collega Dott. Cumoli (Cumoli, 2009), ovvero il substrato si comporta da strato impermeabile.

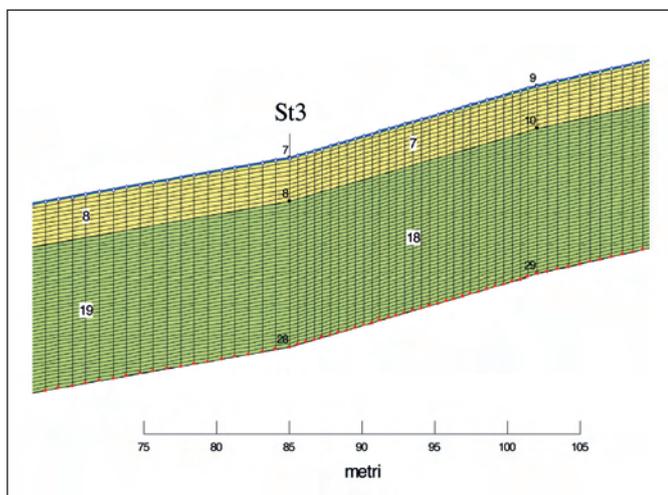


Figura 21 – Sezione 3: coltre superficiale (colore giallo) e bedrock (colore verde), la linea rossa indica la condizione al contorno di altezza di pressione nulla, la linea blu indica il flusso in entrata (precipitazione).

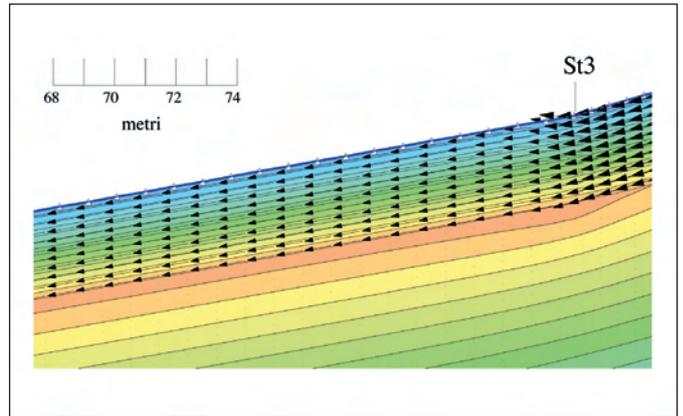


Figura 22 – Sezione 3: coltre superficiale e presenza bedrock con permeabilità pari a $1,25 \times 10^{-10}$ m/s; i vettori indicano direzione e velocità del flusso.

La distribuzione della pressione interstiziale nella coltre è prossima a quella idrostatica.

Assegnando al substrato un valore di permeabilità pari a $1,25 \times 10^{-9}$ m/s si osserva una debole variazione della direzione dei vettori di flusso. Il moto è ora parzialmente diretto verso il substrato a causa di una minima infiltrazione di acqua all'interno del bedrock (Fig. 23).

La distribuzione della pressione interstiziale anche in questo caso è pressoché idrostatica.

Se al substrato si assegna un valore di permeabilità di $1,25 \times 10^{-8}$ m/s si osserva che la falda non si trova più a piano campagna, come nei due casi precedenti, ma è situata a circa 1 m da esso. Il moto di flusso è pseudo-verticale a causa di una più importante infiltrazione di acqua nel substrato (Fig. 24).

Dalla figura 25 si nota che la distribuzione della pressione interstiziale nell'intorno della stazione St3 indica che il terreno in questa situazione si trova in condizioni di tensio-saturazione come riscontrato nei dati sperimentali.

Se si osservano i risultati di queste analisi lungo l'in-

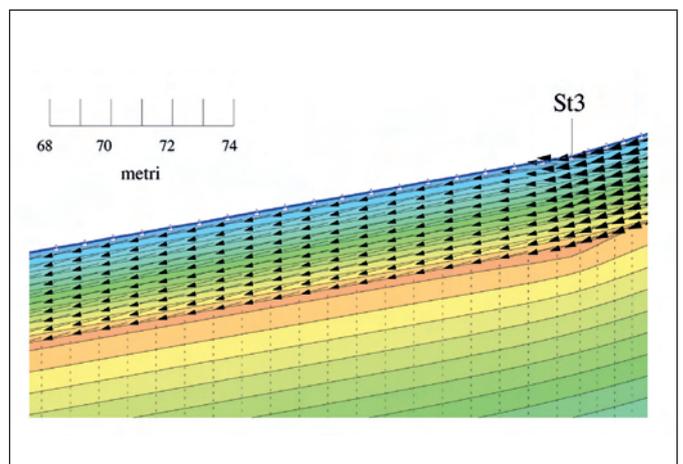


Fig. 23 – Sezione 3: coltre superficiale e presenza bedrock con permeabilità pari a $1,25 \times 10^{-9}$ m/s; i vettori indicano direzione e velocità del flusso. Si notano dei piccoli vettori nel substrato che indicano la minima filtrazione all'interno del bedrock.

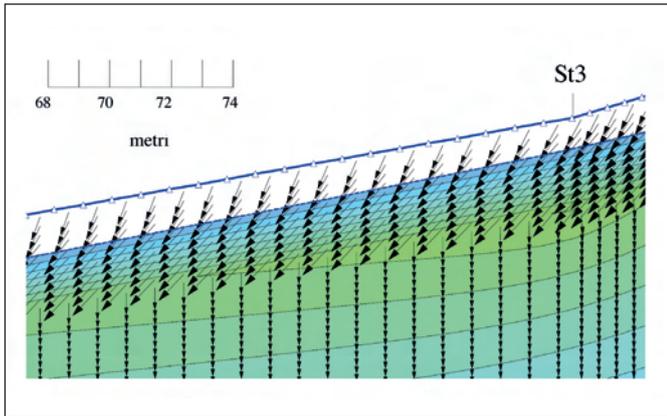


Fig. 24 – Sezione 3: coltre superficiale e presenza bedrock con permeabilità pari a $1,25 \times 10^{-10}$ m/s; i vettori indicano direzione e velocità del flusso. La falda è posizionata a circa 1 metro dal piano campagna.

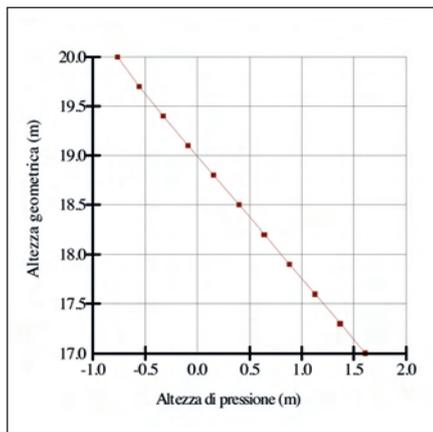


Fig. 25 – Rapporto tra lo spessore e l'altezza di pressione lungo la verticale della stazione St3.

tero versante si nota che i dati teorici corrispondono a quelli sperimentali anche lungo le verticali delle stazioni St1 e St2 (Fig. 26).

Questa analisi è stata effettuata per diversi spessori del substrato (20 m, 40 m, 60 m). Anche in queste simulazioni il valore di pressione interstiziale non varia dal caso appena descritto a dimostrazione che questo parametro non ha una significativa influenza sul risultato.

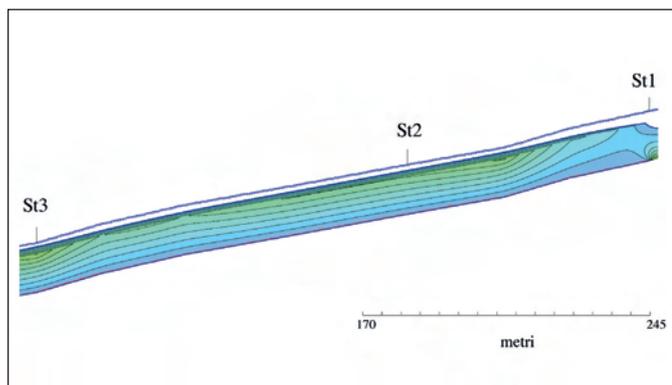


Figura 26 – Sezione intera con bedrock caratterizzato da una permeabilità pari a $1,25 \times 10^{-10}$ m/s. La falda è posizionata a circa 1 metro dal piano campagna in tutte le stazioni.

8. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto in questa tesi è stato centrato sullo studio delle caratteristiche idrauliche di una coltre superficiale in un bacino situato nell'Appennino Emilian-Romagnolo nei pressi di Vergato (BO).

Dopo un accurato studio geomorfologico volto all'individuazione di un versante ideale per tale progetto e allo studio dell'evoluzione dei dissesti presenti in tale area si è passati all'installazione di un sistema di monitoraggio.

Il monitoraggio ha avuto la durata di circa 8 mesi durante i quali è stata necessaria un'accurata manutenzione, lo scopo di tale installazione è stato quello di registrare la variazione del livello e del moto di filtrazione di falda mediante l'interpretazione dei dati di pressione interstiziale misurati dai sensori.

I dati raccolti hanno mostrato che la falda presente nella coltre non è caratterizzata da un accumulo d'acqua da monte verso valle o, se questo fenomeno esiste, la falda rimane al di sotto del metro indagato. Il terreno si trova comunque sempre in condizioni di saturazione o tensio-saturazione in quanto i sensori rispondono in maniera rapida agli eventi piovosi.

Dagli studi del collega Dott. Cumoli che ha analizzato il comportamento idrologico ipotizzando un flusso parallelo al pendio si è evinto che affinché i dati sperimentali corrispondessero a quelli teorici, il terreno avrebbe dovuto avere una permeabilità di 1×10^{-4} m/s.

L'ipotesi di una permeabilità così elevata non è stata ritenuta plausibile e si è quindi ritenuto opportuno considerare la presenza di un substrato parzialmente permeabile che giustificasse l'assenza di accumulo d'acqua verso valle.

Dall'analisi idrologica in condizioni di moto non parallelo al pendio effettuata mediante software SEEP/W è stato riscontrato che assegnando al substrato una filtrazione dell'ordine di 1×10^{-8} m/s il terreno ha un comportamento idraulico analogo a quello registrato in campagna.

9. BIBLIOGRAFIA

Per la bibliografia si rimanda alla Tesi "Analisi sperimentale del comportamento idrologico di un versante argilloso instabile: interpretazione con flusso non parallelo al versante" (Masini, 2009).

10. RINGRAZIAMENTI

Desidero fortemente ringraziare il Prof. Matteo Berti (Università degli Studi di Bologna) e il mio collega di tesi il Dott. Enrico Cumoli che ha partecipato allo sviluppo di questo lavoro sviluppandone gli elementi citati nel testo.