



# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – DICEA**

*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Geotecnica*

## **EFFETTO DELLE PRECIPITAZIONI SULLE VELOCITÀ DI MOVIMENTO DEL SETTORE DI PIAN DE CICE - FRANA DEL TESSINA**

Effect of rainfall on the displacement rate of the sector Pian de Cice - Tessina landslide

***Relatore: Prof. Simonetta Cola***

***Laureando: Andrea Rampazzo  
matr. 1033718***

**ANNO ACCADEMICO 2013/2014**

**PREMESSA***Capitolo 1*

<b>1. ASPETTI GENERALI DELLE FRANE</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introduzione alle frane</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Fattori che influenzano le frane</b>	<b>1</b>
1.2.1 Fattori naturali	2
1.2.3 Fattori dovuti all'attività umana	4
<b>1.3 Tipi di movimento franoso</b>	<b>5</b>
1.3.1 Classificazione delle colate	8
1.3.2 Terminologia impiegata nei movimenti di massa	10

*Capitolo 2*

<b>2. LA FRANA DEL TESSINA</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Inquadramento territoriale</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Generalità del fenomeno franoso</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Cenni storici</b>	<b>24</b>
<b>2.4 Interventi effettuati</b>	<b>28</b>
<b>2.5 Sistemi di monitoraggio</b>	<b>32</b>
2.5.1 Tipologie strumentali per il monitoraggio	33
2.5.2 Il monitoraggio della frana del Tessina	34
2.5.3 Sistemi di monitoraggio automatico	34
2.5.4 Sistemi di monitoraggio manuale	37
<b>2.6 Il sistema di monitoraggio fotogrammetrico</b>	<b>40</b>

*Capitolo 3*

<b>3. IL SETTORE PIAN DE CICE</b>	<b>44</b>
<b>3.1 Il monitoraggio del settore Pian de Cice</b>	<b>45</b>
3.1.1 Sistemi di monitoraggio del 1997 - '98	45
3.1.2 Il nuovo sistema di monitoraggio del giugno 2012	48
<b>3.2 Raccolta, elaborazione e pulizia dei dati</b>	<b>51</b>
3.2.1 Misure inclinometriche	52
3.2.2 Misure pluviometriche	54
3.2.3 Misure piezometriche	55
<b>3.2 Prima analisi delle relazioni tra falda - piovosità - velocità di movimento</b>	<b>56</b>

*Capitolo 4*

<b>4. MODELLI PER LA PREVISIONE DEL MOVIMENTO FRANOSO</b>	<b>66</b>
<b>4.1 Introduzione ai modelli</b>	<b>66</b>

4.1.1 Prove triassiali e comportamento a creep del terreno	74
4.1.2 Modello reologico di Bingham	79
<b>4.2 Modelli misti per la ricerca della correlazione tra i valori monitorati e il comportamento evolutivo di un evento franoso</b>	<b>81</b>
4.2.1 Deformazioni plastiche e viscosi a taglio – Caterina Di Maio	82
4.2.1.1 Il modello viscoso di Van Asch e Van Genuchten	83
4.2.1.2 Resistenza al taglio e comportamento di creep	84
4.2.2 Modello visco-plastico per l'analisi delle frane applicato ad una colata di fango – Maceo-Giovanni Angeli	92
4.2.3 Previsione degli spostamenti profondi e delle velocità dalla variazione di livello di falda – Jordi Corominas	101
4.2.3.1 Il modello viscoso basato sulla legge potenziale di Vulliet e Hutter	110

*Capitolo 5*

<b>5. APPLICAZIONE DEL MODELLO MISTO AL CASO PIAN DE CICE</b>	<b>115</b>
<b>5.1 Modello viscoso di Bingham</b>	<b>115</b>
5.1.1 Correlazione precipitazioni – falda – viscosità	116
5.1.2 Caratterizzazione del comportamento viscoso per periodi significativi di falda	122
<b>5.2 Modello viscoso di Vulliet e Hutter</b>	<b>127</b>
3.2.1 Correlazione precipitazioni – falda – viscosità	129

*Capitolo 6*

<b>6. ANALISI BIDIMENSIONALE DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO CON MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI</b>	<b>134</b>
<b>6.1 Cenni teorici sui moti di filtrazione nei terreni</b>	<b>135</b>
<b>6.2 Descrizione del modello ad elementi finiti</b>	<b>137</b>
6.2.1 Scelta dei parametri geotecnici e delle condizioni al contorno mediante calibrazione in regime stazionario	139
<b>6.3 Analisi del regime di filtrazione in condizioni di precipitazione piovosa</b>	<b>146</b>

<b>CONCLUSIONI</b>	<b>151</b>
--------------------	------------

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>154</b>
---------------------	------------

---

## PREMESSA

---

La Frana del Tessina è una frana di tipo complesso attiva dall'autunno del 1960 nella zona Alpago (Belluno, Italia). L'evoluzione della frana è tipico di formazioni terziarie a Flysch, caratterizzate da alcuni movimenti franosi roto-traslazionali di medie-grandi dimensioni, che si verificano periodicamente nella zona di origine, e che successivamente, si trasformano in colate di fango, portando a condizioni di rischio i centri abitati di Funes e Lamosano situati a valle.

Si definisce Flysch un'alternanza di terreni litologicamente differenti, formata da strati lapidei con comportamento fragile in cui si intercalano terreni a comportamento prevalentemente duttile e viscoso (argille, siltiti, marne, ed arenarie). Si tratta di materiali eterogenei ed anisotropi con strutture che ne condizionano il comportamento meccanico anche nei confronti dei dissesti.

Il presente lavoro di tesi si pone all'interno di una lunga attività di studio e monitoraggio della frana, la quale, negli ultimi decenni è stata intensamente studiata e monitorata dall'Università di Padova mediante diverse tecniche di monitoraggio e modellazione fisico-matematiche con l'obiettivo di comprendere i meccanismi di evoluzione e l'adozione di una strategia di mitigazione per la riduzione del rischio.

Nel Settembre 2012 è stato installato, nella zona denominata Pian de Cice in sinistra orografica, un inclinometro e piezometro all'interno di un foro di sondaggio preesistente che ha permesso di raccogliere i dati orari di spostamento e livello di falda.

L'obbiettivo principale di questo elaborato è quello di ricercare la presenza di correlazioni tra gli spostamenti della frana e le precipitazioni registrate dalla vicina stazione meteorologica di Roncadin, a partire dalle informazioni ottenute dai sistemi di monitoraggio sopraccitati mediante l'analisi qualitativa degli andamenti dei dati e l'uso di modelli misti applicati.

Nel primo capitolo della tesi si descrivono gli aspetti generali riguardanti un movimento franoso ad introduzione del caso particolare della Frana del Tessina, evidenziandone le possibili cause di innesto e movimentazione. Inoltre si svolge un inquadramento della frana in esame all'interno della regione Veneto, con una breve descrizione dei principali movimenti franosi esistenti descrivendone le caratteristiche che accumulano o differenziano la Frana del Tessina ad altri casi citati.

Il secondo capitolo si apre con un inquadramento territoriale della Frana del Tessina nella valle dell'Alpago (Belluno), descrivendone l'ambiente circostante e gli abitati che principalmente sono stati interessati dall'evento franoso (Funes e Lamosano). Si riporta quindi una storia

---

dell'evoluzione della frana a partire dall'autunno 1960, momento in cui avviene il primo distacco. Vengono illustrate le caratteristiche geomorfologiche principali e gli interventi eseguiti sia a scopo di stabilizzazione che di monitoraggio. Grazie a tali informazioni è possibile comprendere la particolarità e la grandezza di tale fenomeno franoso ed avere un quadro completo della sua evoluzione nel tempo. Segue una descrizione del monitoraggio attuato in questi anni, trattandone le caratteristiche principali ed i parametri considerati. In particolare si espongono i sistemi e gli strumenti utilizzati nella frana del Tessina durante gli anni di studio fino al giorno d'oggi ove continua ad essere presente e attivo un sistema di monitoraggio fotogrammetrico, evidenziando i risultati e le informazioni raccolte.

La zona di Pian de Cice situata nel settore orientale della frana tra quota 900 e 1100 m s.l.m. ricopre un ruolo fondamentale nell'evoluzione della frana del Tessina in quanto, grazie ai numerosi studi svolti negli anni, sono stati rilevati spostamenti considerevoli negli ultimi 10 anni. L'eventuale collasso di questo sperone roccioso potrebbe comportare la mobilitazione di importanti settori dell'accumulo superiore che comporterebbe un notevole aggravio delle condizioni di rischio per gli abitati di Funes e Lamosano. Data l'importanza delle dimensioni, e i danni che un'eventuale distacco provocherebbe, l'area è stata oggetto di numerosi studi ed attività di monitoraggio. Il terzo capitolo è interamente dedicato a tale settore della frana, trattando inizialmente il sistema di monitoraggio installato negli anni fino all'ultimo del giugno 2012, esponendone le caratteristiche e i dati raccolti fino allo scorso marzo 2014.

Tali dati vengono qui discussi e analizzati fino ad una interpretazione delle correlazioni esistenti in particolare tra misure inclinometriche, misure piezometriche e misure pluviometriche. A fronte dei risultati ottenuti in questo capitolo è possibile fare alcune osservazioni sia sul sistema di monitoraggio inclinometrico piezometrico, sia sulle variabili che influenzano la nascita di spostamenti profondi e superficiali in riferimento al settore di Pian de Cice: dopo aver illustrato il metodo di filtraggio dei dati utili per lo studio del comportamento franoso del settore si esegue una analisi qualitativa delle relazioni tra i parametri monitorati.

Una volta raccolti i dati e filtrati, si intende proseguire lo studio dell'effetto delle precipitazioni sul movimento del settore Pian de Cice mediante dei modelli misti per la ricerca della correlazione tra i valori monitorati e l'evoluzione di un evento franoso con comportamento viscoso. Nel quarto capitolo vengono illustrati i modelli utilizzati, basati sul modello viscoso di Bingham e il modello potenziale di Vulliet e Kutter. Si riporta una loro applicazione pratica sintetizzando alcuni articoli riguardanti l'utilizzo di tali modelli da diversi autori in casi reali di movimenti franosi a comportamento viscoso di creep.

---

Nel quinto capitolo si esegue la vera e propria applicazione dei dati raccolti in fase di monitoraggio inseriti nei modelli misti precedentemente illustrati, esponendone la bontà dei risultati ottenuti o in caso contrario la non applicabilità di tali modelli al caso in esame.

Si esegue infine una analisi di filtrazione mediante codice di calcolo agli elementi finiti, in grado di simulare il comportamento della falda nel caso di un evento piovoso localizzato. In questo modo sarà possibile evidenziare il comportamento già risultante dai modelli misti, ipotizzando una serie di parametri geotecnici del terreno in base a delle condizioni al contorno note.

Si conclude esponendo le osservazioni raccolte nei capitoli precedenti, grazie alle quali si può trarre una conclusione sui possibili modelli applicabili al settore Pian de Cice per la previsione futura del comportamento di tale settore per effetto delle precipitazioni.

# 1. ASPETTI GENERALI DELLE FRANE

---

## 1.1 Introduzione alle frane

Un fenomeno franoso è costituito da un movimento del terreno o caduta di materiale roccioso o sciolto dovuti alla rottura dell'equilibrio statico preesistente causato da forze gravitazionali che, agendo su di esso, supera le forze opposte di coesione del terreno. Le modalità con cui le forze gravitazionali agiscono dipendono da fattori geologici, topografici, ideologici, climatici e dall'azione dell'uomo.

Le frane rappresentano significativi esempi del dissesto idrogeologico e del degrado ambientale che interessano ampie superfici del territorio italiano e mondiale e sono fonte di rischio per l'incolumità dell'uomo, delle opere e infrastrutture. Per poter realizzare una protezione efficace contro questi disastri, quando è possibile, è necessario avere una completa conoscenza delle cause che li producono ed essere in grado di effettuare una previsione delle conseguenze che essi scatenano.

Il termine frana, è del tutto generale, poiché comprende una grande quantità di fenomeni, dagli scivolamenti lenti con velocità di centimetri all'anno fino a distacchi catastrofici ad altissime velocità. Le cause di questi fenomeni possono essere dovute alla variazione delle tensioni efficaci prodotte da carichi esterni o a variazioni delle pressioni interstiziali, a variazioni delle proprietà dei materiali o a cambiamenti di geometria del versante.

Vi sono molteplici variabili che influenzano il comportamento di una frana, si citano per esempio la variabilità delle proprietà meccaniche dei terreni, la complessità dello stato idraulico e di filtrazione sotterraneo, gli eventi esterni quali piovosità e sovraccarichi accidentali. Per ognuno di questi fattori è difficile avere una conoscenza completa ed adeguata per la modellazione teoria del comportamento di un corpo franoso senza ricorrere ad ipotesi ed assunzioni proprie di chi studia il fenomeno. Infine ogni frana presenta singolarità uniche che rendono difficile trovare un modello unico per ogni tipo di evento franoso.

## 1.2 Fattori che influenzano le frane

Ci sono una grande quantità di fattori che possono favorire l'apparizione di una frana con il conseguente impatto che può produrre. La probabilità che si scateni un movimento è maggiore quanto maggiore sarà il numero di fattori che operano simultaneamente.

La classificazione dei fattori che influiscono su questi fenomeni si può realizzare attenendosi a diversi criteri:

- secondo la loro influenza nell'equilibrio tra la forza di gravità e quella resistente. Questi fattori operano rompendo detto equilibrio da questi punti di vista:

1. aumentando la forza di gravità all'aumentare del peso della massa propensa a scivolare, per esempio, con la pioggia, la neve, la grandine e l'accumulo di sedimenti di origine vulcanica;
2. riducendo la resistenza del terreno in diversi modi;

- secondo il tempo di influenza:

1. permanenti: sono quei fattori, che come le caratteristiche del terreno, restano uguali o che comunque cambiano molto poco dal punto di vista della prospettiva umana, come per esempio la geologia o topografia;
2. variabili: sono quei fattori che cambiano rapidamente, rapido aumento del livello di falda, aumento dell'umidità nel terreno dopo intense precipitazioni, ecc... ;

- secondo il loro campo di azione:

1. geometria: quei fattori che cambiano la geometria del terreno, per esempio: erosione idrica, azione umana, ecc... ;
2. materiale: quei fattori che colpiscono il terreno debilitandolo, per esempio: erosione interna, degradazione chimica, ecc... ;
3. tensioni: si dividono in fattori che influenzano le tensioni totali , come le forze esterne dovute all'uomo, ai terremoti e alle piogge, e quei fattori che influenzano le pressioni interstiziali provocando l'aumento delle stesse come nel caso di precipitazioni e terremoti.

### **1.2.1 Fattori naturali**

Il tipo di materiale è strettamente legato al tipo di instabilità che si può produrre. I terreni in cui si sviluppano le frane si possono dividere in rocce, terre, sedimenti e materiale di riempimento.

Il tipo di materiale oltre ad influenzare la pendenza del versante influisce sul tipo di rottura.

Un terreno può rompersi fondamentalmente in due modi a seconda che la superficie di rottura sia circolare o piana.

In materiali omogenei isotropi la superficie di rottura è di solito circolare (Figura 1.1).

Se il materiale presenta piani instabili, la rottura si produce secondo una superficie piana, e il movimento si sviluppa lungo i piani di scivolamento, come mostra la Figura 1.2.

Un ulteriore importante fattore è la pendenza.

Maggiore è l'inclinazione del versante maggiore è l'influenza della forza di gravità e quindi maggiore sarà la probabilità che si sviluppi una frana. L'inclinazione dipende dal tipo di materiale che costituisce il pendio e all'umidità dello stesso.

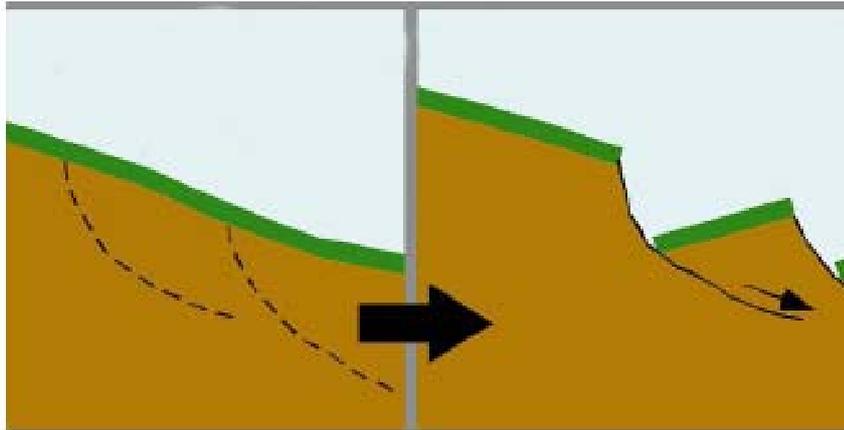


FIGURA 1.1 : rottura circolare in materiali omogenei e isotropi

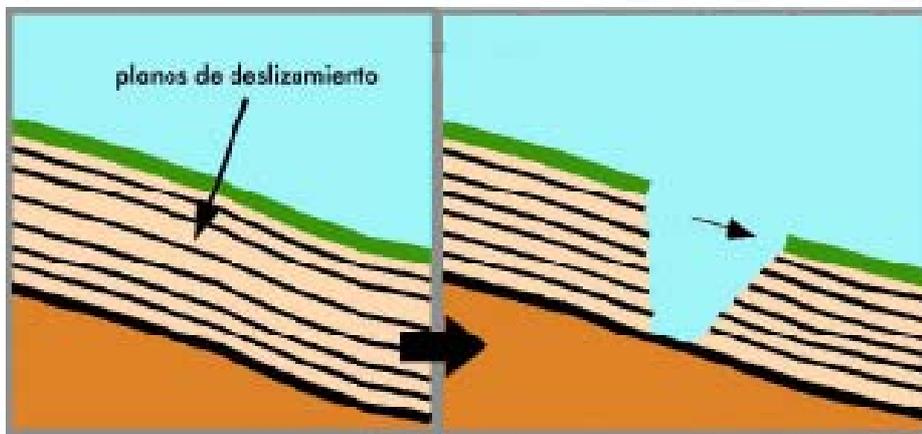


FIGURA 1.2: rottura piana in materiali instabili

L'acqua è il fattore di origine naturale che ha maggior incidenza sia come elemento condizionante che scatenante dei movimenti franosi.

Si può presentare sotto diverse forme: corsi d'acqua, falde sotterranee, pioggia, gelo, neve, ecc.. .

Quando l'acqua cade su un terreno diminuisce la stabilità del versante, dato che aumenta temporaneamente la pressione interstiziale, e questo riduce la resistenza al taglio del materiale influenzando lo stato tensionale dello stesso, senza contare il fatto che si lubrificano zone di terreno o rocce poco resistenti. Questo effetto è maggiore in terreni colluviali visto che sono più permeabili. La roccia sana ha una bassa permeabilità per cui questo effetto non può essere da solo scatenante di una frana. D'altra parte l'acqua provoca un effetto di carico, visto che aggiungendosi al terreno aumenta la forza peso dello stesso. Questo succede quando la zona presenta molte fratture o è molto poroso.

E' importante inoltre sottolineare l'effetto erosivo dell'acqua, considerato che l'interazione dell'acqua con la superficie del terreno può provocare due tipi di instabilità: un degrado chimico

che lentamente riduce l'angolo di attrito del terreno riducendo la resistenza al taglio, e un indebolimento fisico dovuto alla perdita di materiale in seguito ad erosione.

L'azione erosiva dell'acqua è molto importante, per esempio, sui letti dei fiumi dove i depositi alluvionali sono altamente vulnerabili a causa dell'elevata porosità e della tessitura omogenea. Ciò provoca un apporto di sedimenti nei letti del fiume, in seguito a crolli di blocchi o porzioni di terreno, o a scivolamenti degli stessi fino al fiume.

Se questa erosione interessa il piede dei versanti produce spostamenti di materiale e scavi, dato che diminuisce la resistenza al piede del pendio e quindi viene a mancare un appoggio per il materiale che comporta cambiamenti nelle condizioni di equilibrio e la redistribuzione delle tensioni provocando crolli di rocce o flussi di sedimenti.

I cicli di gelo/disgelo dell'acqua del terreno producono una disaggregazione meccanica della struttura del terreno che porta ad una riduzione delle proprietà resistenti del materiale.

La neve, da parte sua può produrre sovraccarichi e aumentare il contenuto d'acqua nel terreno.

Possibili cause scatenanti dei movimenti franosi sono i terremoti, processi vulcanici.

Infine è necessario citare l'attività biologica. Non è un fattore determinante nell'equilibrio del terreno ma condiziona l'azione di altri fattori più importanti. Tra gli elementi che appartengono a questa categoria assume un ruolo importante la vegetazione: questa aiuta a mantenere la stabilità del terreno attraverso le radici, contribuisce anche al drenaggio e attenua la degradazione superficiale; nonostante questo, alcune radici hanno effetto di disaggregazione del terreno diminuendo la resistenza dello stesso.

### **1.2.2 Fattori dovuti all'attività umana**

L'attività umana, principalmente derivata dall'attività mineraria e di opera civile, può indurre ad innescare, accelerare o ritardare i movimenti franosi.

Ci sono fattori come l'umidità o la pendenza del terreno che possono essere facilmente modificati, per esempio attraverso disboscamenti e terrapieni, deforestazione o soppressione della vegetazione, realizzazione di dighe di terra, scavi e attività mineraria, l'irrigazione, sovraccarichi, esplosioni, ecc... .

Una delle attività più importanti sviluppate dall'uomo, dal punto di vista costruttivo, e che intacca la struttura del terreno è la realizzazione di infrastrutture come nel caso particolare della frana del Tessina, la quale fu innescata dalla costruzione di una strada forestale a alla base del monte Teverone.

### 1.3 Tipi di movimento franoso

A causa dell'estrema variabilità delle situazioni geomorfologiche ed ambientali presenti sul nostro pianeta le tipologie di movimenti di versante sono le più svariate possibili: si passa dal ribaltamento di blocchi di roccia a valanghe di materiale granulare secco a scorrimenti lenti di materiale argilloso.

Una tale varietà di fenomeni ha inevitabilmente dato origine a numerose classificazioni ciascuna delle quali tende a raggruppare gli eventi in base ad alcune caratteristiche fondamentali: morfologia dell'area di frana, tipo di materiale coinvolto, tipo di movimento, stato di attività, velocità dei movimenti, ecc... .

Sostanzialmente tutti i criteri sono basati, innanzitutto, su di una distinzione in base all'evoluzione post-rottura del fenomeno, prescindendo dalla meccanica della rottura stessa e, secondariamente, in base al tipo di materiale coinvolto. In tale ottica va vista la distinzione tra colate e scorrimenti che, pur essendo caratterizzati da un tipo di rottura simile, hanno un'evoluzione completamente differente.

Diversi autori hanno proposto specifiche classificazioni, le classifiche di Varnes (1954, 1978), di Skempton e Hutchinson (1969) e di Cruden e Varnes (1996) sono tra le più note. Tuttavia, qualunque sia il criterio di classificazione si riescono ad individuare cinque tipologie principali: crolli, ribaltamenti, scorrimenti, colate, espansioni.

1. I **crolli** consistono nel distacco e nella successiva caduta di uno o più blocchi di materiale su pendii estremamente ripidi . La separazione del blocco dall'affioramento è dovuta ad una rottura per trazione o per taglio lungo una discontinuità; il successivo moto avviene per lo più in aria.

I crolli avvengono tipicamente in rocce o in argille molto consistenti giuntate o fessurate. In base alla classifica di Cruden e Varnes (1996) riportata nel seguito, la velocità del movimento successivo la perdita di contatto con la formazione in sede, è classificabile da molto rapida ad estremamente rapida.

2. I **ribaltamenti** si distinguono dai crolli in quanto il distacco di blocchi avviene attraverso un meccanismo di rotazione intorno alla base sotto l'azione della forza di gravità in combinazione con le spinte, a forte componente orizzontale, esercitate da blocchi adiacenti, dall'acqua infiltrata in discontinuità preesistenti o da azioni sismiche (Figura1.3).

I ribaltamenti sono tipici delle rocce e delle argille giuntate, poiché richiedono la presenza di discontinuità verticali o sub-verticali.

3. Gli **scorrimenti** sono causati da una rottura per taglio seguita da spostamenti del corpo di frana lungo la zona o superficie di taglio. Negli ammassi rocciosi il movimento avviene prevalentemente come scorrimento rigido lungo discontinuità preesistenti, lo stesso fenomeno avviene nel caso di

frane riattivate in argilla. La rottura del versante generalmente si propaga a partire da punti in cui si sono raggiunte prima condizioni di rottura locale. In questo caso, la rottura generale è preceduta da piccole deformazioni interne localizzate in una sottile fascia di terreno (zona di taglio) all'interno della quale si forma e si propaga la superficie di taglio. Questi fenomeni possono mantenersi attivi per molto tempo, anche se in modo intermittente o con continue variazioni di velocità. In alcuni casi, possono evolvere in colate.

Varnes (1978) individua due tipologie principali di scorrimento in base alla forma della superficie di rottura: scorrimenti rotazionali e scorrimenti traslativi. Nei primi la superficie di rottura è concava verso l'alto e può avere la forma di un segmento sferico. Nei secondi il volume in frana scivola lungo una superficie pressoché piana come può esserlo ad esempio un piano di stratificazione o la superficie di contatto tra una coltre di terreno alterato e la formazione sottostante. Mentre nel primo caso, in seguito a piccoli spostamenti, il movimento tende ad arrestarsi a causa della modifica allo stato di sollecitazione agente sul corpo di frana, nel secondo i movimenti possono svilupparsi indefinitamente per tempi anche molto lunghi.

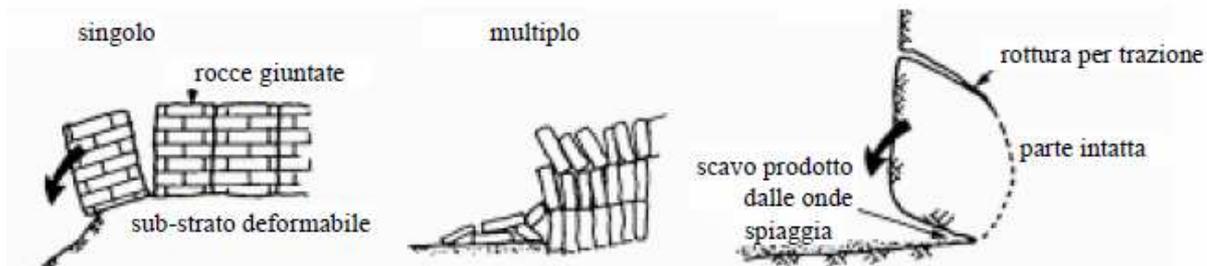


FIGURA 1.3: ribaltamenti (da Hutchinson, 1988)

4. Movimenti di versante che esibiscono durante il loro moto un comportamento simile a quello dei fluidi viscosi a causa di deformazioni interne alla massa in movimento che risultano predominanti rispetto ad eventuali scorrimenti lungo superfici di taglio, sono indicati con il termine di **colate** (Figura 1.4). In tali fenomeni le distanze percorse dal corpo di frana sono molto maggiori che per qualsiasi altro tipo di movimento di versante.

5. Le **espansioni laterali** sono il risultato di complessi processi geologiche di solito coinvolgono blocchi di materiale molto rigido sovrastanti uno strato di materiale più deformabile. A causa di deformazioni dello strato di base, che possono essere causate da differenti processi meccanici (ad esempio liquefazione di sabbie sature in seguito ad un sisma, deformazione di strati o depositi in argilla, etc.), la placca di materiale rigido sovrastante si frattura e si separa in più blocchi che tendono ad allontanarsi in direzione normale al contorno del rilievo con velocità variabili, controllate dal tipo di processo meccanico che è responsabile di tali movimenti (Figura 1.5).

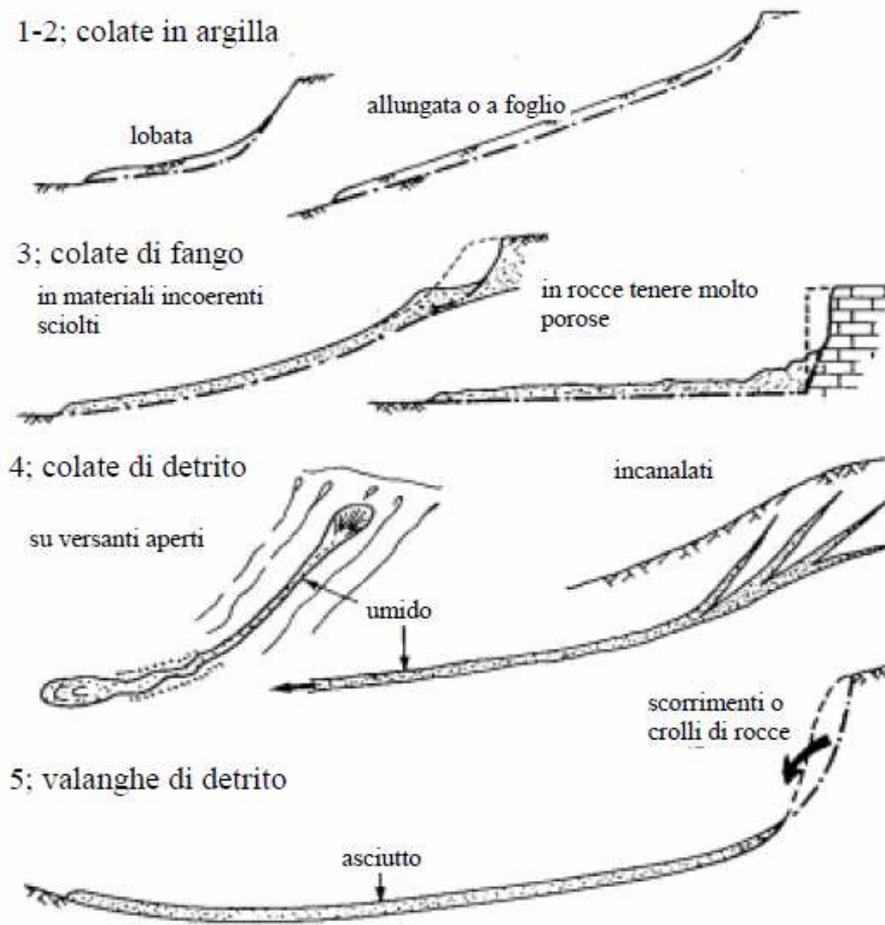


FIGURA 1.4: principali tipi di colate (da Hutchinson, 1988)

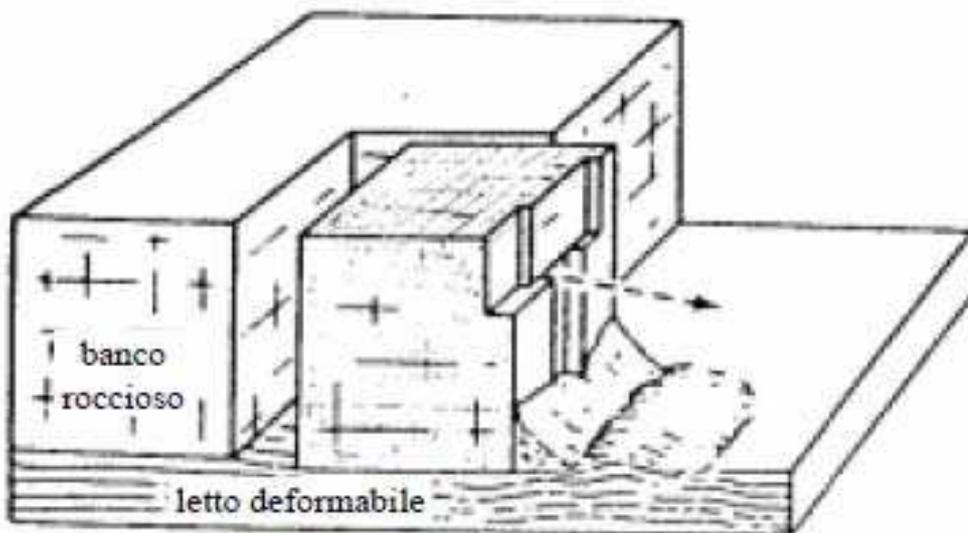


FIGURA 1.5: espansioni laterali (da Varnes, 1976)

### 1.3.1 Classificazione delle colate

Con il termine colata si suole indicare movimenti di versante caratterizzati da deformazioni interne tali che il terreno assume le caratteristiche di un fluido viscoso. Qualsiasi sia il meccanismo di rottura, qualunque fenomeno franoso può evolvere in colata (ad esempio, i crolli possono evolvere in colate di detrito o gli scorrimenti in argilla in colate d'argilla). Nei fenomeni di colata i due principali componenti del miscuglio, acqua e particelle solide, possono essere presenti in proporzioni così differenti che, a seconda della concentrazione dei granuli in acqua, i movimenti possono essere considerati come movimenti di solidi (alte concentrazioni) ovvero come moto di liquidi (basse concentrazioni). Si comprende pertanto come le colate costituiscano un insieme molto vario di fenomeni il cui comportamento ricade tra i domini di appartenenza dei movimenti di versante e dei fenomeni alluvionali. Tracciare una linea di separazione tra i due gruppi è molto difficile dal momento che l'uno sfocia con gradualità nell'altro al crescere del contenuto d'acqua (Figura. 1.6).

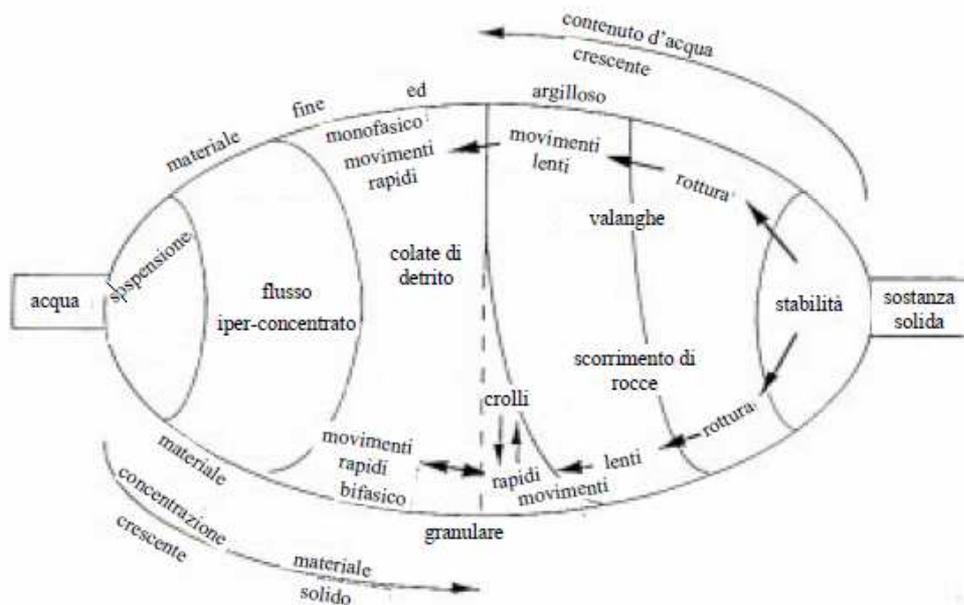


FIGURA 1.6: classificazione dei flussi di materiale e dei movimenti di massa (da Meunier, 1993).

Skempton e Hutchinson (1969) affermano che le colate sono il gruppo di movimenti franosi meno compresi e per i quali la terminologia utilizzata è alquanto confusa.

Tra le cause principali che provocano questo tipo di fenomeni ci sono i cambiamenti delle proprietà meccaniche del terreno causate da variazioni del grado di saturazione, le variazioni delle tensioni efficaci dovute a modifiche del regime delle pressioni interstiziali, i carichi applicati e le variazioni di geometria dovuti all'azione dell'uomo, l'influenza dei cicli climatici (aridità, precipitazioni, gelo e disgelo) e gli effetti sismici.

La principale differenza che permette di distinguere le frane di colata da quelle di scorrimento risiede essenzialmente nelle caratteristiche di deformazione del corpo di frana nella sola fase post-

rottura. Nelle colate il corpo di frana presenta elevate deformazioni interne della massa, negli scorrimenti presenta deformazioni interne modeste in confronto agli spostamenti che si sviluppano sul contorno del corpo di frana. I meccanismi di innesco di entrambi i fenomeni sono legati a processi di rottura per taglio ed in realtà, indipendentemente dal meccanismo di innesco, la colata di caratterizza nella fase di post rottura come una evoluzione prolungata dello scorrimento iniziale.

Si definisce colata (flow) il movimento spazialmente continuo in cui si formano, generalmente senza essere preservate, superfici di taglio ravvicinate che inducono nella massa in frana un campo di velocità simile a quello di un fluido viscoso (Figura 1.7).



FIGURA 1.7: schema di movimento di un flusso di colata

La porzione basale della massa in frana può essere una vera e propria superficie di rottura caratterizzata quindi da discontinuità di spostamento) o anche una ampia zona in cui si distribuisce la deformazione di taglio. In tal senso, per date condizioni (riduzione della resistenza meccanica, inclinazione del pendio più elevata) il flusso si potrebbe presentare come lo sviluppo di un movimento franoso di scivolamento.

La velocità di propagazione di tali fenomeni disastrosi può essere estremamente elevata, ed interessando, talvolta, notevoli volumi di materiale. Tali fenomeni prendono il nome di colate rapide. Generalmente, esse interessano diversi materiali quali terreni residuali, sabbie, limi, argille, etc. I flussi sono pertanto movimenti rapidi nei quali i terreni, le rocce ed i residui vegetali si combinano con aria e acqua, formando una massa che si mobilita senza preservare una superficie di scorrimento definita.

Tra i vari processi che si possono osservare in natura i più interessanti sono: debris flows, debris avalanches, flussi piroclastici, rapid mudflows e valanghe di roccia. Distinzioni tra i differenti fenomeni possono essere fatte considerando la presenza e l'abbondanza di ciascuna fase (solida, liquida e gassosa) e le proprietà della fase solida.

In particolare debris flows e mudflows sono formati da terreni saturi, rispettivamente da materiale grossolano e fine, e possono originarsi lungo pendii aperti o all'interno di canali di drenaggio

(impluvi). I debris flows possono inglobare un ampio campo di dimensioni dei grani e le loro caratteristiche meccaniche possono variare significativamente al variare del contenuto relativo di acqua, limo e argilla nonché delle dimensioni e dell'assortimento dei grani.

Più recentemente Picarelli et al. (2003) hanno proposto di classificare questi fenomeni utilizzando solo una specificazione dei materiali coinvolti e del loro stato fisico. Procedendo in tal modo le frane di colata possono essere suddivise come segue: colata di detrito, colata di sabbia, colata di fango, colata di argilla, colata di torba. Le colate di detrito interessano materiali granulari grossolani come quelli prodotti dalla disgregazione della roccia, spesso non saturi; le colate di sabbia interessano, appunto, terreni sabbiosi non saturi e comunque non soggetti a liquefazione; le colate di fango interessano terreni sabbioso-limosi saturi liquefatti; le colate di argilla sono costituite da argilla satura mentre le colate di torba interessano terreni con un forte contenuto di materiali organici (torbe). Tale nomenclatura privilegia la natura dei materiali sui meccanismi di innesco, con eccezione per le colate in terreni granulari nell'ambito delle quali, anche per mantenere una analogia con la nomenclatura anglosassone, si distingue tra colate di fango, governate da meccanismi di liquefazione, e colate di detrito, in cui tali meccanismi sono inesistenti o di minor rilievo.

Durante il moto il materiale in frana può esercitare, inoltre, un'intensa azione erosiva e di trasporto, inglobando materiale di diversa natura e dimensioni (sino a blocchi di grandi dimensioni) e trasformandosi in alcuni casi in flusso iperconcentrato.

### **1.3.2 Terminologia impiegata nei movimenti di massa**

In generale, quale che ne sia l'origine, i movimenti di massa presentano la seguente struttura: una zona di collasso nella parte superiore e una zona franante o di flusso nella parte bassa del pendio. Secondo questa struttura si possono differenziare diverse parti nelle frane, indicate schematicamente nella Figura 1.8.

Si deve però tenere presente che lo sviluppo non è identico nei differenti tipi di frane ma che esistono delle particolarità proprie di ciascuna tipologia.

- Scarpata principale: superficie generalmente ripida, che delimita l'area quasi indisturbata circostante la parte sommitale della frana, provocata dall'allontanamento del materiale di frana da quello non spostato.
- Scarpata secondaria: ripida superficie che intacca il materiale spostato, prodotta da movimenti differenziali all'interno della massa di frana.
- Testata: le parti più alte del materiale di frana, lungo il limite tra il materiale spostato e la scarpata principale.
- Punto sommitale: il punto più alto del limite tra il materiale spostato e la scarpata principale.

- Unghia della superficie di rottura: parte del materiale spostato che si trova a valle del margine inferiore della superficie di rottura.
- Unghia della frana: il margine del materiale spostato, situato alla maggior distanza dalla scarpata principale.
- Punto inferiore: il punto dell'unghia situato a maggior distanza dal punto sommitale della frana.
- Piede: quella parte del materiale spostato che si trova a valle del margine inferiore della superficie di rottura.
- Corpo principale: quella parte del materiale spostato che ricopre la superficie di rottura, tra la scarpata principale e il margine inferiore della superficie di rottura.
- Coronamento: il materiale rimasto in posto, e quasi indisturbato, adiacente alle parti più alte della scarpata principale.
- Superficie di rottura: è la superficie con piani deboli che ha causato il movimento franoso.
- Superficie originale del terreno: la superficie del versante che esisteva prima che avvenisse il movimento franoso preso in esame. Ove possibile va precisato se detta superficie è riferibile ad un precedente fenomeno franoso.
- Superficie di separazione: termine generale per indicare la superficie che separa il materiale spostato del materiale in posto, indipendentemente dal fatto che lungo di essi vi sia o non vi sia stata rottura.

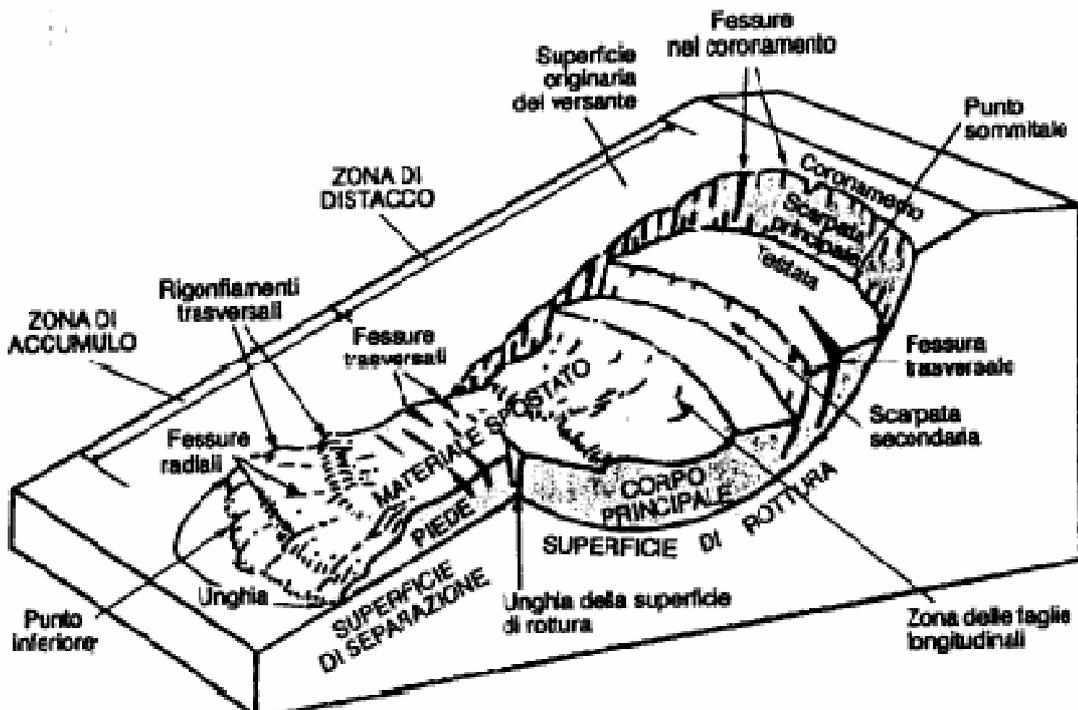


FIGURA 1.8: schematizzazione generale di un movimento di massa

- Materiale spostato: il materiale che si è allontanato dalla sua posizione originaria nel versante. Può essere deformato o non deformato.
- Zona di distacco: l'area entro la quale il materiale spostato si trova a quota inferiore a quella della superficie originaria del versante.
- Zona di accumulo: l'area entro la quale il materiale spostato si trova a quota superiore a quella della superficie originaria del versante.

## 1.4 Principali fenomeni franosi in Veneto

Il territorio della regione Veneto è costituito per il 40% da terreni collinari o montuosi e per il 60% da terreni pianeggianti (*Analisi del dissesto in Veneto – Baglioni 2007*).

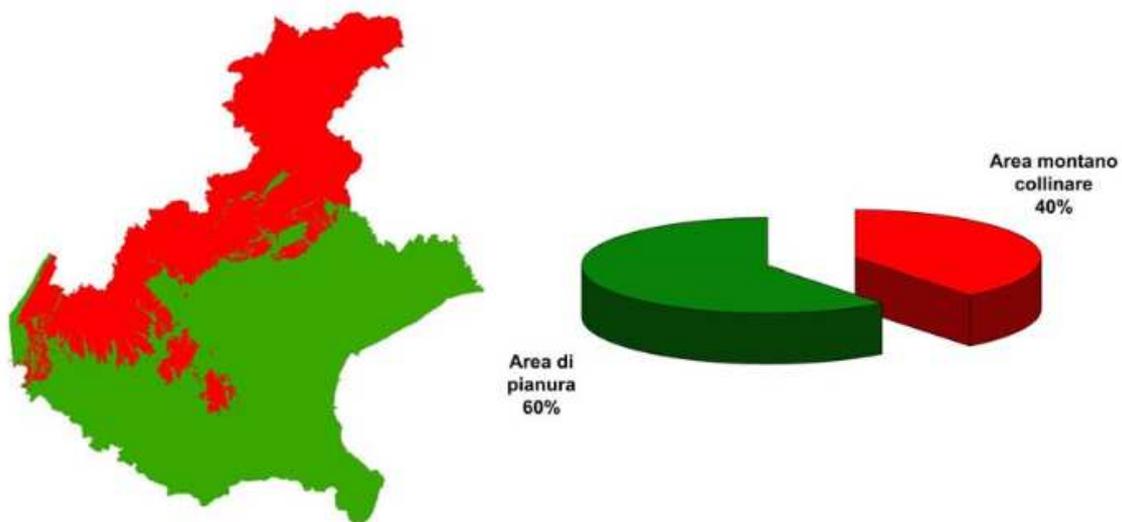


FIGURA 2.1 : Distribuzione delle aree montano-collinari e pianeggianti con relativa percentuale rispetto alla superficie totale regionale.

Il territorio regionale può essere suddiviso in diverse unità raggruppate in due insiemi principali: da un lato le forme a prevalente denudazione osservabili nei rilievi alpini e prealpini, dall'altro le forme a prevalente accumulo corrispondenti ai conoidi pedemontani ed alla pianura padano-veneta. In tale rappresentazione le unità geomorfologiche a prevalente denudazione vengono distinte a loro volta essenzialmente sulla base delle caratteristiche meccaniche delle rocce che le costituiscono. Il Veneto è caratterizzato da un uso del suolo quanto mai variegato, diretta conseguenza della forte variabilità paesaggistica presente nel suo territorio. Nella sezione montana, in particolare in provincia di Belluno, le zone boscate rivestono gran parte dei versanti. Nelle aree altimetricamente più elevate i boschi lasciano spazio a zone aperte con vegetazione rada o assente che nella maggior parte dei casi corrispondono ai gruppi dolomitici maggiori (Civetta, Marmolada, Pale di San Martino, Tofane, Tre Cime di Lavaredo in provincia di Belluno) e

alle cime più alte delle Piccole Dolomiti e dell’Altopiano di Asiago (M. Ortigara) in provincia di Vicenza. Le zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea sono localizzate, per quanto riguarda la provincia di Belluno, nella alta valle del Torrente Cordevole, in sinistra idrografica della media valle del Piave, tra Castellavazzo e Perarolo, sul versante sud della dorsale Monte Cavallino – Peralba e in Comelico.

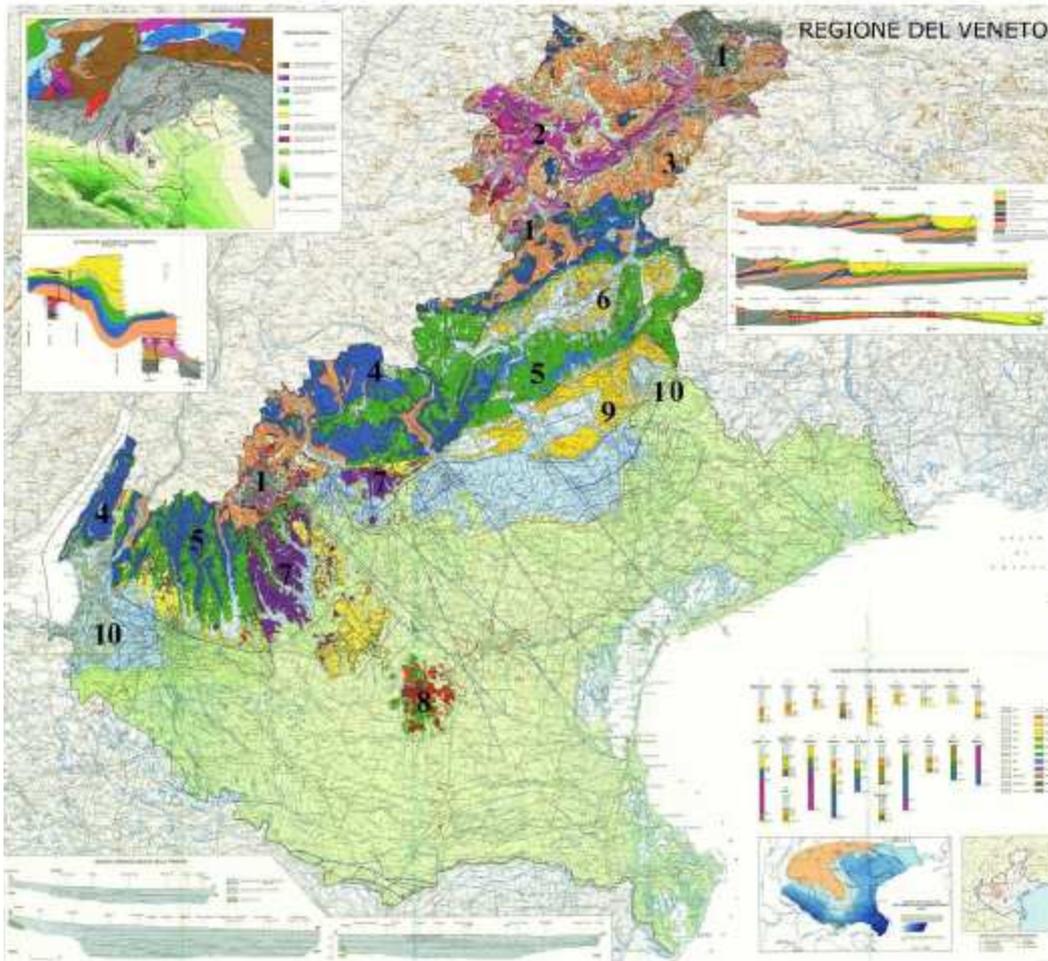


FIGURA 2.2 : geologia del territorio in Veneto

Legenda semplificata: 1)basamento pre-permiano; 2) gruppo di Wengen e di Buchenstein; 3) dolomia principale; 4)calcari grigi; 5)biancone; 6) flysch bellunese; 7) vulcaniti basiche di età terziaria; 8) vulcaniti acide di età terziaria; 9) molassa subalpina; 10) anfiteatri morenici

I dissesti si concentrano particolarmente nel territorio dell’Alpago e nella parte alta dei bacini dei fiumi Cordevole e Piave per la provincia di Belluno, nei Colli Euganei per la provincia di Padova, nelle valli del torrente Agno e Chiampo per la provincia di Vicenza e in quella dell’Illasi per la provincia di Verona. Con il 51,70% dei dati, le tipologie di frana maggiormente rappresentate in Veneto sono gli scivolamenti (rotazionali /traslativi) seguiti dai colamenti rapidi (18,91%). Altre tipologie discretamente diffuse sono i colamenti lenti (9,31%), i crolli/ribaltamenti (5,61%) mentre le frane complesse rappresentano il 2,69% dei fenomeni franosi censiti. Per quanto riguarda le

aree franose, ossia le zone a dissesto generalizzato che includono uno o più fenomeni franosi, si distinguono in aree interessate da frane superficiali diffuse (5,27%) ed aree soggette a crolli e/o ribaltamenti diffusi (2,84%) (Analisi del dissesto in Veneto – Baglioni 2007). Ridotta è la presenza di aree soggette a sprofondamenti diffusi.

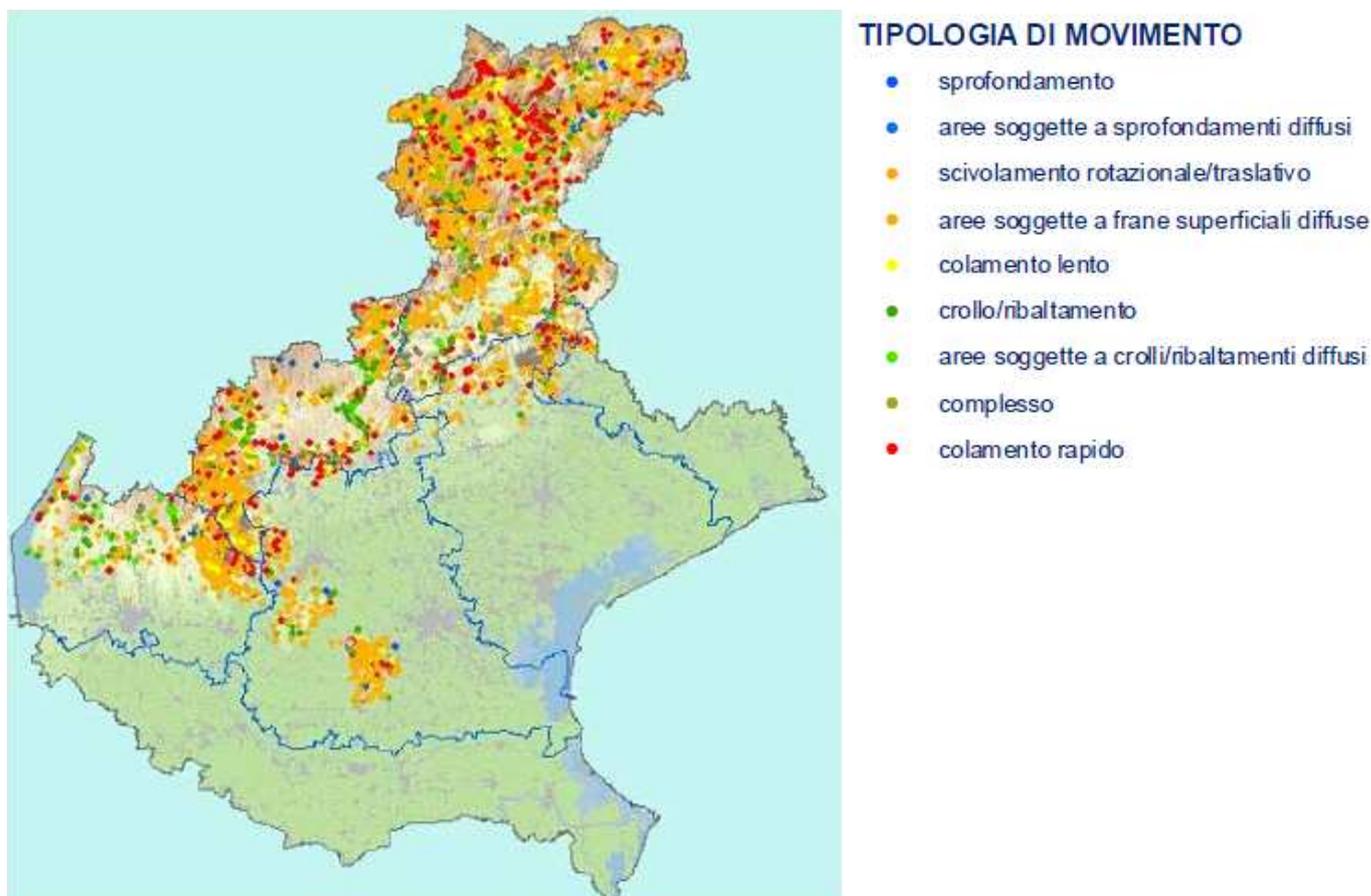


FIGURA 2.3 : diffusione del fenomeno franoso nella regione Veneto

Si citano ora i principali movimenti franosi presenti in Veneto divisi per tipologia.

Frane di crollo a rapida evoluzione: le aree principalmente interessate sono la sponda orientale del Lago di Garda, la Valsugana e le valli del fiume Piave e Cordevole.

Importanti esempi di fenomeni di scorrimento sono la frana del Brustolè in comune di Velo d’Astico (Vicenza), quella del Mesaroz in comune di Cencenighe Agordino e del monte Piz ad Alleghe (Belluno).

Tra le colate lente si citano la frana del Tessina in comune di Chies d’Alpago (Belluno) la quale è considerata come un fenomeno complesso di colata, la frana di Borsoi in comune di Tambre d’Alpago (Belluno), le frane di Staulin e Mortisa in comune di Cortina d’Ampezzo (Belluno) e i numerosi dissesti della Val d’Alpone (Verona). Come importante esempio di colata rapida può

essere ricordata la frana di Somor a Falcade (Belluno) che causò alcune vittime durante l'alluvione del '66. Le coltri detritiche al piede delle scarpate rocciose risultano in alcune condizioni interessate da una tipologia di frana riconducibile a colata di blocchi e detriti denominata debris flow. Particolare diffusione di tali fenomeni si ha lungo la Val Boite, nel bellunese, tra i quali si citano la frana di Cancia in comune di Borca di Cadore, e le frane di Fiames ed Acquabona in comune di Cortina d'Ampezzo.



FIGURA 2.4 : la frana di Alleghe avvenuta con due successivi eventi nel 1771 ha provocato la formazione del lago omonimo ostruendo il corso del torrente Cordevole.



FIGURA 2.5 : la frana di Borsoi in comune di Tambre (BL) è un fenomeno franoso in cui il movimento predominante è costituito da una lenta colata che giunge fino al sottostante alveo del torrente Borsioia

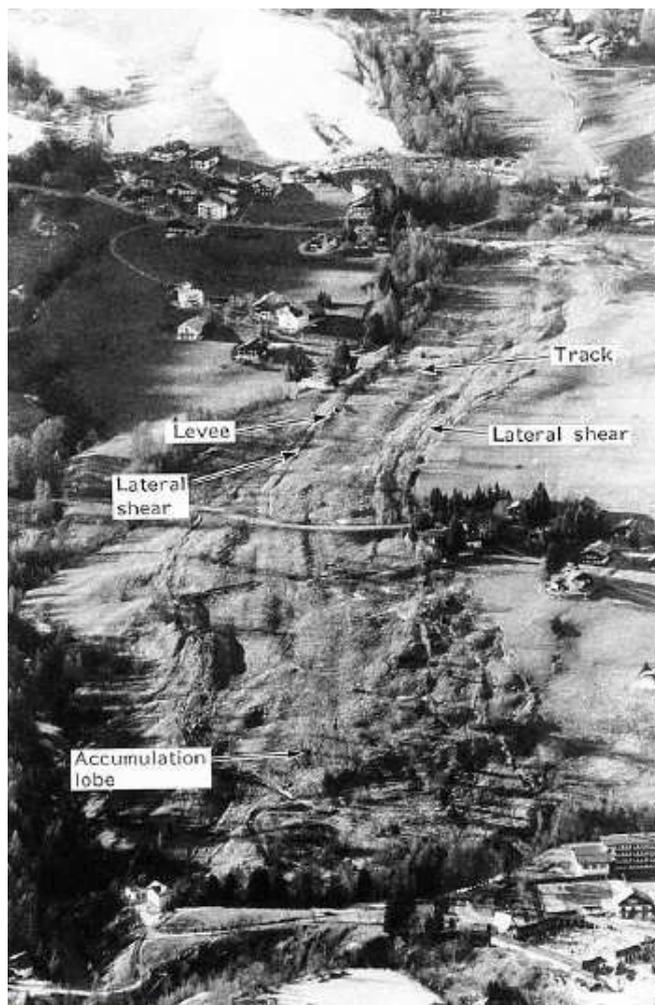


FIGURA 2.6 : frana di Mortisa

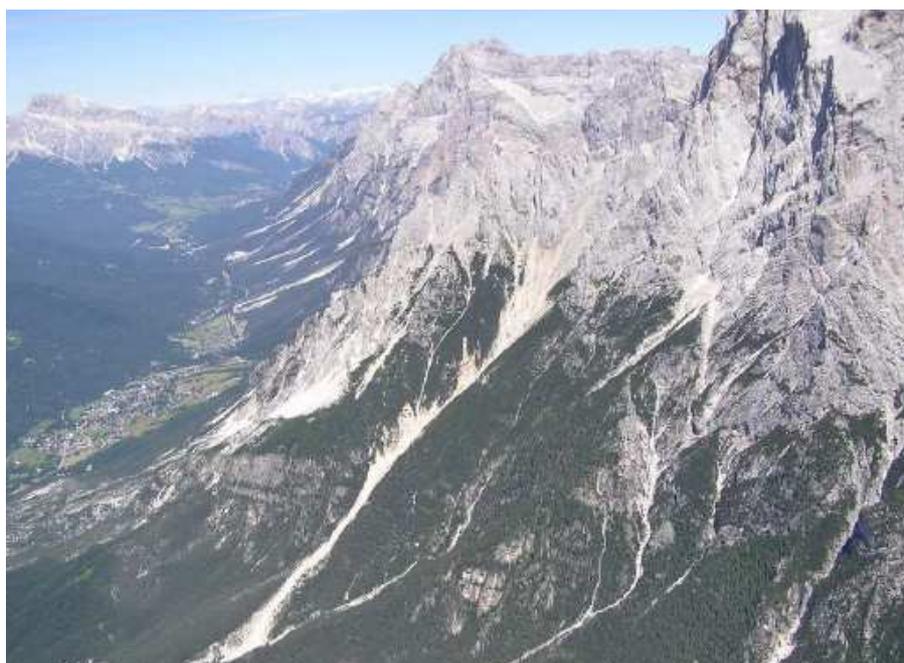


FIGURA 2.6 : la colata rapida di Cancia a Borca di Cadore (BL)



FIGURA 2.7 : la colata rapida di Chiapuzza a San Vito di Cadore (BL)

La morfologia e la geologia del territorio montano rendono la provincia di Belluno la più vulnerabile della Regione Veneto, come è testimoniato dai tanti eventi franosi avvenuti in passato che hanno provocato ingenti danni al patrimonio culturale ed ambientale e al tessuto sociale ed economico.

Tra le varie zone della provincia di Belluno, l'altopiano dell'Alpago, a causa della litologia dei terreni affioranti e dell'elevata piovosità, è la zona più predisposta a fenomeni di dissesto.

Uno dei più rilevanti movimenti franosi fu sicuramente quello che portò allo sbarramento della valle di Santa Croce determinato dalla frana di Fadalto, causando la deviazione del fiume Piave verso il Vallone Bellunese e quindi nel Canale di Quero, risalente ad oltre 11700 anni fa. In seguito l'area Paludi (confine tra l'Alpago e il comune di Ponte nelle Alpi), che presentava un livello inferiore rispetto all'attuale di 150 m, andò a colmarsi per depositi successivi di materiali alluvionali e smottamenti. Cedimenti successivi hanno portato poi al completamento e alla formazione di buona parte delle valli che oggi caratterizzano tutta l'area. Come si può notare in Figura 2.9 questa modellazione non è ancora terminata a causa della presenza di numerose frane come: la frana di Lamosano, che sta spostando l'intero abitato, la frana di Borsoi, la frana di Poiatte, la frana di Buscole e la frana del Tessina.

La grande frana del Tessina, negli ultimi vent'anni ha creato allarme nelle popolazioni dell'altopiano dell'Alpago ed, in particolare, per gli abitanti di Lamosano e Funès. Il fenomeno, il cui primo innesco ha avuto luogo nel 1960, è caratterizzato da continui distacchi localizzati alle pendici del monte Teverone, che hanno dato luogo alla grande colata che tuttora contraddistingue la morfologia della valle. I volumi già coinvolti sono dell'ordine dei sei milioni di metri cubi con masse prossime all'instabilità di dimensioni equivalenti.



FIGURA 2.8 : vista aerea dell'altopiano dell'Alpago dal Lago Santa Croce

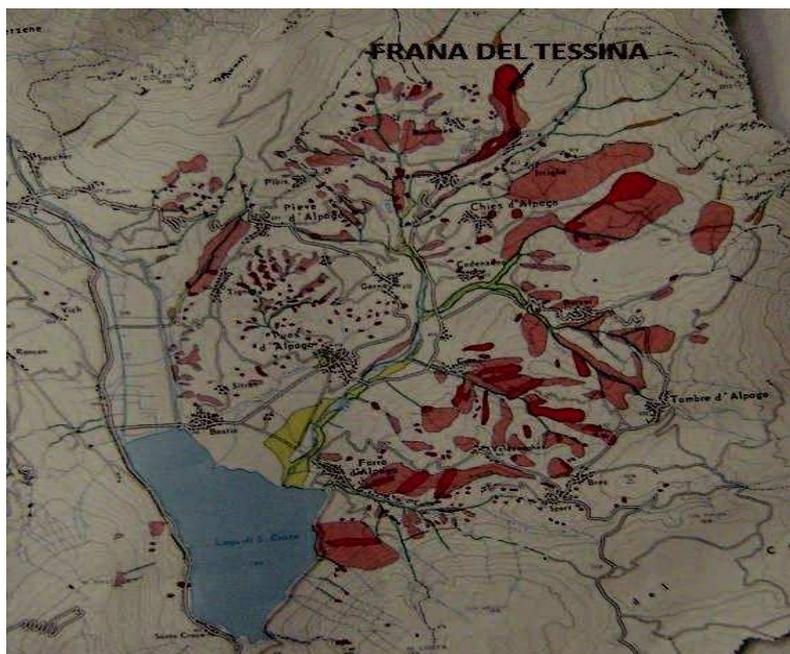


FIGURA 2.9 : Distribuzione delle frane nell'Alpago

## 1.5 Sistemi di monitoraggio dei movimenti franosi

Il monitoraggio rappresenta un'attività di controllo, che permette di studiare ed analizzare un fenomeno in evoluzione mediante l'utilizzo di strumenti automatici e manuali. Per realizzare una rete di monitoraggio è necessario preliminarmente eseguire delle verifiche geologiche e geotecniche, per individuare i parametri da monitorare che caratterizzano il fenomeno, impiantistiche, informatiche e gestionali per ottimizzare l'installazione e la gestione della strumentazione. I parametri di interesse possono essere suddivisi in due tipologie:

- Parametri diretti: grandezze che descrivono in modo diretto il comportamento del fenomeno franoso.
- Parametri indiretti: grandezze che rappresentano le condizioni al contorno del fenomeno franoso o che possono essere analizzate in correlazione con altre grandezze.

Gli elementi primari che regolano la progettazione dell'attività di monitoraggio sono:

- Scopo: Può essere di protezione civile, volto all'avvertimento e alla salvaguardia della popolazione, di sicurezza per infrastrutture, opere o impianti o semplicemente di studio.
- Frequenza di rilievo: viene definita in funzione dello scopo di monitoraggio, delle responsabilità connesse all'analisi delle misure, dell'evoluzione dei fenomeni e dei periodi di osservazione.
- Tipologia di sistema di monitoraggio: varia in funzione dello scopo del monitoraggio, della disponibilità economica e dell'ubicazione del sito. Può essere manuale, automatica o varia.

### 1.5.1 Tipologie strumentali per il monitoraggio

Le tipologie strumentali utilizzabili nel monitoraggio di una frana possono essere suddivise in funzione dei parametri da misurare come: spostamenti, pressioni neutrali, livelli di falda, rotazioni, deformazioni e parametri meteorologici. Tra i principali strumenti di misura si possono citare:

- Distometri: consentono di misurare le variazioni di distanza tra due punti fissi rappresentati, ad esempio, dalle pareti di una grossa frattura in roccia.
- Estensimetri: Consentono di misurare lo spostamento relativo tra due punti di misura posti ai due lati di una frattura.
- Inclinatori: Consentono di determinare la superficie di rottura e gli spostamenti orizzontali mediante l'inserimento, all'interno di un tubo a sezione circolare, di sonde che trasmettono le variazioni della verticale.
- Piezometri: Consentono di misurare la quota della falda e le pressioni neutrali mediante l'inserimento dello strumento nel corpo di frana.
- Teodolite: Consente di determinare angoli azimutali, zenitali e distanze mediante l'utilizzo di mire ottiche.

- Distanziometro: Consente di misurare le deformazioni orizzontali con elevata precisione, mediante l'utilizzo di un raggio laser.
- GPS: Consente di determinare la distanza tra due punti e quindi risalire alle coordinate di una rete di capisaldi.

Per quanto riguarda le frane, è necessario inizialmente individuare il tipo di movimento (crollo, rotazione, colamento..), lo stato di attività (attiva, inattiva, riattivata...), la sua distribuzione (in avanzamento, retrogressiva..) e le caratteristiche geologiche e geotecniche, per realizzare un'adeguata progettazione e gestione del sistema di monitoraggio. È possibile riassumere questi concetti attraverso il seguente schema:



## 2. LA FRANA DEL TESSINA

---

### 2.1 Inquadramento territoriale e generalità sul fenomeno franoso

Situata nel comune di Chies d'Alpago, ed in particolare a ridosso degli abitati di Funes, Lamosano e San Martino, quella del Tessina è una delle più importanti frane d'Europa che nel corso degli anni ha raggiunto dimensioni notevoli.

Essendo una colata, cioè un tipo di movimento franoso nel quale il materiale si comporta come un fluido viscoso, il suo sviluppo è in continua evoluzione, infatti inizialmente l'area coinvolta era molto piccola ma ad oggi il corpo di frana supera i 2 chilometri di lunghezza: ha origine ai piedi del monte Teverone a 1148 m s.l.m. e si sviluppa in direzione Nord-Sud per 1250 metri, lambisce da vicino l'abitato di Funes dove svolta in direzione sud-ovest per altri 750 m in direzione dell'abitato di Lamosano fino a quota 640 m s.l.m..

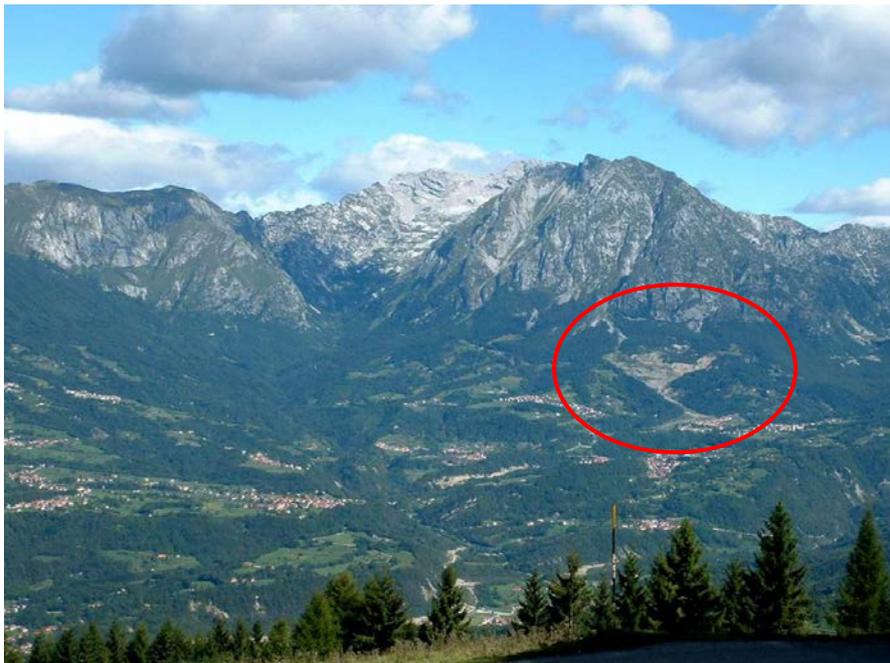


FIGURA 2.1 : Vista aerea dell'Alpago con la grande frana del Tessina in evidenza

Sin dall'inizio del dissesto è stato possibile individuare tre distinte zone in funzione della loro morfologia (figura 2.2).

Zona sorgente: posta tra quota 1200 e 1000 m s.l.m. circa, in continua espansione e nella quale il fenomeno si esplica prevalentemente sotto forma di scivolamenti rotazionali e colamenti (comprende l'accumulo superiore).

Canale collettore: costituito da un ripido canale di scarico, posto tra la quota 1000 e 900 m s.l.m., che mette in comunicazione l'accumulo superiore con quello inferiore.

Accumulo inferiore: con lunghezza di oltre 2 km, lungo il quale si sviluppa la colata, tra quota 900 e l'abitato di Lamosano (610 m s.l.m.).

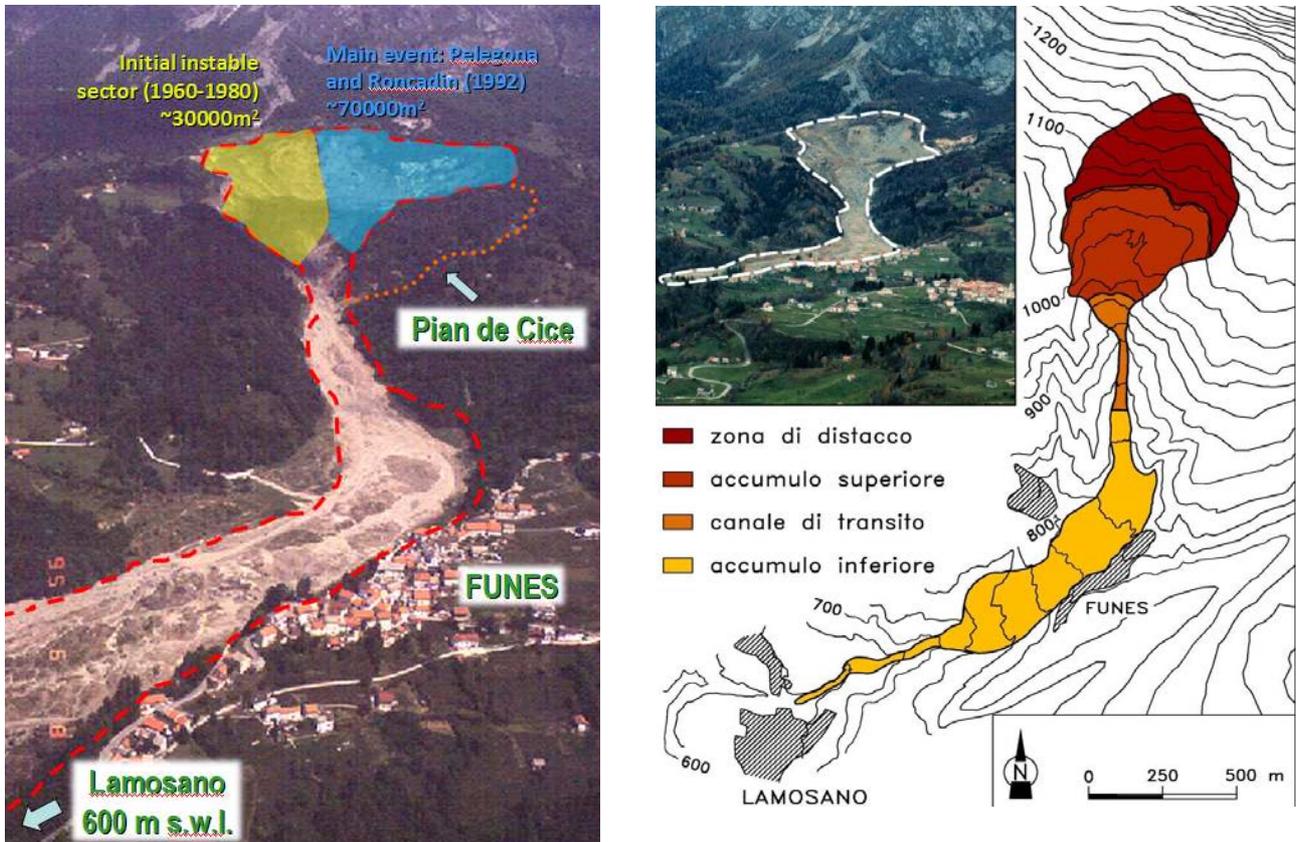


FIGURA 2.2 : Suddivisione del corpo di frana in funzione della morfologia

L'area in esame è caratterizzata da una grande varietà di dissesti, sia di carattere gravitazionale (crolli e scivolamenti di masse) sia idrogeologico (erosione e fluidificazione), dovuti alla presenza del Flysch: roccia sedimentaria stratificata composta da alternanza di arenarie, marne ed argille che in presenza d'acqua si comporta come un fango molto sciolto (figura 2.4). L'influenza dell'acqua è garantita dalla sorgente Pelegona, la quale è sempre attiva e scorre lungo buona parte del corpo di frana. Il meccanismo di movimento può essere riassunto come segue:

- I distacchi si susseguono nel tempo, accompagnati da un progressivo arretramento del margine superiore (coronamento).
- Le porzioni distaccate tendono a disgregarsi e a formare delle masse di detrito e fango, le quali percorrono con velocità medio-alte il canale che porta a Funes; solitamente subiscono un rallentamento in corrispondenza dell'allargamento presente a monte della strada Funes-San Martino provocando un innalzamento del fondo del torrente Tessina in

quanto l'energia delle acque di magra non è in grado di asportare il materiale.

- In presenza di precipitazioni prolungate si ha un aumento di fluidità del materiale il quale riesce a raggiungere la strada che collega Funes con San Martino e raramente anche l'abitato di Lamosano.

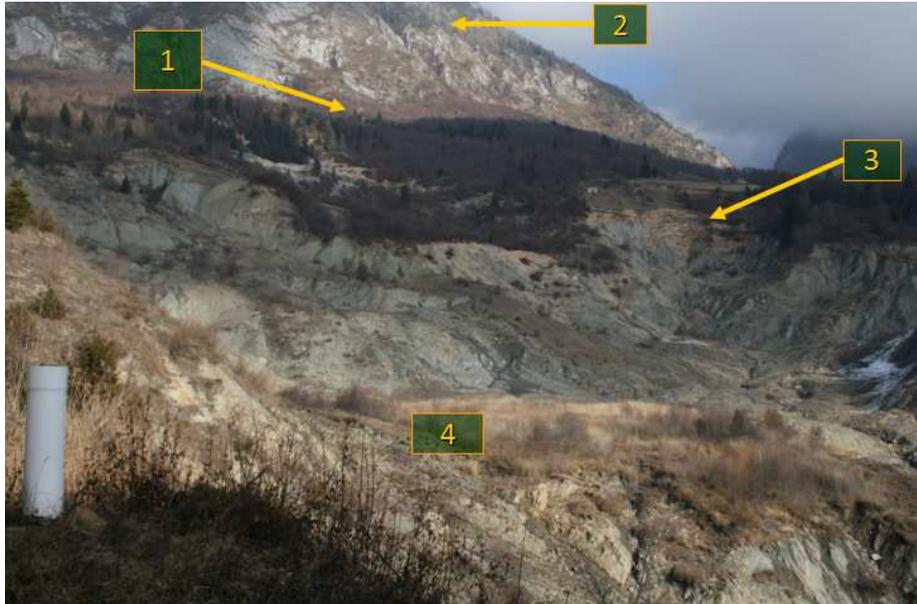


FIGURA 2.3 : 1) Ghiaioni costituiti da residui di calcare; 2) Monte Teverone (Calcare del Fadalto); 3) Deposito morenico su substrato di Flysch alterato; 4) Frana attiva



FIGURA 2.4 : Particolare di Flysch in stato roccioso in fase di alterazione (a) e in stato disgregato (b)

Essendo la frana del Tessina un fenomeno in continua evoluzione, la rappresentazione geomorfologica sulla carta è limitata, in quanto non testimonia la complessa dinamica del fenomeno, ma ne inquadra lo stato di dissesto in un particolare momento. Vi sono però alcuni importanti aspetti morfologici che testimoniano una tendenza evolutiva del corpo di frana ad ingrandirsi. Un aspetto importante è il considerevole ampliamento della zona instabile, in particolar modo nel settore nord-orientale. La fessura perimetrale è, infatti, arretrata ed è ormai prossima alla parete del M. Teverone. L'arretramento è probabilmente legato alla rimobilitazione

di un precedente accumulo di frana che avrebbe, in passato, interessato la zona di Roncadin. A seguito di ciò sono comparse numerose nuove fratture lungo tutto il coronamento, nella zona che va dalla scarpata principale fino alla strada forestale sommitale. Un'altra importante variazione morfologica registrata alla fine degli anni '90 è stata la totale riattivazione dell'accumulo superiore con il coinvolgimento del settore di Moda che, fino al 1998, non aveva dato segni di movimento. Ora tutta quest'area è in movimento e gli spostamenti maggiori sono concentrati proprio nella parte più occidentale. Associata a questa vasta ripresa dei movimenti si è registrato anche l'importante arretramento della scarpata secondaria di frana che delimita, a valle, l'accumulo superiore: l'effetto è quello di un pericoloso avvicinamento di questa scarpata a quella principale. Il raccordo tra questi due elementi morfologici rappresenterebbe un evento piuttosto pericoloso perché in questo modo si verrebbe a formare un'unica imponente scarpata, alta un centinaio di metri, incombenza sulla parte inferiore della colata. Ultima considerazione che deriva, non tanto dall'analisi della carta geomorfologica, quanto dai rilevamenti di campagna e dalle misure di spostamento effettuate negli ultimi anni, riguarda la zona di Pian de Cice. Questo rilievo riveste un'importanza strategica per la stabilità di tutto l'accumulo superiore. Ci sono però evidenze morfologiche che inducono a pensare che questa zona sia in lento ma progressivo movimento. Lungo il canale di scarico è ormai ben visibile una superficie, evidenziata da continue venute d'acqua, che rappresenta un'importante discontinuità, la cui presenza è confermata anche dai rilievi inclinometrici. La destabilizzazione di questo settore, indurrebbe delle modifiche molto importanti nella zona di alimentazione della frana, il suo crollo potrebbe comportare un allargamento della porzione di versante in frana con una velocizzazione ed intensificazione dei volumi delle colate verso l'abitato di Funès, con grave rischio per l'incolumità degli abitanti.

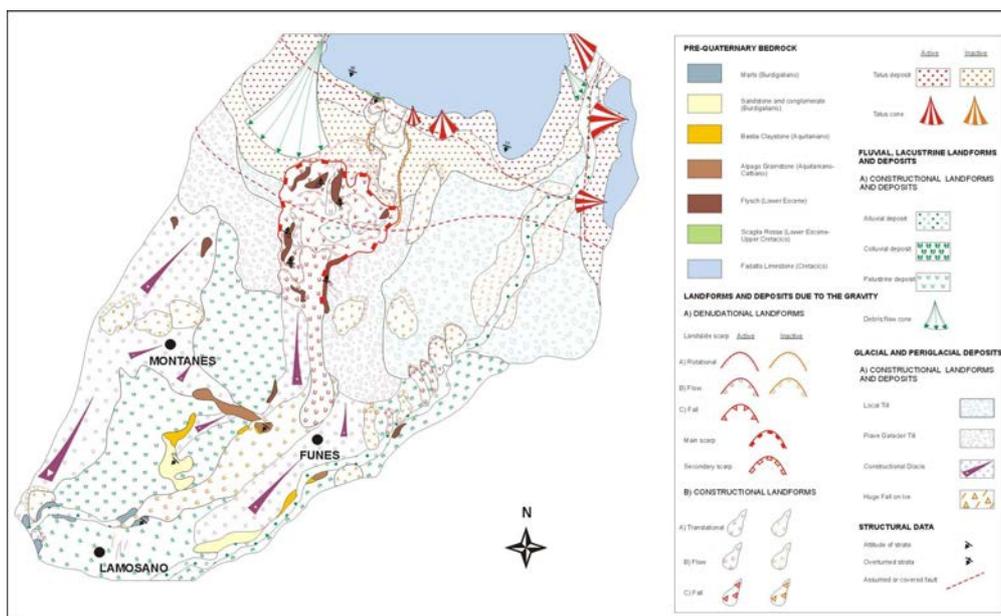


FIGURA 2.5 : Carta geomorfologica della frana del Tessina

## 2.2 Cenni storici

Nell'autunno del 1960 si è attivato, nella valle del Tessina, alla base del Monte Teverone in comune di Chies d'Alpago, il fenomeno franoso della frana del Tessina, che in 50 anni, mobilizzando oltre 5 milioni di metri cubi di materiale, ha causato profonde modificazioni morfologiche dell'area e ripetute situazioni di elevato rischio per i centri abitati di Funès, Lamosano e Tarcogna. La prima testimonianza di movimento della frana, con conseguente danneggiamento di opere idrauliche, risale al 20 Settembre 1960 tuttavia, l'effettivo inizio del dissesto si verificò il 30 Ottobre successivo. A seguito di intense e prolungate precipitazioni dei giorni precedenti (398,7 mm in Ottobre'60) avvenne il distacco di circa 1 milione di m<sup>3</sup> di materiale sulla parte meridionale del monte Teverone a quota 1100 m s.l.m., distribuito su un fronte di circa 300 m e con uno spessore di 20 m. Tale materiale si incanalò nella valle danneggiando la strada Pedol-Funes e provocando l'innalzamento del livello di base dell'alveo del torrente Tessina, attualmente completamente coperto.



FIGURA 2.6 : Zona sorgente della frana del Tessina e del tratto di valle a monte dell'abitato di Funes nel 1960

Nel dicembre 1962 si registrò una ripresa del fenomeno, causata da abbondanti precipitazioni nel mese precedente (251,2 mm in Novembre'62), che portò la colata a lambire l'abitato di Funes situato a valle. Ulteriori riprese si verificarono nel Dicembre 1963, dove la colata percorse anche 70-80 cm/giorno, e nel Marzo 1964 dove, a seguito dello scioglimento delle nevi e delle abbondanti precipitazioni, si registrò una velocità di circa 100 m/giorno ed un innalzamento del livello d'alveo di ulteriori 20 m in prossimità di Funes; durante questi eventi la colata si propagò verso valle avvicinandosi anche all'abitato di Lamosano. Oltre all'allarme nella popolazione, questi eventi provocarono ingenti danni alle infrastrutture: venne danneggiato l'acquedotto di Montanes, che dovette essere riparato ed in parte sostituito, venne distrutta una briglia in legno a monte di Lamosano realizzata nel 1961 ed il ponte collegante Funes e Pedol.

La situazione andò via via stabilizzandosi negli anni, nonostante la nicchia di distacco si sia ampliata gradualmente verso Est e verso Nord durante i periodi piovosi provocando colate modeste. È interessante osservare che la frana non ha registrato variazioni durante la disastrosa alluvione del Bellunese nel Novembre 1966. Negli anni successivi non si sono verificati particolari movimenti ma solamente delle riattivazioni con fenomeni di instabilità ridotti, fino al Dicembre 1991 quando, probabilmente in concomitanza di una leggera scossa sismica, nacquero delle fessurazioni seguite dal collasso di circa 2 milioni di m<sup>3</sup> di materiale dal settore sinistro della zona di alimentazione della frana. Nell'Aprile 1992, dopo un periodo particolarmente piovoso (160 mm in 15 giorni) e lo scioglimento delle nevi, si è verificato uno scorrimento rotazionale con superficie ipotizzabile tra i 20 e 30 m di un volume di circa 1 milione di m<sup>3</sup> di materiale in sinistra idrografica il quale, fortemente rimaneggiato e fluidificato per l'aumento del contenuto d'acqua, si propagò verso valle lungo l'asta del torrente alimentando il corpo della colata.

Verso fine mese la massa incanalata aumentò la velocità (10 m/h) e si diresse verso il lato sinistro della valle lambendo l'abitato di Funes ed innalzando di altri 4 m il fondo preesistente. Data la vicinanza della colata, il paese venne evacuato e si procedette alla realizzazione di un argine in blocchi di cemento e terre armate da parte del Genio Civile di Belluno.

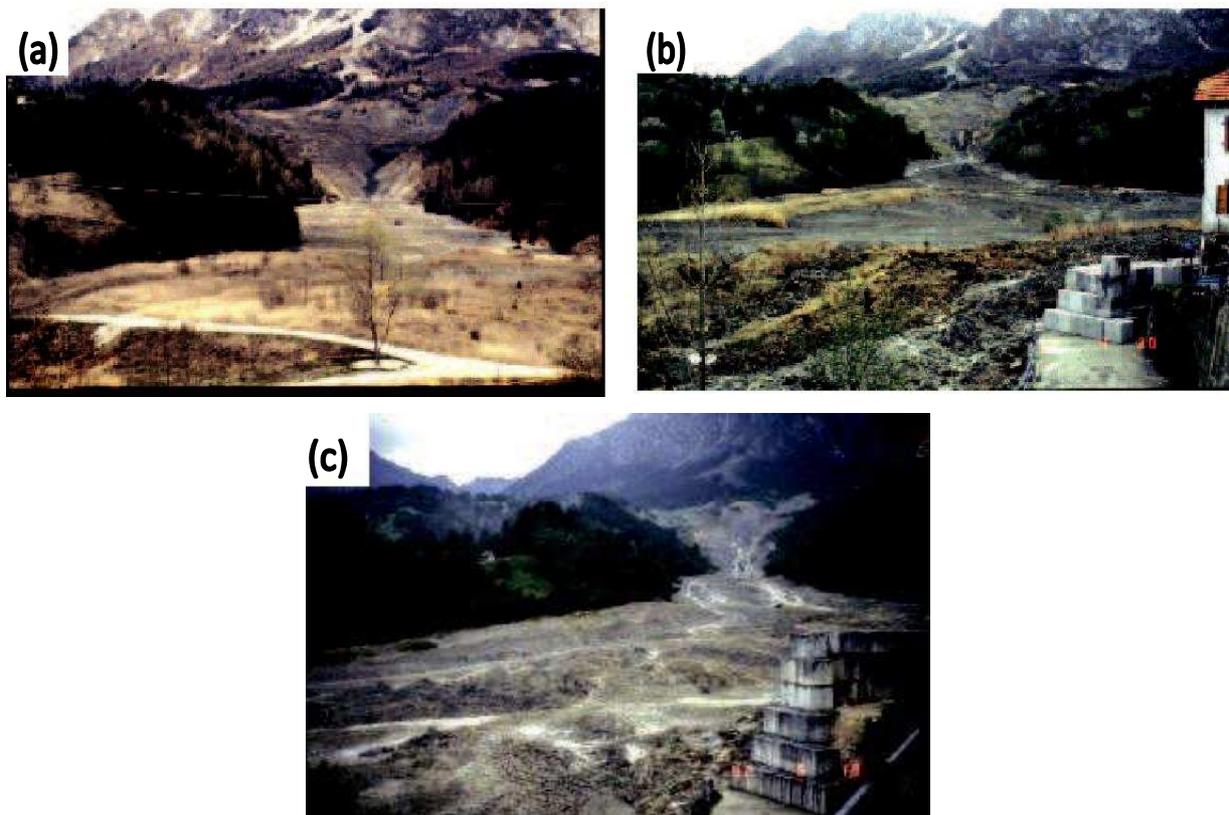


FIGURA 2.7 : Situazione in prossimità di Funes nel 1992: prima del collasso (a), dopo l'asportazione della strada Funes-Montanes (b) e arrivo del materiale in prossimità del muro di cls in fase di realizzazione (c)

Durante il mese successivo la colata provocò la disgregazione e il movimento del materiale precedentemente accumulato, convogliandolo verso valle con una velocità di 10 m/giorno provocando un'ulteriore innalzamento del livello di fondo in prossimità di Funes di circa 3 m. Date le elevate velocità si ipotizzò che la colata, nel giro di 2 settimane, avrebbe raggiunto gli abitati di Lamosano e Tarcogna; per questo venne realizzato un muro di cemento armato ed un terrapieno di terre armate come protezione.

Riassumendo, l'evento del 1992 ha comportato, oltre all'allargamento dell'area sorgente, notevoli modifiche del ripiano superiore e l'espansione del materiale a monte di Funes su tutta la valle del Tessina, con un suo ulteriore riempimento per spessori superiori a 10 m. Inoltre la colata ha parzialmente riempito la depressione presso Col, avanzando poi nella strettoia poco a monte dell'abitato di Tarcogna, depositando materiali per uno spessore superiore a 7 m e fermandosi in prossimità dell'abitato di Lamosano. Quest'ultimo era, ed è tuttora, soggetto ad un movimento franoso con spostamenti annuali di circa 2 cm e con una direzione simile a quella della colata, pertanto si temeva che la spinta del materiale potesse aggravare tale situazione.

Un altro evento importante si verificò nel Maggio 1995 dove, a seguito di un'abbondante precipitazione e probabilmente delle vibrazioni generate dalle esplosioni per la costruzione della galleria drenante, ci fu la mobilitazione di circa 2-2,5 milioni di m<sup>3</sup> di materiale che si propagò verso valle con una velocità di circa 30 m/giorno innalzando il fondo di ulteriori 3 m e raggiungendo, dopo 15 giorni, la stretta in corrispondenza di Lamosano.



FIGURA 2.8 : Giugno 1995, spessore della colata a monte dell'abitato di Lamosano

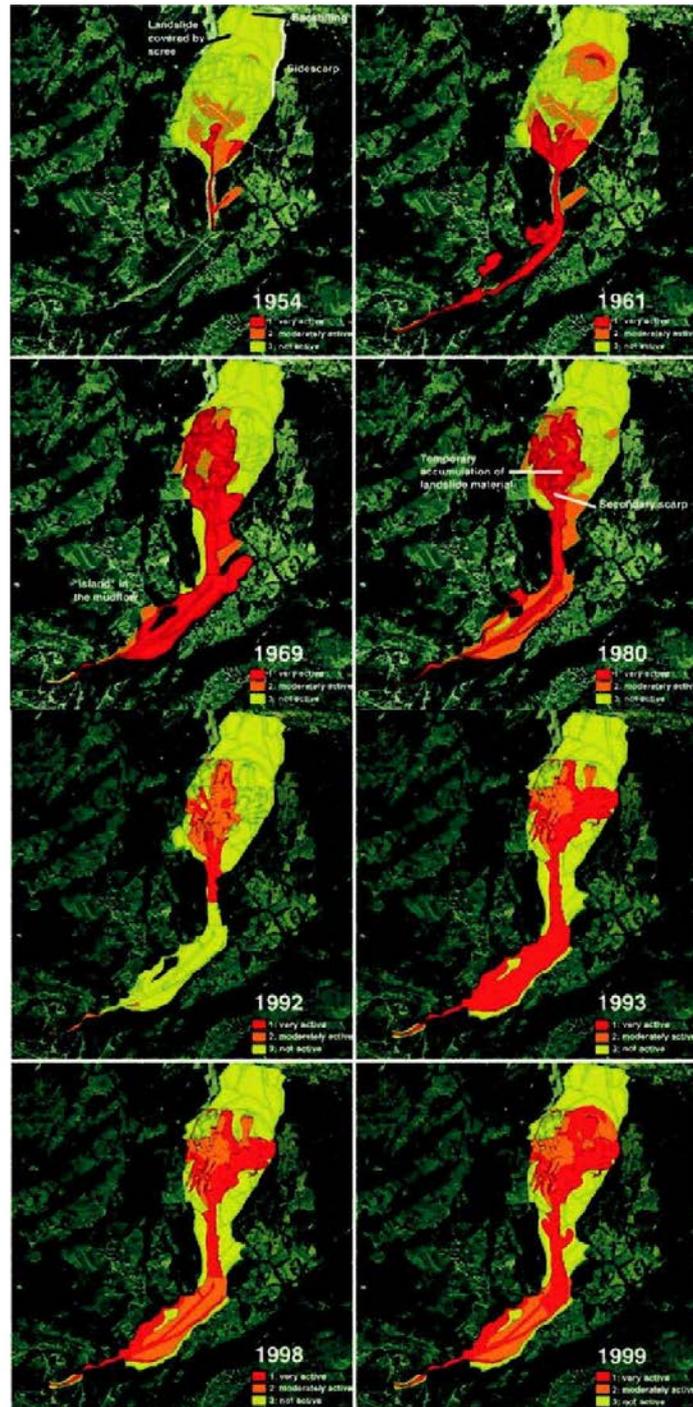


FIGURA 2.9 : Evoluzione della frana dal 1954 al 1980 e dal 1992 al 1999

Nel 1960 l'abitato di Funes si trovava ad una quota superiore di 50 m rispetto al fondo d'alveo mentre oggi, dopo i successivi accumuli di materiale di colata, è pressoché a livello.

La situazione negli ultimi anni sembra stabilizzata, tuttavia si registrano ancora movimenti franosi di piccola intensità che interessano in particolar modo la parte alta, quella della sorgente, e della mediana, che ha visto l'asportazione più volte della strada di collegamento tra Pedol e Funes come avvenuto nel Maggio 2013. Nonostante il corpo centrale sia stabile, ci sono due aree che destano particolare preoccupazione: quella di "Pian de Cice" e di "Moda" che hanno evidenziato

spostamenti in accelerazione, seppur di lieve intensità, suggerendo la possibilità di un futuro collasso. Se questo dovesse avvenire, soprattutto in riferimento a Pian de Cice, comporterebbe la mobilitazione di importanti volumi di materiale con dinamica diversa dalla colata ed un notevole aggravio delle condizioni di rischio per gli abitati di Funes e Lamosano.



FIGURA 2.10 : Il settore di Moda vista dalla parte superiore della frana (anno 2014)



FIGURA 2.11 : Il punto sommitale della frana in cui è ben visibile il coronamento e la scarpata principale (anno 2014)

## 2.3 Interventi effettuati

Nel corso degli anni furono effettuati diversi interventi di natura idraulica e strutturale per ripristinare il corso del torrente Tessina e contenere il materiale di frana ma, data l'importanza dei volumi coinvolti, essi si rivelarono inefficaci comportando un grande spreco di denaro.

Nel 1961, subito dopo il primo grande movimento, il Corpo Forestale dello Stato realizzò una grossa briglia di ritenuta in gabbionate nei pressi dell'abitato di Funes ed una briglia ad arco a monte di Lamosano, che però furono entrambi distrutte nell'evento del 1964.

Nei vent'anni successivi furono effettuati diversi interventi volti soprattutto alla canalizzazione e convogliamento delle acque: si realizzarono delle briglie in legno, dei canali drenanti rivestiti, delle reti di drenaggio e dei lavori di captazione e derivazione delle sorgenti Pelegona e Moda.

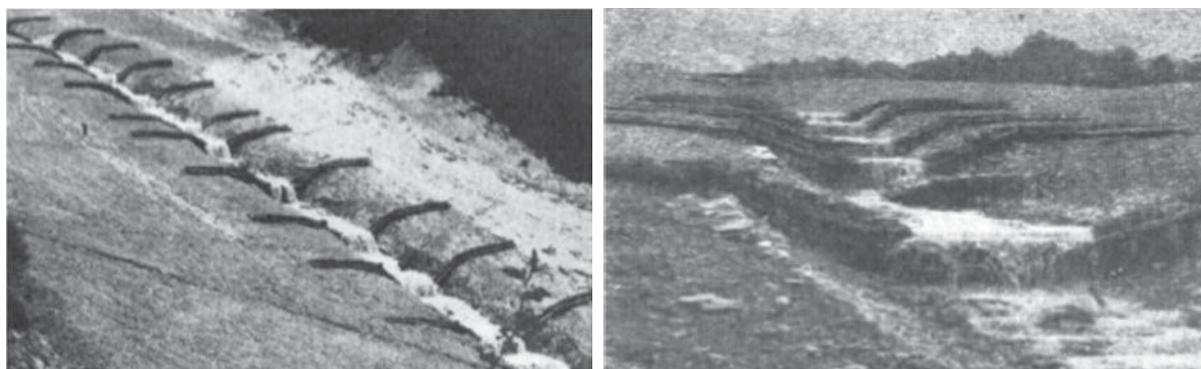


FIGURA 2.12 : Briglie in legname e materassi sul Tessina, distrutte dall'arrivo delle colate

Tutti questi interventi però furono solamente uno spreco economico e di materiale in quanto furono inefficaci e distrutti nel tempo. Dopo l'evento del 1992, per fronteggiare al meglio l'emergenza, si costituì un'unità di crisi con sede a Lamosano composta dal Genio Civile di Belluno, dai Vigili del fuoco, da un gruppo di ricercatori del CNR-IRPI di Padova e dal Ministero della Protezione civile. Per tre mesi l'unità monitorò il movimento franoso e si istituì, per la prima volta in Italia, un Piano di Protezione Civile integrato a un sistema d'allarme, che in caso di elevata pericolosità avrebbe portato all'evacuazione della popolazione.

Come anticipato, per proteggere l'abitato di Funes, si realizzò un argine di sicurezza in blocchi di calcestruzzo e terra armata; lo stesso intervento fu attuato per gli abitati di Lamosano e Tarcogna.

Nel 1993, per individuare altri interventi di stabilizzazione della frana, la Regione affidò l'incarico ad Edoardo Semenza e Floriano Villa, i quali presentarono due differenti ipotesi di intervento basate su diverse interpretazioni delle caratteristiche idrogeologiche dell'area e, in particolare, in funzione della provenienza delle acque, responsabili della mobilitazione del materiale:

Semenza: ipotizzò che le acque afferenti al corpo di frana provenissero direttamente dal monte Teverone, il quale raccoglie tutte le precipitazioni convogliandole, attraverso fessure e condotti

carsici, fino ad un livello impermeabile che provocherebbe il trabocco dell'acqua così raccolta e la successiva infiltrazione nell'ammasso in movimento. Per ovviare a questo effetto, propose la realizzazione di una galleria drenante.

Villa: Ritene che il bacino del monte Teverone non fosse in grado di raccogliere e fornire una quantità d'acqua sufficiente per alimentare il movimento franoso, per questo ipotizzò che l'apporto maggiore fosse da attribuire principalmente al bacino laterale della valle di Montanés, i cui contributi penetrerebbero in profondità del corpo di frana da Ovest o Nord-Ovest, alimentando anche la sorgente Pelegona. Per captare quest'acqua propose la realizzazione di pozzi drenanti verticali di grande diametro.

Anche se secondo il modello di Villa la realizzazione di una galleria drenante avrebbe avuto solo la funzione di regolarizzare le portate delle sorgenti, smussandone i picchi, ma non quella di eliminare completamente la presenza d'acqua nell'area di frana, si procedette comunque alla sua realizzazione sulla base delle indicazioni di Semenza.



FIGURA 2.13 : Muro in blocchi in calcestruzzo eretto in prossimità dell'abitato di Funes nel 1992

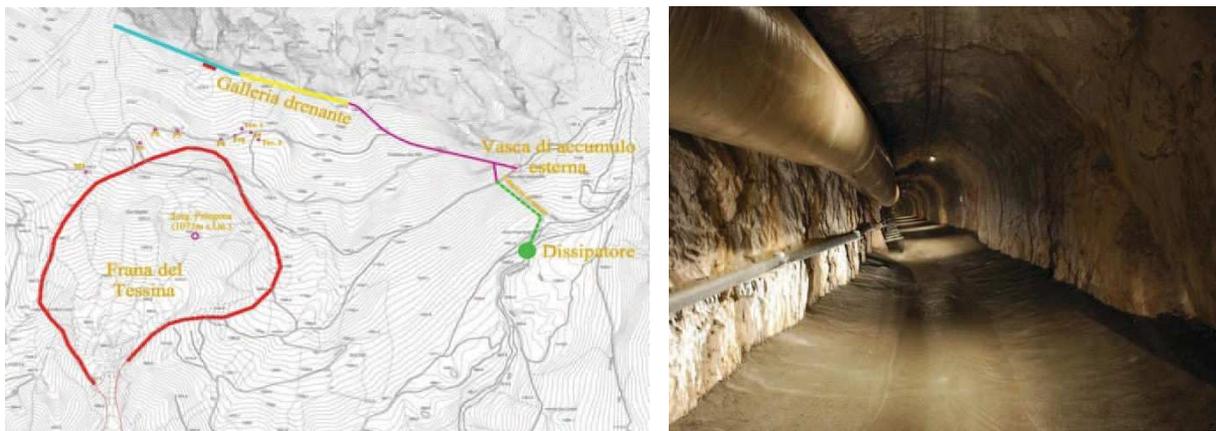


FIGURA 2.14: Ubicazione della galleria drenante (Genio Civile di Belluno) e immagine del suo interno

La galleria, costruita tra il 1995 e il 1997, presenta una lunghezza di 1244 m, sezione di scavo di 14 m<sup>2</sup>, pendenza di fondo di 0,035 % e quota di imbocco situata a 1143 m s.l.m.

Essa è stata quasi interamente scavata nei calcari del monte Teverone, con un orientamento Est-Ovest, ed è composta dall’imbocco e dal corridoio sotterraneo, completo di una condotta di scarico a sezione semicircolare per l’afflusso delle acque drenate da convogliare nel serbatoio di accumulo.

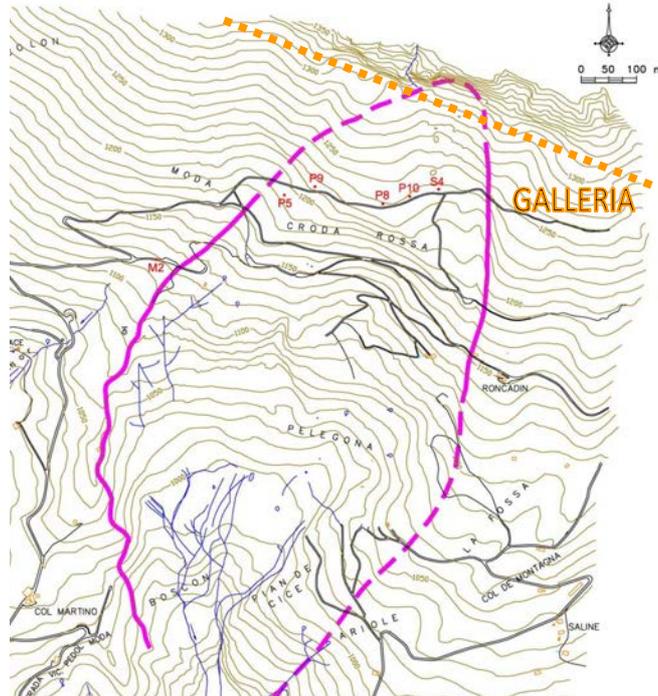


FIGURA 2.15 : . Posizione della galleria, dei piezometri attivi nel 2008-2010 e della sorgente Pelegona

Lo scavo è stato realizzato con fori pilota in pre-avanzamento, profilato con fori e cariche esplosive secondo la tecnologia “smoothblasting” e, inoltre, al fine di aumentare la capacità drenante dell’opera, è stata eseguita una serie di dreni suborizzontali, rivolti verso l’interno del massiccio del monte Teverone per una lunghezza complessiva di 18712 m. Tale intervento è stato introdotto per deprimere localmente le sovrappressioni idrauliche e permettere un agevole lavoro di scavo della galleria. Successivamente è stato effettuato un intervento di miglioramento dello stato della pavimentazione e dell’efficacia della canaletta di scarico per facilitare l’allontanamento delle acque drenate. Per quanto la galleria abbia avuto un effetto drenante, con portate costanti oscillanti tra 30 e 350 l/s rispettivamente in corrispondenza a periodi poco piovosi e a seguito di prolungate precipitazioni, non è risultata efficace nella risoluzione del problema, in quanto non intercetta tutta la circolazione idrica sotterranea proveniente dal monte Teverone.

L’intervento però non fu del tutto inutile, infatti grazie alla costruzione di una piccola centrale idroelettrica sul torrente Funesia (ricettore di scarico della galleria), il comune di Chies ha potuto sfruttare le portate drenate per la produzione di corrente elettrica (1721000 kWh all’anno).

Inoltre circa 2 anni fa sono stati eseguiti degli altri fori drenanti a partire dalla galleria, al momento però non si dispone di molti dati per descriverne gli effetti.

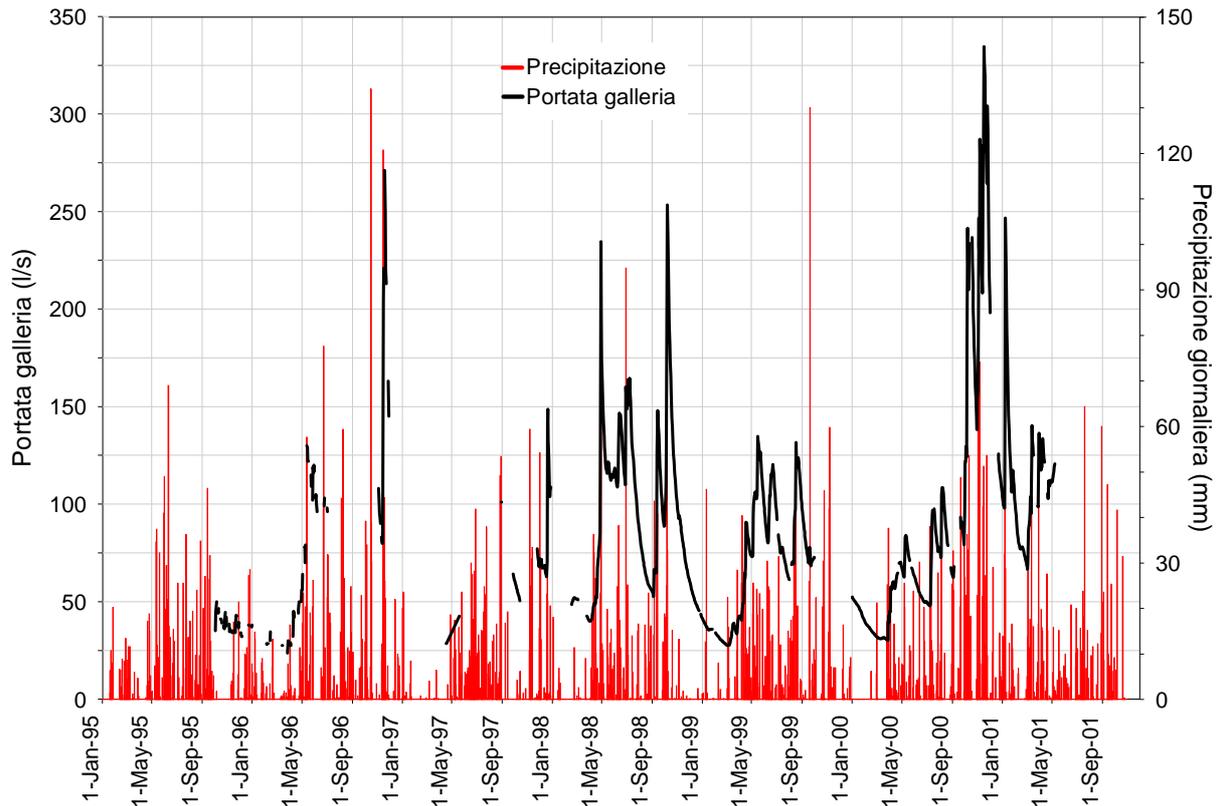


FIGURA 2.16 : Confronto tra precipitazione giornaliera e portata drenata dalla galleria negli anni 1995-2001

## 2.4 Sistemi di monitoraggio

Oltre agli interventi sopracitati, nella frana del Tessina è stata eseguita negli anni una grande attività di monitoraggio volta allo studio del fenomeno e alla prevenzione del rischio.

I risultati ottenuti hanno permesso di comprendere meglio sia le caratteristiche fisico/meccaniche del fenomeno franoso, sia il suo comportamento ed evoluzione nel tempo.

### 2.4.1 Il monitoraggio della Frana del Tessina

A seguito della riattivazione del 1992 l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica di Padova fu incaricato, dall'allora Ministero della Protezione Civile, di ideare e progettare un sistema di monitoraggio ed allarme per la messa in sicurezza degli abitati di Funes e Lamosano. La filosofia con cui venne concepito tale sistema prevedeva di controllare la zona sorgente, a scopo di studio, e la colata con finalità di allarme, differenziando quindi gli strumenti utilizzati.

Si trattava, in generale, di sistemi che permettevano la misura di spostamenti superficiali e profondi, delle variazioni piezometriche e delle precipitazioni. Una volta realizzata la galleria drenante, nel 1997, il sistema venne integrato con misure di portata effettuate nella galleria che dovevano consentire di verificare l'influenza delle precipitazioni e la modalità di filtrazione degli afflussi meteorici nonché i loro rapporti con le variazioni piezometriche misurate all'interno dell'area in frana. Si illustrano ora le principali strumentazioni utilizzate.

### 2.4.2 Sistemi di monitoraggio automatico

Questi sistemi consentono la misura dei parametri senza l'intervento di un operatore e per questo sono molto utilizzati quando i punti di misura si trovano in aree difficilmente raggiungibili o rischiose, quando la frequenza di lettura richiesta è troppo elevata per misure manuali o quando siano abbinati a sistemi di allarme.

Nel caso in esame venne installata una serie di sensori e strumenti che, tramite centraline periferiche, segnalavano ad una stazione centrale variazioni e movimenti sia della colata che della zona sorgente. Dopo l'elaborazione, la stazione centrale segnalava eventuali situazioni di allarme ai Vigili del Fuoco di Belluno. Nella zona di alimentazione furono installati due sistemi estensimetrici a filo a base multipla, di lunghezze 280 m e 390 m, per la misura continua dei movimenti superficiali ed una serie di 12 centraline; tale sistema venne distrutto nell'evento del 1993 (figura 2.17).

Sempre nella parte superiore fu installato un sistema topografico con ricerca automatica dei capisaldi per la misura di spostamenti superficiali, che rimase attivo fino alla fine del 2009.

Le misure ottenute permisero di riconoscere delle fasi di accelerazione e prevedere i collassi di alcune aree, in particolare per quanto riguarda gli eventi del 1993 e 1995 per i quali sono riportati alcuni dei grafici più significativi (figura 2.18).

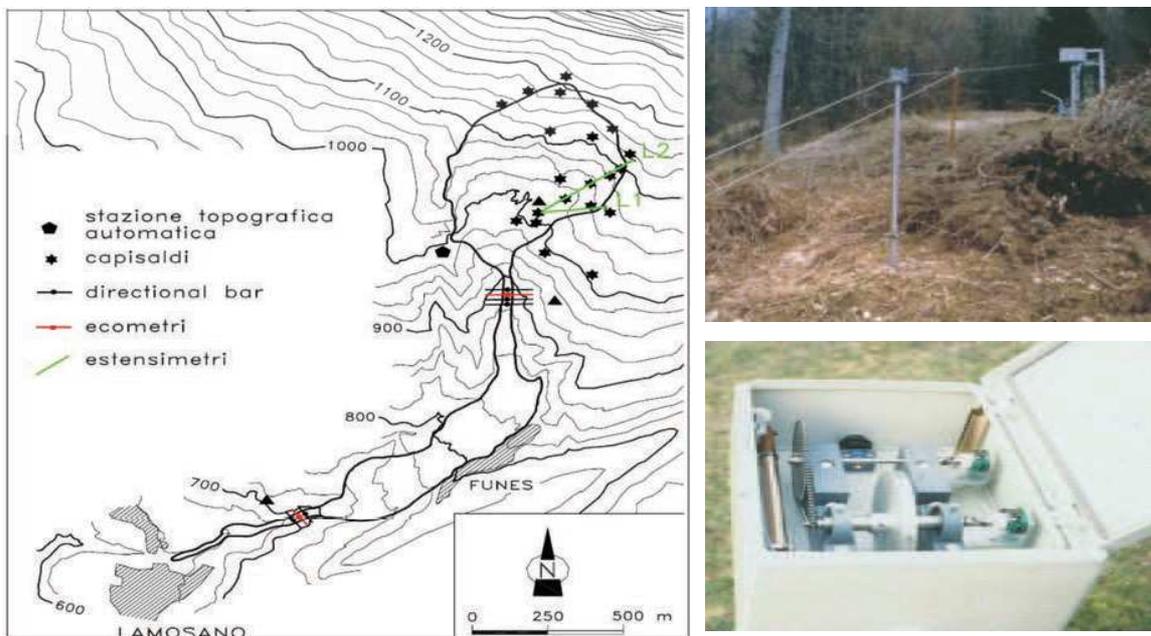
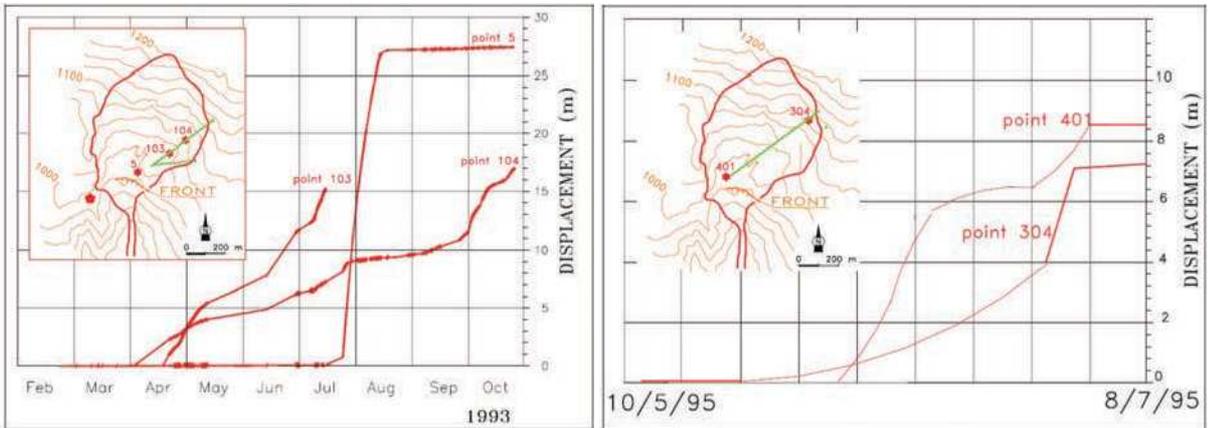


FIGURA 2.17 : Disposizione dei sistemi di monitoraggio automatico e particolare di un estensimetro a base multipla e di una centralina di misura



FIGURA

2.18 : Andamento degli spostamenti per alcuni punti significativi

In entrambi gli eventi fu possibile definire con una certa precisione l'evoluzione del fenomeno: inizialmente si mobilitarono le aree in prossimità della scarpata principale e solo dopo alcuni giorni i punti posti in prossimità della scarpata secondaria che raccorda la zona superiore con la colata. L'andamento degli spostamenti nel triennio 1997-1999, consentì una zonizzazione della frana in 4 aree caratterizzate da velocità di spostamento diverse (figura 2.19).

1. Fascia sinistra idrografica tra Roncadin e Pian de Cice, caratterizzata da spostamenti inferiori a 15 cm/anno
2. Zona di coronamento con spostamenti compresi tra i 30 e i 100 cm/anno
3. Zona a monte della scarpata principale con spostamenti compresi tra i 15 e i 30 cm/anno
4. Zona di accumulo superiore con spostamenti maggiori di 1m/anno

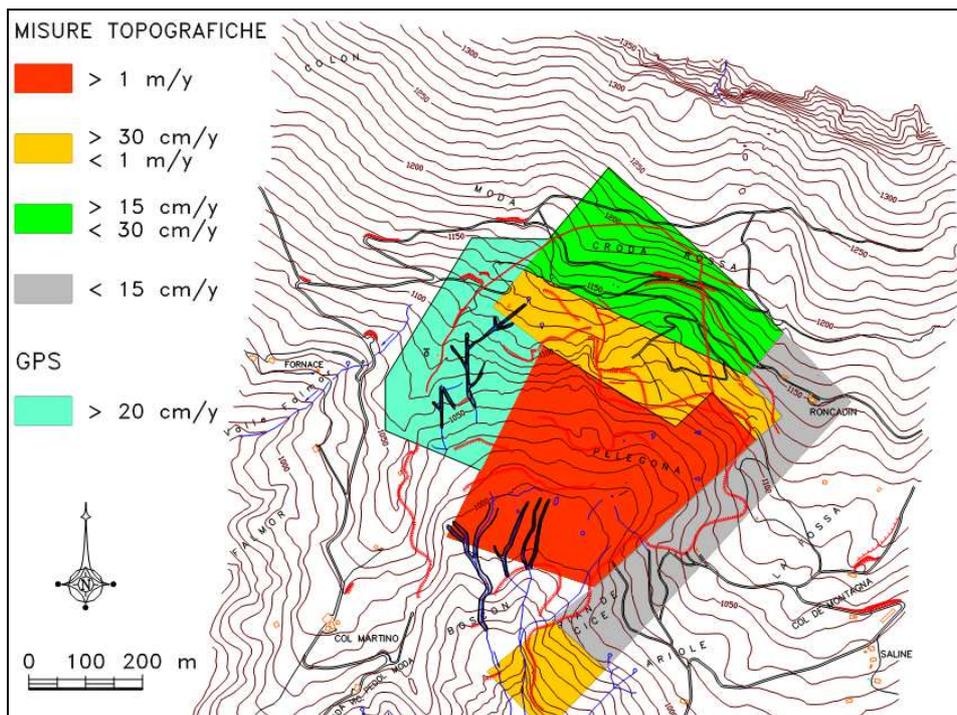


FIGURA 2.19 : Delimitazione dell'area sorgente in zone caratterizzate da valori di spostamento simili

Nel corpo della colata furono invece attrezzate due stazioni di controllo a monte di Funes e Lamosano: una costituita da tre aste direzionali (aste di qualche metro appese ad un cavo teso trasversalmente al corpo di frana) ed un ecometro ad ultrasuoni (strumenti per la misura della quota d'alveo) e l'altra da due aste ed un ecometro (figura 2.20).

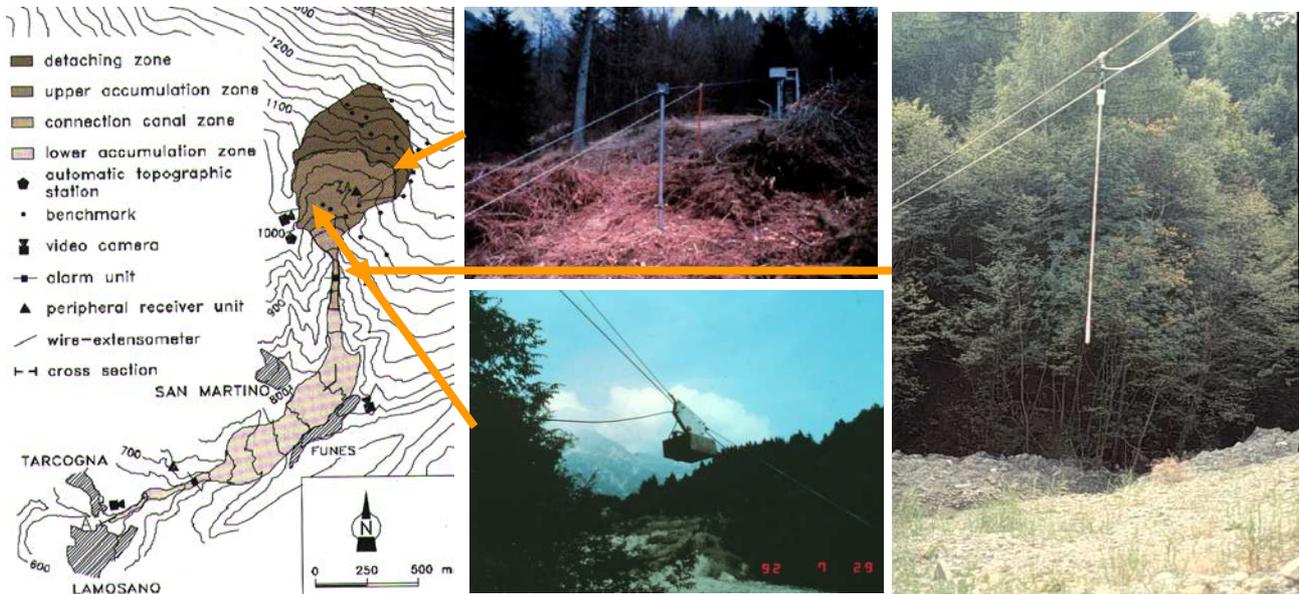


FIGURA 2.20 : Particolare di un asta direzionale e tre aste direzionali ed un ecometro per il controllo della colata a monte di Funes

Nel caso di transito di materiale le aste subiscono un'inclinazione lungo la direzione di scorrimento; qualora tale inclinazione risulti maggiore di  $20^\circ$  per un periodo superiore ai 16 s, viene inviato un allarme attraverso la chiusura di un contatto al mercurio che viene confermato dal segnale degli ecometri, i quali rilevano l'andamento della quota del fondo d'alveo (figura 2.21).

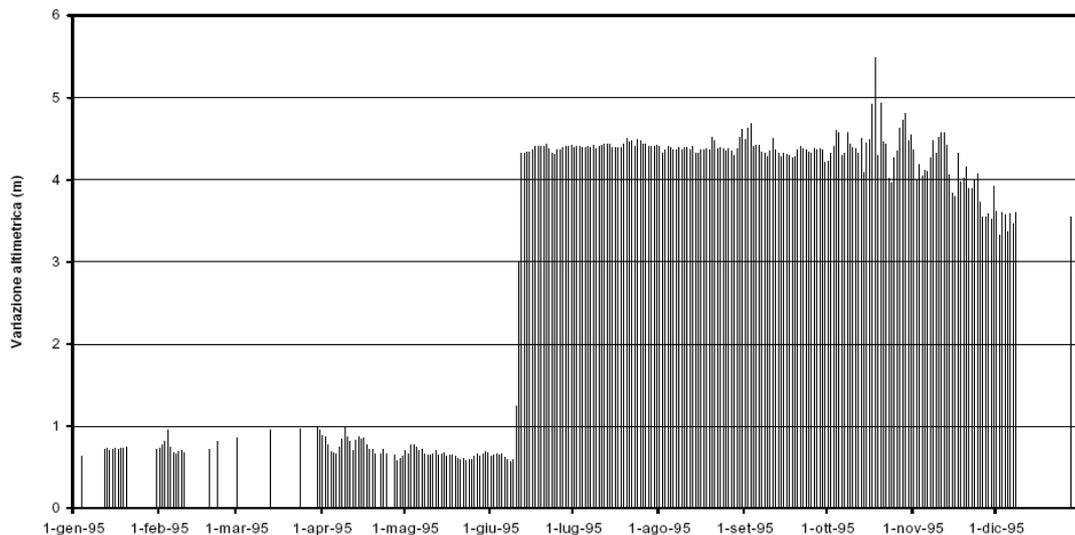


FIGURA 2.21 : Variazioni di quota del fondo d'alveo a monte di Lamosano durante tutto il 1995

Ai sistemi sopraesposti furono affiancate tre telecamere per la registrazione ed il controllo visivo dei movimenti in corrispondenza delle zone ritenute più critiche: la prima venne installata presso il ponte vecchio di Lamosano, la seconda a Funes e la terza in una zona stabile in destra orografica a 1000 m s.l.m. puntata verso il coronamento della frana. Dal 18 Maggio 1992 fu installata inoltre una telecamera all'infrarosso termico in località di Funes per il controllo notturno della colata.

### **2.4.3 Sistemi di monitoraggio manuale**

Questi sistemi necessitano dell'intervento di un operatore e vengono tipicamente utilizzati quando la tipologia ed il numero di strumenti installati, nonché le condizioni al contorno (accessibilità, gestione ecc...) la frequenza di lettura e le disponibilità economiche, impediscono l'installazione di sistemi automatici. Come dispositivi di misura manuale furono utilizzati: inclinometri (alcuni dotati di cavi TDR), estensimetri a filo, piezometri (alcuni elettrici), capisaldi GPS, un misuratore di portata all'uscita della galleria drenante e due stazioni meteorologiche per la registrazione delle precipitazioni. Parte di questi strumenti furono installati a seguito degli eventi del 1992 soprattutto nella zona di scarpata e nel settore di Pian de Cice, e sono tuttora attivi.

#### **Spostamenti superficiali**

Gli spostamenti superficiali vennero misurati sia con sistemi topografici tradizionali sia con sistemi GPS, in riferimento a due zone: la prima identificabile come sorgente ed accumulo superiore, dove vennero eseguite misure topografiche automatiche e GPS, e la seconda coincidente con i tratti di colata a monte e valle di Funes, dove furono installati dei capisaldi topografici per la misura manuale. Le misure GPS, in accordo con le topografiche automatiche, permisero di confermare l'attività dell'area di Moda e della destra orografica, ed il costante movimento della scarpata principale e della zona a monte. Le misure topografiche manuali invece, registrarono osservazioni dell'ordine degli errori strumentale e quindi non furono rilevati spostamenti che potessero essere collegati ad un reale movimento della colata.

#### **Spostamenti profondi**

Tali spostamenti vennero misurati mediante l'uso di inclinometri classici e con cavi TDR i quali permisero di rilevare uno spostamento continuo di Pian de Cice (5-7 cm/anno) ed una superficie di scorrimento ben definita alla profondità di circa 26 m. Nel periodo 1997-1999 furono effettuate due campagne, con l'impiego di una sonda televisiva, per verificare l'agibilità di oltre 20 pozzi realizzati nei primi anni'90 i quali risultarono rotti ad una profondità variabile tra i -20 e -68 m.

### Misura delle precipitazioni e dei livelli piezometrici

Le misure pluviometriche vengono raccolte dalle stazioni limitrofe alla frana situate a Chies, Roncadin, Funes e Degnona/Moda, mentre per osservare il livello di falda furono realizzati, per conto della Regione Veneto, 14 sondaggi. Nel Novembre 1995 l'IRPI-CNR di Padova installò piezometri elettrici nei pozzi ancora agibili ubicati su Pian de Cice i quali furono monitorati in continuo.

Nel periodo 1994-1997, in corrispondenza della costruzione della galleria drenante, vennero registrati dei valori inferiori rispetto ai precedenti indicando quindi un'efficace azione drenante iniziale da parte della galleria, sia sul monte Teverone sia sull'accumulo di frana (figura 2.22).

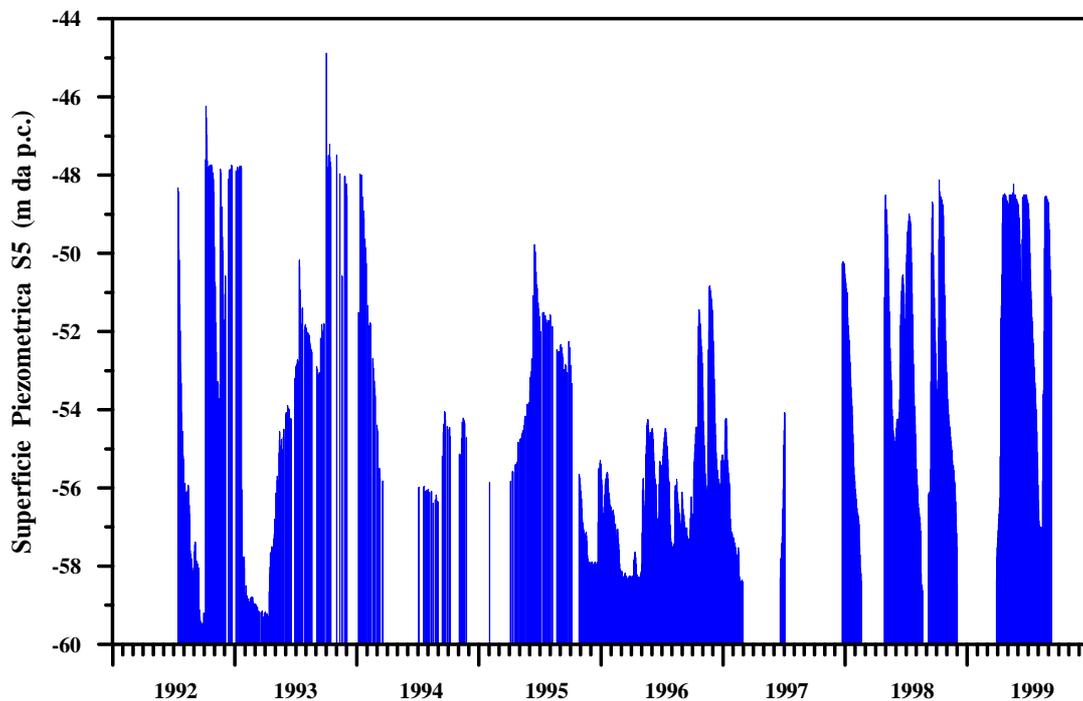


FIGURA 2.22 : Andamento della falda nel periodo che va dal 1992 al 1999

### Misure di portata in galleria

I dati raccolti dimostrano la presenza di una portata minima costante pari a 30/40 l/s, rispetto la quale si hanno frequenti variazioni con picchi giornalieri che raggiungono anche i 250 l/s. L'analisi idrologica ha evidenziato che esiste un ritardo di circa 6 ore fra l'inizio delle precipitazioni e l'incremento delle portate in galleria ed un ritardo rispettivamente di circa 9 e 12 ore fra l'inizio delle precipitazioni e l'aumento dei livelli di falda. Una risposta così veloce sia da parte della galleria che della superficie piezometrica è indice di una circolazione idrica per fessurazione, entro l'ammasso roccioso, particolarmente attiva e dovuta alle numerose fratture presenti in tutta l'area.

### Interferometria SAR

Questa tecnica, che venne applicata tra il 25 Settembre e il 13 Ottobre 2000, si basa su misure da postazioni remote che permettono di descrivere il comportamento di tutti i punti della superficie osservata, senza il bisogno della presenza di un operatore.

Il radar è un sensore che invia impulsi a microonde verso la scena osservata, registra coerentemente il segnale retrodiffuso, e deriva l'informazione sulla distanza dei diversi retrodiffusori nella scena dal calcolo del ritardo temporale tra segnale inviato ed eco ricevuto (figura 2.23).

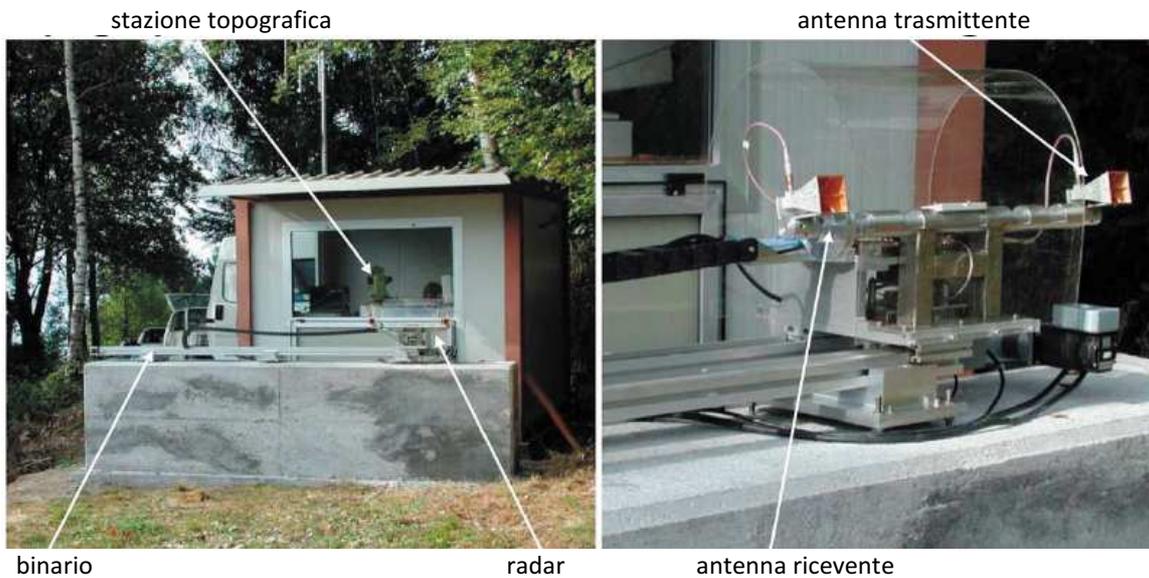


FIGURA 2.23 : Stazione SAR

Grazie a questa tecnica è stato possibile ottenere una mappa delle deformazioni superficiali dell'area indagata con una precisione millimetrica e verificare la bontà delle misurazioni eseguite mediante rilievo topografico (figura 2.24).

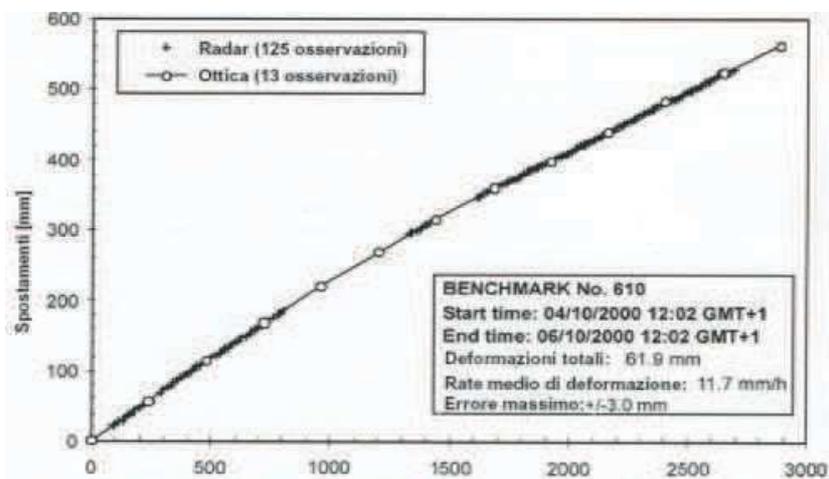


FIGURA 2.24 : Confronto tra SAR e rilievo topografico per l'andamento tempo/deformazioni di un caposaldo

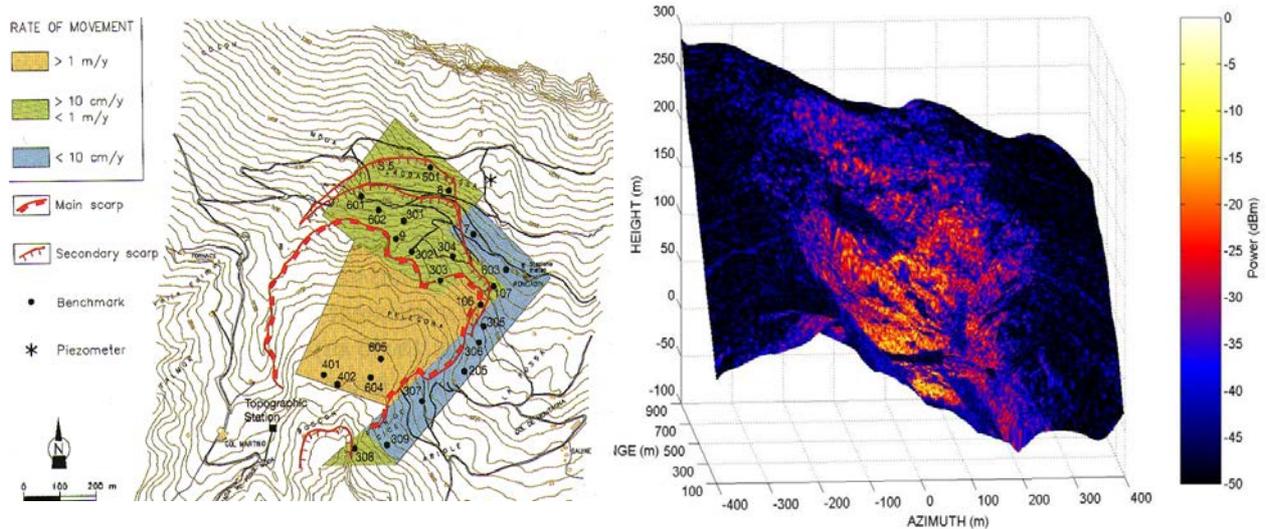


FIGURA 2.25 : Risultati del sistema SAR con le posizioni dei capisaldi topografici.

## 2.5 Il sistema di monitoraggio fotogrammetrico

Oltre alle strumentazioni precedentemente esposte, dal 2011 è presente un sistema di monitoraggio basato sull'acquisizione di immagini digitali da due fotocamere, che possono essere successivamente elaborate al fine di determinare gli spostamenti della colata.

Questo sistema è di tipo misto, cioè si ha l'acquisizione automatica dei dati ma è necessario l'intervento dell'operatore per la loro raccolta, in quanto non è possibile l'accesso remoto per mancanza di copertura telefonica nella zona.

Negli anni scorsi, grazie al buon numero di fotografie raccolte ed alla loro alta risoluzione, è stato possibile determinare direzione ed intensità (in pixel) degli spostamenti di alcuni target individuati nelle foto mediante un programma basato sul Particle Image Velocimetry (PIV) realizzato dal Dottor Fabio Gabrieli e Mirco Motta.

Una volta definito lo scopo del monitoraggio, ed aver quindi individuato la strumentazione adeguata per conseguirlo, è necessario verificare la presenza di una zona idonea per l'installazione e la gestione del sistema, che garantisca accessibilità e comodità nelle operazioni da svolgere.

Nel caso del Tessina la scelta dell'ubicazione è stata leggermente vincolata dalla presenza, in sinistra orografica (zona Moda), di una stazione del CNR, la quale ha fornito degli elementi utili all'installazione ed è inoltre facilmente raggiungibile per eventuali interventi di manutenzione e prelievo di dati. Da questa posizione, situata a 1005 m s.l.m. in destra orografica della frana, è possibile osservare gran parte del dissesto ed in particolare il coronamento in sinistra orografica, l'accumulo superiore e l'inizio del canale di convogliamento verso valle (figure 2.26 – 2.27).

La stazione si trova in una zona boschiva ed è priva di copertura di rete telefonica, impedendo così l'installazione di un sistema di controllo remoto, ed inoltre, la crescita della vegetazione davanti alle fotocamere rende inutilizzabili le foto soprattutto nel periodo primaverile/estivo.



FIGURA 2.26 : Vista della zona sorgente della frana dalla stazione di monitoraggio fotogrammetrico



FIGURA 2.27 : Vista della stazione di monitoraggio fotogrammetrico

Il sistema di monitoraggio è composto da due fotocamere digitali Canon EOS 550D per l'acquisizione delle immagini, un computer per l'archiviazione delle foto e l'invio di una mail di conferma di funzionamento del sistema, due webcam per la sorveglianza della stazione.

Questo sistema di monitoraggio, presenta pregi e difetti: dato il costo ed il tipo di strumentazione e di infrastrutture necessarie, questo metodo risulta essere pratico, economico e di semplice installazione. Mediante opportuni software è possibile determinare gli spostamenti del materiale grazie all'ottima risoluzione delle fotocamere, che permette inoltre di apprezzare l'evoluzione del dissesto anche solo osservando le immagini in sequenza. Grazie al software di invio mail è possibile accertare il funzionamento del sistema ed individuare eventuali intrusioni in prossimità della strumentazione.

La zona in cui è installata l'attrezzatura, risulta essere facilmente accessibile per l'eventuale manutenzione e raccolta dati ed inoltre, grazie alle infrastrutture già presenti, l'installazione è stata facilitata anche se leggermente vincolata.

Il principale difetto rilevato durante gli studi è la dipendenza dagli agenti atmosferici: in presenza di nebbia, neve e tal volta pioggia, le foto sono parzialmente o totalmente inutilizzabili ed inoltre la strumentazione può subire delle modifiche dei suoi settaggi (ad es. perdita di messa a fuoco nelle fotocamere). Non essendo un sistema di monitoraggio automatico è necessario recarsi in loco per scaricare i dati, i quali quindi risultano retrodatati e non in tempo reale; pertanto tale sistema non può essere utilizzato, ad esempio, per scopi di allertamento. L'ubicazione della strumentazione, essendo in zona boschiva, risente della presenza di vegetazione la quale, crescendo, ostruisce spesso la visuale delle fotocamere rendendo totalmente o parzialmente inutilizzabili le foto; si rende quindi necessario recarsi in loco per interventi di rimozione o prevedere un riposizionamento degli strumenti.

La tecnica fotogrammetrica ha richiesto alcuni passaggi iniziali per l'installazione del sistema.

- Raccolta di varie foto da diverse angolazioni (Pi)
- Correzione della distorsione laterale fotografica
- Orientamento spaziale delle foto abbinando analoghi punti selezionati manualmente
- L'identificazione automatica di altri punti
- Calcolo dello spostamento di ciascun punto dalla differenza di coordinate in due istanti

Per verificare la bontà del lavoro svolto nell'analisi visiva della fotografie, e confermare il meccanismo di movimento individuato, si utilizzano delle analisi statistiche che consentono di ricercare le dipendenza tra gli spostamenti delle diverse zone.

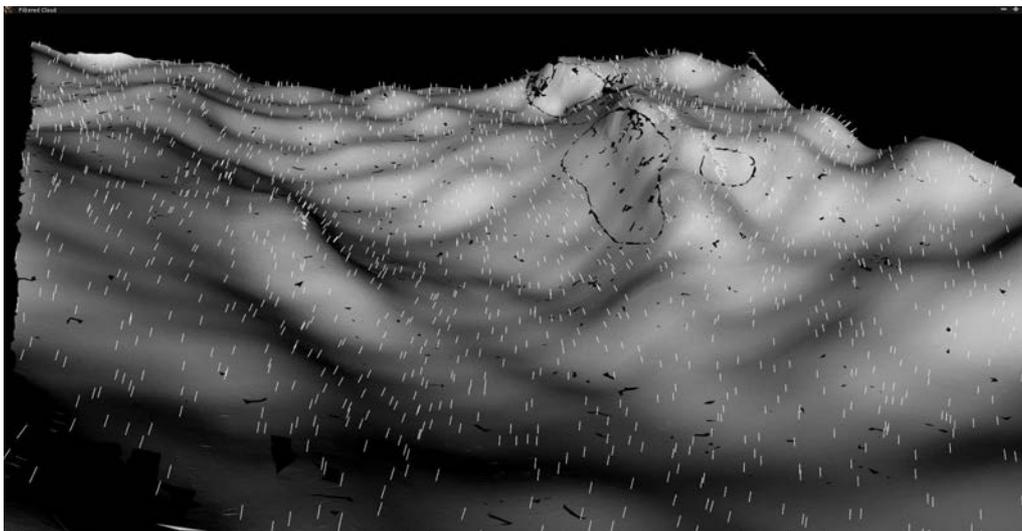


FIGURA 2.28 : Ricostruzione 3d del terreno da due immagini sorgenti

Essendo la frana in esame una colata si vogliono ricercare eventuali correlazioni tra gli spostamenti rilevati dalle fotografie e gli eventi pluviometrici, utilizzando i dati raccolti dalla stazione meteorologica di Roncadin, vicino a Chies d'Alpago. Presentandosi il fenomeno molto vario ed esteso, un'eventuale correlazione risulterebbe di particolare interesse dal punto di vista previsionale e quindi di sicurezza per gli abitati di Funes e Lamosano.

Per quanto riguarda il sistema di monitoraggio fotogrammetrico utilizzato è possibile affermare che esso risulta un buon compromesso tra economicità e semplicità di installazione, necessitando solamente di alcune accortezze nella protezione della strumentazione, e di interventi volti alla rimozione della vegetazione.

L'analisi visiva delle fotografie sembrerebbe un buon punto di partenza per lo studio degli spostamenti della frana, in quanto, grazie all'alta risoluzione, è possibile individuare i meccanismi di movimento del materiale e l'evoluzione del dissesto nel tempo solamente scorrendo le immagini in sequenza.



FIGURA 2.29 : Esempio di analisi visiva del movimento della colata con una serie di fotografie ad alta risoluzione

### 3. IL SETTORE PIAN DE CICE

La zona di Pian de Cice ricopre un ruolo fondamentale nell'evoluzione della frana del Tessina in quanto, grazie ai numerosi studi svolti negli anni, sono stati rilevati spostamenti dell'ordine dei 2,8 - 6,3 cm annui che hanno portato ad uno scivolamento di 50 cm negli ultimi 10 anni.

In alcune relazioni tecniche effettuate per conto della Regione Veneto è stato scritto che: *“l'eventuale collasso di questo sperone roccioso potrebbe comportare la mobilitazione di importanti settori dell'accumulo superiore, anche con dinamica diversa da quanto finora avvenuto; ciò comporterebbe un notevole aggravio delle condizioni di rischio per gli abitati di Funes e Lamosano...”*. È stato, inoltre, sottolineato che *“... eventuali collassi nella zona sorgente possono creare nuove colate che vanno a sovrapporsi a quelle già stabilizzate. Ciò determina il fenomeno di carico non drenato sul materiale di colata più vecchio, inducendo in quest'ultimo sollecitazioni dovute al carico rapido ...”*.

La zona denominata Pian de Cice è situata nel settore orientale della frana (Figura 2.36) tra quota 900 e 1100 m s.l.m., in un'area soggetta a numerosi fenomeni erosivi da parte della colata, e coinvolge un volume di materiale di circa 600000 m<sup>3</sup>. Data l'importanza delle dimensioni, e i danni che un'eventuale distacco provocherebbe, l'area è stata oggetto di numerosi studi ed attività di monitoraggio che hanno permesso di determinarne gli spostamenti e le caratteristiche geologiche.



FIGURA 3.1 : Veduta panoramica della frana del Tessina da Chies d'Alpago con la zona di Pian de Cice in evidenza

### 3.1 Il monitoraggio del settore Pian De Cice

#### 3.1.1 Sistemi di monitoraggio del 1997 - '98

Dopo l'evento di riattivazione della frana del 1992 furono eseguiti numerosi sondaggi meccanici attrezzati con piezometri ed inclinometri per monitorare sia il livello di falda, sia gli spostamenti profondi e la posizione della superficie di scorrimento; in particolare a Pian de Cice venne installato un piezometro ed inclinometro ad una profondità di 50 m a quota 994 m s.l.m. .

Nel 1998 venne posizionato un inclinometro che evidenziò uno spostamento continui di Pian de Cice e la presenza di una superficie di taglio ad una profondità di 26 m lungo la quale gli spostamenti avvengono seguendo la linea di massima pendenza. Nel 1997 fu installato un sistema di monitoraggio basato sulla ricerca automatica di 30 capisaldi, 3 dei quali (307, 308, 309) vennero posizionati su Pian de Cice, che permisero di conoscere il movimento della zona.

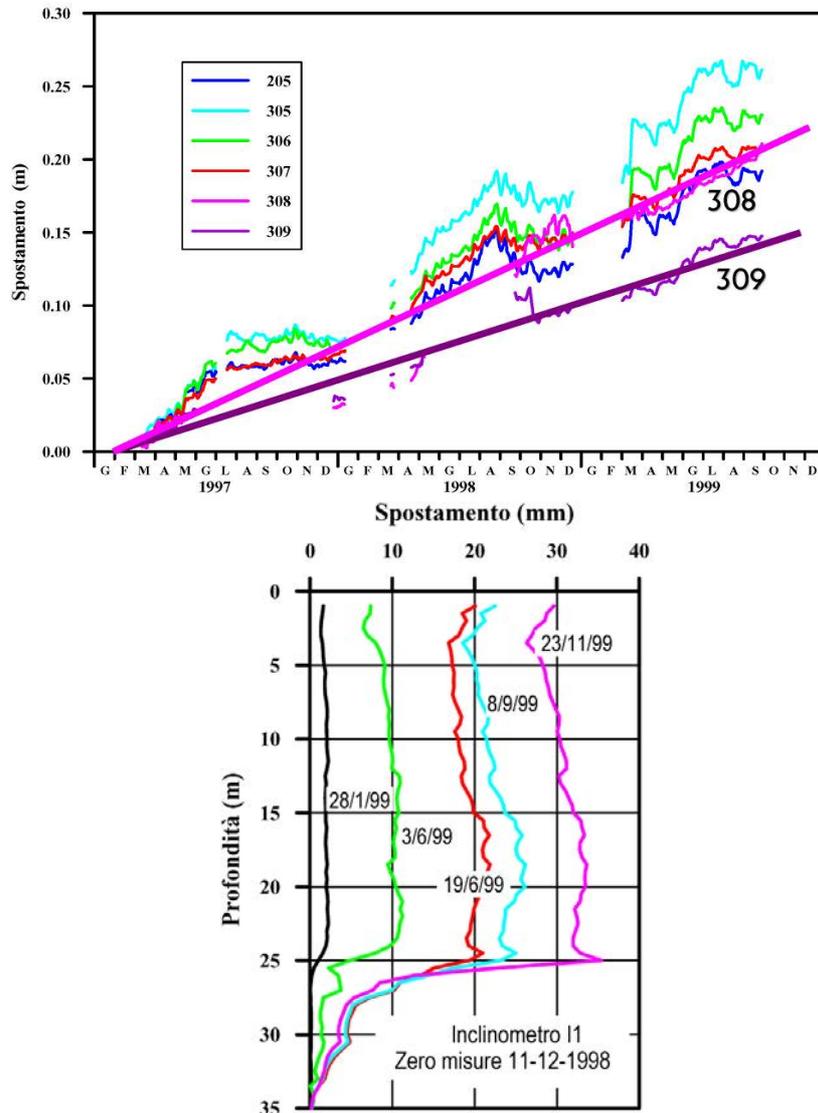


FIGURA 3.2 : Deformazioni dell'inclinometro T1 e spostamenti dei capisaldi di Pian de Cice

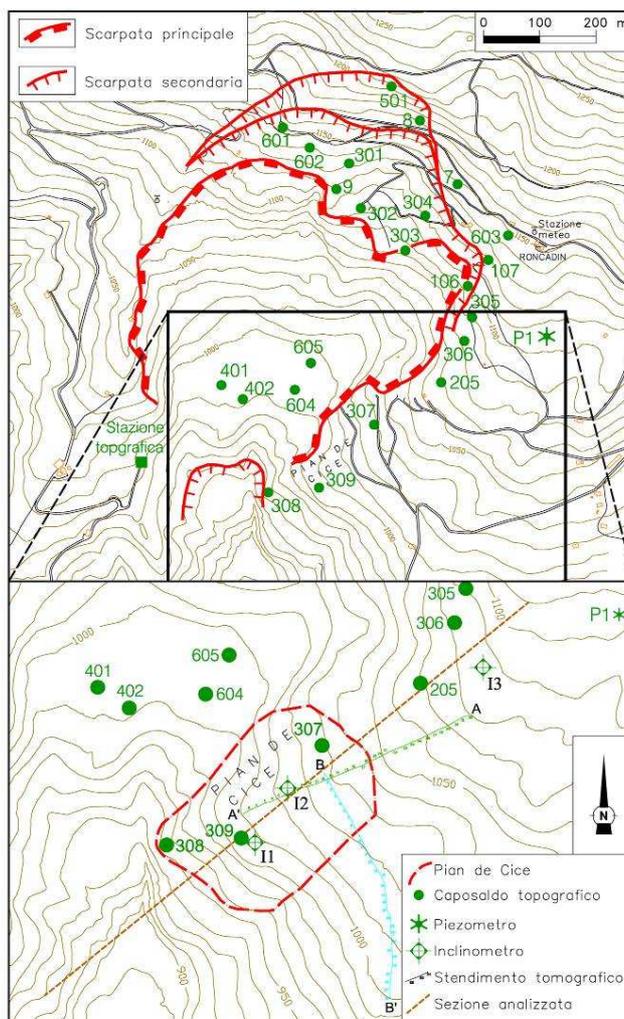


FIGURA 3.3 : Ubicazione dei capisaldi ancora attivi e dell'area di Pian de Cice

Per individuare eventuali superfici di scivolamento, e monitorare l'entità degli spostamenti in profondità, furono installati 3 tubi inclinometrici (I1, I2, I3) lungo la sezione di massima pendenza del blocco; tali strumenti confermarono quanto rilevato precedentemente, cioè una superficie di scorrimento situata a 26 m di profondità e spostamenti annuali di 4,5 cm con direzione Nord 235°. Durante il progetto MoVeMit si sono ripresi i controlli topografici per valutare il campo di spostamenti attuale e confrontarlo con quello raccolto in passato, verificando così come superficialmente la situazione sia rimasta invariata.

Vennero inoltre eseguite delle video ispezioni dei tubi inclinometrici per valutare, in modo qualitativo, la deformazione subita negli anni in cui non sono state effettuate misure strumentali; si osservò che il campo deformativo rimase costante.

I risultati della tomografia elettrica mettono in evidenza la diversa composizione del versante: viene indicato con il Giallo ed Arancio i materiali detritici asciutti (depositi glaciali del Piave), con il Viola e Blu i materiali ricchi d'acqua (Flysch di Belluno) e con gli altri colori i termini litologici con contenuti d'acqua intermedi.

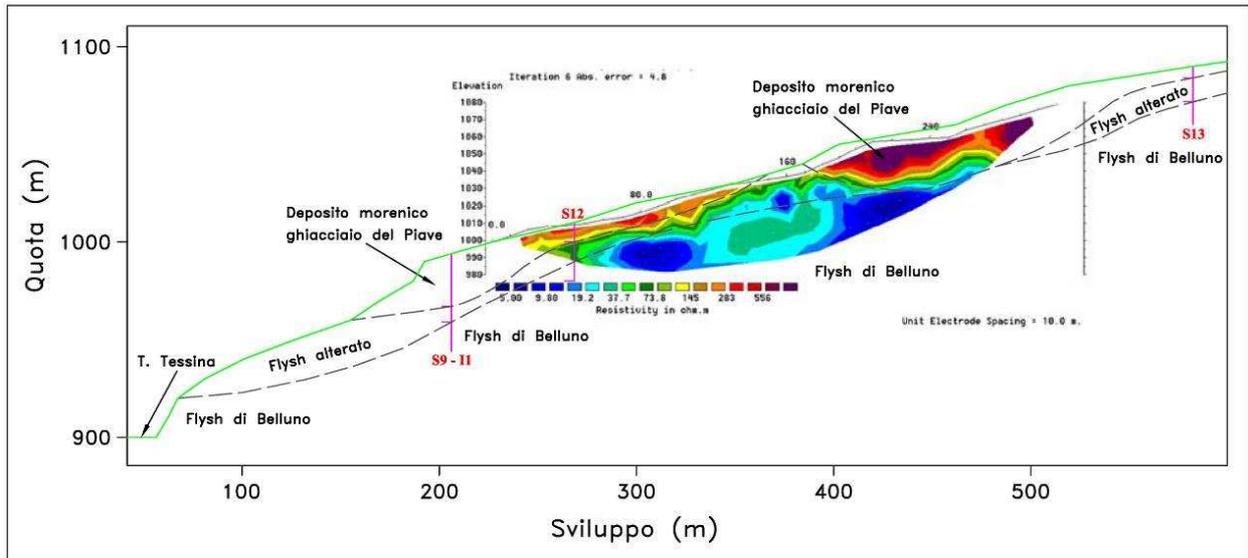


FIGURA 3.4 : Profilo tomografico e schema stratigrafico della sezione longitudinale analizzata

Le misure inclinometriche, la descrizione delle carote recuperate durante l'esecuzione dei sondaggi e le osservazioni sulle formazioni, hanno consentito di ricostruire con sufficiente approssimazione la geometria dell'area da investigare ed i rapporti tra le diverse tipologie litologiche.

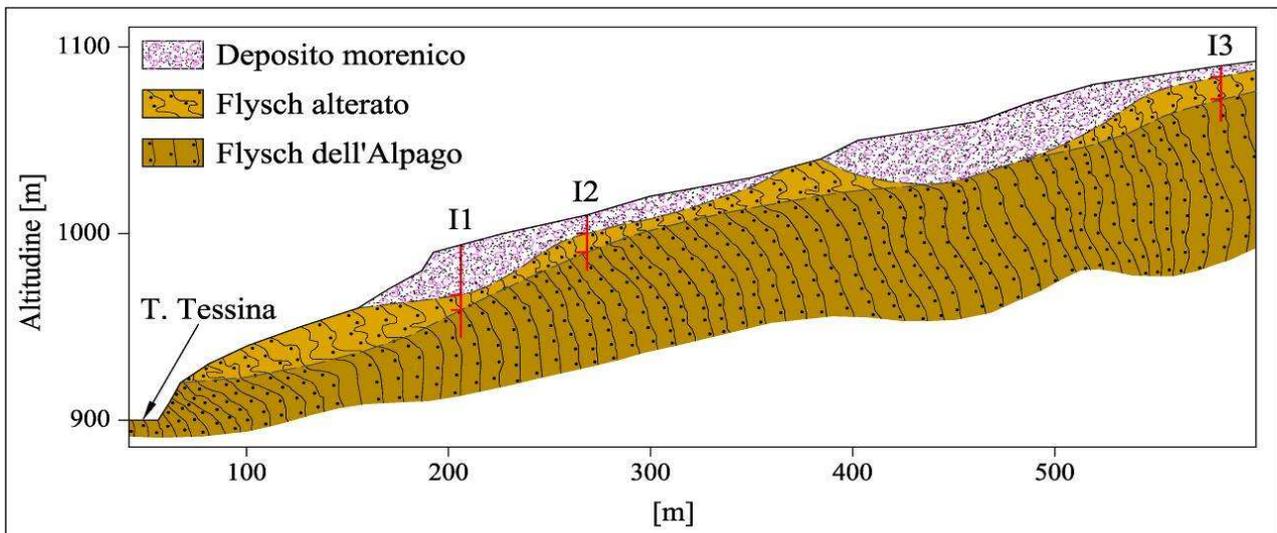


FIGURA 3.5 : Ricostruzione geologica lungo la sezione longitudinale di Pian de Cice.

La sezione longitudinale mostra due verosimili superfici di scivolamento che tagliano il versante di Pian de Cice a quote diverse, coincidenti con le superfici di contatto tra copertura morenica e Flysch alterato e tra Flysch alterato e substrato roccioso.

La prima superficie è facilmente riconoscibile dal netto cambiamento di materiale, mentre la seconda grazie alle misure inclinometriche.

Per verificare e quantificare la relazione tra le precipitazioni, l'altezza della falda e gli spostamenti, si sono confrontati i dati acquisiti dal piezometro P1 (dotato di trasduttore di pressione e datalogger) con i dati pluviometrici.

L'analisi di una serie decennale di osservazioni mostra oscillazioni molto piccole (minori di 50 cm) della falda che rimane praticamente costante nella zona di contatto tra il materiale morenico e il bedrock costituito dal Flysch.

Ciò indica un'alta conducibilità idraulica del deposito morenico ed un'elevata capacità di dissipare eccessi di pressione nei pori. Si può pertanto concludere che solo eventi particolarmente eccezionali possono attivare fenomeni d'instabilità nella zona.

### **3.1.2 Il nuovo sistema di monitoraggio del giugno 2012**

La difficoltà di stabilire una relazione tra il livello di profondità della falda e lo spostamento della frana indusse a modificare la modalità di monitoraggio installando delle nuove attrezzature nel settore Pian de Cice.

Nel giugno 2012 una sonda inclinometrica, con riferimento I1 bis, fu posta in opera fino ad una profondità di 30 m vicino l'inclinometro precedentemente installato. Dopo tre mesi, quando gli spostamenti verticali hanno chiaramente mostrato la presenza di una zona di taglio nell'interfaccia tra il deposito morenico e il Flysch alterato furono installate due sonde inclinometriche (sonda alta e sonda bassa) aventi le seguenti caratteristiche:

Lunghezza (L): 1,30 m

Angolo guida (X): 250° rispetto il Nord

Angolo vettore spostamento: 168° (calcolato a -26,5 m s.p.c.)



FIGURA 3.6 : Vista di Pian de Cice con indicata la zona in cui è collocato il sistema di monitoraggio



FIGURA 3.7 : Strumenti di misura posizionati nel giugno 2012

La testa della Sonda Alta è situata a -25,5 m s.p.c. mentre quella della Sonda Bassa a -27 m s.p.c. in corrispondenza della superficie di scorrimento rilevata nei monitoraggi precedenti. Insieme alle due sonde fu installato un piezometro a fondo aperto ad un profondità di -28,65 m s.p.c. .

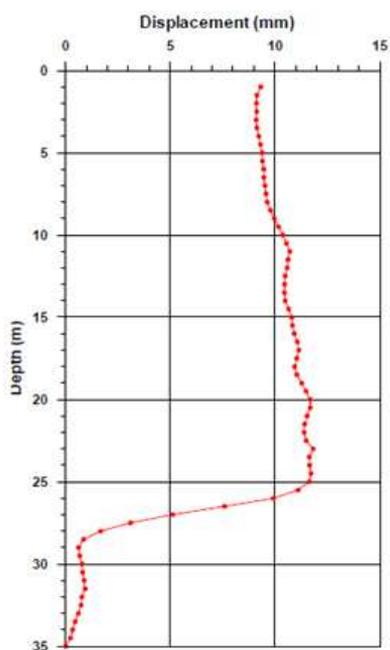
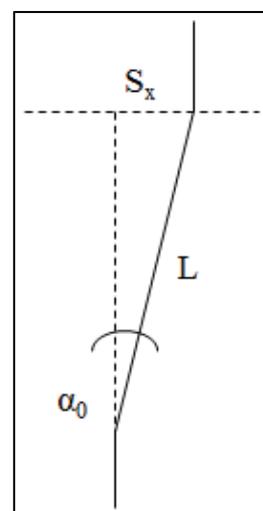


FIGURA 3.8 : Profilo degli spostamenti dell'inclinometro I1bis

Probabilmente a causa di errori strumentali, causati da uno scarso ancoraggio al substrato o dalla spiratura del tubo inclinometrico che ha prodotto la non conformità della direzione di movimento dell'inclinometro, la sonda bassa si è rivelata inaffidabile e per questo non considerata nell'analisi dei dati. Il resto dell'attrezzatura ha regolarmente funzionato dal 29 settembre 2012 fino allo scorso marzo 2014, momento in cui lo strumento di monitoraggio è arrivato a fine corsa.

L'inclinometro ed il piezometro forniscono rispettivamente i seguenti parametri: le misure orarie degli angoli lungo la direzione X, lungo la direzione Y e l'oscillazione di falda, i quali si elaborano utilizzando delle semplici relazioni trigonometriche, in particolare per la conversione angolo-spostamento, secondo lo schema nella seguente Figura, ottenendo i seguenti parametri:

spostamento di un'estremità [m]  $S_x = L \times \sin \alpha(t)$   
 scorrimento lungo la direzione X [m]  $\Delta X = L \times (\sin \alpha_x(t) - \sin \alpha_{x0})$   
 scorrimento lungo la direzione Y [m]  $\Delta Y = L \times (\sin \alpha_y(t) - \sin \alpha_{y0})$   
 scorrimento risultante [m]  $\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$



dove  $\alpha(t)$  e  $\alpha_0$  sono rispettivamente l'inclinazione della sonda al tempo t generico ed alla prima rilevazione di riferimento (01/10/2012).

I dati raccolti e i calcoli relativi vengono riassunti in un foglio elettronico appositamente preparato che consente di la realizzazione immediata di rappresentazioni grafiche dell'andamento dei dati monitorati. Inoltre a partire da un file di input, i dati verranno analizzati, puliti da eventuali dati anomali, e inseriti in modelli matematici atti a riprodurre il comportamento della zona franosa.

Data Ora		ALTA_Y angolo Radianti	ALTA_Y Spostamento [m] * -1	ALTA_X angolo Radianti	ALTA_X Spostamento [m] * -1	ALTA_ Risultante [cm]	Velocità di scorrimento [cm/y]	Profondità della falda (m s.p.c.)	Altezza precipitazione RONCADIN [mm]
01/10/2012 0.00.00	- 12	-0,02738	2,81E-05	0,022759	-1,2E-05	3,05799E-05		19,61	9,2
01/10/2012 1.00.00	- 11	-0,02738	2,81E-05	0,022759	-1,2E-05	3,05799E-05	0,000	19,61	11,8
01/10/2012 2.00.00	- 10	-0,02738	2,81E-05	0,022759	-1,2E-05	3,05799E-05	0,000	19,61	0,6
01/10/2012 3.00.00	-9	-0,02738	2,81E-05	0,022759	-1,2E-05	3,05799E-05	0,000	19,61	1,6

### 3.2 Raccolta, elaborazione e pulizia dei dati monitorati

Allo stato attuale delle indagini di monitoraggio, i dati sono stati rilevati dal 1 ottobre 2012 fino al 5 maggio 2014, dati in cui si evince dai dati rilevati che lo strumento di rilevazione è arrivato a fine corsa.

Da un primo sommario confronto tra la pioggia, il livello delle acque sotterranee, lo spostamento e la velocità di spostamento quotidiano si evince che la pioggia totale in 1 anno è di circa 2 metri e, occasionalmente, il 1h-precipitazione supera 15 mm. Il livello di falda ha dimostrato una escursione inferiore a 3 m, a differenza di quanto mostrato dai monitoraggi precedenti i quali non registravano escursioni significative del livello di falda.

Il comportamento del livello di falda presenta un rapido e significativo aumento all'inizio della precipitazione piovosa e gradualmente diminuisce nel corso della giornata, al termine della pioggia: ciò è particolarmente evidente nel periodo estivo, quando il livello di falda decresce avvicinandosi molto lentamente a profondità asintotiche di 21 m.

La velocità di spostamento varia molto in accordo con le variazioni del livello di falda evidenziando un atteggiamento di valori più alti durante il periodo primaverile (come osservato per mezzo del monitoraggio topografico di riferimento).

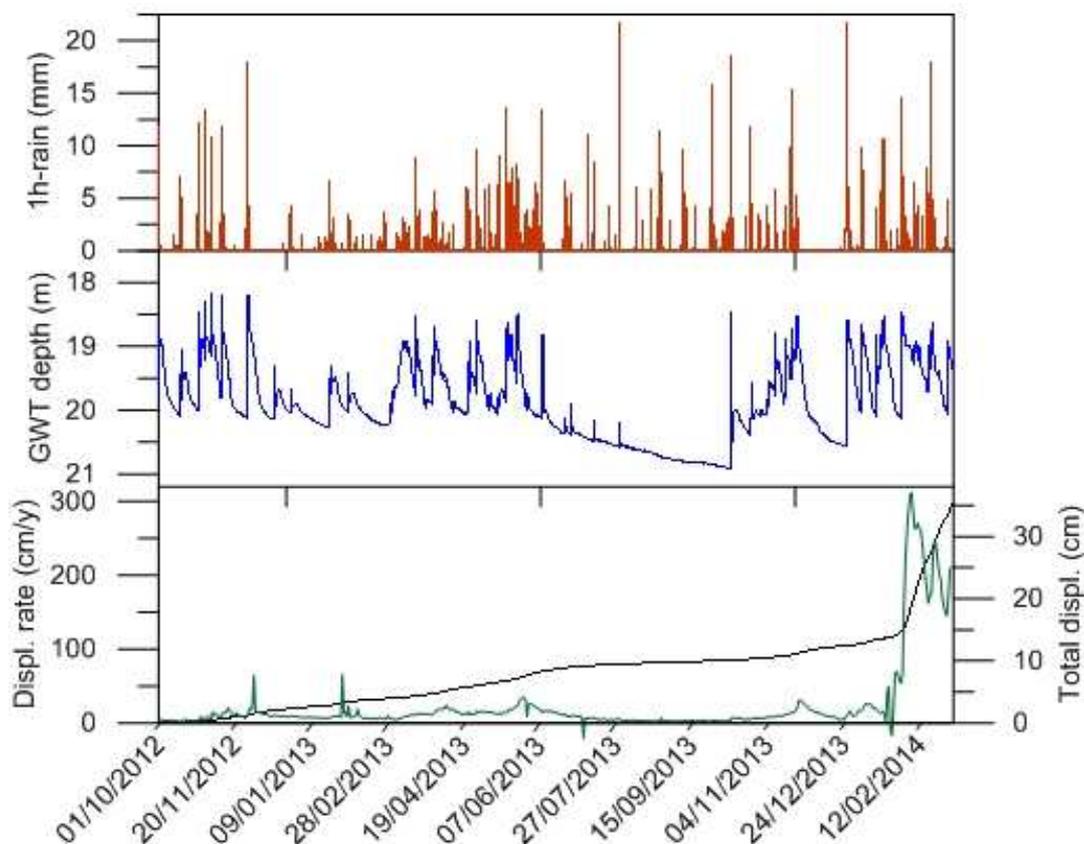


FIGURA 3.9 : Sequenza temporale dei dati raccolti di precipitazioni orarie, profondità GWT, spostamento registrato dall'inclinometro inferiore e la velocità di spostamento giornaliera durante il periodo dal 01/10/2012 al 05/05/2014

Si nota che fino all'ottobre 2013 circa, lo spostamento totale nel primo anno era di circa 10 cm, negli ultimi mesi di rilevazione invece si è un marcato aumento di velocità con un picco di spostamento totale che supera i 35 cm. Analizziamo ora l'andamento delle singole grandezze.

### 3.2.1 Misure inclinometriche

Di seguito si riportano gli andamenti degli spostamenti lungo la direzione X e Y durante il periodo di monitoraggio.

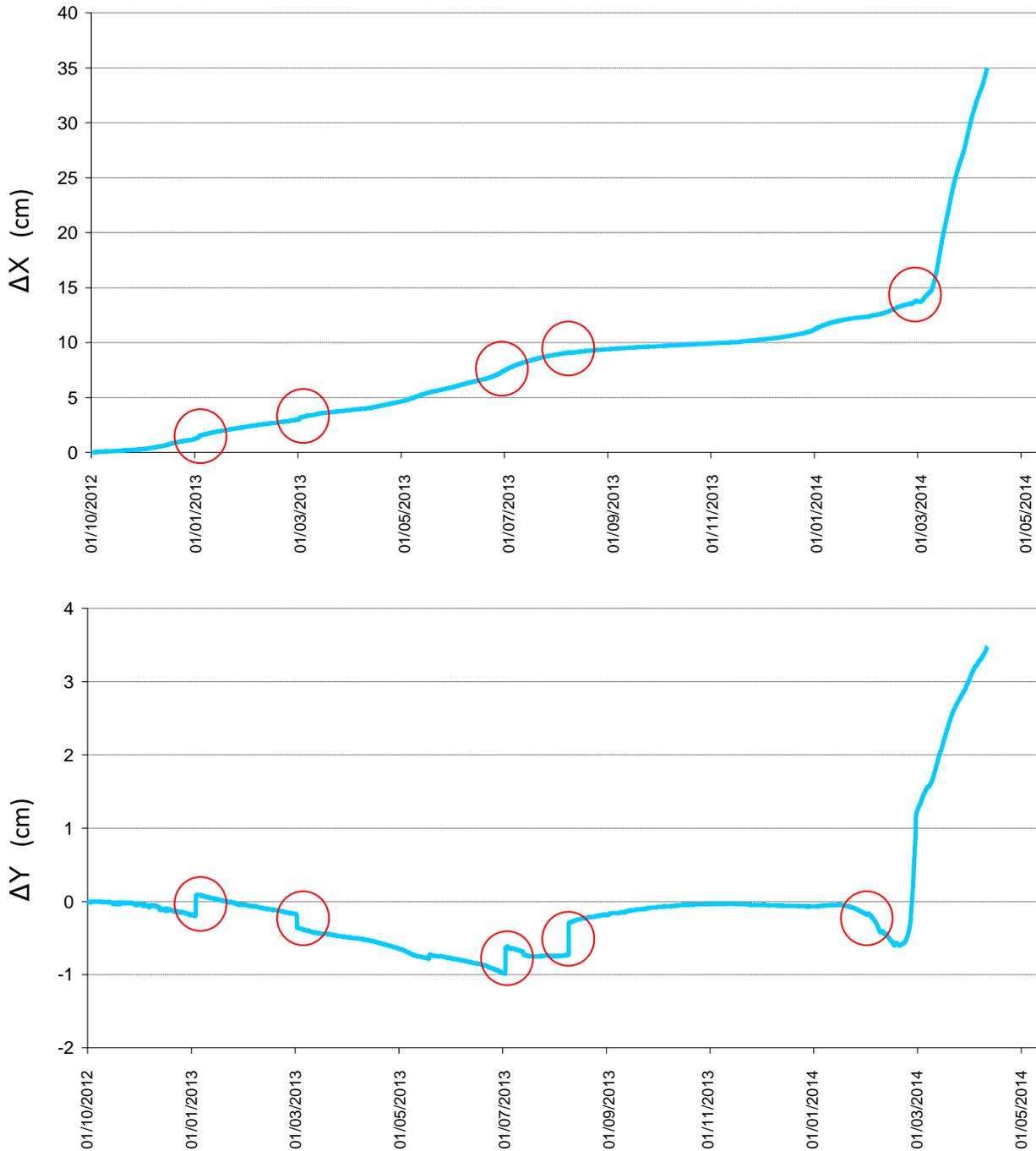


FIGURA 3.10 : Misure inclinometriche lungo la direzione X ed Y

Gli spostamenti lungo la direzione X risultano maggiore rispetto quelli la direzione Y di un ordine di grandezza, inoltre si evidenzia una irregolarità dei dati lungo Y, dovuti probabilmente dallo strumento di monitoraggio.

Sono presenti inoltre dei punti anomali (cerchiati in rosso) simile a dei gradini con spostamento discreto della curva: tali punti verranno eliminati dall'elaborazione dati.

Lo spostamento risultante  $\Delta_{tot}$  viene illustrato nel grafico seguente.

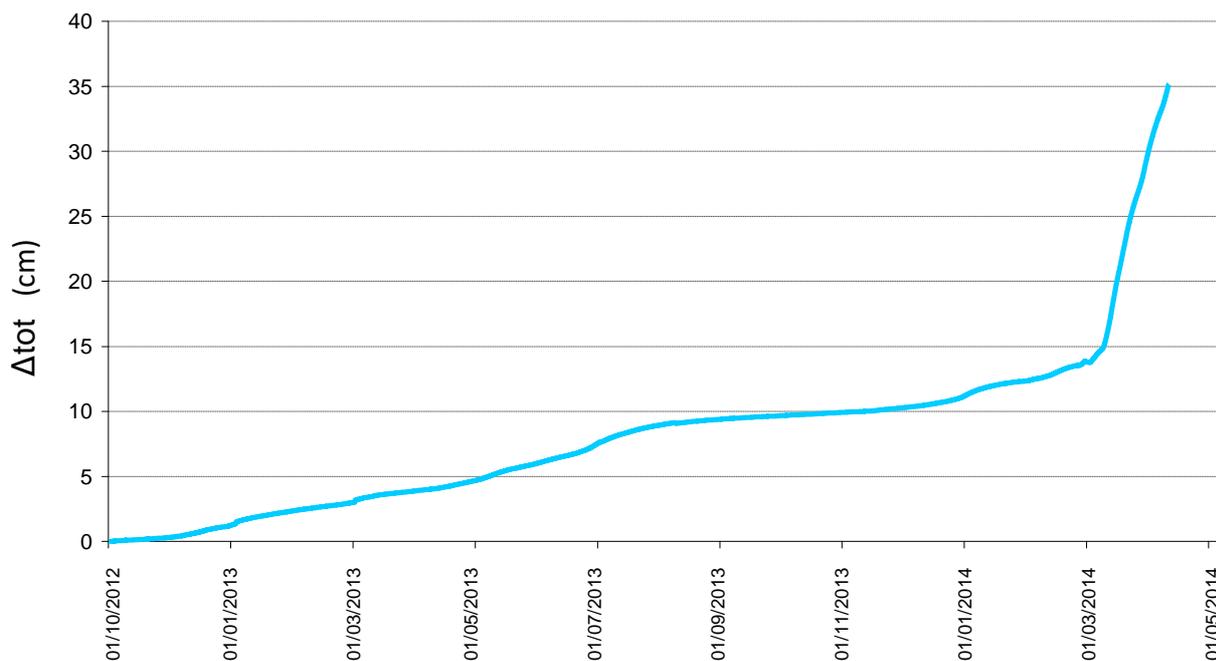


FIGURA 3.11 : Spostamento risultante

Osserviamo che le misure inclinometriche hanno rilevato nel periodo di osservazione fino ad inizio anno 2014 degli spostamenti compresi tra i 10 e 15 cm totali, suggerendo fin da questo punto un aumento della velocità di movimento rispetto gli anni precedenti in cui si registravano spostamenti annui di circa 5 cm. Inoltre questo trend aumenta sensibilmente nei primi mesi dell'anno 2014 dove in soli 5 mesi si ha uno spostamento totale di circa 25 cm, aumentando così del 150% lo spostamento annuo.

È possibile notare inoltre che nel periodo che va da Aprile a Giugno 2013 e lo stesso periodo nel 2014 la curva aumenta la sua pendenza rispetto l'andamento medio, suggerendo quindi un aumento degli spostamenti probabilmente dovuto ad un innalzamento di falda, il quale può essere generato dalle abbondanti precipitazioni caratteristiche dei mesi primaverili.

### 3.2.2 Misure pluviometriche

Di seguito si riportano gli andamenti dei dati pluviometrici orari raccolti dalla stazione di Roncadin, in località Chies D'Alpago, durante il periodo di monitoraggio del settore Pian de Cice.

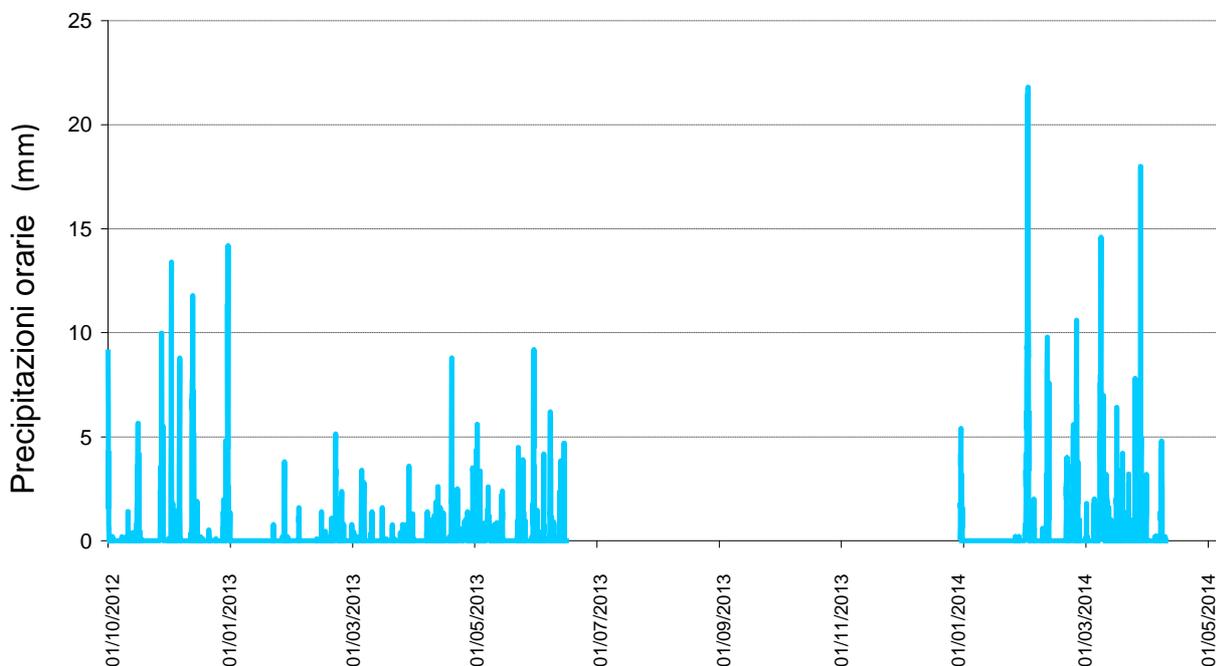


FIGURA 3.12 : Diagramma pluviometrico

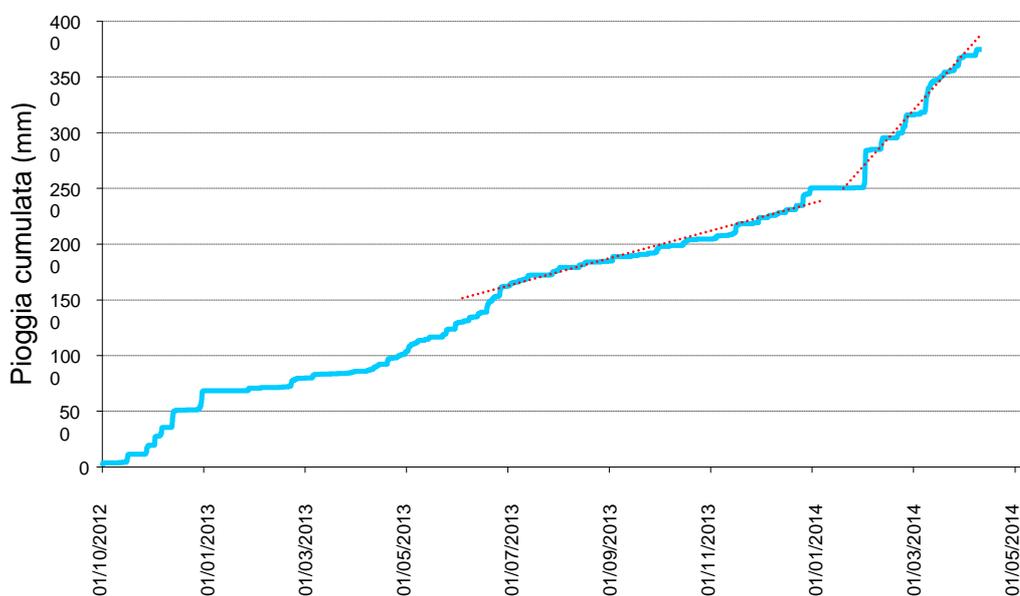


FIGURA 3.13 : Diagramma delle precipitazioni cumulate

Si evidenzia un periodo caratterizzato da piogge intense compreso tra Ottobre e Dicembre 2012, e due periodi di piogge intense e prolungate durante Aprile e Giugno 2012 e 2013.

Nei periodi di piogge intense i valori di picco delle precipitazioni sono concentrate nel mese di Novembre 2012, mentre nell'Aprile e Maggio 2012 e 2013, sono presenti rilevanti eventi piovosi distribuiti durante tutto l'arco temporale.

Questo conferma quanto esposto precedentemente a proposito degli spostamenti rilevati: nei periodi tra aprile e giugno la curva degli spostamenti aumenta la sua pendenza rispetto l'andamento medio per effetto dell'innalzamento di falda dovuto alle precipitazioni abbondanti caratterizzanti tale periodo.

### 3.2.3 Misure piezometriche

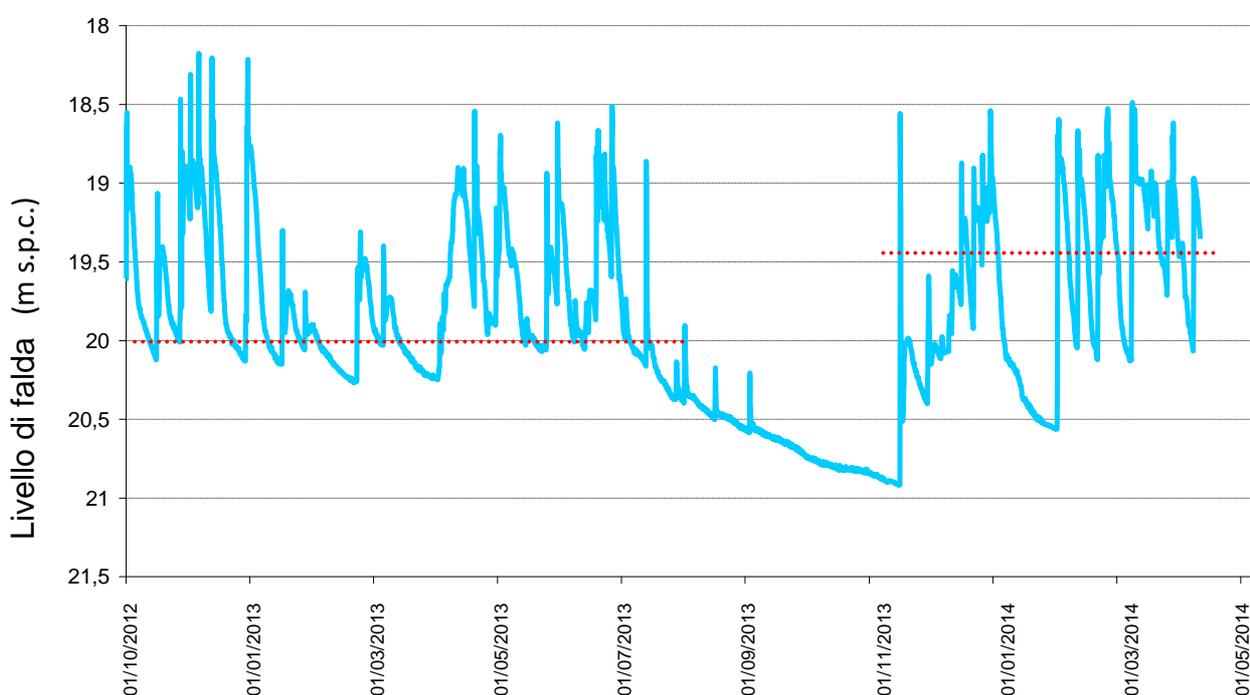


FIGURA 3.14 : Diagramma piezometrico

Tramite le misurazioni del livello di falda ottenute dal piezometro durante il periodo di monitoraggio, è possibile individuare un livello medio alla profondità di circa 20 m sotto il piano campagna (s.p.c.) con oscillazioni di circa un metro ed eccezionalmente due metri, più alte rispetto ai 50 cm rilevati in passato da un piezometro installato più a monte.

Nei mesi estivi di Luglio e Agosto 2013 la falda presenta un andamento calante molto regolare, a comprova che non vi sono stati rilevanti eventi piovosi, in accordo anche con quanto evidenziato negli anni precedenti, durante i quali generalmente il periodo estivo è relativamente asciutto.

L'inverno 2013-14 risulta abbastanza anomalo in tutto il Nord Italia: in quest'area, dopo il primo evento piovoso intenso avutosi a fine novembre 2013 registrato dai piezometri con un picco di

innalzamento del livello di falda, si susseguono numerose oscillazioni caratterizzate da un livello medio di falda sopra ai 20 m s.p.c. precedentemente osservati, in particolare tra 19.5 e 19 m s.p.c.. Ciò potrebbe in parte giustificare l'aumento di velocità di spostamento osservato nel settore durante gli ultimi mesi di monitoraggio.

Si osserva, inoltre, che dopo l'evento piovoso la falda subisce un rapido innalzamento seguito da una leggera diminuzione e, in molti casi, da un ulteriore aumento successivo, anche senza precipitazione: questo comportamento potrebbe essere l'effetto di due fenomeni di filtrazioni diversi legati alle caratteristiche eterogenee ed anisotrope del terreno i quali hanno un effetto combinato sulla quota di falda ritardandone il comportamento successivo ad una precipitazione piovosa o alla particolare configurazione del piezometro.

### 3.2.4 Elaborazione e filtraggio dei valori di velocità di spostamento

A seguito dei dati di spostamento rilevati è possibile calcolare la velocità di spostamento della frana in cm/y come differenza di due successivi valori di spostamento orario moltiplicato per il fattore di tempo che fornisce lo spostamento annuo.

Come primo tentativo si sono ricavati una velocità di spostamento su intervalli di 1 ora e due valori di velocità calcolata come media mobile su intervalli di 6 e 24 ore.

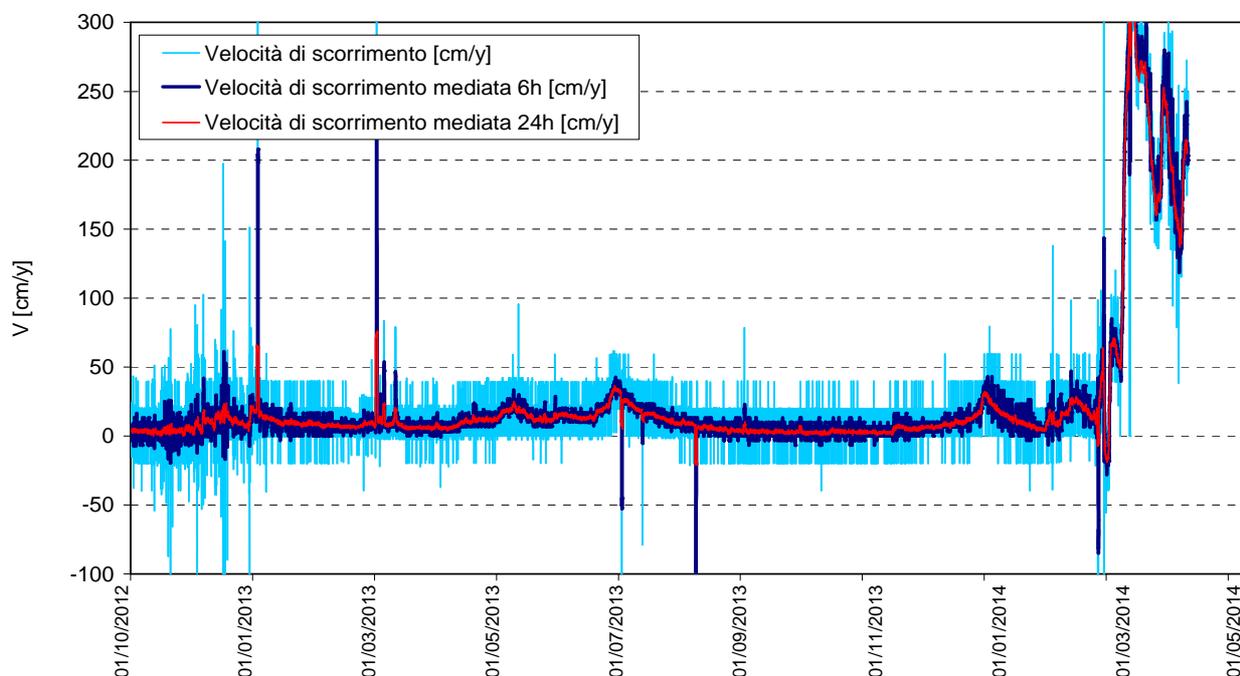


FIGURA 3.15 : Andamento dei dati di velocità di spostamento filtrati e mediati

Come si vede in Figura 3.15 i dati presentano brusche variazioni probabilmente dovute allo strumento di misura, il quale, alimentato durante il giorno mediante pannello solare e durante la

notte da una batteria, può risentire della differenza di voltaggio fornita dalle due diverse alimentazioni nel momento in cui si passa da una all'altra. Questo ciclo di alimentazione variabile crea delle interferenze giornaliere che porta a registrare ciclicamente delle velocità negative fittizie. Si è pensato opportuno "pulire" i dati da valori anomali, mediante l'applicazione di filtro e il calcolo della media mobile. Per far ciò ci si è servito di un programma in *matlab* il quale, prendendo come input i dati rilevati dalla strumento di misura in loco, procede alla pulizia fornendo in output i valori di velocità di spostamento filtrata e mediata e lo spostamento cumulato sulla stessa velocità filtrata e mediata. I risultati sono stati ottenuti in primo luogo togliendo i salti di spostamento entro certi limiti tra una rilevazione e l'altra, nel nostro caso abbiamo impostato un intervallo di  $\pm 0.03$  cm. Successivamente è stata eseguita una media mobile media mobile a 5 punti: prende i primi 5 dati e prende il dato centrale attraverso la media, quindi l'analisi completa parte dal terzo dato perdendo i primi 2 e gli ultimi 2. Da questo primo filtraggio si cercano di togliere i picchi tralasciando i picchi anomali relativi ai periodi lunghi eseguendo uno smussamento dei segnali per periodi sotto le 24, e un'ultima media mobile giornaliera.

Si noti dalla Figura 3.16 come siano spariti i picchi anomali e l'andamento delle velocità di spostamento risulta molto più chiaro e pulito rispetto l'andamento riportato in Figura 3.15.

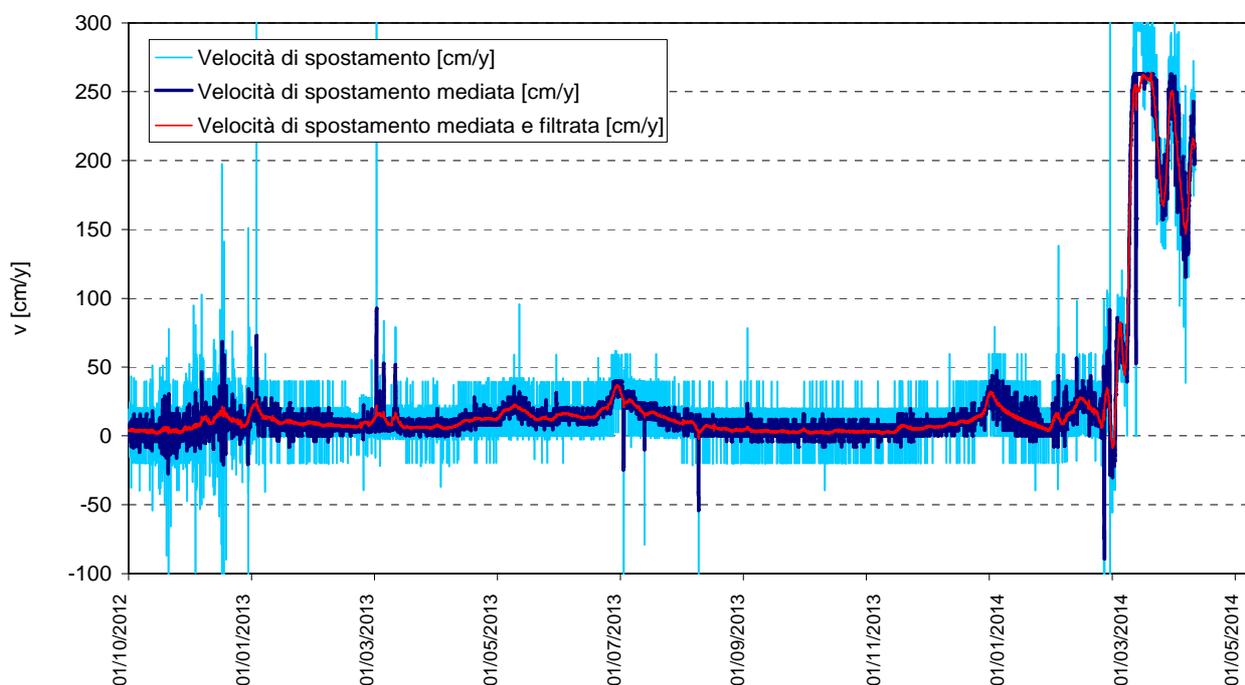


FIGURA 3.16 : Andamento dei dati di velocità di spostamento filtrati e mediati in uscita dal programma

Il risultato del filtraggio si può maggiormente apprezzare visualizzandone gli effetti nel breve periodo, se ne riporta un esempio relativo al periodo tra il 27/07/2013 e il 14/11/2013.

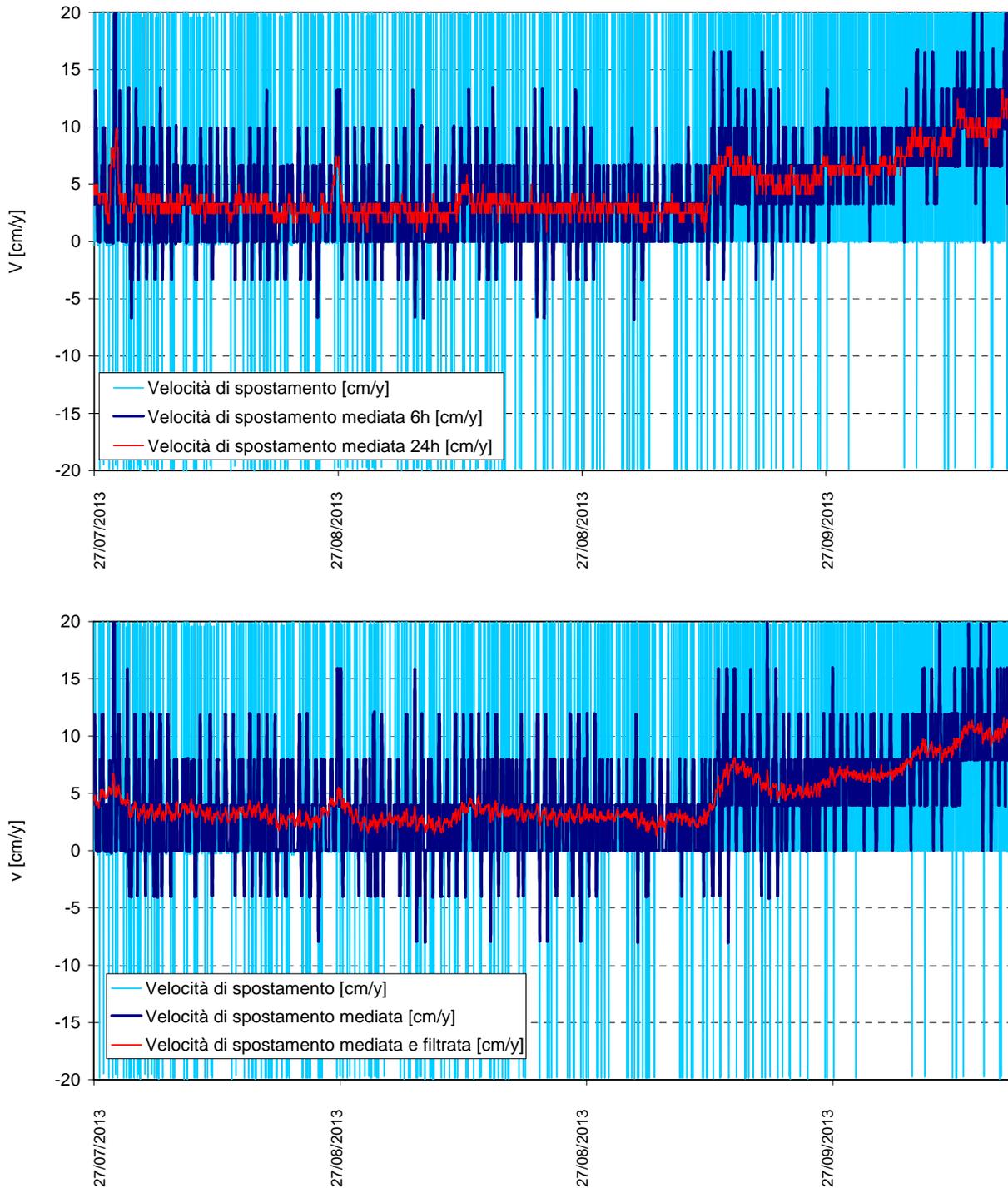


FIGURA 3.17 : Andamento dei dati di velocità di spostamento filtrati e mediati nel breve periodo

### 3.3 Analisi qualitativa delle relazioni tra i parametri monitorati

Dal confronto degli andamenti temporali della precipitazione, profondità della falda e velocità di spostamento riportati in Figura 3.9 è possibile osservare che vi è una relazione tra le precipitazioni ed il livello di falda, nonché con la velocità di spostamento della frana.

Per osservare e analizzare meglio queste relazioni si considereranno dei significativi e brevi intervalli temporali per apprezzare maggiormente gli andamenti delle variabili in gioco.

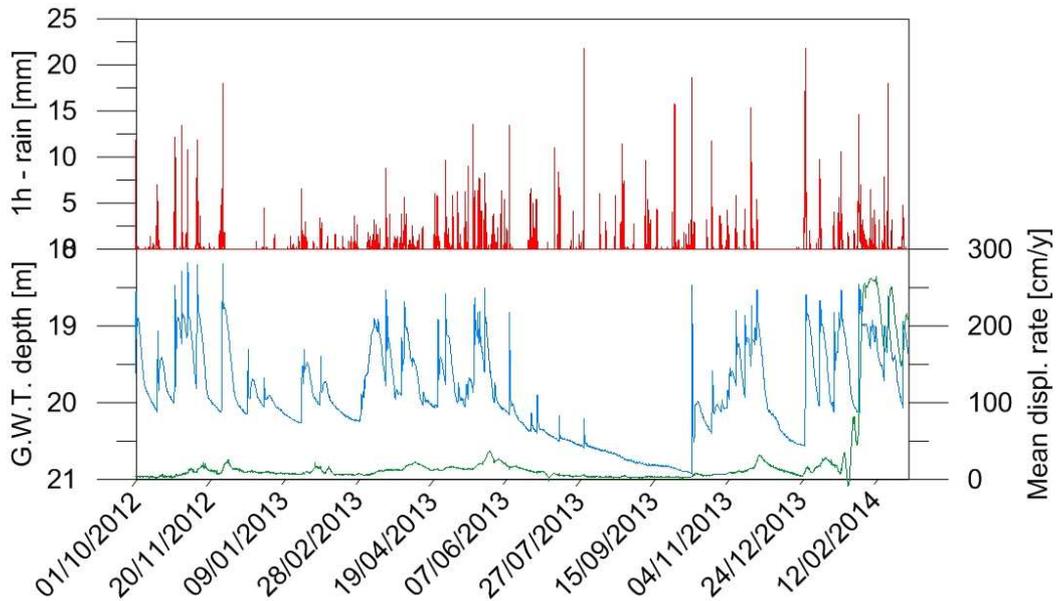


FIGURA 3.18 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 10/10/12 – 18/10/12

In particolare andremo ad analizzare l'andamento relativo tra profondità della quota di falda (G.W.T. depth [m]), velocità di spostamento (Mean displ. Rate [cm/y]), e precipitazioni orarie (1h-rain [mm]).

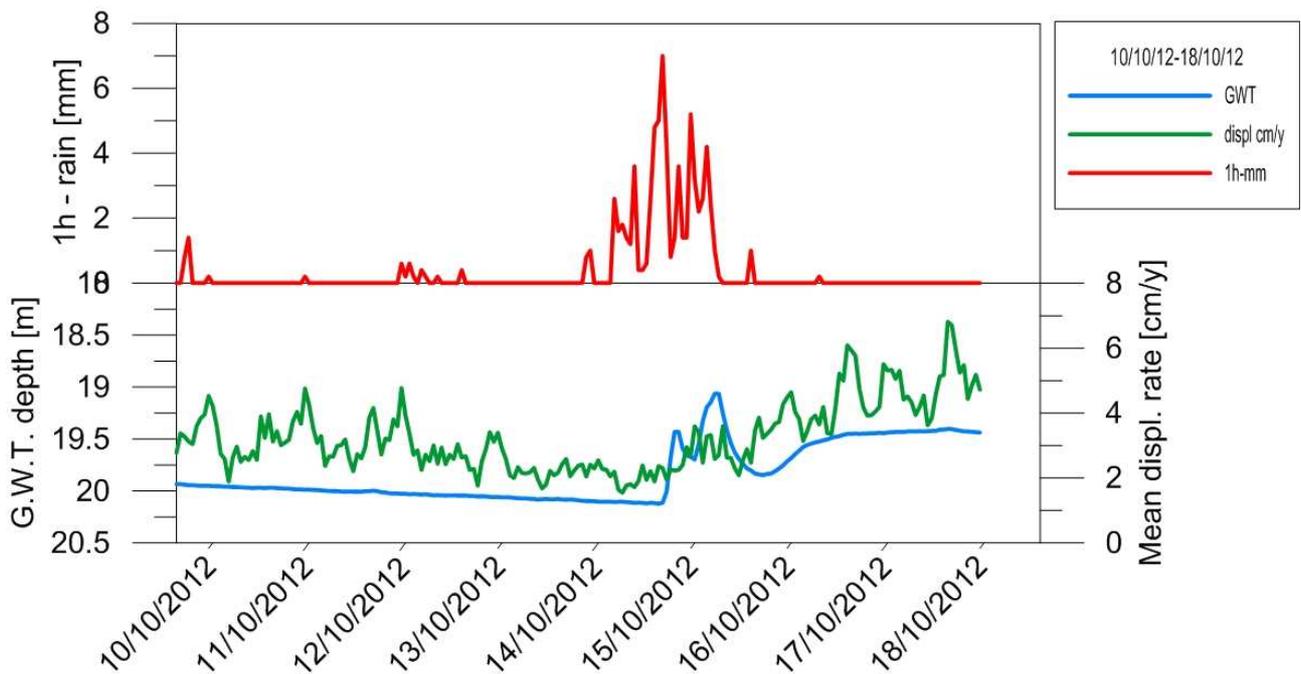


FIGURA 3.19 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 10/10/12 – 18/10/12

Dalla Figura 3.19 è possibile osservare che l'innalzamento del livello di falda avviene con qualche ora di ritardo dal picco di pioggia e che esso, dopo aver raggiunto un primo massimo, decresce per poi recuperare quota anche in assenza di precipitazione: probabilmente questo comportamento è l'effetto di due fenomeni di filtrazione diversi, legati alle caratteristiche eterogenee ed anisotrope del terreno. Questa osservazione, in riferimento al periodo analizzato, è concorde a quanto rilevato da un'analisi idrologica eseguita in passato, la quale aveva individuato un ritardo di circa 9/12 ore tra l'inizio delle precipitazioni e l'innalzamento del livello di falda.

Per quanto riguarda la velocità di spostamento, risulta chiaro come l'andamento prima dell'evento piovoso fosse leggermente tendente ad abbassarsi su un valore di circa 2 cm/y; concordemente all'innalzamento della falda anche la velocità di spostamento aumenta superando i 6 cm/y. Analogamente a quanto detto per il comportamento del livello di falda, anche la risposta della velocità di spostamento sembra essere ritardata rispetto l'evento piovoso, si può dire quindi che la pioggia costituisce un elemento per far scattare una variazione di equilibrio sia del livello di falda che della velocità di spostamento, essendo questi legati da leggi geotecniche.

Nel seguente grafico viene presa in considerazione un periodo diverso caratterizzato da un evento piovoso misto costituito da cinque intensi eventi consecutivi intervallati da un breve periodo l'uno dall'altro. Complessivamente la quota di falda media rimane alla profondità di circa 19.4 m s.p.c. per oltre 20 giorni. Ma nello stesso periodo la velocità di spostamento sembra aumentare tendendo al valore di circa 20 cm/y.

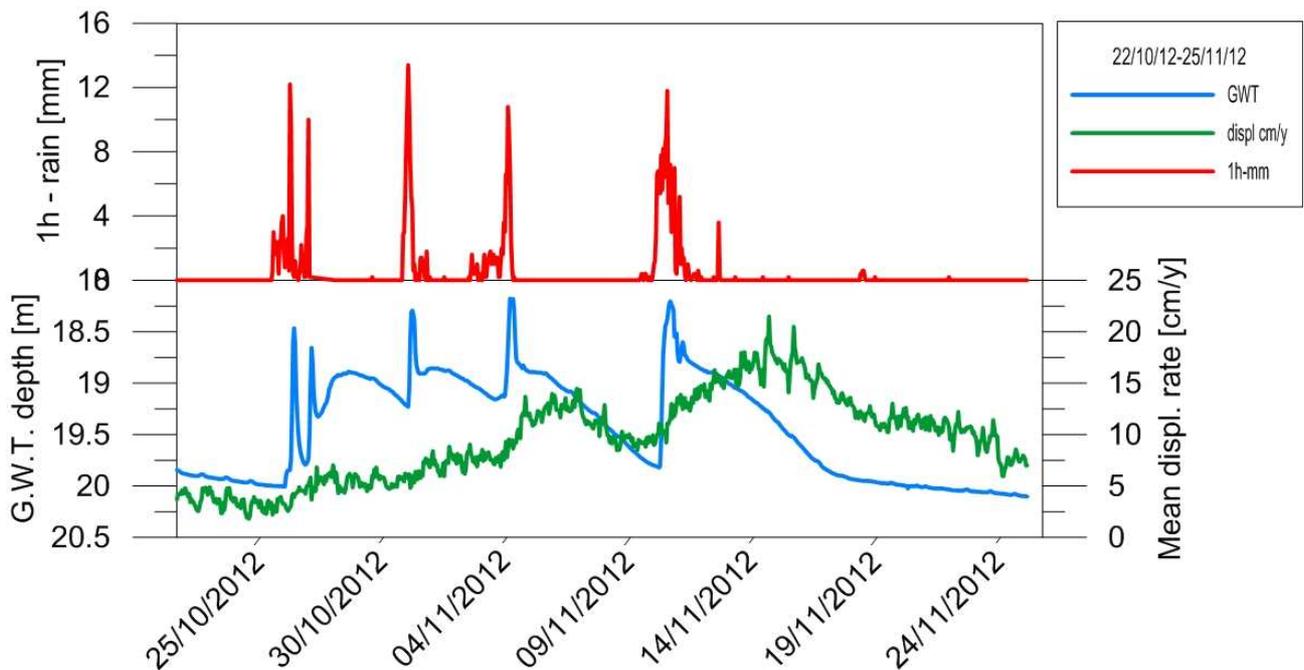


FIGURA 3.20 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 22/10/12 – 25/11/12

Dal confronto dei tre andamenti è possibile osservare una correlazione tra le precipitazioni ed il livello di falda, evidenziato dalla corrispondenza dei picchi massimi dell'andamento della falda quasi in corrispondenza, se non per un lieve ritardo, dei picchi massimi delle precipitazioni. Come anticipato il livello di riposo può essere fissato tra 20 e 21 m s.p.c., infatti quando le precipitazioni si esauriscono, la falda scende a tale quota fino al successivo evento piovoso. Per quanto riguarda la velocità non si rileva una correlazione netta con le altre variabili. In questo caso particolare con quattro eventi ravvicinati la velocità di spostamento non ha periodi di assestamento, bensì continua a crescere a differenza del livello di falda il quale sembra direttamente influenzato dalle precipitazioni e risponde velocemente agli eventi esterni. Questi risultati, anche se qualitativi, consentono di affermare che durante il mese di novembre, caratterizzato da piogge di elevata intensità e quindi da un livello di falda mediamente alto, la velocità risulta abbastanza elevata rispetto ai mesi precedenti (nel mese di Ottobre si aggira sugli 0,01 cm/24h), assumendo valori pari a circa 0,05 cm/24 h. L'evento che viene ora preso in considerazione risulta eccezionalmente interessante data la cadenza particolarmente isolata da rilevanti eventi piovoso antecedenti e seguenti ad esso. È assai immediato intuire una correlazione tra l'evento e i dati di falda e velocità di scorrimento in analogia con quanto predetto.

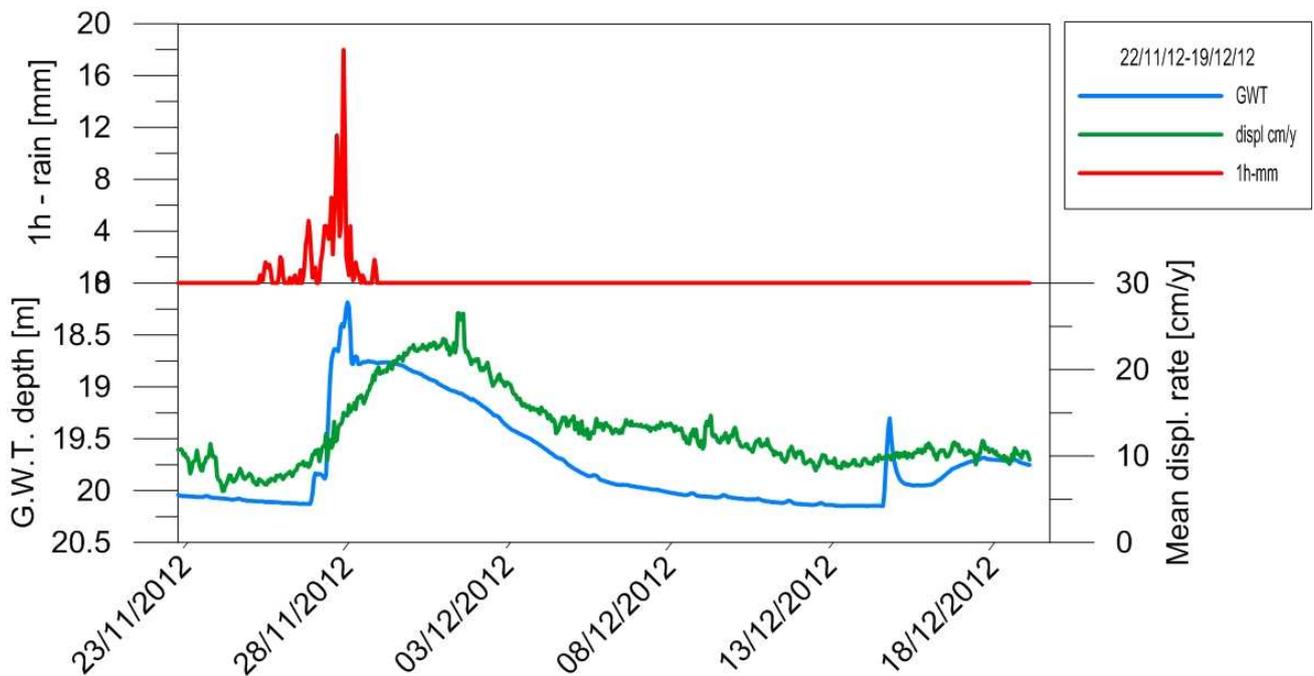


FIGURA 3.21 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 22/11/12 – 19/12/12

Se consideriamo la risposta del movimento franoso per questo singolo evento piovoso, si denota un rapido aumento di velocità, ma con un ritardo di circa 12 ore, in linea con le precedenti

affermazioni. Allo stesso modo, la variazione di velocità di spostamento al termine dell'evento piovoso, sembra essere in accordo con l'abbassamento di livello di falda, anche se si verifica più gradualmente.

Il graduale incremento di velocità che si verifica con un livello costante di falda ci porta a pensare che la frana sta evolvendo con un'accelerazione costante, il che significa che siamo in una condizione di creep terziario. Il creep terziario è la fase in cui la velocità aumenta fino a raggiungere la rottura, ed esso si verifica quando la tensione di taglio mobilitato è maggiore della resistenza residua.

È plausibile affermare che la frana è già in condizione di rottura, ma la fase di accelerazione presente tra un evento piovoso e un successivo è troppo breve per avere il completo collasso del pendio, così, quando il livello di falda diminuisce anche la velocità di spostamento si riduce.

Si riporta di seguito un generico andamento deformazione tempo.

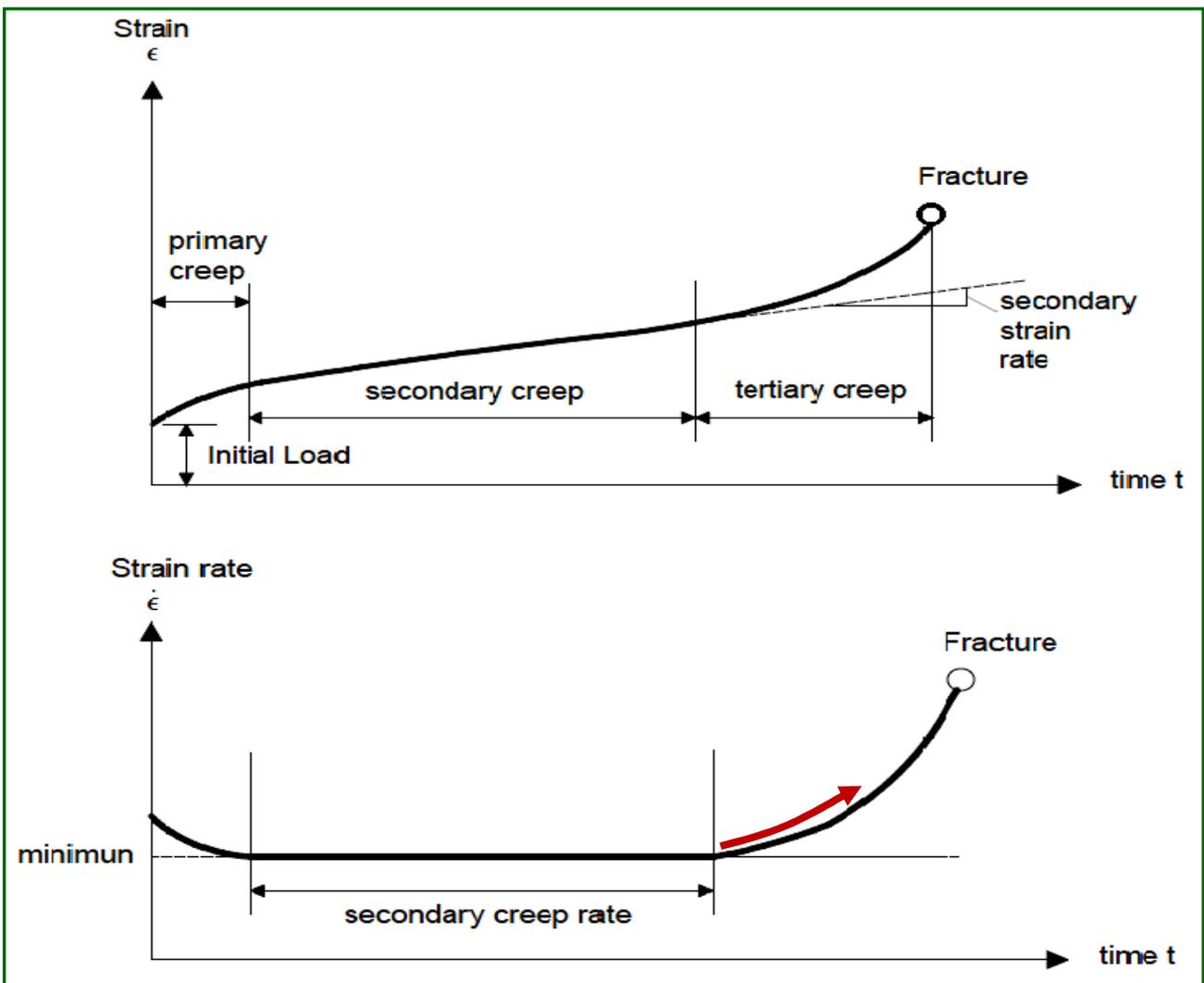


FIGURA 3.22 : Andamento tempo – deformazione viscosa di un materiale sottoposto a tensione costante

Si distinguono tre fasi:

- la prima (scorrimento primario) individua la parte di deformazione assai rapida che si genera all'atto dell'applicazione del carico;
- la seconda (scorrimento secondario) definisce un periodo di tempo, in generale molto lungo e dipendente dalle condizioni di temperatura e carico applicate, in cui la velocità di deformazione è diversa da zero e costante; la deformazione accumulata è permanente;
- la terza (scorrimento terziario) rappresenta un fenomeno intrinsecamente instabile che conduce rapidamente alla rottura.

In ogni caso, quando il livello di falda aumenta conseguentemente ad un intenso evento piovoso, la velocità di spostamento mediata sia sulle 24h, che sulle 6h, aumenta rapidamente. Ciò induce a considerare questo comportamento come una risposta a causa di un creep primario già esistente.

Nella primavera del 2013 sono stati registrati diversi giorni di precipitazioni nevose, e il conseguente scioglimento delle nevi ha indotto un aumento del livello di falda in assenza di pioggia: questo è evidente nella parte iniziale (periodo 1/3-5/3) del grafico di Figura 3.23.

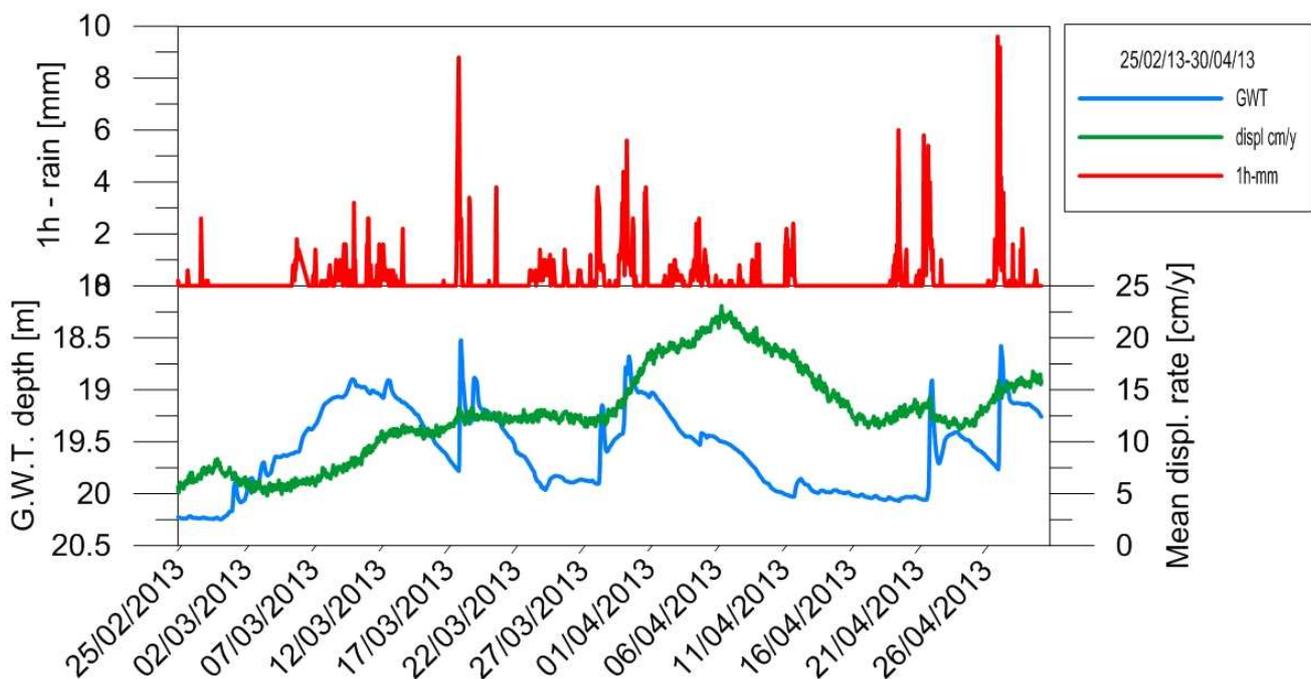


FIGURA 3.23 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 25/02/13 – 30/04/13

Le successive piogge mantengono alto il livello di falda, il quale successivamente scende a quota 20 m s.p.c. fino al successivo evento di pioggia che ne causa un nuovo innalzamento. La velocità si mantiene relativamente bassa ad inizio mese per poi crescere, con un certo ritardo dall'innalzamento della falda, fino ad un valore pari a circa 0,03 cm/24 h. Successivamente essa aumenta anche dopo il picco di pioggia, indicando quindi un'influenza delle precipitazioni piovoso

sul movimento del versante (e ovviamente sul livello di falda) in fase iniziale, procurando una reazione a lunga durata della velocità di movimento probabilmente amplificata anche dalle leggere precipitazioni presenti a cavallo tra marzo e aprile. Anche in questo periodo analizzato si distingue l'importante effetto degli intensi eventi di pioggia sul livello di falda con un leggero ritardo rispetto il picco massimo della precipitazione e di conseguenza un aumento della velocità di spostamento. Anche in questo caso la velocità aumenta gradualmente e allo stesso modo diminuisce.

Consideriamo ora un periodo estivo, a cavallo tra i mesi di luglio e agosto. Si denota un evento piovoso molto abbondante, a fine luglio, susseguito dalla quasi totalità assenza di fenomeni piovosi per i primi venti giorni di agosto. Questo potrebbe farci pensare ad un periodo di tempo assai caldo e soleggiato in linea con la tendenza estiva.

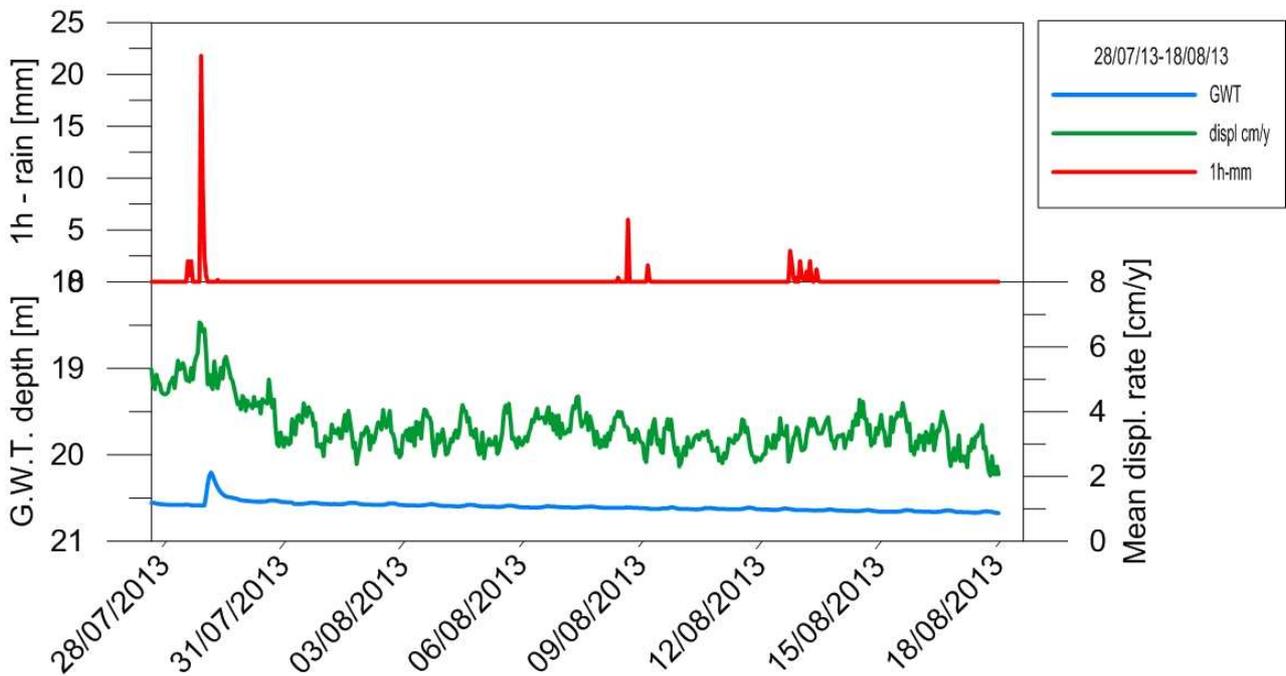


FIGURA 3.24 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 28/07/13 – 18/08/13

Il livello di falda, e analogamente la velocità di spostamento, non sembra risentire dell'evento piovoso se non in minima parte, con un leggero innalzamento di circa mezzo metro del livello di falda che si smorza in brevissimo tempo, e un leggero aumento della velocità di spostamento da circa 4 a 6 cm/y. Conseguentemente il livello di falda si riporta alla quota media di 20.5 m s.p.c. e la velocità si assesta presto attorno ad un valore costante di circa 3 cm/y. Questo comportamento può essere spiegato col fatto che l'acqua proveniente dalla precipitazione, dato il periodo caldo e la presenza di piante in intensa attività vegetativa, è allontanata per evapotraspirazione e non riesce ad infiltrarsi in profondità. In questo modo la maggior parte di precipitazione non collabora

all'innalzamento della falda. Concludiamo questa prima analisi sommaria tra la relazione che lega i parametri monitorati con l'analisi di altri due eventi significativi nei mesi autunnali ed invernali. Dalle osservazioni appena esposte e dagli esempi che seguono è possibile affermare che nel mese di novembre, marzo ed aprile 2013 la zona di Pian de Cice si è mossa rapidamente e, in particolare, nei mesi di marzo ed aprile ha subito una forte accelerazione rispetto ai mesi precedenti (Figura 3.25).

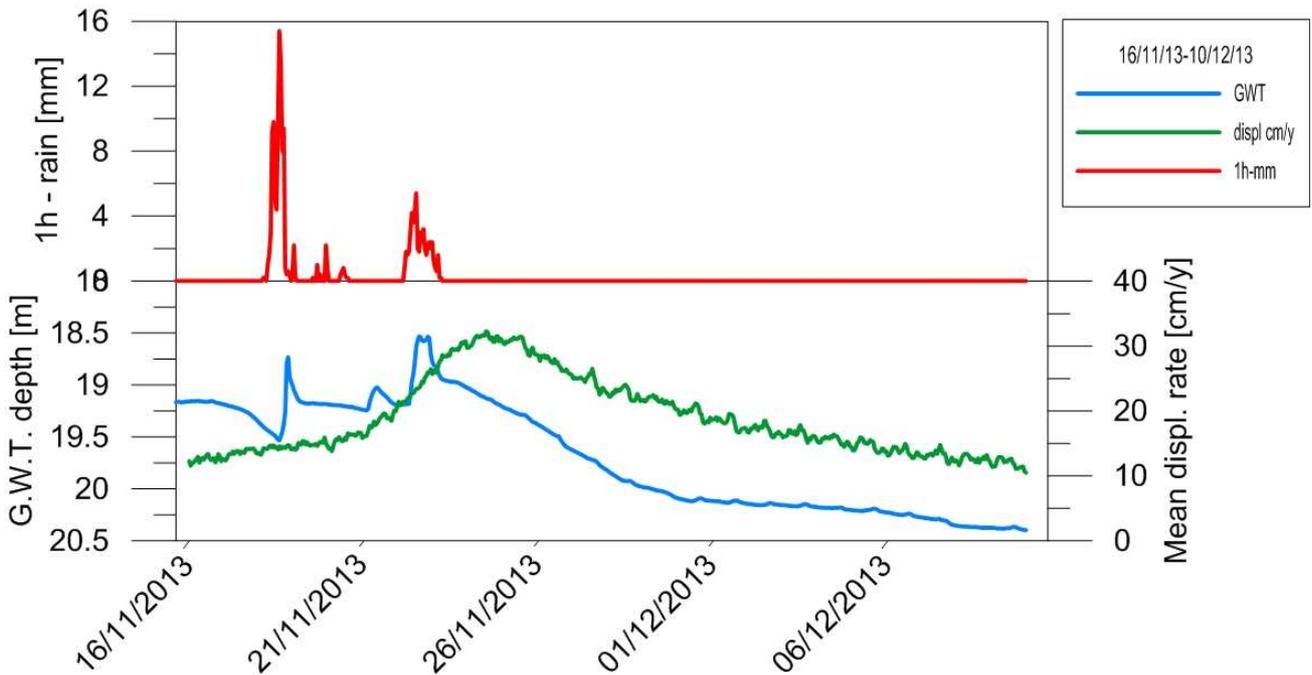


FIGURA 3.25 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 16/11/13 – 10/12/13

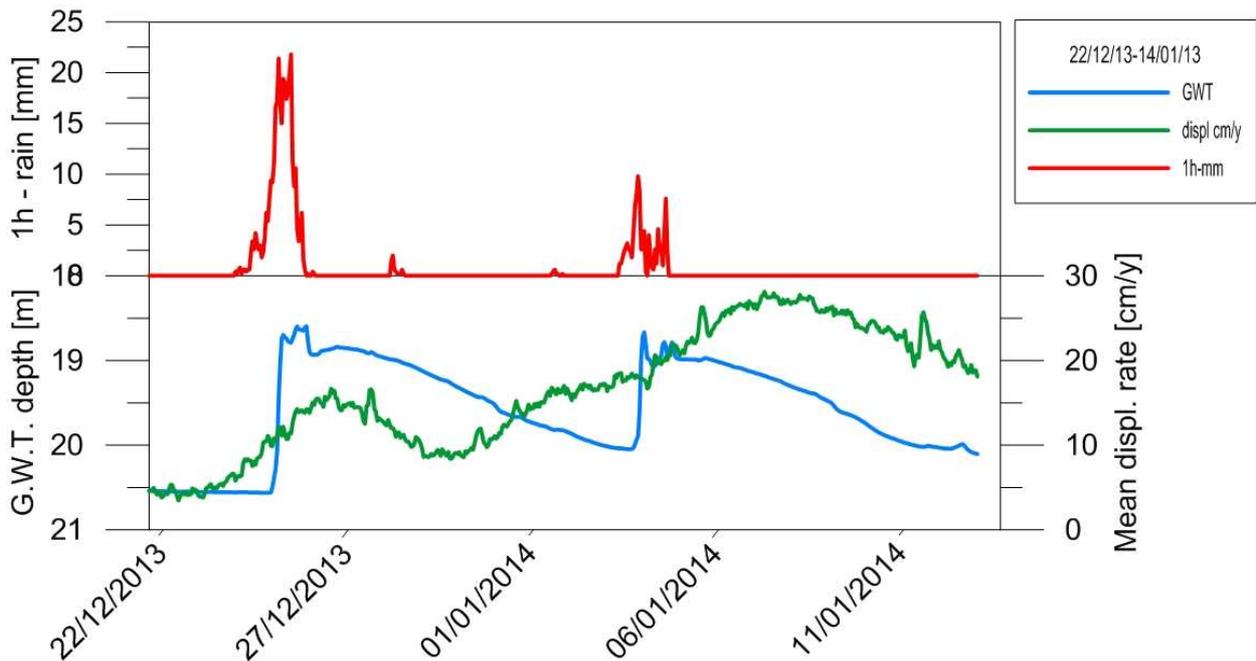


FIGURA 3.26 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 22/12/13 – 14/01/13

In generale risulta chiaro che un singolo evento piovoso causa un aumento rapido della velocità di spostamento, ma con un ritardo di circa 12 ore.

Allo stesso modo, la diminuzione della velocità di spostamento sembra essere in accordo con la diminuzione del livello di falda, anche se si verifica più gradualmente.

In particolare si ottiene che l'oscillazione di falda ha effetto significativo sullo spostamento misurato dall'inclinometro: un'oscillazione di falda, ed in particolare un suo innalzamento, comporta un aumento delle pressioni neutrali con conseguente diminuzione delle tensioni efficaci e mobilitazione del versante. Per quanto riguarda il ritardo presente tra le precipitazioni ed il livello di falda è possibile affermare che negli anni, probabilmente a causa della nascita di numerose fratture all'interno del terreno, tale ritardo si sia ridotto, suggerendo quindi una diminuzione del tempo di attivazione del movimento.

Tale fenomeno si rispecchia nel valore di spostamento finale ottenuto per il periodo in esame (18 mesi) pari a circa 35 cm, molto elevato rispetto quello misurato in passato.

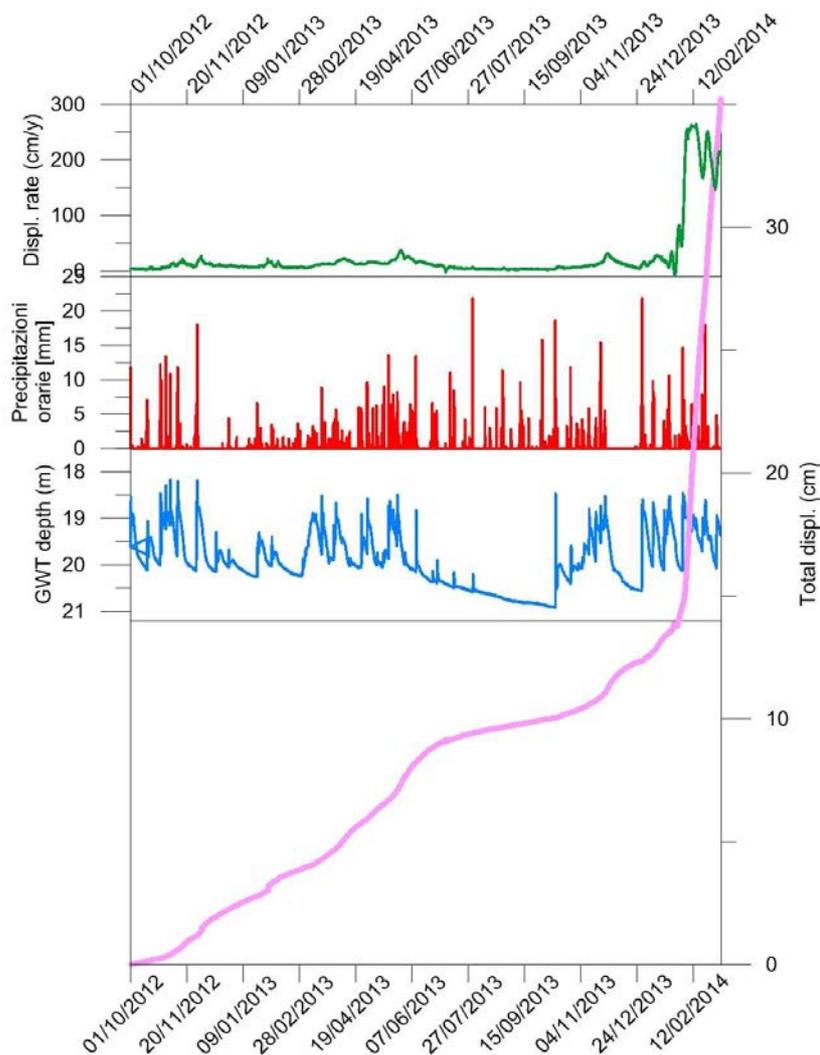


FIGURA 3.27 : Confronto tra i dati monitorati nell'intero periodo di monitoraggio con il picco finale di spostamento registrato nei mesi invernali tra il 2013 e il 2014

Sarebbe opportuno, nonché consigliabile allungare il periodo di monitoraggio e ampliare il sistema di monitoraggio anche in altri punti del settore Pian de Cice, in quanto risulta evidente che la tendenza del comportamento del settore è quella di avere un graduale aumento delle velocità di spostamento, confermato dal picco registrato nei periodi finali del monitoraggio, accelerando fino ad arrivare al collasso in accordo con molti studi riguardanti il comportamento dei pendii in movimento in fase di creep e rottura progressiva. In particolare Suklje afferma che: *“Le condizioni esistenti nei pendii con struttura eterogenea sono particolarmente favorevoli perché si abbia rottura progressiva. [...] Il manifestarsi della rottura progressiva a lungo termine di pendii eterogenei si deve attribuire o alla variabilità del carico o alla diminuzione dei valori della resistenza di picco con il tempo, oppure all’effetto combinato di entrambi i fattori. [...] In caso di creep con velocità costante o crescente, la rottura progressiva dovrebbe manifestarsi con un processo di creep a breve termine.”*

## 4. MODELLI PER LA PREVISIONE DEL MOVIMENTO FRANOSO

### 4.1 Introduzione ai modelli

La causa più comune di innesco delle frane è sicuramente rappresentata dalle precipitazioni. L'effetto delle precipitazioni consiste soprattutto nell'aumento della pressione dell'acqua interstiziale nei terreni (aumento della pressione dei pori  $u$ ), la quale determina una riduzione degli sforzi efficaci che, in terreni saturi, è espressa dal principio di Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4.1)$$

dove  $\sigma$  e  $\sigma'$  rappresentano rispettivamente lo sforzo totale e quello efficace.

Tale riduzione comporta una diminuzione della resistenza di taglio, secondo il criterio di Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi' + c' \quad (4.2)$$

In letteratura, esistono numerosi studi rivolti alla ricerca delle relazioni tra precipitazioni e fenomeni franosi. Generalmente infatti i dati pluviometrici sono di facile acquisizione nei paesi dotati di reti di stazioni meteorologiche sufficientemente articolate; per questo i dati pluviometrici possono essere efficacemente utilizzati sia in fase previsionale, per la valutazione della pericolosità dell'evento franoso, sia in fase di prevenzione, per la realizzazione di sistemi di allarme per la mitigazione del rischio.

Allo stato attuale della ricerca, in letteratura vi è la generale convinzione che le frane superficiali ed i debris flows siano innescati da precipitazioni intense e di durata relativamente breve, mentre la stabilità di frane profonde o comunque più complesse sia influenzata da eventi di precipitazioni prolungati nel tempo. Molti lavori di ricerca sembrano indicare un ruolo preciso e importante delle piogge antecedenti sull'innescio dei fenomeni franosi (almeno per certe tipologie), ma il quadro è forse meno chiaro di quanto appare, specialmente in relazione alle caratteristiche intrinseche del terreno, quali viscosità, permeabilità. Inoltre non è ancora chiaro quale particolare evento piovoso, quello subito antecedente o anche quelli precedentemente avvenuti, sia l'innescio dell'evento franoso o dell'aumento di velocità di spostamento. Molti autori comunque, come per esempio Corominas & Moya (1999) e Corominas (2000) per i Pirenei, ritengono che la precipitazione antecedente non influenzi la stabilità dei versanti.

Il problema generale consiste nella ricerca di una certa "soglia pluviometrica" la quale innesci un comportamento franoso, o che ne modifichi uno esistente aumentandone la velocità e quindi il rischio di collasso.

Con il termine “*soglia pluviometrica*” si suole indicare un valore minimo o massimo di pioggia necessaria per innescare un processo naturale d’instabilità; quella “*minima*” è da considerare il livello inferiore al di sotto del quale il processo non s’innesci, quella “*massima*” rappresenta il livello oltre il quale il processo si manifesta sempre.

Il problema della definizione delle soglie pluviometriche è reso difficile dalle complesse relazioni che esistono tra afflussi, infiltrazione efficace e risposta della pressione dei pori.

A tal proposito il modello geotecnico di un pendio, schematizzato col diagramma seguente, riassume il percorso da compiere per arrivare alla modellazione di un movimento franoso, grazie alla quale possiamo capirne, e prevederne il comportamento nel tempo.



FIGURA 4.1 : modello geotecnico di un pendio

Gli studi che si sono prefissati l’obiettivo di individuare la correlazione tra precipitazioni e movimenti di massa sono classificabili principalmente in tre tipologie:

**MODELLI DETERMINISTICI:** studi basati sulla modellazione fisica del pendio esaminato, dell’infiltrazione e del deflusso lungo il pendio stesso (modello idrologico). Analisi di questo tipo sono in genere svolte su una porzione di versante limitata o, al massimo, a scala di bacino, spesso con l’ausilio di tecnologie GIS: necessitano infatti di numerosi parametri che sono soggetti ad elevata variabilità spaziale;

**MODELLI STATISTICI O EMPIRICI:** studi volti all’individuazione di soglie pluviometriche per l’innesco di frane, valide a scala locale o regionale, determinate su indagini di tipo statistico in base ai dati relativi agli eventi pregressi nella zona in esame. Per lo svolgimento di analisi di questo tipo è necessario disporre di un’ampia base di dati, relativi sia alle precipitazioni che alle frane nella zona esaminata; occorre inoltre porre particolare attenzione alla validità spaziale delle soglie ricavate. In questi modelli non si entra nel merito delle leggi fisiche che regolano le trasformazioni afflussi – infiltrazioni - risposta piezometrica;

**MODELLI MISTI:** in cui vengono abbinate entrambe le precedenti strategie; ad esempio l’innalzamento della falda è prevista mediante un modello idrologico mentre la risposta piezometrica è correlata statisticamente all’evento pluviometrico.

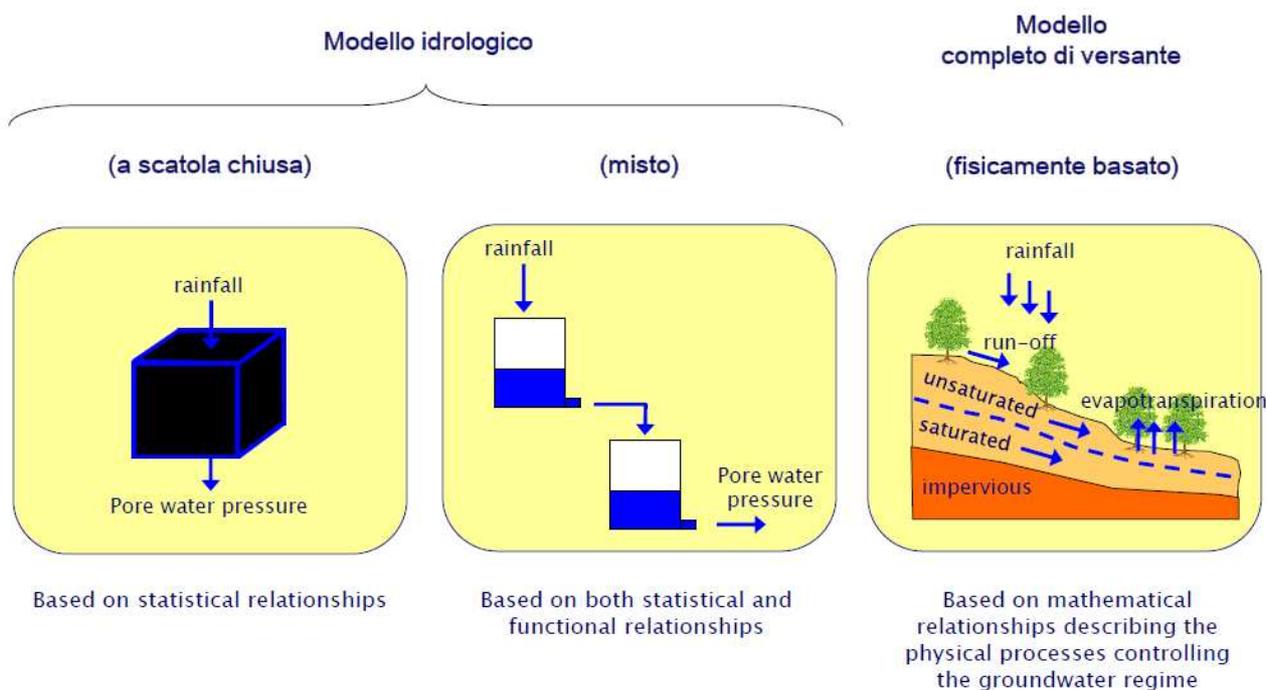


FIGURA 4.2 : modellazione di un versante in base al tipo di modello adottato

Generalmente la taratura dei modelli deterministici o di quelli misti richiede la conoscenza delle oscillazioni piezometriche nel tempo, ottenibile solo con un accurato monitoraggio. Nel presente lavoro si farà uso di modelli deterministici e misti applicati al caso di studio della Frana del Tessina, grazie al monitoraggio effettuato nel settore Pian de Cice. Esistono due principali approcci di analisi della pericolosità applicati ai modelli di tipo deterministici o misti mediante monitoraggio: uno meccanico l’altro cinematico, si possono applicare separatamente o in maniera complementare. Nell’approccio di tipo **meccanico** la previsione dei movimenti di un fenomeno franoso o di un versante potenzialmente instabile può avvenire in teoria mediante il monitoraggio

di ognuno dei parametri, caratterizzati da variabilità temporale, che entrano in gioco nella definizione del fattore di sicurezza, ovvero:

- a) pressioni neutre;
- b) morfologia del versante;
- c) proprietà meccaniche dei terreni;
- d) carichi applicati.

In pratica il parametro caratterizzato dalla maggiore incertezza e dalla più ampia variabilità nel tempo è rappresentato dalle pressioni neutre, per cui in genere l'approccio meccanico si basa sulle misure piezometriche. In genere si utilizzano periodi limitati di osservazioni piezometriche (uno - due anni) per ricavare correlazioni fra afflussi meteorici e oscillazioni della falda. In base a tali correlazioni la previsione della pericolosità può essere effettuata mediante l'analisi statistica delle precipitazioni, come descritto precedentemente. Le pressioni neutre stimate possono essere utilizzate per il calcolo del fattore di sicurezza, mediante l'analisi all'equilibrio limite. In questo modo si possono stimare le variazioni del fattore di sicurezza nel tempo e, attraverso l'analisi dei valori estremi annuali, si può associare un tempo di ritorno ad ogni valore del fattore di sicurezza. L'analisi in termini di fattore di sicurezza presenta tuttavia alcuni problemi, legati all'incertezza con cui questo può essere determinato in relazione alla reologia dei materiali interessati.

La reologia è quella parte della fisica che si occupa dei fenomeni di scorrimento nei materiali (viscosità e comportamento newtoniano e non newtoniano dei fluidi), studiando l'andamento delle deformazioni nella materia sotto l'effetto dell'applicazione di un sistema di sollecitazioni esterne. Tutti i materiali solidi che scorrono però hanno anche deformazioni di tipo elastico, per cui nel nostro caso è più corretto affermare che la reologia si occupa dei fenomeni di visco-elasticità nei materiali solidi. Infatti, come noto, ogni forza esterna applicata provoca in un materiale una deformazione, che può avere due componenti:

- Deformazione elastica: istantaneamente il materiale raggiunge una condizione di equilibrio (forza esterna bilanciata dalle forze interne); venuta meno la forza esterna, esso ritorna immediatamente nella configurazione iniziale;

- Deformazione irreversibile: sotto l'azione della forza esterna, la deformazione aumenta nel tempo ed è irreversibile (permanente), cioè non viene recuperata anche se la forza che l'ha prodotta viene eliminata. Nel campo delle deformazioni irreversibili, esistono però due possibili risposte dei materiali:

- a) Scorrimento viscoso, che si verifica nel tempo a forza costante, qualunque sia l'entità della forza esterna;
- b) Scorrimento plastico, che si manifesta immediatamente e solo se la forza esterna supera un certo valore (resistenza del materiale).

I terreni, sono caratterizzati da un comportamento anelastico non lineare anche per piccoli valori degli sforzi applicati, da cui deriva che le deformazioni sono prevalentemente irreversibili e dipendono dal percorso tensionale, dalla velocità di applicazione del carico e dal tempo. In particolare, il terreno, se sottoposto ad un carico costante, sviluppa deformazioni differite nel tempo, volumetriche e/o deviatoriche, che possono diventare di notevole entità. Questo fenomeno, noto con il nome di deformazione secondaria o creep, è attribuibile ai processi viscosi che avvengono a livello dello scheletro solido del terreno (costituito dalle particelle e dall'acqua adsorbita).

Il fenomeno "inverso", di solito chiamato rilassamento, consiste nella diminuzione della tensione nel tempo, conseguente all'applicazione di un livello di deformazione costante.

L'entità e la velocità del creep e del rilassamento sono quindi conseguenze di uno stesso fenomeno, cioè del cambiamento della struttura del terreno nel tempo (viscosità).

In generale, questo tipo di comportamento è essenzialmente lo stesso per tutti i terreni, cioè sia per i terreni granulari che per i terreni coesivi. Tuttavia, la dipendenza del comportamento meccanico dal tempo è più marcata per le argille rispetto alle sabbie.

Un ruolo importante nel comportamento viscoso dei terreni è dato dall'acqua che può lubrificare le particelle e incrementare la velocità di creep, quindi le deformazioni di creep sono più rilevanti se il contenuto d'acqua è elevato; il comportamento viscoso nei terreni normalconsolidati è più marcato rispetto ai terreni sovra consolidati.

La sabbia, che è generalmente considerato come un materiale non viscoso, mostra invece un comportamento time-dependent. I risultati sperimentali mostrano che le deformazioni di creep non sono trascurabili e possono raggiungere il 10% della deformazione per carico monotono (solitamente intesa come deformazione elastoplastica). Inoltre, durante il caricamento, dopo aver subito processi di creep e/o di rilassamento, la risposta è molto più rigida rispetto ai casi in cui non si siano verificati fenomeni viscosi. Per questo motivo, la maggior parte delle osservazioni sperimentali riportate in letteratura si concentra quasi esclusivamente sulla caratterizzazione del comportamento viscoso dei terreni a grana fine, mentre il numero delle prove di laboratorio sulle sabbie è molto più ridotto, anche se negli ultimi anni è stata dedicata sempre maggiore attenzione anche alla ricerca sperimentale sul creep dei materiali granulari

La risposta viscosa dei terreni dipende quindi da numerosi fattori, come la natura e la struttura del terreno, la storia tensionale, le condizioni di drenaggio e la tipologia di caricamento. In Figura 4.3, ad esempio, è riportata un'ampia gamma di curve  $[t-\epsilon]$  di creep volumetrico ricavate per diversi tipi di terreni

in diverse condizioni (Mitchell e Soga, 2005).

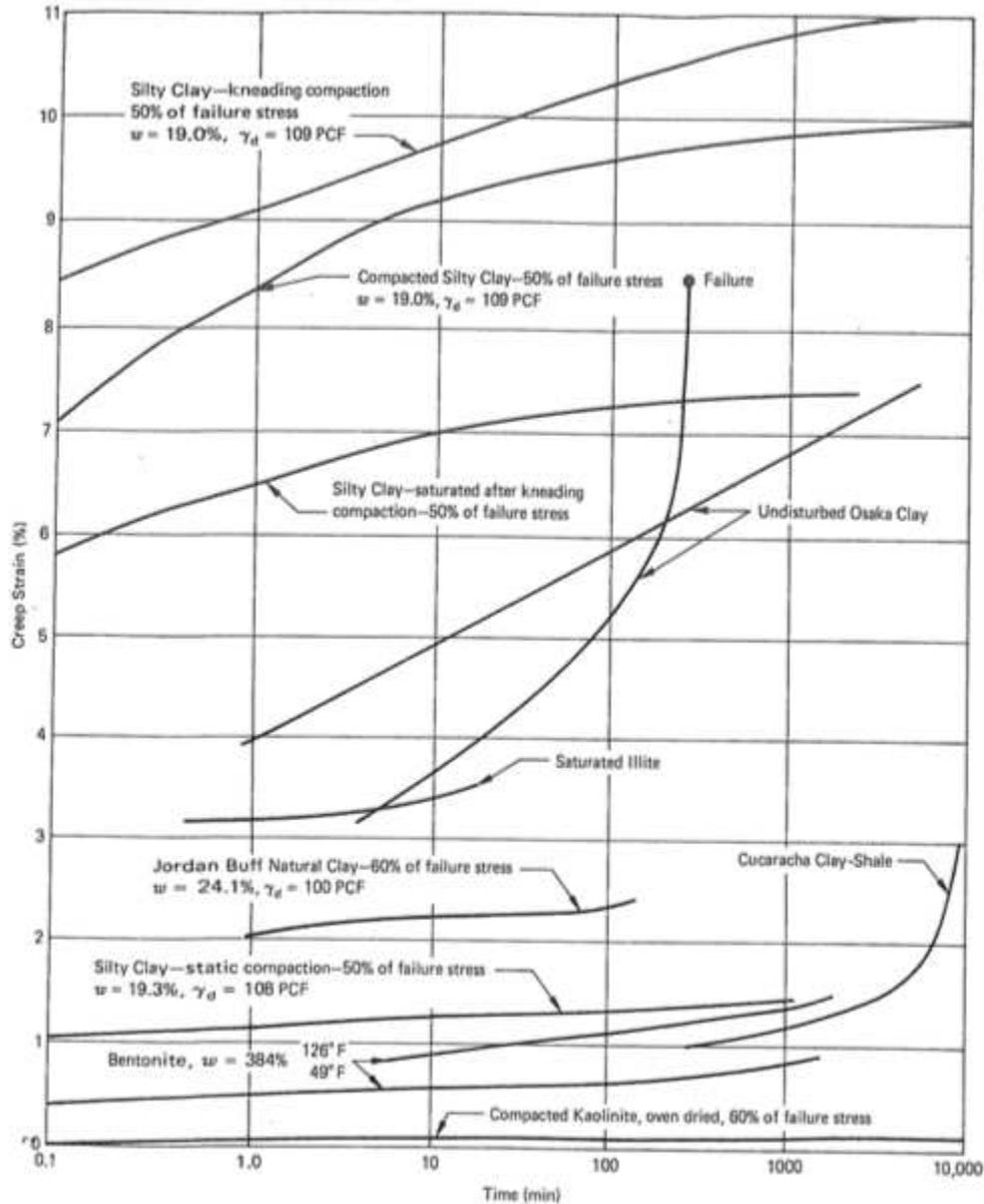


FIGURA 4.3 : Curve di creep volumetrico per diversi tipi di terreni e diverse condizioni di carico

Un approccio più diretto per la previsione dell'istante di rottura (time of failure) di un pendio si basa sul monitoraggio delle deformazioni, mediante misure topografiche estensimetriche o inclinometriche, si tratta di un approccio di tipo **cinematico**. L'analisi accurata del quadro deformativo è in genere problematica a causa della complessità delle leggi costitutive che regolano il comportamento meccanico dei materiali naturali. Pur essendo possibile dare un'interpretazione deterministica delle deformazioni, sulla base di modelli numerici, è spesso conveniente far riferimento a procedimenti empirici a "scatola chiusa".

Se si considera la variazione nel tempo della velocità di un movimento franoso, essa in genere è descritta da una curva che presenta due tratti:

1) il primo in cui la velocità si mantiene pressoché costante  $v=v_0$ , entro il quale le deformazioni sono essenzialmente di natura viscosa;

2) il secondo, che inizia ad un determinato tempo  $t_0$ , in cui la velocità aumenta nel tempo; tale fase può dar luogo a due tipi di evoluzione (Figura 4.3):

- a) la velocità può continuare ad aumentare indefinitamente nel tempo fino alla rottura;
- b) la velocità, dopo un iniziale aumento, si stabilizza su un valore costante o diminuisce in modo che non si raggiungono mai condizioni di rottura.

Il tratto di curva che corrisponde al comportamento 2a) può essere interpretato mediante leggi empiriche.

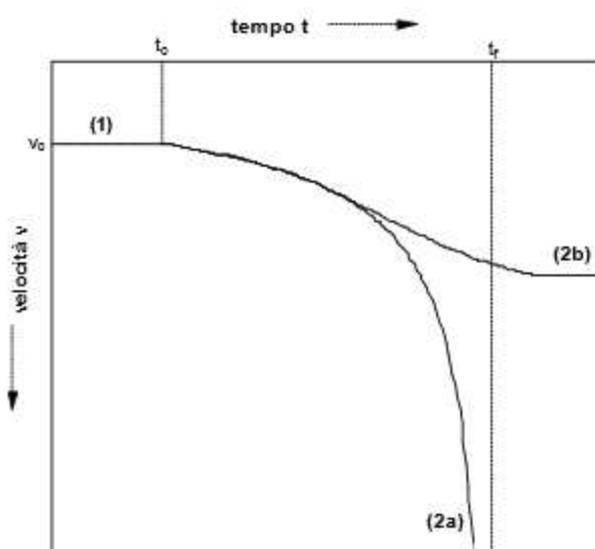


FIGURA 4.3 : evoluzione cinematica di una frana

Scopo del presente capitolo è illustrare una serie di modelli misti applicati alla ricerca della correlazione tra i valori monitorati e il comportamento evolutivo di un evento franoso.

In ogni caso, allo stato attuale della ricerca, si può affermare che il comportamento di una frana si colloca all'interno di un comportamento a rottura progressiva del terreno (creep), comportamento che viene posto in relazione con la riduzione della resistenza dei terreni dopo il superamento del valore di picco.

Si ricorda che lo stato critico di un terreno, successivo alla condizione di resistenza massima che si ha a piccole deformazioni, è definito come quella resistenza al taglio per la quale il terreno si deforma a tensione e volumi costanti in condizione di grandi deformazioni, proprie quindi di un movimento franoso. È stato inoltre dimostrato che lungo le superfici principali di slittamento, nelle frane e nelle zone di taglio tettoniche, la resistenza è uguale o prossima al valore residuo. Lungo le fratture di taglio secondarie con superficie piuttosto irregolare dove i movimenti relativi sono stati piccoli, come pure i piani di stratificazione ed i giunti, dove i movimenti relativi accumulati sono

nulli o trascurabili, la resistenza è maggiore del valore residuo, ma minore della resistenza del materiale intatto. Comunque piccolissimi movimenti bastano per diminuire la resistenza fino al valore residuo.

Il manifestarsi della rottura progressiva a lungo termine di pendii eterogenei si deve attribuire o alla variabilità del carico o alla diminuzione dei valori della resistenza di picco con il tempo, oppure all'effetto combinato di entrambi i fattori.

In conclusione, in base agli aspetti principali del comportamento reologico del terreno, e del procedimento di modellazione di un pendio franoso possiamo riassumere quattro concetti fondamentali:

- 1) La rottura progressiva o creep, influisce sulla stabilità in tutti i pendii nei quali la resistenza del terreno si riduce dopo il superamento del valore di picco del terreno, a meno che il campo di tensione e la resistenza di picco siano uniformi in tutte le zone; entrambe queste condizioni possono essere difficilmente realizzate nei pendii naturali.
- 2) In condizioni di carico costante il creep a lungo termine non può avvenire a meno che la resistenza di picco non sia stata superata nella maggior parte della zona di creep; in queste condizioni la rottura a lungo termine deve attribuirsi al comportamento a fatica del terreno, cioè alla riduzione della resistenza di picco con la durata della sollecitazione.
- 3) Il ritardo nella rottura può essere anche attribuito alla variabilità periodica dello stato di tensione, cioè a stati di tensione di breve durata, per i quali viene raggiunta la resistenza di picco o il creep si sviluppa a velocità costante o crescente, ai quali seguono stati di tensione per cui le deformazioni avvengono a velocità decrescente. Tale aumento periodico della sollecitazione può essere attribuito, in particolare, alla variazione del campo di potenziale della falda acquifera.

Nelle condizioni naturali il ritardo nella rottura deve essere comunemente attribuito all'effetto combinato del carico variabile e del comportamento a fatica del terreno inteso come diminuzione della resistenza con tempo.

- 4) Qualsiasi creep con velocità costante o crescente deve essere considerato un processo che porta alla rottura. Al fine di stabilire il grado di pericolosità, di valutare il tempo occorrente perché si verifichi la rottura e per studiare l'efficacia di possibili interventi, devono essere eseguite misure in sito in tutti i casi in cui i pendii soggetti a creep possono causare eventi catastrofici, o comunque situazioni di pericolo a beni e persone. Misurando periodicamente gli spostamenti dei pendii instabili si dovrebbero determinare le direzioni, la velocità e le accelerazioni del creep. Tali informazioni devono essere completate con misurazioni inclinometriche profonde, dal monitoraggio della quota di falda e della sua

oscillazione in base alle precipitazioni piovose, e da risultati sulle proprietà geotecniche del terreno determinate con prove in laboratorio ed in sito.

Per capire a fondo il comportamento dei terreni in fase di creep riassumiamo brevemente il loro comportamento durante la fase di una prova di taglio.

#### 4.1.1 Prove triassiali e comportamento a creep del terreno

Nelle prove triassiali standard, un provino cilindrico di terreno, contenuto fra due basi indeformabili e circondato lateralmente da una membrana impermeabile, viene inizialmente compresso in condizioni di simmetria assiale tramite un fluido in pressione (fase di consolidazione). La velocità di consolidazione deve essere tale da minimizzare le deformazioni secondarie in fase di consolidazione, ma non troppo veloce da provocare accumulo di pressione interstiziale.

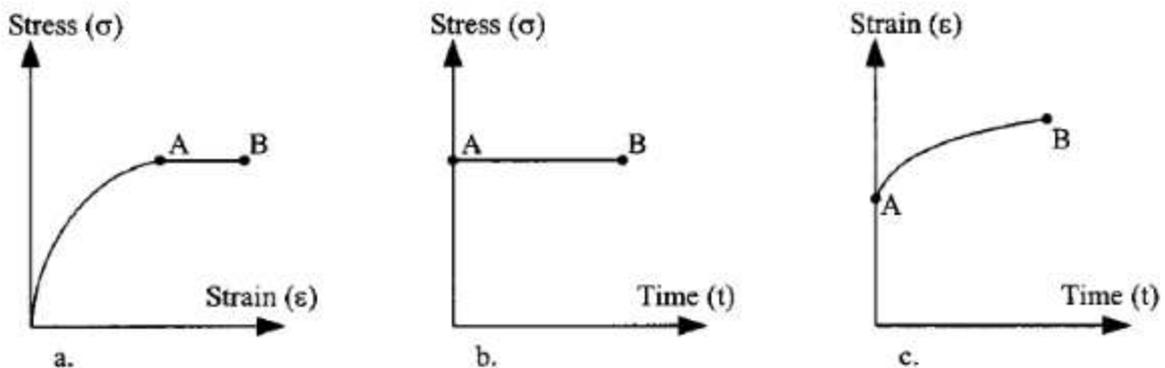


FIGURA 4.4 : Prove di creep a bassi livelli tensionali: (a) relazione tensione-deformazione, (b) relazione tensione-tempo e (c) relazione deformazione-tempo

Al termine della prima fase, segue la fase di taglio, in cui il campione è soggetto a compressione assiale mediante l'avanzamento di un pistone. In virtù della differenza tra la tensione assiale e la pressione di confinamento laterale si genera una tensione deviatorica che sollecita il terreno a taglio. Se dopo aver fatto avanzare il pistone a velocità costante fino allo stato di tensione-deformazione ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ) prefissato (rappresentato dal punto A in Figura 4.4) si mantengono costanti le tensioni per un certo periodo di tempo, come mostrato sul piano ( $\sigma$ ,  $t$ ) in Figura 4.4b, si può sottoporre il provino ad un processo di creep. Infatti, con il passare del tempo nel materiale si manifestano deformazioni assiali e radiali permanenti e gradualmente crescenti: durante questo processo lo stato di deformazione si muove verso il punto B, come mostrato sul piano ( $\epsilon$ ,  $t$ ) in Figura 4.4c.

La prova di creep in cella triassiale può essere quindi rappresentata, sul piano ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) in Figura 4.4a, dal percorso di deformazione  $A \rightarrow B$ , che si manifesta progressivamente nel tempo sotto tensione costante.

In relazione ad un processo di creep realizzato in un apparecchio triassiale, la pressione interstiziale può aumentare, diminuire o rimanere costante, a seconda della variazione di volume della struttura del terreno e del verificarsi o meno del drenaggio durante il processo di deformazione a taglio. Per tenere conto di questo fattore, in letteratura si distinguono due condizioni di creep:

- 1) CREEP DRENATO: la fase di taglio viene condotta a drenaggio aperto e a velocità lenta in modo da non generare variazioni di pressione interstiziale nei provini ( $\Delta u = 0$ ). In questo modo tensioni totali ed efficaci coincidono, quindi la tensione media ( $p' = p - u$ ) e la tensione deviatorica ( $q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$ ) vengono mantenute costanti, cioè il processo di creep corrisponde ad un singolo punto sul piano triassiale:  $p', q = \text{cost}$
- 2) CREEP NON DRENATO: la fase di taglio avviene a drenaggi chiusi (a deformazioni volumetriche impedito), quindi si ha un aumento della pressione interstiziale. Di conseguenza la tensione media efficace  $p'$  diminuisce, mentre la tensione deviatorica  $q$ , essendo indipendente dalla pressione dei pori, rimane costante:  $\Delta u \uparrow \Rightarrow p' \downarrow, q = \text{cost}$ .

Sulla base della definizione di creep (sviluppo di deformazioni viscoso a tensioni efficaci costanti), si può concludere che, diversamente dal creep drenato, il creep non drenato non rappresenta un processo di creep puro, poiché le deformazioni sono costituite da una componente plastica (dovuta alla variazione della tensione efficace) e una viscosa. Comunque, in letteratura, entrambi i processi sono generalmente descritti come creep.

D'altra parte, il requisito di tensioni efficaci costanti non è, in generale, soddisfatto durante le prove di creep. La differenza tra creep a carico costante e creep a tensioni efficaci costanti è illustrato in Figura 4.5, dove  $t$  è il tempo di creep.

Il creep a tensioni efficaci costanti corrisponde ad un punto del piano triassiale  $p'-q$ ;

Il creep a carico costante avviene a tensioni decrescenti nel tempo.

La continua diminuzione della tensione di creep è dovuta al fatto che l'area del campione aumenta. In realtà, è evidente che solo il creep a tensione costante può essere considerato come creep puro, perché lo stato tensionale efficace viene mantenuto costante. Comunque, in generale, in letteratura entrambi i processi vengono descritti come fenomeni di creep.

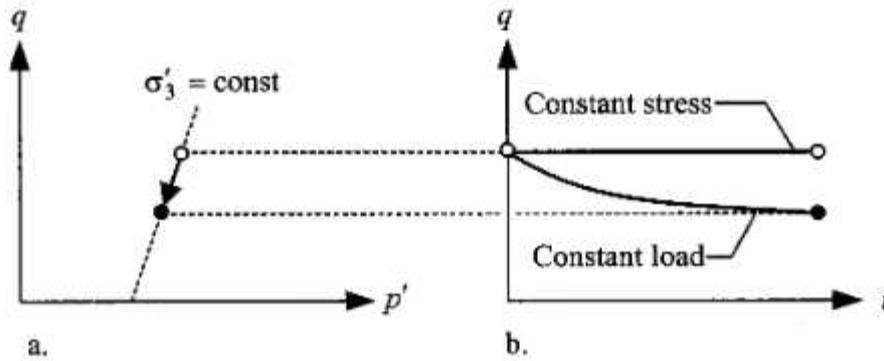


FIGURA 4.5 : Differenza tra creep a tensioni efficaci costanti e creep a carico costante: (a) relazione tensione deviatorica-p pressione media (piano triassiale) e (b) relazione tensione deviatorica-tempo

I risultati delle prove di creep possono essere rappresentati in un diagramma deformazione-tempo ( $\epsilon$ - $t$ ), come mostrato in Figura 4.6a . In relazione ad esso, il processo di creep può essere diviso in tre fasi:

- 1) CREEP PRIMARIO O TRANSITORIO (primary, transient or fading creep), caratterizzato da una velocità di deformazione  $\epsilon' = d\epsilon/dt$  crescente nel tempo;
- 2) CREEP SECONDARIO O STAZIONARIO (secondary, stationary or non fading creep), caratterizzato da una velocità di deformazione  $\epsilon' = d\epsilon/dt$  costante nel tempo;
- 3) CREEP TERZIARIO O ACCELERATO (tertiary or accelerated creep), caratterizzato da una velocità di deformazione  $\epsilon' = d\epsilon/dt$  crescente nel tempo.

L'entità della velocità di deformazione aumenta all'aumentare della plasticità del terreno, del contenuto d'acqua e del livello tensionale. L'andamento della velocità di deformazione è chiaramente rappresentato in Figura 4.6b, dove il logaritmo della velocità di deformazione è funzione del logaritmo del tempo ( $\log \epsilon$ -  $\log t$ ). Tale classificazione è valida solo per prove di creep effettuate mediante apparecchi triassiali.

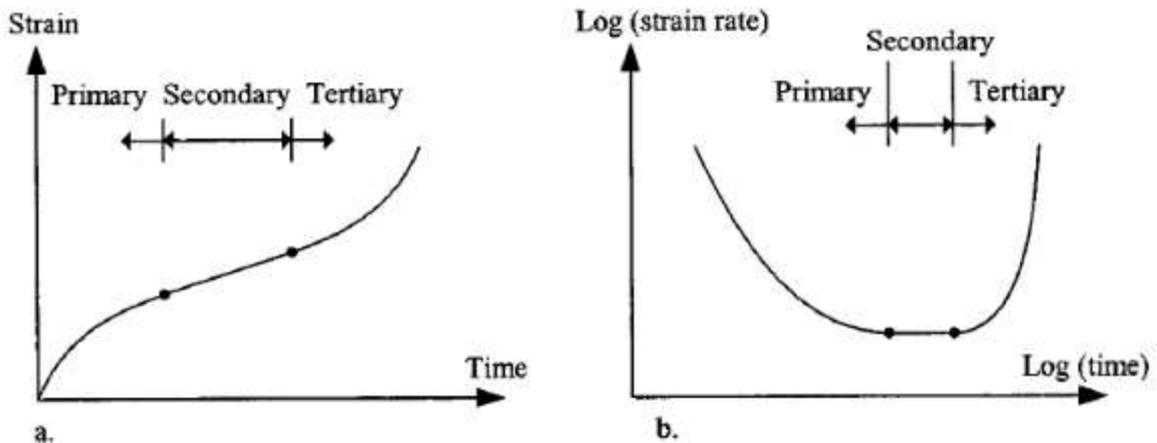


FIGURA 4.6 : Definizione delle fasi di creep durante prove triassiali di creep a tensioni efficaci costanti: (a) relazione deformazione-tempo e (b) relazione deformazione-tempo in scala logaritmica

Aumentando il livello di tensione deviatorica  $q=\sigma_1-\sigma_3$  e ripetendo la prova, la curva deformazione-tempo si modifica, riducendo le durate dei vari stadi di creep e incrementando la velocità di deformazione di creep, come mostrato in Figura 4.7.

A bassi livelli di tensione deviatorica, la fase di creep terziario non si verifica e dopo un certo periodo di tempo lo stato tensionale e deformativo del terreno si stabilizzano.

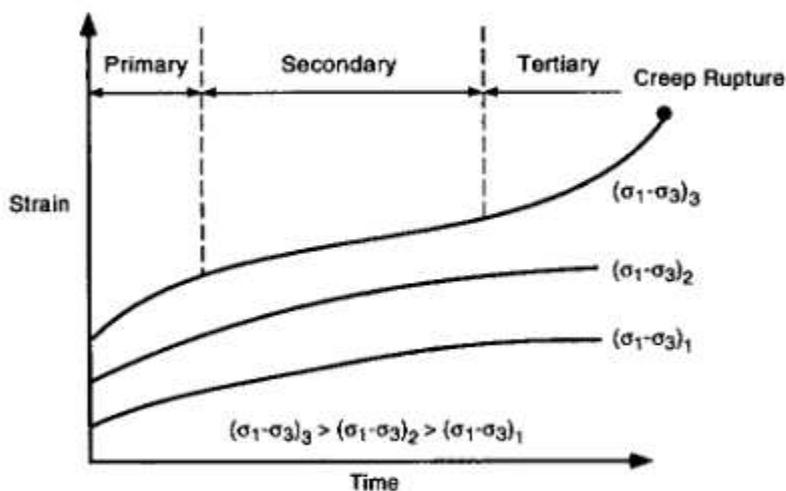


FIGURA 4.7 : Comportamento di creep a diversi valori di tensione deviatorica costante

Al contrario, dall'andamento della curva superiore in Figura 4.7 si può notare che, ad elevati livelli di tensione deviatorica, in seguito alla fase di creep secondario, il creep può divenire di tipo terziario e la velocità di deformazione può aumentare rapidamente nel tempo, portando infine alla rottura del terreno. In questo caso si parla di rottura o collasso per creep.

Alcuni terreni possono quindi collassare per creep sotto un livello di tensione deviatorica significativamente inferiore (appena il 50%) rispetto al picco tensionale misurato in una prova triassiale standard, in cui un campione viene caricato a rottura in pochi minuti o ore.

La perdita di resistenza per creep è particolarmente importante nelle argille tenere in condizioni triassiali non drenate e nelle argille fortemente sovraconsolidate in condizioni drenate.

La relazione tra tensioni e deformazioni svolge un ruolo molto importante nella valutazione del comportamento di creep dei terreni a grana fine. In particolare, in relazione allo stato tensionale agente nel terreno, è possibile distinguere il comportamento di creep in:

- 1) CREEP VOLUMETRICO (volumetric creep), costituito solo da deformazioni viscoso volumetriche relative alla fase di creep primario, cioè tende a stabilizzarsi; non si verificano le fasi di creep secondario e terziario. Da questo punto di vista, la consolidazione secondaria costituisce un caso particolare di creep volumetrico, che può essere studiato mediante prove edometriche, cioè in condizioni monodimensionali, ad incrementi di carico costanti e/o a velocità di deformazione costante.

- 2) CREEP DEVIATORICO (deviatoric or shear creep), costituito da deformazioni viscoso deviatoriche, associate non a variazioni di volume, ma solo a variazioni di forma (deformazioni distorcenti). A seconda della mobilitazione della resistenza a taglio, le deformazioni di taglio possono avere velocità decrescente, costante o crescente nel tempo: cioè, se la tensione deviatorica è bassa, si verifica solo la fase di creep primario, mentre, se essa supera un certo livello, il creep primario viene seguito dal creep secondario, che può portare al creep terziario e alla rottura per creep. Il creep deviatorico, in combinazione al creep volumetrico, può essere studiato mediante prove triassiali, in condizioni drenate e non drenate, e per diversi valori della tensione deviatorica.

Infatti, in natura le deformazioni volumetriche di creep si verificano contemporaneamente a quelle deviatoriche: a causa della combinazione degli effetti tra le deformazioni plastiche volumetriche e quelle deviatoriche nei terreni, un aumento della pressione media o della pressione deviatorica può dare luogo a entrambi i tipi di deformazione.

La principale differenza tra il comportamento di creep volumetrico e quello deviatorico è la presenza delle fasi di creep secondario e terziario, che dipendono dal valore della tensione deviatorica, dalla natura del terreno e dalle condizioni al contorno. Ciò può essere spiegato sottolineando che mentre il creep volumetrico conduce ad una condizione più stabile della struttura del terreno, a cui è generalmente associato anche un aumento della resistenza, il creep deviatorico può essere fisicamente interpretato come un aumento o una diminuzione del numero dei legami strutturali, legati alla contemporanea presenza di deformazioni volumetriche e deviatoriche. In altri termini, il creep primario si verifica quando prevale l'incrudimento viscoso (creep hardening), il creep terziario quando prevale l'indebolimento della struttura (creep softening); il creep secondario si verifica quando i precedenti effetti si compensano.

Pertanto, contrariamente al creep volumetrico, sotto determinate condizioni, il creep deviatorico può portare il terreno al collasso.

Come spiegato finora, la maggior parte delle indagini sperimentali sul creep dei terreni è stata condotta su campioni consolidati isotropicamente e poi sollecitati a compressione triassiale oppure consolidati in condizioni edometriche. Tuttavia, in natura molti terreni sono stati soggetti a una storia tensionale anisotropa, perciò lo stato deformativo è più spesso conforme a condizioni di deformazione piana piuttosto che di compressione triassiale.

Nonostante le relazioni generali tensione-deformazione-tempo e deformazione-velocità di deformazione-tempo siano simili, i valori possono essere notevolmente diversi. Ciò è dovuto al fatto che le deformazioni dipendono dalla storia tensionale precedente alla fase di creep.

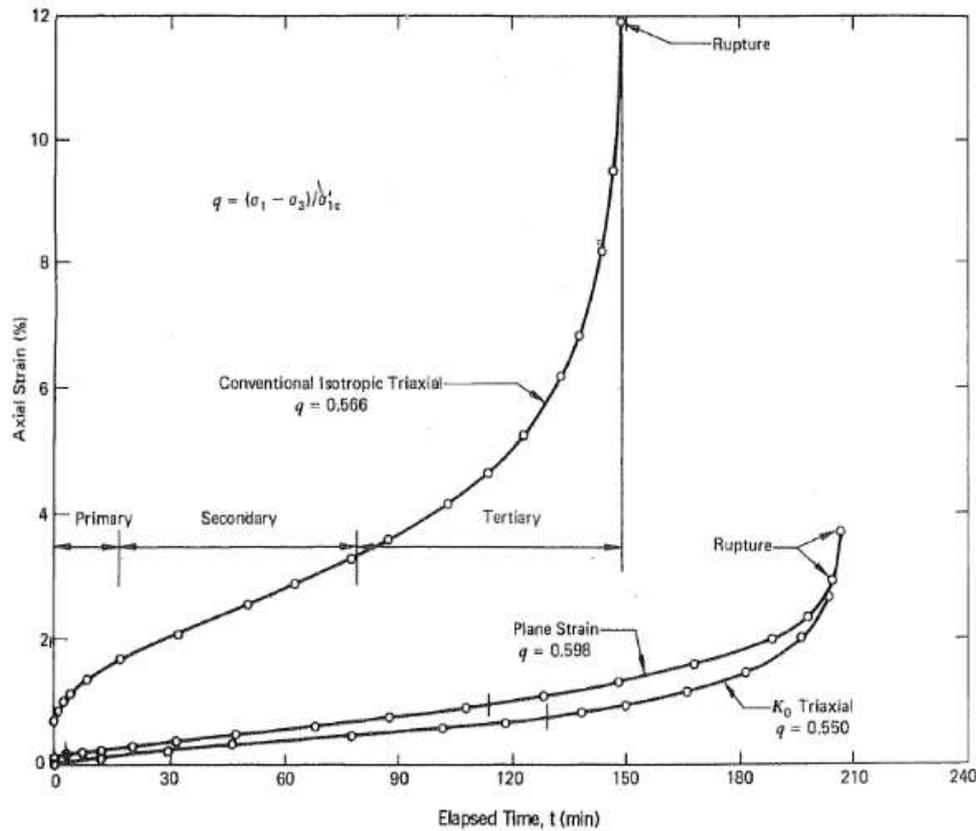


FIGURA 4.8 : Prove di compressione triassiale e di deformazione piana su argille indisturbate consolidate isotropicamente.

#### 4.1.2 Modello reologico di Bingham

Al fine di capire i modelli per la correlazione del comportamento viscoso del pendio in base alle precipitazioni monitorate, risulta conveniente illustrare brevemente il modello reologico al quale la maggior parte degli articoli presenti in letteratura fa riferimento per l'analisi del fenomeno, il modello reologico di Bingham.

Come già espresso la reologia si occupa dei fenomeni di scorrimento nel campo della meccanica dei solidi (viscosità e comportamento newtoniano e non newtoniano dei fluidi), studiando l'andamento delle deformazioni nella materia sotto l'effetto dell'applicazione di un sistema di sollecitazioni esterne, che può essere dato nel nostro specifico caso dalla variazione di quota di falda, o dalla presenza di sovraccarichi dati per esempio da una precipitazione nevosa, un evento sismico, o per cause legate all'intervento umano. Si può ricorrere ai concetti essenziali e ai fondamenti della reologia per inquadrare il comportamento meccanico dei terreni mediante l'impiego di schemi più o meno semplificati.

È importante sottolineare che la scelta del modello non è legata solo al tipo di materiale, ma anche e soprattutto al fenomeno fisico che lo interessa.

Le relazioni costitutive reologiche sono generalmente date da soluzioni in forma chiusa o in forma differenziale, essi vengono solitamente divisi in tre categorie:

- approccio differenziale;
- teorie ingegneristiche del creep;
- approccio ereditario.

Secondo l'approccio differenziale, detto anche metodo dei modelli reologici meccanici, le relazioni costitutive di qualunque materiale viscoelastico vengono formulate combinando opportunamente i modelli elementari principali, come la molla elastica di Hooke, il blocco ad attrito plastico di Saint-Venant, e lo smorzatore viscoso di Newton (Figura 4.9). Tali modelli sono caratterizzati da parametri meccanici propri, che descrivono in termini quantitativi la relazione tra tensioni, deformazioni e tempo, e che devono essere determinati sperimentalmente.

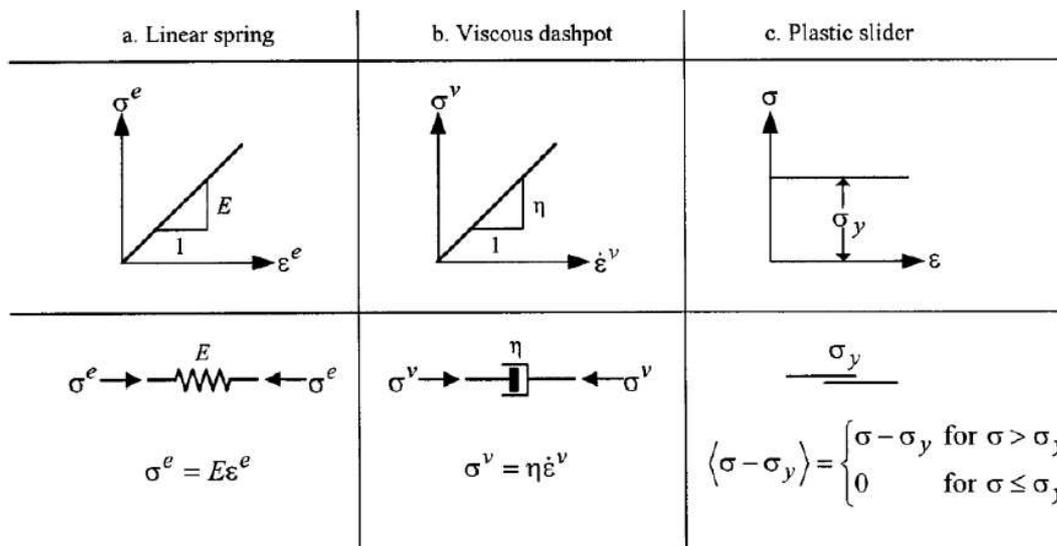


FIGURA 4.9: Rappresentazione schematica dei modelli reologici elementari : (a) molla elastica di Hooke, (b) smorzatore viscoso di Newton e (c) morsetto ad attrito di Saint Venant

I tre modelli più semplici che possono essere assunti singolarmente o in combinazione tra loro, per schematizzare il comportamento meccanico del terreno.

Il modello viscoplastico a tre parametri di Bingham è costituito da uno smorzatore lineare con coefficiente di viscosità  $\eta$  e da un morsetto ad attrito con limite di tensione in parallelo, collegati in serie ad una molla lineare con costante di elasticità  $E$ , come mostrato in Figura 4.10.

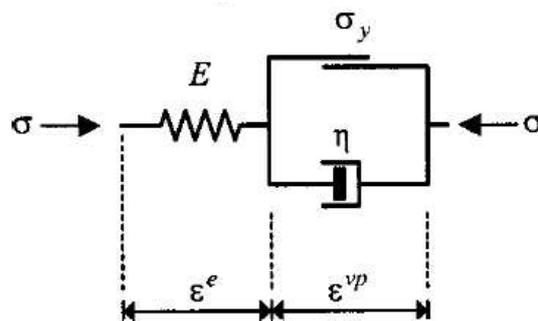


FIGURA 4.9: Modello reologico di Bingham

L'unità costituita dallo smorzatore e dal blocco ad attrito combinati in parallelo rappresenta l'elemento viscoplastico, dipendente dal tempo, mentre la molla lineare rappresenta l'elemento indipendente dal tempo. Il modello manifesta una risposta puramente elastica al di sotto del limite di snervamento perchè il blocco ad attrito, e con esso l'elemento viscoplastico, sono inattivi finché  $\sigma < \sigma_y$ . Dopo aver superato  $\sigma_y$ , il modello mostra un flusso viscoso di Maxwell. Pertanto, è solo la differenza  $\sigma - \sigma_y$  che dà luogo alle deformazioni viscoplastiche.

I modelli reologici sono utili dal punto di vista concettuale per distinguere le componenti elastica e plastica della deformazione, e per visualizzare il flusso viscoso che accompagna le variazioni nel tempo della struttura fino ad uno stato più stabile.

Le relazioni matematiche possono essere sviluppate in modo semplice per la descrizione del creep, del rilassamento tensionale e della risposta a velocità di deformazione costante. Pertanto, i modelli reologici non rappresentano i cambiamenti strutturali a cui è sottoposto il materiale nel processo di deformazione, ma forniscono soltanto una descrizione formale del suo comportamento fenomenologico. Tuttavia permettono di rappresentare la relazione costitutiva in una forma grafica, e possono essere trasformati semplicemente cambiando la posizione dei vari elementi nello schema complessivo.

## **4.2 Modelli misti per la ricerca della correlazione tra i valori monitorati e il comportamento evolutivo di un evento franoso**

Verranno ora esposti una serie di recenti modelli misti redatti da vari autori con lo scopo di ricercare la correlazione tra precipitazioni e movimento franoso analizzando il comportamento reologico del terreno. Tale comportamento è fortemente influenzato, come è stato spiegato, dalla viscosità del terreno, proprietà che varia in base alla quota di falda, legata essa stessa alle precipitazioni meteorologiche. Risulterà quindi ovvio ricercare prima di tutto la legge che collega la variazione di viscosità del terreno nella zona di rottura del pendio con la quota di falda e quindi con le pressioni interstiziali. Gli articoli presi in esame sono i seguenti:

- Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides (*van Asch et al., 2007*);
- Plastic and viscous shear displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation (*di Maio et al., 2013*);
- Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain) (*Corominas et al., 2005*);
- Geotechnical characterization of slope movements (*Leroueil e Locat, 1996*);
- A visco-plastic model for slope analysis applied to a mudslide in Cortina d'Ampezzo, Italy (*Angeli et al., 1996*).

#### 4.2.1 Analisi delle deformazioni a taglio plastiche e viscose

L'articolo di Di Maio et al. riguarda parte dal monitoraggio di spostamenti profondi e superficiali che sono stati misurati a partire dal 2005 nella frana di Costa della Gaveta. E' questa una frana di tipo lento, attiva, verificatasi nelle argille varicolori su un pendio caratterizzato da pendenze modeste negli Appennini meridionali italiani.

E' una frana molto profonda (fino a un massimo di circa 40 m) ed estremamente lenta, con velocità di scorrimento nell'ordine di 1 cm/anno nella parte centrale del canale.

Dal 2005 è monitorata con piezometri, inclinometri e stazioni GPS. Nel 2012 sono stati realizzati tre nuovi fori a carotaggio continuo, nei quali sono stati installati tubi inclinometrici (Figura 4.10a). I profili inclinometrici alla frana sono risultati sostanzialmente uniformi (Figura 4.10b), con velocità di spostamento che diminuisce significativamente procedendo da monte verso valle.

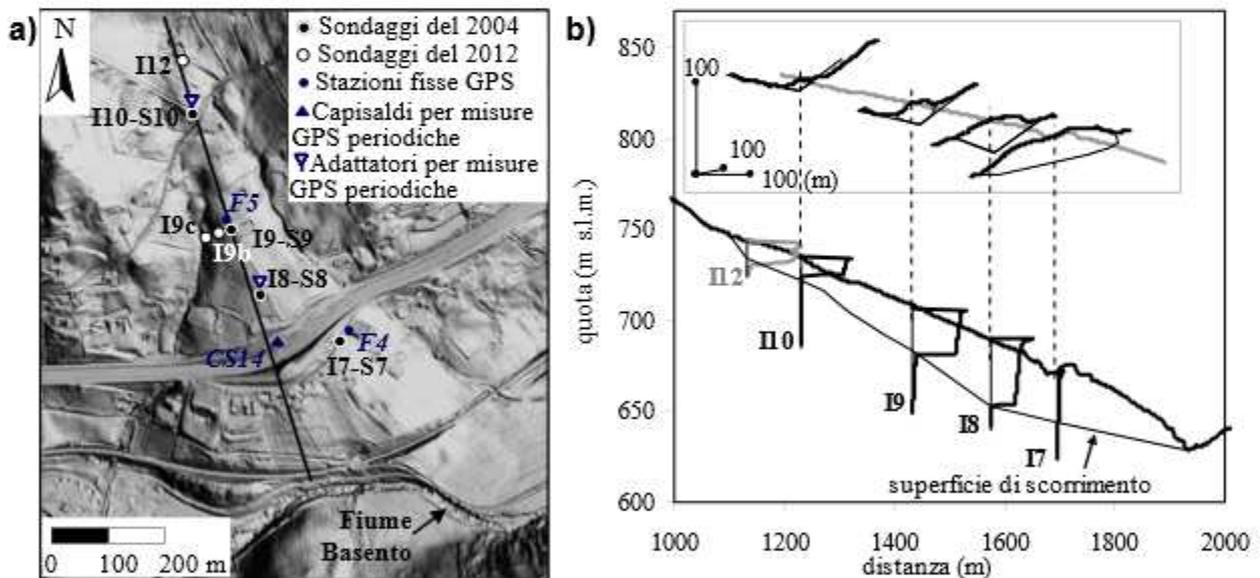


FIGURA 4.10 : (a) DTM della frana di Costa della Gaveta con ubicazione delle postazioni strumentate; (b) sezione longitudinale con i profili inclinometrici e alcune sezioni trasversali

In questo lavoro, i profili inclinometrici e i dati di spostamenti ottenuti col monitoraggio in sito vengono analizzati nel corso del tempo. I nuovi dati confermano le ipotesi dei lavori precedenti sulla geometria e sul cinematismo innescato del movimento franoso e aggiungono ulteriori informazioni sulla componente viscosa degli spostamenti.

Il meccanismo di movimento, nella maggior parte del pendio franoso, corrisponde sostanzialmente ad uno scorrimento localizzato su una superficie di taglio, coerentemente con le tensioni e le distribuzioni di forze.

Tuttavia, localmente, si verificano deformazioni viscoso interne, specialmente durante gli eventi piovosi e nelle zone della frana caratterizzate da un terreno più morbido, tali deformazioni viscoso che contribuiscono alla continuità del movimento della frana.

Gli spostamenti viscoso possono essere interpretati da un modello reologico semplificato basato sull'equazione di Bingham. La resistenza al taglio residua è stata considerata il valore di soglia di scorrimento del pendio e la viscosità dinamica è stata considerata dipendente dal livello di tensione, sulla base di prove di taglio diretto a lungo termine sotto sollecitazioni di taglio controllate, che sono state effettuate in laboratorio.

Un monitoraggio a lungo termine, è sempre necessario per una soddisfacente valutazione del cinematiso di una frana. La comprensione del meccanismo di movimento e degli effetti che sono influenzati dai vari fattori richiede una valutazione accurata del comportamento temporale dello spostamento della frana. Una frequenza relativamente elevata di monitoraggio di dati è quindi necessario. Un monitoraggio a lungo termine, con frequenti registrazioni di dati potrebbe consentire di distinguere i movimenti causati da variazioni di tensioni efficaci da quelli di tipo viscoso.

Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare gli spostamenti di un terreno argilloso caratterizzante il pendio franoso e di ricostruire il suo campo di spostamento valutando il ruolo del comportamento a creep sui suoi movimenti.

L'analisi e il confronto dei dati nuovi e precedenti rivelano ulteriori caratteristiche interessanti della frana. I risultati dei dati raccolti mediante inclinometro più le misure effettuate periodicamente mediante sonda manuale in sito permettono di ipotizzare il comportamento della velocità di spostamento del corpo di frana. Come tipicamente accade nei fenomeni franosi di tipo argilloso si evidenzia una superficie di taglio profonda e localizzata.

Per valutare se le tensioni interne possono essere interpretate come deformazioni di taglio viscoso di tipo secondario, è stato utilizzato un modello semplificato reologico del tipo di Bingham, a seguito di una procedura proposta da Van Asch e Van Genuchten.

#### 4.2.1.1 Il modello viscoso di Van Asch e Van Genuchten

Diversi modelli di flusso sono stati proposti per descrivere il comportamento delle frane che si muovono lentamente. Di frequente vengono utilizzati i modelli di flusso basati sulla legge di Bingham, come il seguente:

$$\frac{dv}{dz} = \frac{1}{\eta} (\tau - \tau_0) \quad (4.3)$$

$$\tau_0 = (\sigma - u) \tan \phi'_r \quad (4.4)$$

Dove  $v$  è la velocità [m/s],  $z$  è la profondità,  $\eta$  è la viscosità dinamica [kPa s],  $\tau$  è lo sforzo di taglio [kPa] e  $\sigma$  è lo sforzo normale totale [kPa]. La pressione interstiziale dei pori è  $u$  [kPa] e  $\phi_r$  angolo di taglio residuo del materiale. Per un corretto calcolo del profilo di velocità, la prima equazione deve essere integrata sulla profondità  $z$ , il cui risultato dà un profilo di velocità non lineare. Tuttavia, per le superfici di taglio sottile (< 5 cm) si può assumere un profilo della velocità lineare dritto profilo e quindi una relazione lineare tra la velocità e la profondità  $z$ . Si ricava così, scrivere la velocità di una frana che si muove su una superficie di taglio:

$$v = \frac{h_m}{\eta} (\tau - \tau_0) \quad (4.5)$$

Dove  $h_m$  è lo spessore della superficie di slittamento [m].

Nel caso di ampi intervalli di tensioni ( $\tau - \tau_0$ ) molti autori trovarono una non linearità della velocità  $v$  con lo sforzo di taglio  $\tau$  ottenuta da diverse prove di laboratorio. Essa può essere espressa come segue:

$$v = \frac{h_m}{\eta_0} (\tau - \tau_0)^b \quad (4.6)$$

L'esponente  $b$  può essere interpretato come una variazione di viscosità data dalla variazione di sforzo di taglio mentre  $\eta_0$  può essere considerata come la viscosità intrinseca di il materiale.

In accordo con Vulliet e Hutter (1988), la forma finale dell'equazione ottenuta in tale modello, sembra descrivere la velocità di spostamento della frana meglio di altre leggi più empiriche.

#### 4.2.1.2 Resistenza al taglio e comportamento di creep

Per determinare la resistenza al taglio di picco del materiale di frana, Di Maio et al. (2010) hanno svolto prove triassiali sui pochi campioni indisturbati estratti in sito. I risultati sono riassunti nella Figura 4.11.

I risultati, riportati in termini di stress deviatorico  $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$  confrontati con le tensioni efficaci  $p' = (\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3) / 3$ , mostrano che i punti sperimentali che mostrano la rottura sono ben disposti su una linea retta. La resistenza residua è stata valutata mediante prove di taglio diretto sia sul indisturbato e il materiale ricostituito.

La Figura 4.11b mostra i risultati precedenti e recenti, la linea equivalente alla forza residua confrontata con la linea interpolatrice della forza di picco risultante dalle prove triassiali. La differenza notevole tra il picco e la resistenza residua suggerisce l'esistenza di eventuale comportamento a creep dei terreni.

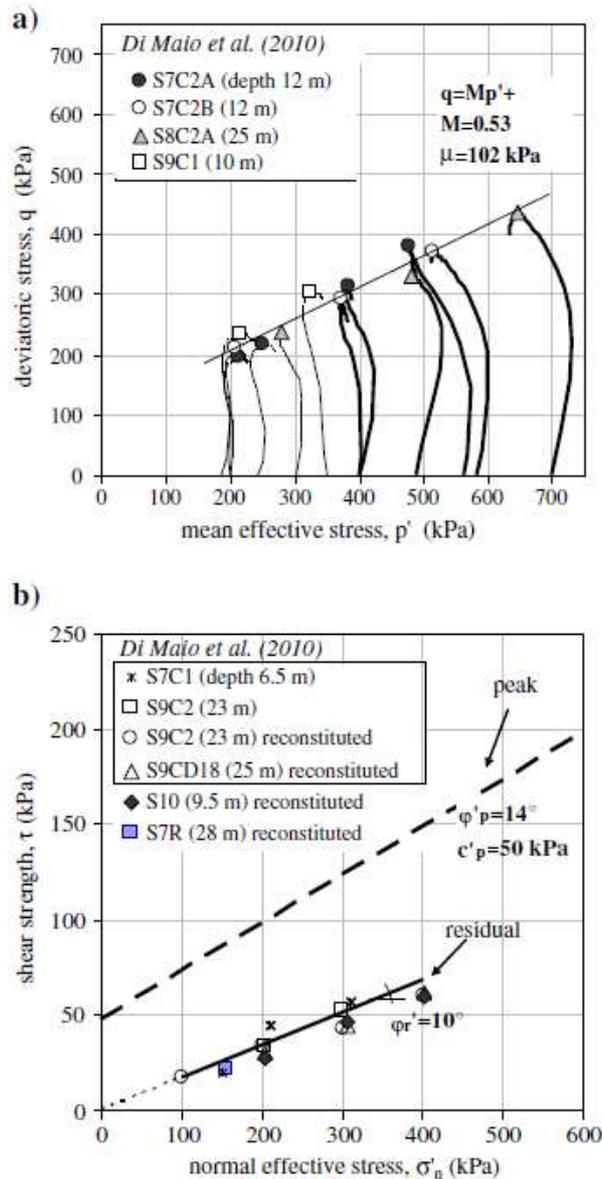


FIGURA 4.11 : (a) Risultati delle prove triassiali CIU, percorsi di sollecitazione efficaci e resistenza al taglio di picco campioni indisturbati; (b) resistenza al taglio residua efficace contro lo stress normale da prove di taglio diretto e confronto con la retta di interpolazione dei picco valori.

Il provino S7R1 (preparato con il materiale estratto a 29 m dal foro S7 e ricostituito con acqua distillata) è stato sottoposto a fasi di taglio diretto “standard” fino al residuo, pari a circa 21 kPa per lo sforzo normale applicato, e successivamente a prova di creep. Per  $\tau = 20 \text{ kPa}$  ( $\tau < \tau_r$ ) la velocità di scorrimento ha raggiunto valori nulli dopo circa 40 giorni ed è rimasta nulla per altri 25 giorni. Quindi la tensione di taglio è stata incrementata fino a  $\tau = 22 \text{ kPa}$  ( $\tau \approx \tau_r$ ). Ciò ha causato un breve creep primario, seguito da creep secondario con una velocità media di  $0,1 \mu\text{m/giorno}$  per 34 giorni, seguito da un rapido creep terziario e quindi dalla rottura. Una volta ristabilita la tensione tangenziale  $\tau = 20 \text{ kPa}$  si è osservato nuovamente solo creep primario: la velocità di spostamento è diventata nulla in pochi giorni ed è rimasta tale per circa 50 giorni.

Allo scopo di spiegare tale comportamento, sullo stesso provino sono state condotte nuove fasi di taglio a velocità di deformazione controllata. In due cicli consecutivi il provino ha esibito un picco di resistenza di circa 25 kPa e dopo circa 5 mm di scorrimento ha raggiunto il valore residuo. L'ipotesi che un picco di resistenza fosse disponibile anche durante le prove di creep all'applicazione di  $\tau \approx \tau_r$  può spiegare perché la rottura sia stata raggiunta solo dopo un numero così elevato di giorni. Tale picco potrebbe essere attribuito a un fenomeno di recupero di resistenza che si verifica in fasi di stasi o anche di deformazione molto lenta.

Si riportano i risultati e il comportamento a creep derivanti dalle prove di laboratorio eseguite.

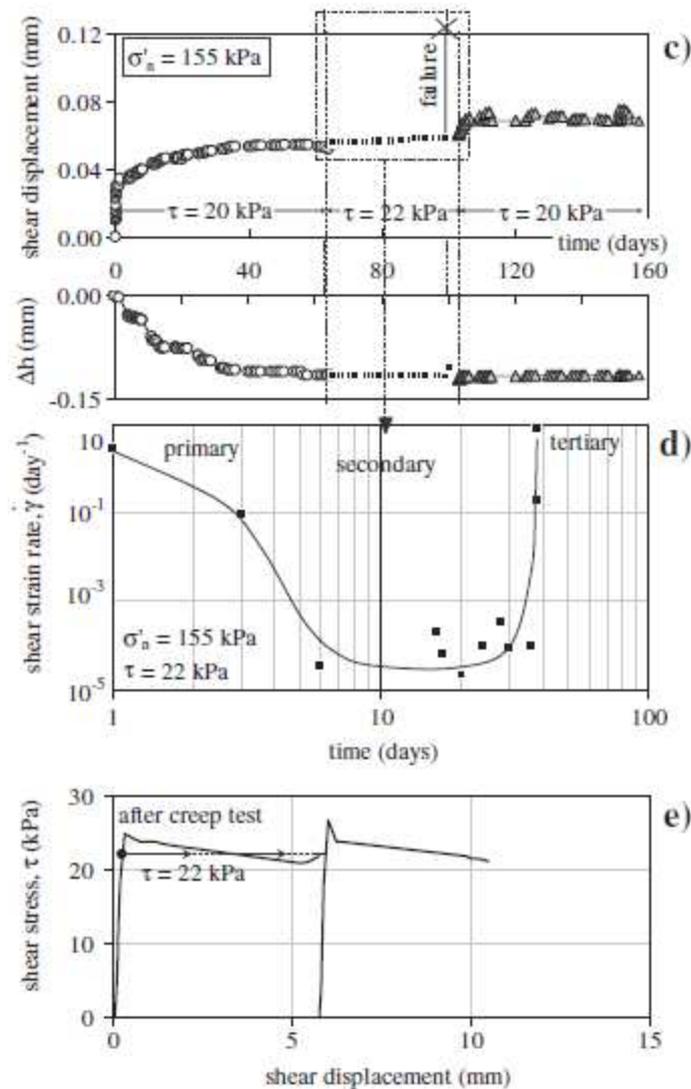


FIGURA 4.12 : (c) spostamenti di taglio con comportamento a creep e spostamenti verticali in funzione del tempo; (d) velocità di deformazione a taglio sotto  $\tau = 22$  kPa contro il tempo; (e) deformazioni della prova di taglio dopo la rottura in condizioni di creep terziario.

Il fenomeno è attualmente oggetto di studio sperimentale per i terreni di Costa della Gaveta. Sembra comunque ragionevole ipotizzare che un provino che mostra un picco di questo tipo possa andare a rottura con  $\tau$  pari alla resistenza residua solo con il processo reologico schematizzato in

Figura 4.12c. Il provino S7R2 (preparato con lo stesso materiale di S7R1 e ricostituito anch'esso con acqua distillata) è stato sottoposto a prove di creep senza essere preventivamente portato al residuo. In Figura 4.13 sono mostrate le curve degli spostamenti viscosi a  $\sigma'_n = 57$  kPa per vari livelli di tensione tangenziale. Per  $\tau = 8,5$  kPa (valore prossimo al residuo nell'ipotesi che  $\phi'_r$  del provino S7R2 sia pari al valore determinato sul provino S7R1) c'è stato solo creep di tipo primario (la durata totale della prova è stata di 110 giorni). Per  $\tau = 15$  kPa ( $\tau > \tau_r$ ) si è verificato creep di tipo secondario, in corso dopo 340 giorni dall'inizio della prova. Dunque, da tutti i risultati ottenuti sul provino integro, con prove di lunga durata, non si è trovato un valore di soglia per il passaggio da creep primario a creep secondario maggiore della resistenza residua. Difatti, le velocità di scorrimento sono diventate nulle dopo alcuni giorni per  $\tau < \tau_r$ , mentre per  $\tau > \tau_r$  le prove, tuttora in corso, non hanno ancora evidenziato l'arresto degli scorrimenti (Di Maio et al., 2013). Quindi, in prima approssimazione, è stata assunta come soglia di creep proprio la resistenza residua  $\tau_r$ , in accordo con i risultati e le indicazioni di Yen (1969), Suhaydu e Prior (1978), e Iverson (1985).

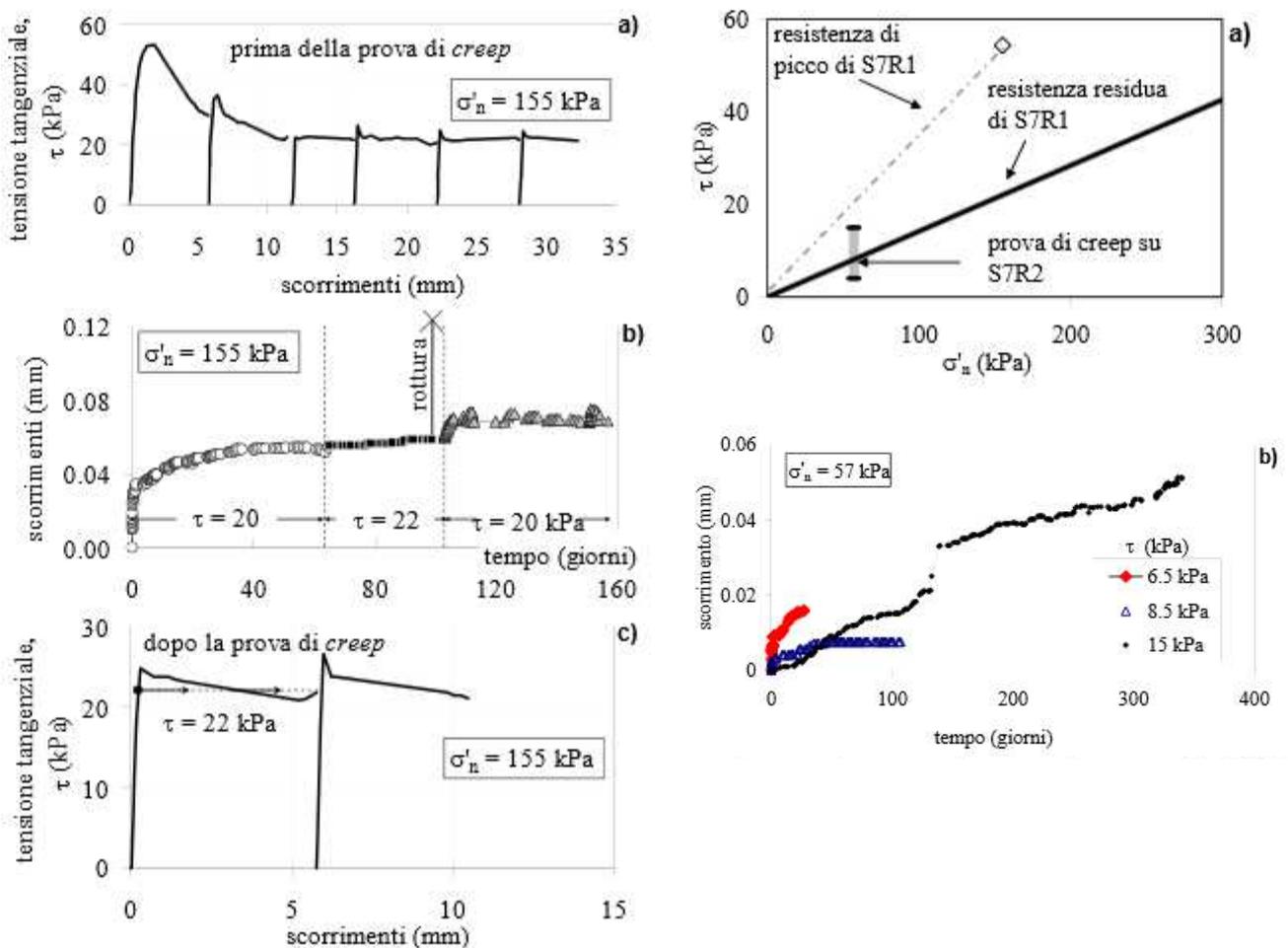


FIGURA 4.13 : Sulla sinistra provino S7R1: (a) cicli di taglio a deformazione controllata; (b) scorrimenti viscosi in funzione del tempo; (c) cicli di taglio a deformazione controllata successivi alla rottura per creep. A destra, provino S7R2: a) intervallo tensoriale delle prove di creep, confrontato con la resistenza di picco e residua di S7R1; b) scorrimenti viscosi in funzione del tempo per diverse tensioni tangenziali ( $\tau$  a tensioni normali efficaci  $\sigma'_n=57$  kPa).

Passando al confronto tra misure inclinometriche in situ e il profilo teorico della deformazione a creep si denota che sia nei test di laboratorio che nel corpo di frana, gli spostamenti dovuti al creep sono piccoli ma non per questo trascurabili quando si considerano in relazione ad intervalli di tempo lunghi. In accordo con la letteratura riguardanti le analisi teoriche e i risultati sperimentali, una intensa deformazione a creep può verificarsi per livelli di tensioni superiori alla resistenza residua. La distribuzione delle sollecitazioni, all'interno di un corpo di frana e della superficie di slittamento, furono state stimate da Vassallo et al. (2013) in condizioni 2D utilizzando diversi approcci, riferendosi ad un pendio infinito o alla sezione mediana longitudinale analizzata con un modello elastico. Recentemente, studi eseguiti mediante metodi agli elementi finiti 2D e 3D vengono eseguiti, sotto differenti condizioni di carico.

Risultati preliminari indicano che si instaurano tensioni tangenziali parallele alla superficie di slittamento molto vicine alla resistenza al taglio residua nella stessa direzione. Tuttavia, sforzi di taglio superiore alla resistenza residua sono stati calcolati in diverse direzioni. Come è noto sapere in ogni modellazione numerica, i risultati dei calcoli sono molto influenzati dall'ipotesi dei diversi parametri costitutivi, questo è il motivo per cui una campagna di indagini per le misure delle tensioni in sito è in prossimità di iniziare. In questo lavoro, in prima approssimazione, gli effetti in situ dovuti allo scorrimento viscoso vengono interpretati seguendo la procedura riportata da Van Asch e Van Genuchten (1990) precedentemente esposta.

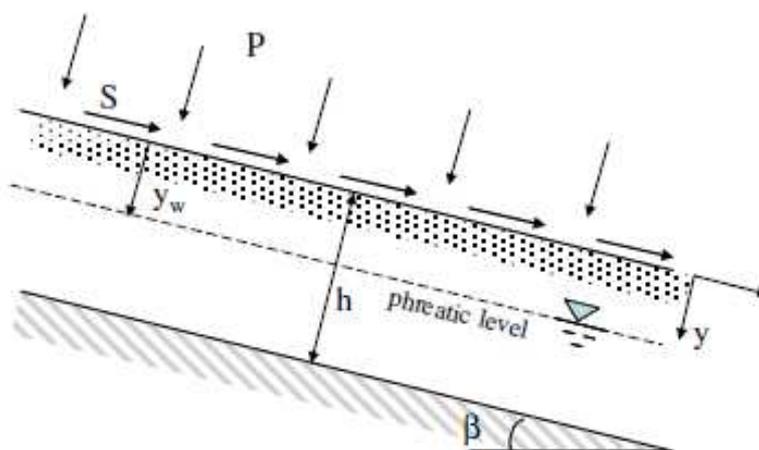


FIGURA 4.14 : Schematizzazione geometrica del modello di creep redatto da Van Asch e Van Genuchten

La velocità di deformazione viscosa e i profili di deformazione teorica dovuti al creep sono stati valutati negli inclinometri posti in situ e denominati I8, I9 e I10 sotto le ipotesi di:

- Superficie di scorrimento piana con una pendenza infinitamente lunga;
- Nessun cambiamento nella distribuzione delle sollecitazioni conseguenti al creep.

Il comportamento reologico del suolo è considerato come descritto dalla relazione di Van Asch esposta precedentemente. Ter Stepanian (1963) assunse che la viscosità dinamica  $\eta$  aumenta con tensioni efficaci secondo un rapporto che, per  $\tau_0 = \tau_r$ , diventa:

$$\eta = \frac{\sigma}{\lambda} \quad (4.7)$$

dove  $\sigma'$ =tensione efficace normale,  $\lambda$  = fattore di flusso.

Quindi, la velocità di spostamento di spostamento dovuta al comportamento viscoso può essere valutata come:

$$\frac{du}{dy} = \lambda(\tau - \tau_0) / \sigma \quad (4.8)$$

con  $y$  normale alla superficie del terreno.

L'approccio proposto da Van Asch e Van Genuchten (1990) fa riferimento allo schema riportato in Figura 4.14 e ad uno strato omogeneo del terreno. Così, essi integrarono l'equazione ottenuta sulla superficie di scivolamento in una forma chiusa. Diversamente, nel nostro caso, il terreno è stato considerato eterogeneo. Pertanto, la distribuzione delle velocità di spostamento è stato calcolato con una procedura alle differenze finite dividendo il corpo di frana in substrati da 1 m di spessore applicando l'equazione di Van Asch al centro di ogni substrato.

Le tensioni efficaci normali  $\sigma'$  e gli sforzi di taglio  $\tau$  sono stati calcolati in funzione della profondità. Tali sforzi sono stati calcolati su superfici parallele al terreno utilizzando le equazioni di equilibrio di un pendio infinito di inclinazione  $\beta$ .

Nella schematizzazione di calcolo originale, erano state considerate sollecitazioni di taglio e normali di sovraccarico,  $S$  e  $P$ . Nel calcolo sono stati assunti rispettivamente  $S = 0$  e  $P = 0$ . Il flusso di acque sotterranee è stato ipotizzato parallelo alla superficie del terreno e la falda freatica è stata assunta coincidente con il suolo. Nel corpo di frana, il peso unitario del terreno è stato considerato variabile con la profondità. La figura che segue mostra come un modello unico e semplice interpreta correttamente il comportamento di inclinometri verticali della sezione longitudinale della frana.

Considerando le variazioni con la profondità delle proprietà del suolo sono stati assunti tre valori del fattore di flusso  $\lambda$  lungo la verticale, con valori decrescenti dal suolo alla superficie di scivolamento. I valori sono quelli che permettono una buona interpretazione dei dati sperimentali.

$$\lambda = 6 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1} \text{ per } z \leq 2\text{m};$$

$$\lambda = 6 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \text{ per } 2 < z \leq 8\text{m};$$

$$\lambda = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \text{ per } z > 8\text{m}.$$

Lo spessore della zona di deformazione della frana è stato assunto pari a 9 m, 24 m e 35 m in I10, e I8 I9 rispettivamente; l'angolo di attrito residuo e l'inclinazione a terra sono stati assunti pari a  $\phi'_r = 10^\circ$  e  $\beta = 7^\circ$  rispettivamente. Gli spostamenti lungo la superficie di scorrimento, evidenziati dai dati inclinometrici monitorati sono superiori a quelli del corpo di frana. Facendo riferimento al modello di Bingham, questa potrebbe essere dovuto ad una viscosità molto inferiore di una fascia di zona taglio con un contenuto di acqua superiore.

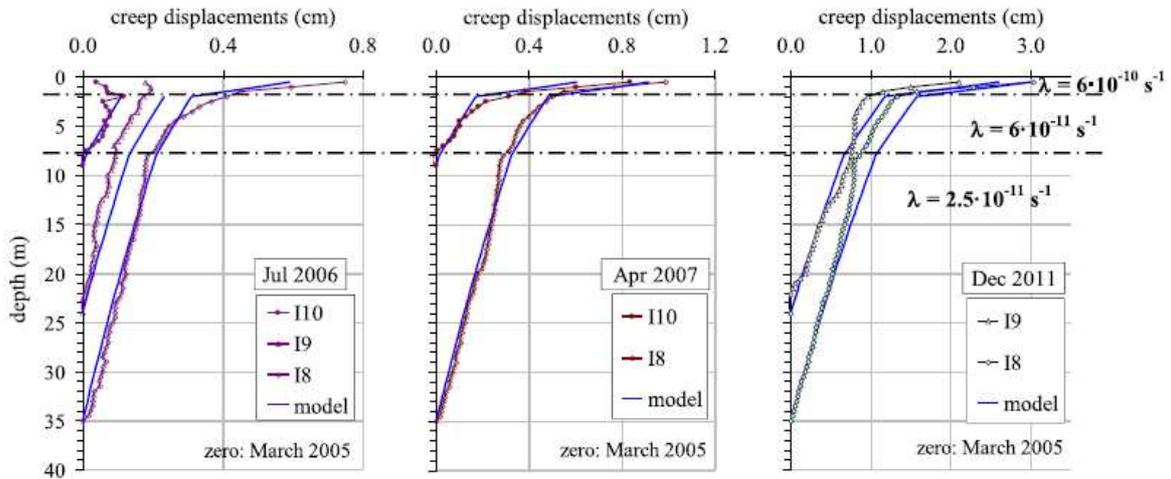


FIGURA 4.15 : Inclinometri I10,I9, I8, profili monitorati in situ comparati con i profili risultati dalla modellazione teorica

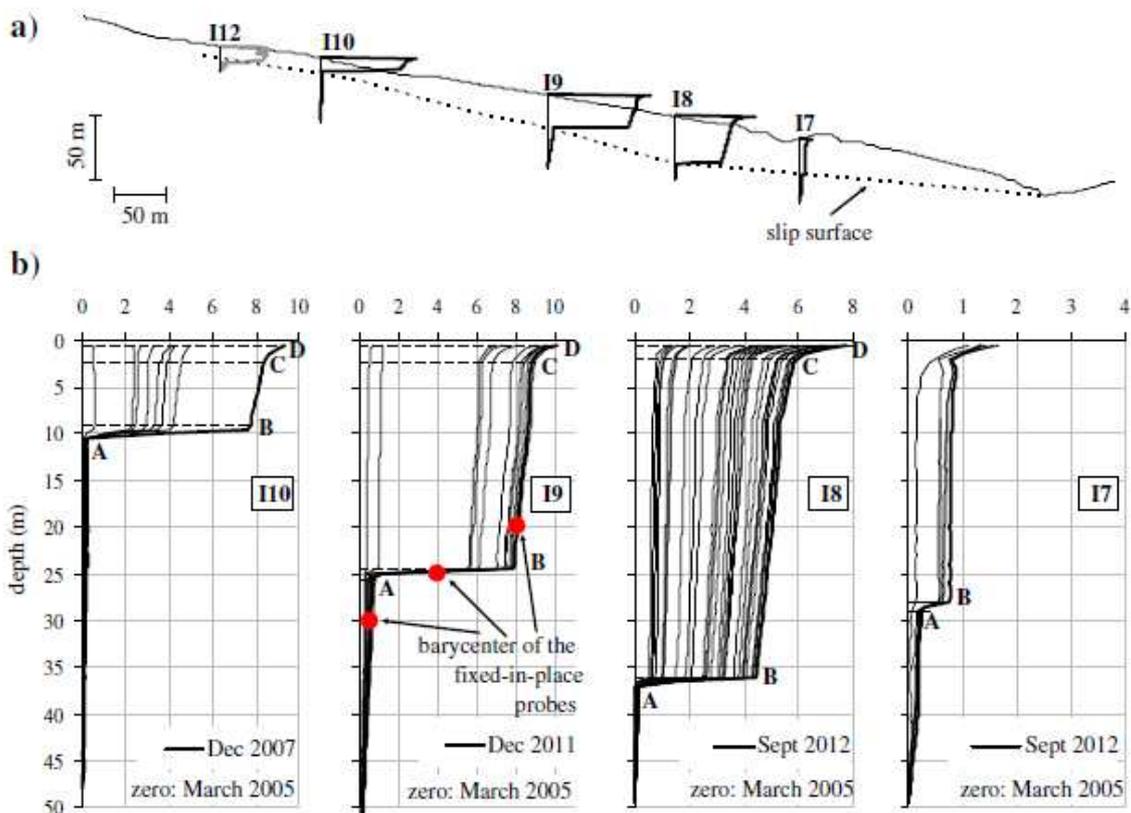


FIGURA 4.16 : Sezione longitudinale della frana con i profili inclinometrici

In prima approssimazione, il calcolo del fattore di flusso e della la viscosità per la zona degli spostamenti profondi dell'inclinometro I8, dove lo spessore del tubo deformato è stato valutato di 0,5 m, risultano essere appropriati in quest'ordine:  $\lambda=7,5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  e  $\eta=5.6 \cdot 10^{10} \text{ kPa}\cdot\text{s}$ .

Assumendo lo stesso valore dello spessore di 0,5 m, vengono valutati per I9 e I10 rispettivamente:  $\lambda=1.5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  ( $\eta=1.8 \cdot 10^{10} \text{ kPa}\cdot\text{s}$ ) e  $\lambda=1.9 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  ( $\eta=5.3 \cdot 10^9 \text{ kPa}\cdot\text{s}$ ). Corominas et al. (2005) hanno valutato  $\eta=1.5 \cdot 10^7 \text{ kPa}\cdot\text{s}$  dalla back-analysis per il modello della frana Vallcebre, considerando uno spessore della zona di taglio del 0,3 m.

Nel nostro caso, il reale spessore della fascia di taglio non è esattamente noto. Potrebbe essere anche molto più basso di 0,5 m come rileva la lunghezza del tubo deformato dell'inclinometro I8.

Seguendo inoltre le indicazioni di Corominas et al. (2005), sotto l'ipotesi che solo spostamenti dovuti al comportamento viscoso si verificano durante periodi di siccità, è possibile valutare una velocità media di scorrimento  $2 \cdot 10^{-3} \text{ cm / giorno}$  dall'inclinometro I9.

Tuttavia, l'ipotesi dello spessore della zona di taglio deve essere verificata attraverso una osservazione diretta, e questo è uno degli scopi principali del monitoraggio in situ in corso d'opera.

In conclusione, il presente articolo riporta che:

Gli spostamenti della frana di Costa della Gaveta sono legati prevalentemente a un meccanismo di scorrimento alla base con portata di terreno costante. Se l'analisi riguarda tempi molto lunghi, tuttavia, il contributo delle deformazioni viscosi interne non è più trascurabile. Inoltre, gli inclinometri installati di recente in prossimità del canale laterale di frana mostrano che tale zona è caratterizzata da deformazioni viscosi più marcate, probabilmente a causa del maggiore contenuto d'acqua del terreno e di una distribuzione tensionale differente da quella agente nella parte centrale della frana. Il comportamento reologico del terreno di Costa della Gaveta è stato studiato anche in laboratorio tramite prove di creep da taglio di notevole durata. Non è ancora emersa l'esistenza di una soglia di creep per tensioni tangenziali  $\tau$  maggiori della resistenza residua  $\tau_r$ . Infatti, si è osservato creep di tipo primario soltanto per  $\tau < \tau_r$  e creep di tipo secondario o eventualmente terziario per  $\tau > \tau_r$ . I risultati delle prove di laboratorio hanno anche dato utili indicazioni sul legame tra creep secondario e sforzi agenti, di cui si è tenuto conto per la modellazione dei profili di spostamento viscoso in situ.

Le deformazioni interne del corpo di frana sono ben interpretate dal modello proposto da Van Asch e Van Genuchten (1990), basato sul legame costitutivo del fluido di Bingham. Tale modello è in grado di descrivere i profili di spostamento viscoso e la loro evoluzione nel tempo per tre verticali del canale di frana, strumentate da lunga data, utilizzando gli stessi parametri di flusso.

#### 4.2.2 Modello visco-plastico per l'analisi delle frane applicato ad una colata di fango – Maceo-Giovanni Angeli

L'articolo redatto nel 1996 da *Angeli et al.* descrive un modello visco-plastico il quale, utilizzato a partire dal monitoraggio della variazione del livello di falda, vuole simulare la velocità di spostamento del movimento franoso di Alverà, Cortina d'Ampezzo - Italia. Inoltre il modello si occupa anche del fenomeno proprio della resistenza al taglio delle argille montmorillonite durante i periodi di stasi dei movimenti franosi. Il modello si ritiene valido per il comportamento a lungo termine di un pendio con caratteristiche di colate fangose in terreno argilloso.

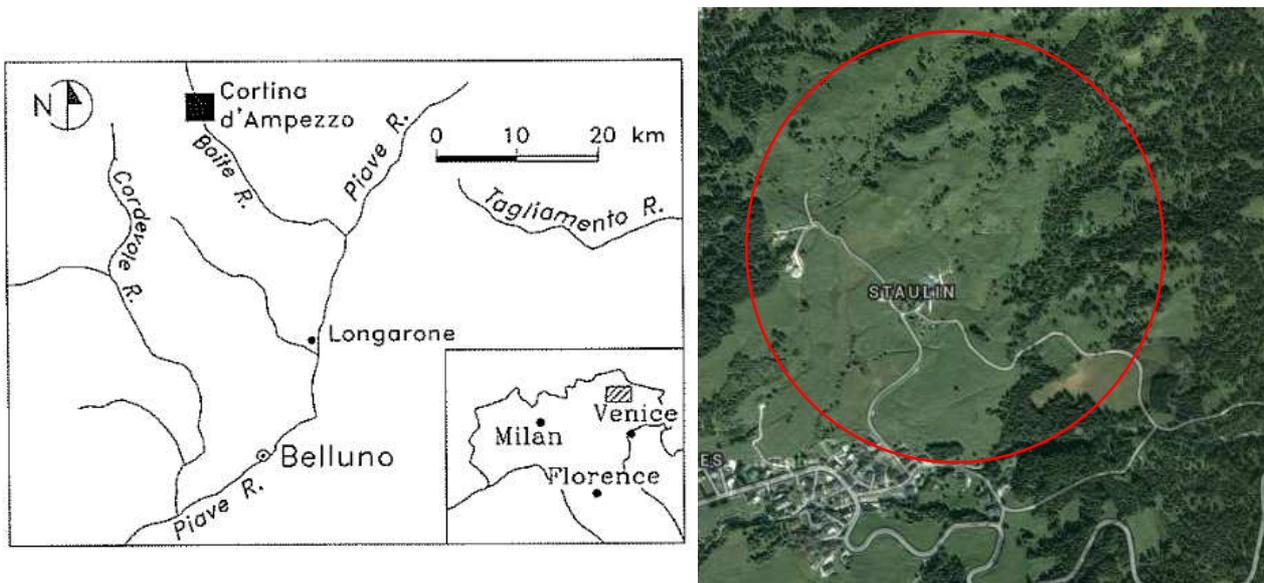


FIGURA 4.17 : Localizzazione della frana di Alverà – Cortina d'Ampezzo

Il tentativo di calcolare la velocità di spostamento di numerose frane in materiale argilloso su piani di slittamento a bassa inclinazione usando il classico modello di analisi di stabilità dell'equilibrio limite, rileva spostamenti e velocità in eccesso rispetto a quelle calcolate direttamente sul campo.

Nel metodo classico, la tensione del terreno è considerata come l'unica resistenza.

Il movimento franoso potrebbe iniziare quando l'equilibrio tra le forze di resistenza e di scivolamento è rotto dalla crescita della pressione delle acque interstiziali, dopo di che le resistenze di taglio diminuiscono e di conseguenza le forze di scivolamento prevalgono.

È possibile definire una differenza tra forze di resistenza e di scivolamento in questo modo: per una definita crescita di pressione interstiziale questa forza è costante, e dunque la frana soggetta ad un'accelerazione costante si dovrebbe muovere con un aumento di velocità indefinito.

Questo è il motivo per cui vengono calcolati valori molto elevati di velocità, immediatamente dopo l'inizio del movimento.

Ciò significa che l'analisi dell'equilibrio limite di stabilità dovrebbe essere applicato solo per determinare i fattori di sicurezza di un pendio nella fase immediatamente precedente il movimento ( $F=1$ ), mentre nella fase successiva si dovrebbero utilizzare altri tipi di analisi.

L'ultima (seconda) fase può essere analizzata con un modello visco-plastico, in grado di tener conto una ulteriore componente delle forze di resistenza che, come comunemente osservato sul campo, permette alla velocità di raggiungere un valore costante subito dopo l'inizio del movimento. In pratica, entra in gioco una nuova forza (la differenza tra forze di resistenza e scivolamento e la resistenza di taglio) e, non appena inizia il movimento, l'aumento della velocità è accompagnato dall'aumento delle forze di resistenza.

Dal momento che la viscosità è proporzionale alla velocità, la forza netta disponibile tende ad azzerarsi e la velocità diventa costante.

Da un punto di vista teorico, questo modello di andamento dinamico è equiparabile al modello di Bingham. Esso fornisce una spiegazione completa della relazione tra la variazione di pressione interstiziale sulla superficie della frana e la sua velocità.

Da un punto di vista numerico, il modello è stato sviluppato considerando un piano di slittamento infinito (Skempton & De Lory, 1957).

La sua validità è stata verificata grazie a quattro anni di monitoraggio della variazione del livello di falda e della velocità di spostamento.

La frana è costituita da una formazione argillosa con una alternanza di letti rocciosi; lunga circa 1 km con una superficie di slittamento sviluppata ad una profondità di circa 5 m dal piano campagna.

Osservando i dati ottenuti dal monitoraggio del livello di falda si ricava che essa scorre parallela alla superficie di slittamento assunta.

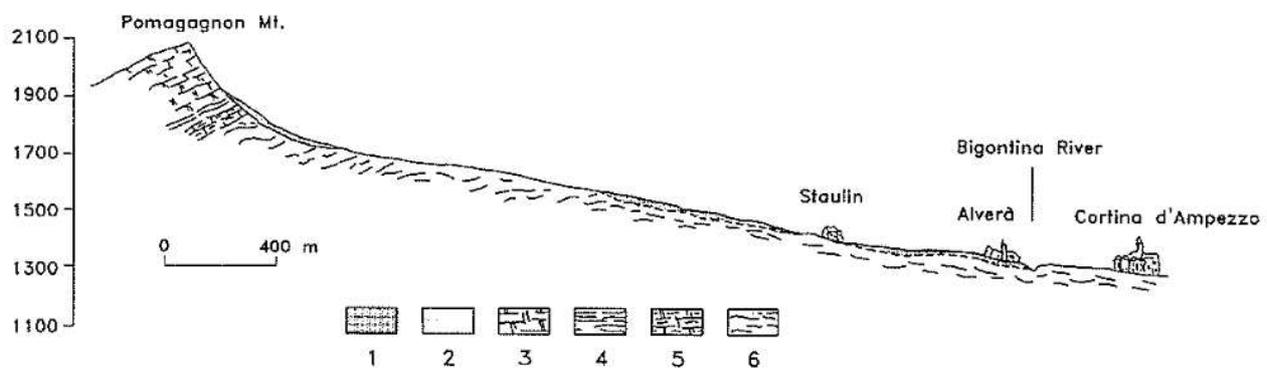


FIGURA 4.18 : Sezione geologica della frana di Alverà: 1) corpo di frana, 2) depositi di ghiaia di origine quaternaria, 3) dolomia principale, 4) sequenza alternata di siltstones e limestones, 5) Dolomite di San Cassiano, 6) Argilla sovraconsolidata

Viene ora illustrato il modello reologico visco-plastico utilizzato dagli autori.

Si è tentato di calcolare la velocità che la massa della frana può raggiungere, una volta influenzata da note variazioni piezometriche. Il bilancio tra forze di resistenza e di scivolamento lungo la superficie pendio argilloso considerato infinito, che ha subito molti moti antecedenti, e senza prendere in considerazione nessun altro parametro di resistenza eccetto l'angolo di attrito interno, ha fornito il punto di partenza.

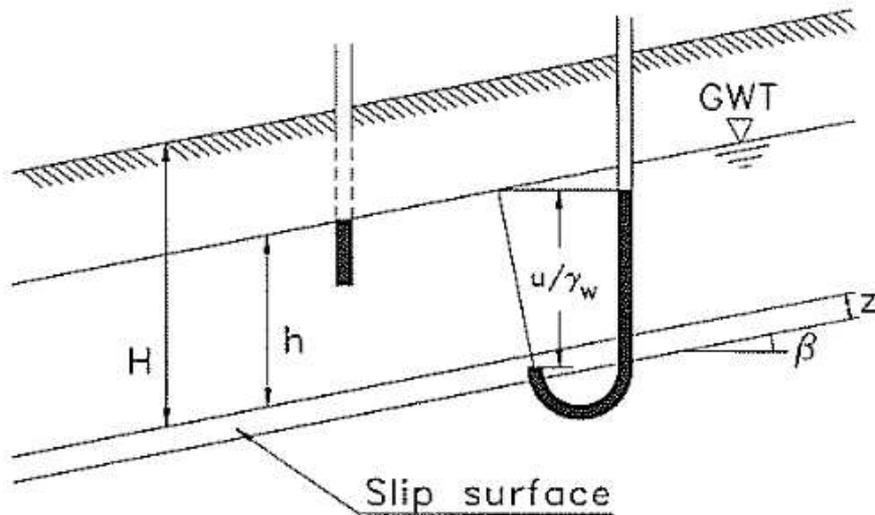


FIGURA 4.19 : Schematizzazione di pendio infinito con un starto di deformazione a comportamento viscoso (z)

Le analisi nelle condizioni di equilibrio critico, in termini di forze sono date da:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \quad (4.9)$$

Dove:

$$\sigma = \gamma H \cos^2 \beta = \text{sforzo normale totale}$$

$$u = \gamma_w h \cos^2 \beta = \text{pressione interstiziale}$$

$$c' = 0 \text{ coesione}$$

Per l'equilibrio si richiede  $\tau = \tau_f$

Non appena la pressione interstiziale supera il valore soglia collegato con l'equilibrio critico, così che la forza di taglio decresce lungo la superficie, l'equazione diventa:

$$\gamma H \sin \beta \cos \beta > (\gamma H - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \phi' \quad (4.10)$$

La differenza tra le forze di spostamento e di resistenza fanno nascere una accelerazione della massa franante facilmente ricavabile dalla  $a = dv/dt$  e  $\sum F = ma$ .

Comunque, questi risultati sembrano essere molto maggiori rispetto a quelli monitorati. Dunque, per avvicinarsi a valori di velocità calcolati più realistici, sono stati attentamente studiati alcuni approcci sperimentali che tenevano conto delle componenti di viscosità.

Questi studi presuppongono che le forze di resistenza viscosa controllino i processi di accelerazione o decelerazione delle masse in movimento. Descrivono inoltre alcune relazioni sperimentali tra velocità, viscosità ed altri parametri, ottenuti con la prova di taglio anulare o con il viscometro. Si è inoltre tentato di descrivere il comportamento di questo suolo argilloso con il modello di Bingham. Si può visualizzare come un da uno smorzatore lineare con coefficiente di viscosità  $\eta$  e da un morsetto ad attrito con limite di tensione in parallelo (un peso e un ammortizzatore dash-pot) uniti in parallelo Figura 4.20.

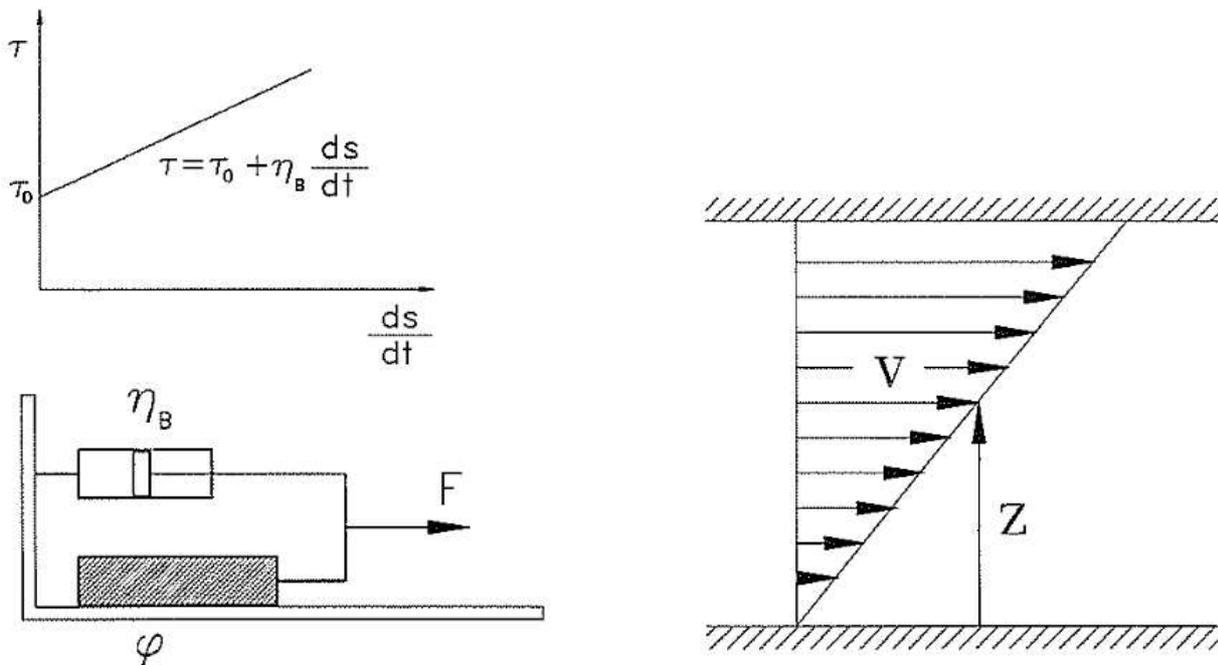


FIGURA 4.20 : Schematizzazione del modello di Bingham e sulla destra flusso di un fluido indotto dal movimento relativo tra due piani paralleli.

Una volta che la resistenza di attrito viscoso del peso è superata, inizia il movimento relativo con una velocità controllata dalla resistenza viscosa, dove  $\eta_B$  esprime le caratteristiche viscosive dell'olio nell'ammortizzatore. In analogia con il meccanismo dei fluidi, le resistenze di viscosità del terreno si possono esprimere in termini di forze come:  $\eta dv/dz$ .

Così le resistenze totali del materiale argilloso sono espresse da  $\tau_f + \eta dv/dz$ .

Il termine  $\eta dv/dz$  entra in gioco quando le forze di taglio, all'interno di un terreno di spessore  $z$ , superano la forza di taglio prodotta  $\tau_f$  e ipotetiche teoriche lamine di terreno iniziano a muoversi a differenti velocità scorrendo l'una sull'altra in parallelo alle forze di taglio applicate.

A questo punto si sviluppa tra le lamine adiacenti una forza di resistenza direttamente proporzionale al gradiente di velocità e inversamente proporzionale a  $z$ . Il fattore di proporzionalità  $\eta$ , chiamato coefficiente di viscosità, mostra una grande variabilità a seconda della natura dei materiali. Supponendo un andamento lineare per il profilo di velocità lungo l'asse  $z$ , come avviene nei fluidi Newtoniani, la formula  $dv/dz$  può essere sostituita da  $v/z$ , dove  $z$  corrisponde ad un ben definito spessore della zona di deformazione lungo la superficie e  $v$  eguaglia la velocità di scivolamento della massa.

La differenza tra forze di resistenza e di scivolamento in termini di tensioni ora diventa:

$$\tau - \left( \tau_f + \frac{\eta v}{z} \right) = \frac{ma}{A} = \frac{m}{A} \frac{dv}{dt} \quad (4.11)$$

dove l'accelerazione è una funzione della velocità.

Un processo di integrazione produce la seguente espressione per la velocità:

$$v = \frac{[X - \exp(\ln a - Yt)]}{Y} \quad (4.12)$$

dove:

$$X = \frac{(\tau - \sigma' \tan \phi') A}{m} \quad (4.13) \quad \text{e} \quad Y = \frac{A \eta}{mz} \quad (4.14)$$

Per poter applicare tale formula della velocità alla pendenza selezionata, è richiesta una precisa conoscenza della geometria, delle caratteristiche del materiale, della forza di taglio dell'argilla, delle forze agenti ed infine dei parametri coinvolti nella resistenza viscosa. Per la difficoltà di determinare separatamente i valori di  $\eta$  e  $z$  con altri test di laboratorio o in situ (ogni minima variazione di questi influenza fortemente i valori calcolati di velocità), sono stati considerati come  $\eta_d = \eta/z$ , detto coefficiente di viscosità dinamica.

Conseguentemente, il contributo alla resistenza si può esprimere come  $\tau = \eta_d v$  che è analogo all'espressione di Bingham per la resistenza viscosa  $\tau = \eta_B v$ .

Un primo valore prova per  $\eta_d$  di  $4,5 \times 10^{11} \text{ N s m}^{-3}$  è stato ottenuto in laboratorio da test di taglio diretti eseguiti su un provino di terreno a grana sottile.

I sistemi informatici, programmati per il calcolo della velocità, hanno progressivamente aggiustato questo valore finché i valori di velocità calcolata non aderivano a quelli registrati. Il valore finale adottato era  $\eta_d$  di  $7,8 \times 10^7 \text{ N s m}^{-3}$ .

Il motivo per cui questo valore è minore di quello di laboratorio è presumibilmente da attribuire alla presenza nel terreno di alcuni ammassi di materiale non viscoso e/o a grana grossa.

Per ottenere risultati numerici migliori dai modelli, i programmi informatici hanno inoltre considerato la presenza di due diversi valori soglia per la pressione interstiziale.

Questi sono stati individuati alla fine di 4 anni di analisi dei dati di spostamento e della pressione interstiziale.

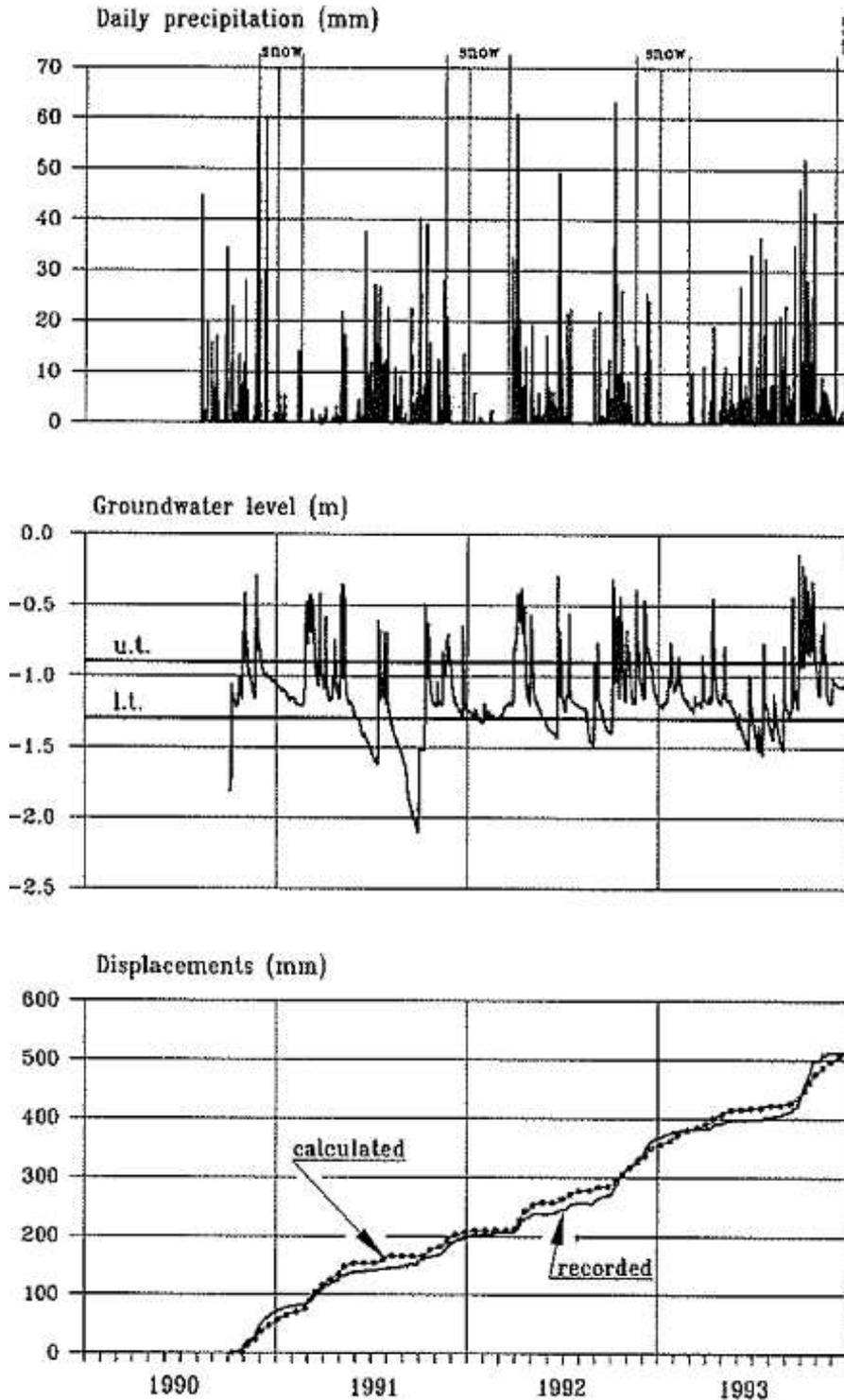


FIGURA 4.21 : Precipitazioni, profondità di falda monitorata e spostamento calcolato nella frana di Alverà

La soglia più bassa corrisponde alla completa cessazione dei moti della frana, mentre la più alta sembra correlata con la riattivazione del movimento. Sulla base del principio delle tensioni efficaci l'intervallo di circa 40 cm tra le due soglie corrisponde ad una modifica della resistenza di taglio di circa 1 kPa. Dunque, è possibile supporre che il raggiungimento della soglia più alta di pressione interstiziale determina una fase di riattivazione della frana, che provoca una diminuzione delle forze di taglio di circa 1 kPa, mentre il raggiungimento della soglia più bassa porta ad una fase di arresto della frana, a cui consegue un incremento delle forze di taglio di circa 1 kPa.

Questa situazione è evidenziata nella Figura 4.22, il limite superiore della variazione delle forze di taglio corrisponde al periodo di stasi, mentre il limite inferiore corrisponde al periodo di attività della frana.

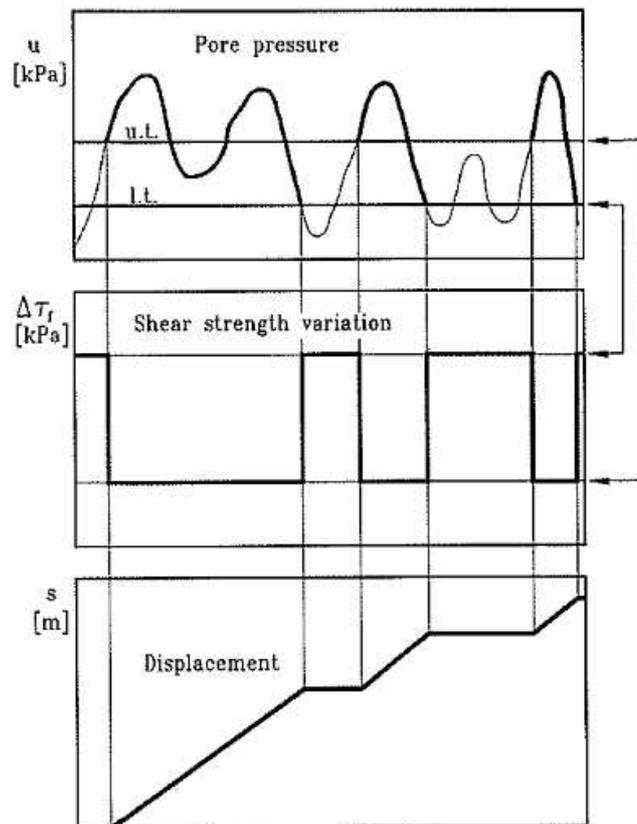


FIGURA 4.22 : Schema semplificato delle relazioni tra pressione interstiziale, sforzi di taglio, e spostamenti.

Queste due soglie sono inversamente correlate alle soglie superiori ed inferiori della curva della pressione interstiziale. Il modello tiene inoltre in considerazione il momento in cui la curva della pressione interstiziale penetra nell'area al di sotto della linea u.-t.

Secondo il principio delle tensioni efficaci, l'accrescimento della pressione interstiziale in questa area, tende a ridurre le forze di taglio, incrementando così la forza netta disponibile per il movimento o, in altri termini, aumentando la velocità.

Dall'altro lato, il modello non considera la crescita della resistenza di taglio quando la pressione scende al di sotto della linea l-t, perché questo rappresenta un campo indefinitamente stabile. Questo andamento può essere correlato alla forza recuperata nella argilla montmorillonitica durante il periodo in cui la frana è stazionaria.

Test di taglio diretti su materiale passante al 40 (0,42mm) per tensioni normali uguali ai valori in situ, conferma l'esistenza di una significativa forza recuperata anche dopo un breve periodo di pausa. I valori di forza recuperata ottenuti nelle prove di taglio erano apparentemente lievemente superiori di quelli osservati sul campo.

Usando i valori di pressione interstiziale registrati durante i 4 anni di studio, e prendendo in considerazione la forza guadagnata considerando nei programmi informatici due distinti valori soglia di pressione interstiziale, è possibile calcolare i valori di velocità. Questi erano infine convertiti in spostamenti e paragonati ai valori registrati.

La Figura 4.23 mostra la buona concordanza tra i valori di spostamento calcolati e registrati.

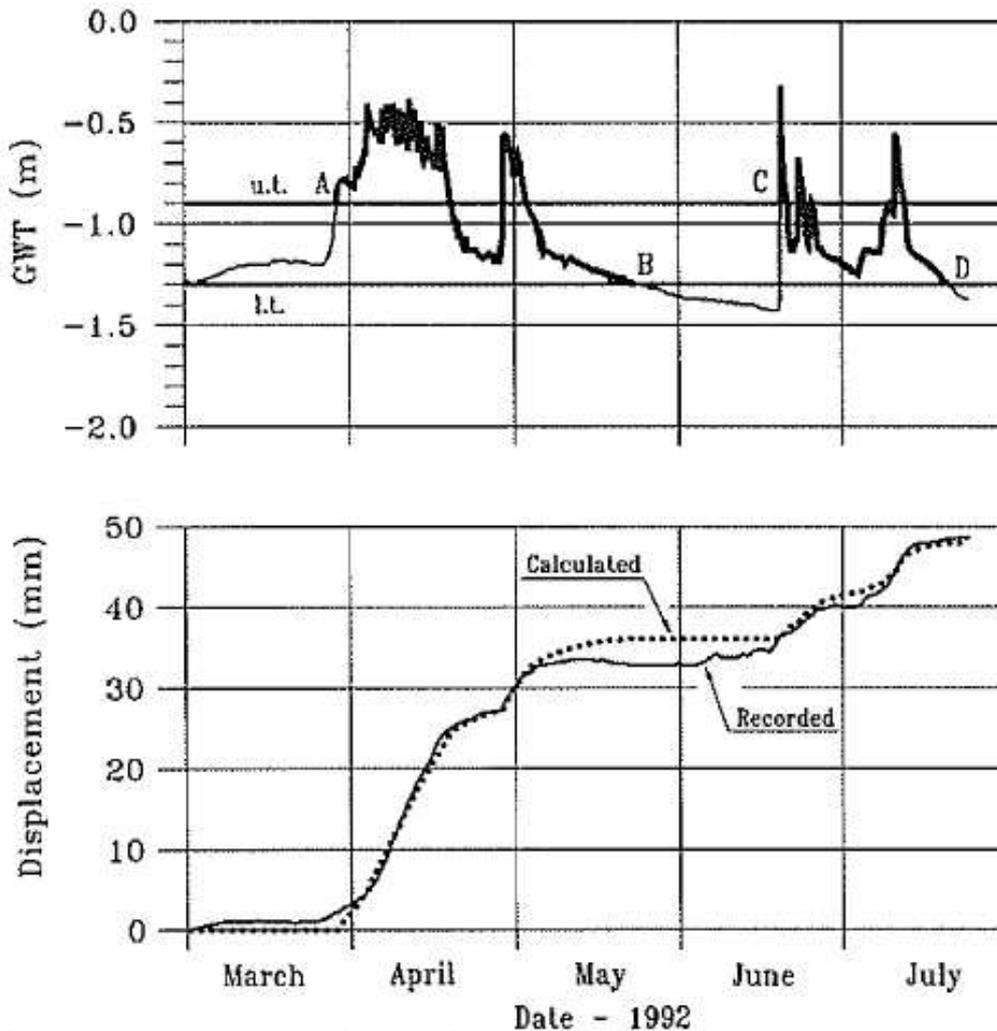


FIGURA 4.23 : Confronto tra il comportamento della frana monitorato e ottenuto dal modello di calcolo

I risultati ottenuti e le conclusioni dell'articolo dicono che: l'uso delle classiche analisi di stabilità su un piano di pendenza infinito argilloso danno uno sviluppo irrealistico della velocità della frana con un indefinito aumento della velocità (moto con accelerazione costante), non appena la pressione interstiziale diventa sufficiente per indurre un movimento. Ciò è in contrasto con il monitoraggio reale dei pendii, in cui la velocità tende a divenire costante subito dopo l'inizio del movimento.

Il modello visco-plastico in cui l'accelerazione tende a decrescere con l'aumentare della velocità, fornisce un modello più realistico per lo sviluppo della velocità evidenziando come solo una nuova variazione di pressione interstiziale può produrre un cambio nella velocità della frana.

Questo meccanismo è supportato e convalidato da registrazioni a lungo termine sul pendio studiato. Il modello prende in considerazione la presenza di due diversi valori soglia di pressione interstiziale, come indicato dalle analisi di una completa serie di pressioni interstiziali e dati di spostamento. L'effetto fisico dei due soglie (invece che una), è che dopo il recupero della forza di taglio associata con il periodo di immobilità della frana, è richiesto un maggiore valore di pressione interstiziale per iniziare il movimento e mantenerlo. Caratteristicamente, una volta che il moto si arresta la pressione interstiziale sarà alla soglia più bassa, mentre, a questo punto, il processo di recupero della forza ricomincia. Quindi è necessario superare la soglia più alta perché il movimento avvenga ancora. Questo tipo di andamento è coerente con le analisi mineralogiche dell'argilla. È stata confermata la presenza di montmorillonite nelle argille studiate, e tali materiali erano ben noti per il fenomeno del recupero di forza (comportamento tixotropico: la tixotropia o tixotropia è la proprietà di alcuni fluidi pseudo-plastici di variare la loro aeriformità quando sottoposti a sollecitazioni di taglio oppure nel caso di lunghi periodi di quiete o sottoposti a movimenti peristaltici. In queste condizioni il fluido può passare dallo stato di grasso pastoso quasi solido a quello di liquido o, più in generale, da quello di gel a quello di liquido). Tale processo è stato confermato da test di taglio diretti eseguiti su campioni di terreno a grana fine prelevati dalla superficie del pendio.

Come mostrato nella Figura 4.22 e 4.23, il movimento inizia quando la curva piezometrica raggiunge i punti A e C e finisce solo quando la curva raggiunge definitivamente i punti B o D, sulla soglia inferiore. Comunque, ogni volta che la curva si trova nella zona tra le due soglie, ma senza raggiungere quella inferiore, il movimento continua. Così il modello tiene in considerazione contributi al movimento che non si potrebbero spiegare utilizzando un solo valore soglia. Il più importante risultato dell'applicazione del modello è, comunque, l'ottima concordanza tra i valori di spostamento calcolati e registrati. Tale concordanza è significativa dal momento che è il primo passo per la predizione del comportamento del movimento della frana. Acquisendo sufficienti informazioni sulle relazioni tra la pressione interstiziale, le piogge, e altri dati climatici si potrebbe predire il movimento della frana atteso dopo precipitazioni di particolari intensità.

#### 4.2.3 Previsione degli spostamenti profondi e delle velocità dalla variazione di livello di falda – Jordi Corominas

Nei movimenti franosi già attivi, la previsione di accelerazioni del movimento è una questione cruciale per la progettazione e il buon funzionamento dei sistemi di allerta e prevenzione oltre che protezione. La frana di Vallcebre nei Pirenei orientali, in Spagna, viene monitorata dal 1996 (e continua tutt’oggi) e i dati sulle precipitazioni, i livelli delle acque sotterranee e gli spostamenti di terra sono misurati e registrati con cadenza oraria.

Gli spostamenti osservati mediante filo estensimetri in loco hanno mostrato una risposta immediata della frana a episodi di precipitazioni. Questa rapida risposta è probabilmente dovuto alla presenza di vie di drenaggio preferenziale all’interno del terreno. Il verificarsi di una velocità di spostamento quasi costante in coincidenza con livelli costanti delle acque sotterranee suggerisce la presenza di forze viscoso sviluppate durante il movimento. Un tentativo di prevedere sia gli spostamenti che le velocità con cui questi avvengono è stata effettuata a Vallcebre risolvendo la nota equazione dell’equilibrio dinamico nella è stato aggiunto un termine viscoso descritto o con la legge di Bingham o con legge potenziale (Vueillmy e Hutter, 1989).

I risultati mostrano che, utilizzando parametri reologici simili per tutta la frana, gli spostamenti calcolati riproducono molto accuratamente gli spostamenti osservati da tre estensimetri a filo posti in loco a monitoraggio della frana. Questi risultati indicano che la previsione di spostamenti di un corpo franoso in relazione a variazioni del livello delle acque sotterranee è fattibile per questo particolare caso.



FIGURA 4.24 : Vista generale della frana traslazionale di Vallcebre. Il movimento è limitato, sul fondo, per l'alta scarpata di Serra de La Llacuna (centro-destra), in primo piano dal torrente Vallcebre, che va da destra a sinistra in un canale, e lateralmente da affioramenti di calcare grigio

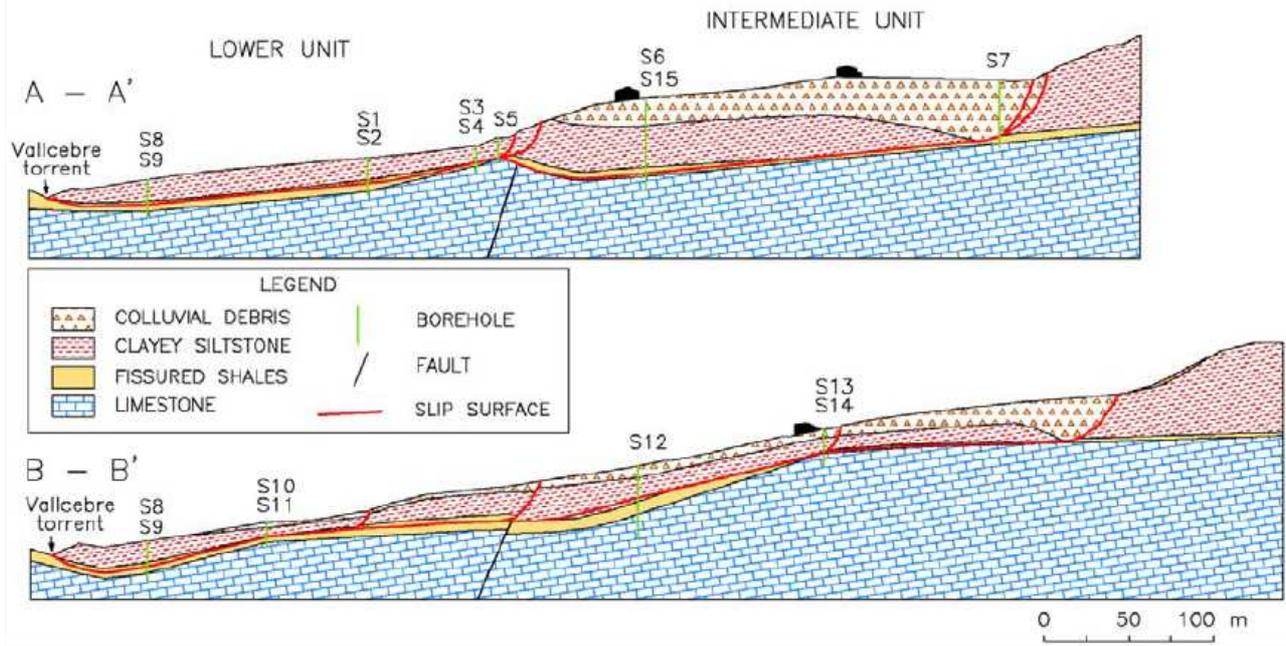


FIGURA 4.25 : Sezione geologica della frana traslazionale di Vallcebre

La parte inferiore della frana di Vallcebre è stato monitorato dal 1987 con metodi di rilevamento convenzionale e fotogrammetria (Gili e Corominas 1992). Nel mese di luglio del 1996, marzo 1997 e aprile 1998 sono stati eseguiti sedici pozzi di sondaggio sul corpo della frana, al fine di: registrare i materiali geologici della frana; fornire campioni indisturbati per le prove di laboratorio; per consentire test idrologici in-situ; e di istituire una rete di monitoraggio. I fori eseguiti sono stati dotati di inclinometri, estensimetri a filo e piezometri.

La superficie di rottura della frana è stata determinata mediante l'uso degli inclinometri.

I profili inclinometrici risultanti dal monitoraggio hanno mostrato che lo spostamento del corpo franoso avviene in una zona di taglio alla base della frana caratterizzato da spessori molto sottili, con deformazione trascurabile. La zona di taglio si sviluppa attraverso lo strato di siltite argilloso fessurata, vicino al contatto con il calcare. Ha una pendenza media del  $10^\circ$  in direzione del torrente Vallcebre e procede all'incirca parallela alla superficie del terreno ad eccezione della zona in prossimità del contatto tra le masse intermedie e inferiori in cui la presenza di un bedrock produce una diminuzione di lo spessore della frana.

La profondità della superficie di rottura non è costante. Le letture inclinometriche mostrano che l'unità di slittamento inferiore ha uno spessore da 10 a 15 m, mentre l'unità intermedia raggiunge uno spessore di almeno 34 m nel lato nord e tra 14 e 19 m in quella meridionale. Dal 1996, la registrazione sistematica delle precipitazioni, delle variazioni del livello delle acque sotterranee, e degli spostamenti franosi è stata effettuata ogni 20 min. Letture piezometriche hanno indicato che i cambiamenti nei livelli delle acque sotterranee si verificano rapidamente. L'estensimetro ha registrato repentine variazioni della velocità di spostamento che possono essere

direttamente collegati alle fluttuazioni della falda correlate alla pioggia. Le misurazioni degli spostamenti superficiali mediante PGS sono stati utilizzati per completare le misure inclinometriche ed estensimetriche. Un totale di 30 caposaldi sono stati posizionati sulla superficie della frana per un monitoraggio di controllo periodico.

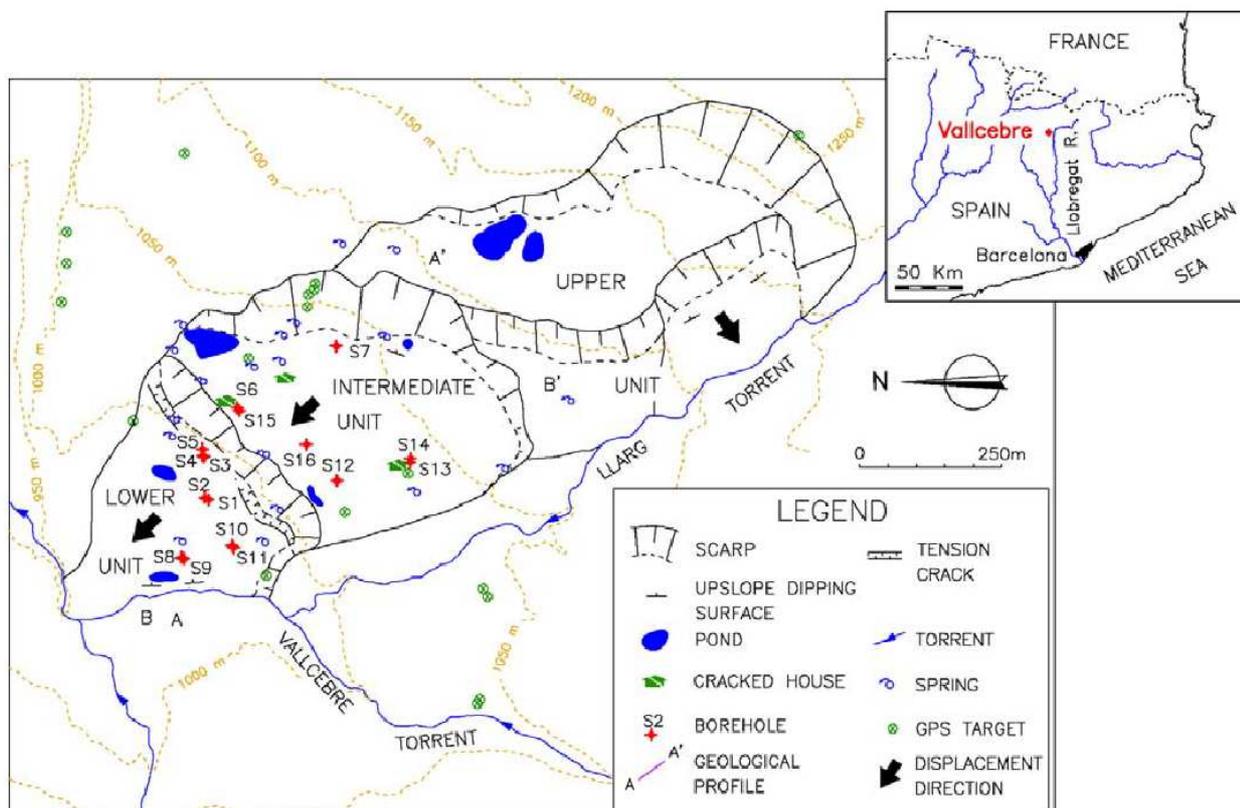


FIGURA 4.26 : Schematizzazione geomorfologica con i capisaldi di monitoraggio della fran traslazionale di Vallcebre

Le misurazioni filo estensimetriche mostrano che la frana non ha mai completamente smesso di muoversi da quando è stato iniziato il monitoraggio continuo nel novembre 1996, anche se le velocità si riducono in modo significativo durante i periodi secchi. D'altra parte, la storia degli spostamenti estensimetrici riferiti alle diverse parti del corpo di frana mostra un andamento sincronico ma con una diversa velocità di spostamento.

Per determinare parametri e le caratteristiche del suolo da utilizzare nelle analisi numeriche sono state eseguite prove di laboratorio su campioni indisturbati ottenuti per carotaggio. Particolare attenzione è stata dedicata alle prove per la determinazione della resistenza al taglio del terreno coinvolto nella superficie di scorrimento.

Test di identificazione di base e diversi tipi di prove di taglio sono state effettuate su 14 campioni indisturbati. Le prove di taglio sono state effettuate prevalentemente su campioni della zona di scisto fessurato in cui si trova la superficie di slittamento; in particolare, alcune prove sono state condotte su superfici di taglio preesistenti.

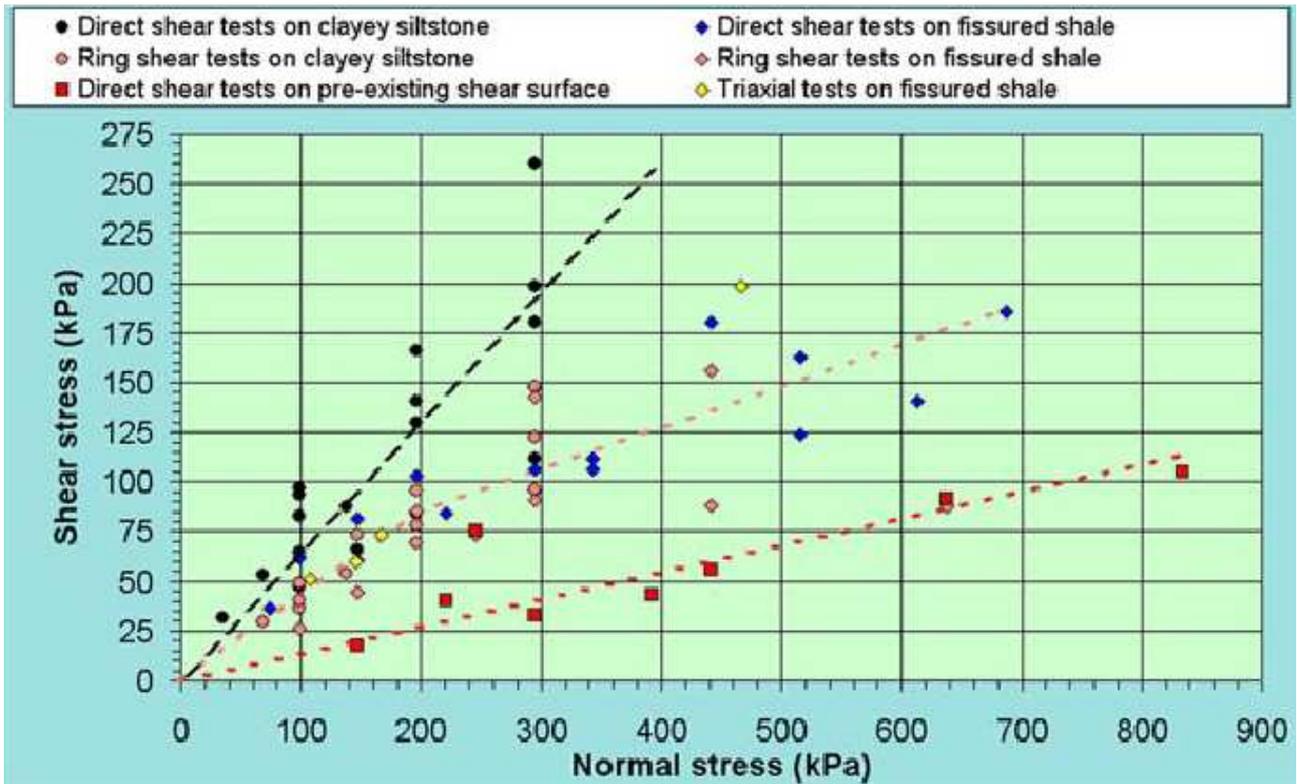


FIGURA 4.27 : Angolo di taglio minimo ottenuto in differenti tipi di prova e campioni

La Figura 4.27 mostra i risultati di tutti e tre i tipi di test eseguiti per ricavare la minima forza di taglio per ogni campione. In scisto fessurata le differenze tra la resistenza al taglio minima misurata nel taglio diretto, in prove triassiali o in prove di taglio anulari sono piccole e sono paragonabili alle differenze tra i campioni dello stesso materiale. La forza minima misurata da prove di taglio diretto su siltiti argillose è leggermente superiore rispetto allo stesso tipo di forza ottenuto per la roccia scistosa fessurata.

Tuttavia, la resistenza minima della siltite argillosa, ottenuta da prove di taglio anulare, è simile alla forza minima misurata per la scisti fessurata. La forza misurata su superfici di taglio preesistenti è più piccolo della minima resistenza a taglio eseguita da prove di taglio dirette e da prove di taglio ad anello, che indica che lo stato residuo non è stato raggiunto in questi test. Pertanto, per il scisto fessurata, lo sforzo residuo potrebbe essere sovrastimata se viene assunto pari alla forza minima misurata mediante la prova di taglio diretto.

Dalle variazioni volumetriche registrati durante fase di consolidamento nei test di taglio diretto sono stati determinati il coefficiente di consolidamento, la conducibilità idraulica, e, il coefficiente di consolidamento secondario. Valori tipici del modulo elastico sono circa 100 MPa e la conducibilità idraulica è compresa tra  $10^{-7}$  e  $10^{-9}$  cm/s.

Le variazioni delle acque sotterranee per il periodo novembre 1996 all'ottobre del 1997, misurato con sei piezometri sono mostrate in Figura 4.28.

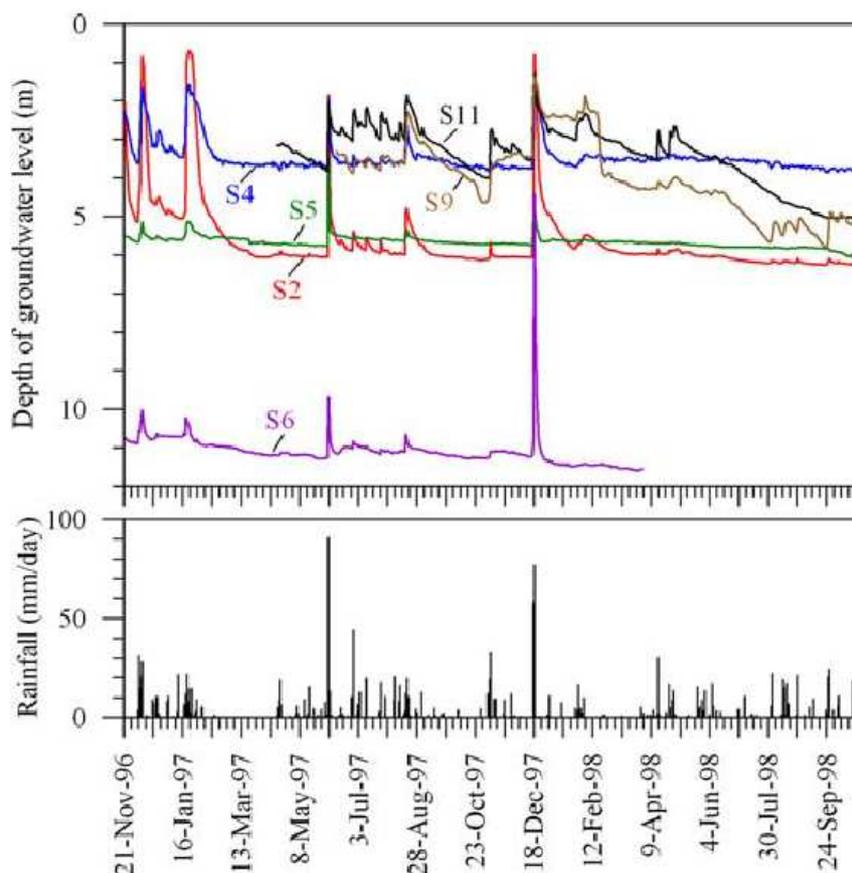


FIGURA 4.27: Andamento della variazione di falda registrata dai piezometri

Tutti i piezometri erano del tipo a tubo aperto, in modo da fornire una posizione media della falda nel pozzo di monitoraggio. È stato determinato un flusso di acque sotterranee parallelo alla superficie di slittamento. I dati registrati relativi alle acque sotterranee mostrano che la falda reagisce quasi immediatamente agli impulsi delle precipitazioni piovose, suggerendo che l'infiltrazione d'acqua è controllata da fessure e canali di drenaggio naturali piuttosto che dalla porosità del suolo. Il ruolo della rete formata dal terreno carsico con lenti di gesso è chiaro ma si può ritenere secondario, in quanto le caratteristiche di questo livello di terreno arrivano a profondità di circa 3 m, ben al di sopra della normale fluttuazione del livello delle acque sotterranee. Nonostante la rapida risposta dei piezometri, i livelli d'acqua di picco sono raggiunti in tempi leggermente diversi a seconda della permeabilità del materiale adiacente. Due tipi fondamentali di risposte a precipitazioni sono state osservate, a seconda della posizione dei piezometri in loco. Per esempio il piezometro S5, mostra una variazione minore del livello delle acque sotterranee (compresa tra 0,5 e 2 m) e un drenaggio più veloce rispetto ai piezometri ubicati altrove (per esempio S2, S4 e S11). Il comportamento di piezometro S5 è coerente però con la presenza di elevati crepe che caratterizzano l'elevata permeabilità nella zona considerata. Di conseguenza, si può dedurre che le crepe fungono da percorsi di drenaggio preferenziali all'interno della frana. Oltre alla rapida risposta agli input di precipitazione, tutti piezometri

mostrano un livello definito sotto del quale la falda diminuisce molto lentamente. Questo livello può essere osservato durante i periodi di febbraio-aprile 1997 e settembre-ottobre 1997. Una stretta relazione tra la variazioni di livello delle acque sotterranee e il comportamento della frana è stata misurata con un estensimetro a filo nel foro S2 (Figura 4.28). Esiste una forte livello di sincronismo tra i due andamenti. Inoltre, la velocità di spostamento è fortemente correlata con i dati rilevati dalla variazione di falda.

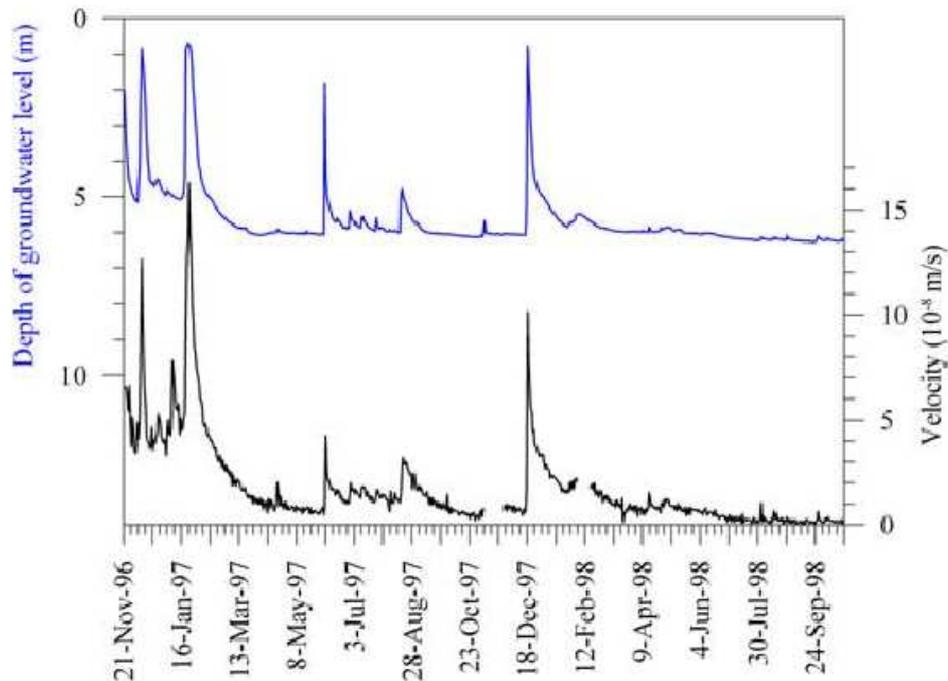


FIGURA 4.28 : Andamento della variazione di falda e velocità di spostamento nel foro di monitoraggio S2

La posizione del livello di falda ad una profondità di 6,22 m circa, corrisponde ad una situazione di stabilità del movimento franoso. Se viene eseguita una back analysis di stabilità per questo caso nella zona inferiore della frana, si trovano valori dell'angolo di attrito relativi alla zona di taglio  $\phi' = 14^\circ$  e della coesione  $c' = 0$ . Questo però non è concorde con il valore ottenuto dal test di laboratorio, che vanno da  $7.8^\circ$  a  $11.8^\circ$  di valore d'angolo di attrito.

È da notare inoltre che i test eseguite forniscono per questa variazione di angolo di attrito un cambiamento nel fattore di sicurezza da 0,79 a 1.17. Il valore di  $\phi' = 14^\circ$  ottenuto ipotizzando il limite di equilibrio per quella posizione di falda è difficile da spiegare se si considerano solo le condizioni statiche. Anche se i dati di laboratorio potrebbero includere alcune incertezze (dovuta al campionamento) non si ha alcuna prova di tale valore di resistenza per la superficie di slittamento. Di conseguenza, gli autori suggeriscono che oltre alla resistenza di attrito si sviluppino ulteriori resistenze di tipo viscoso che si oppongono al movimento (forze viscosi). Nel complesso, si esclude che una analisi all'equilibrio limite possa simulare in maniera corretta il movimento continuo della frana.

La stretta correlazione tra la velocità della frana e la posizione del livello di falda monitorata dai piezometri suggerisce la possibilità di effettuare una simulazione dello spostamento della frana sulla base dei dati registrati di pressione piezometrica.

Nel caso in esame, sarebbe possibile una analisi di regressione per la simulazione dello spostamento, ma si preferisce adottare un approccio fisico basato sull'equazione dei momenti. È stata quindi analizzata la dinamica dei punti locali della frana nei quali si può presumere una uniformità di condizioni per la geometria tenendo in considerazione il comportamento viscoso con i valori di viscosità ricavati dalle analisi precedentemente illustrate.

La dinamica della frana è governata dalla differenza tra forze destabilizzanti, che dipendono sostanzialmente da peso e pendenza, che sono costanti, e forze stabilizzanti o di resistenza, sensibili alla pressione dell'acqua sulla superficie di scorrimento.

L'equazione dei momenti può essere scritta come:

$$F - Fr = ma \quad (4.15)$$

dove  $m$  è la massa e  $a$  l'accelerazione del corpo franoso.

Per un punto localizzato nel quale si può assumere una condizione di pendio infinito, le forze di resistenza possono essere calcolate usando i criteri di Mohr-Coulomb dipendente dalla coesione e dall'angolo di attrito.

Le forze sono considerate per unità di superficie e le forze di taglio possono essere descritte dalla formula seguente:

$$\tau - [c' + (\sigma - p_w) \tan \phi'] = ma \quad (4.16)$$

Dove:

$\tau$  = forze di taglio destabilizzante

$c'$  = coesione

$\sigma$  = sforzo normale

$p_w$  = pressione di falda

$\phi'$  = angolo di attrito

Tutte queste forze sono riferite alla superficie di scorrimento.

In tale formulazione, la pressione dell'acqua è l'unica variabile temporale nella parte sinistra dell'equazione, dunque, questa, predice un unico valore di accelerazione per ogni valore di pressione di falda sotterranea.

Una correlazione univoca è quindi anche presente tra accelerazione e livello di falda se si considera il flusso di filtrazione parallelo alla zona di taglio.

Ad ogni modo, l'analisi mostra che l'accelerazione è positiva quando il livello di falda cresce, mentre è negativa, quando decresce.

Valori diversi di accelerazione son stati registrati nel movimento franoso per gli stessi livelli di falda, ciò suggerisce che altri fattori dovessero essere considerati nell'equazione.

Un'altra dimostrazione di questo comportamento è rappresentata nella Figura 4.29.

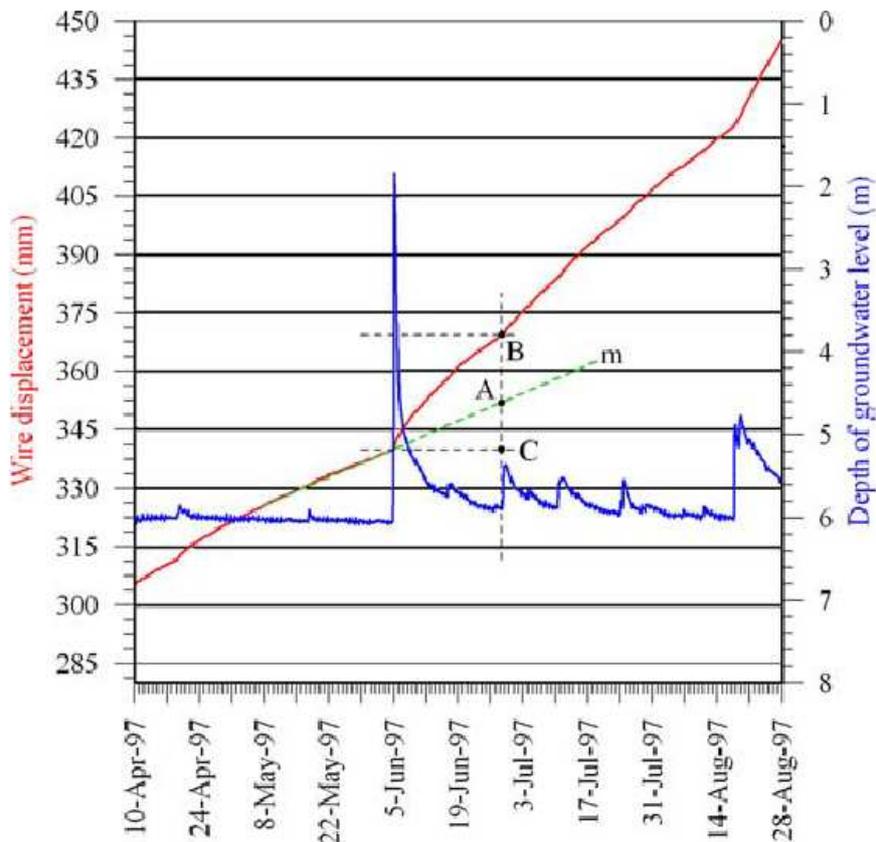


FIGURA 4.29 : Andamento della variazione di falda e velocità di spostamento nel foro di monitoraggio S2 durante la primavera e l'estate del 1997

Si nota che durante i periodi di secca, ad esempio nell'aprile e nel maggio 1997, il movimento presenta una velocità costante.

Tuttavia, se vi è uno sbilanciamento delle forze nel sistema è da aspettarsi un valore di accelerazione, altrimenti altre forze di resistenza dovrebbero essere prese in considerazione.

Dunque una forza viscosa, che interpretiamo come componente viscosa, sembra rivestire un ruolo fondamentale nel comportamento della frana.

Dopo una precipitazione piovosa, la velocità cambia, e considerando uno spostamento totale B-C, una parte può essere attribuita alla pioggia, e una parte alla componente viscosa A-C.

L'evidenza ci suggerisce che un termine viscoso deve essere inserito nell'equazione principale dei momenti prima posta:

$$\tau - [c' + (\sigma - p_w) \tan \phi'] - \tau_v = ma \quad (4.17)$$

$$\tau - (\tau_v + \tau_r) = ma \quad (4.18)$$

$$\tau_r = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4.19)$$

Dove  $\tau_v$  è la componente viscosa dipendente dalla velocità.

La precedente equazione diviene, per le condizioni di piano di slittamento infinito illustrate in Figura 4.30:

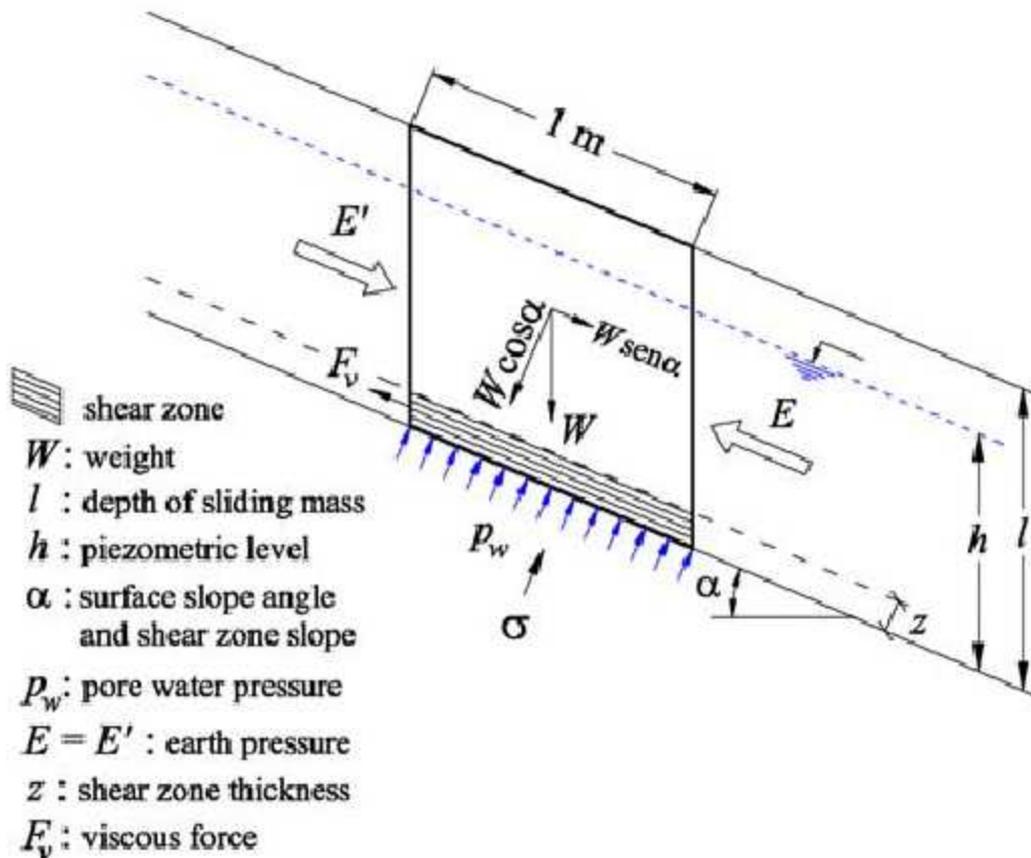


FIGURA 4.30 : Geometria e variabili utilizzate nel modello viscoso

$$W \parallel - [c' + (W \perp - p_w) \tan \phi'] - \tau_v = ma \quad (4.20)$$

$$\gamma \sin \alpha \cos \alpha - [c' + (\gamma \cos^2 \alpha - p_w) \tan \phi'] - \tau_v = ma \quad (4.21)$$

Le forze sono espresse per unità di area di superficie di slittamento. Le forze viscose dipendono dalla velocità di deformazione della zona di taglio, per un modello alla Bingham tale relazione è lineare e diventa:

$$\tau_v = \frac{\eta v}{z} \quad (4.22)$$

$\eta$  = viscosità

$v$  = velocità

$z$  = spessore della zona di taglio

Dalla precedente equazione, sostituendo, ottengo:

$$\begin{aligned} \gamma l \sin \alpha \cos \alpha - [c' + (\gamma \cos^2 \alpha - p_w) \tan \phi'] &= ma + \eta \frac{v}{z} \\ \gamma l \sin \alpha \cos \alpha - [c' + (\gamma \cos^2 \alpha - p_w) \tan \phi'] &= m \frac{dv}{dt} + \eta \frac{v}{z} \quad (4.23 \text{ a-b}) \end{aligned}$$

La pressione dell'acqua interstiziale non si misura in modo diretto, ma viene stimata dalle letture di profondità del livello di falda. Assumendo un superficie di falda parallela a quella della frana ottengo:

$$p_w = \gamma_w \cos^2 \alpha h = \gamma_w \cos^2 \alpha (l - Dw) \quad (4.24)$$

Dove  $Dw$  è la profondità del livello di falda.

L'equazione risolutiva viene risolta numericamente in termini di spostamenti usando uno schema alle differenze finite. Mediante lo stesso approccio è possibile derivare direttamente la velocità e l'accelerazione della frana.

#### 4.2.3.1 Modello viscoso basato sulla legge potenziale di Vulliet e Kutter

È stata considerato inoltre un'alternativa al modello di Bingham, basata su una legge potenziale; in tale modello la velocità  $v$  è ottenuta dall'eccesso di forze di scorrimento  $\tau - \tau_0$ . Tale legge ripresa da Leroueoil et al. 1996, si deve a Vulliet e Hutter (1988).

$$v = A \left( \frac{\tau}{\tau - \tau_0} \right)^{-x} \quad \text{per } \tau > \tau_0 \quad (4.25)$$

dove  $A$  e  $x$  sono parametri propri del materiale che possono essere calibrati mediante una back analysis. Il termine  $\tau - \tau_0$  corrisponde la componente viscosa  $\tau_v$  e l'espressione potenziale può essere riscritta come segue:

$$\tau_v (\text{power}) = \tau \left( \frac{v}{A} \right)^{1/x} \quad (4.26)$$

$$\gamma l \sin \alpha \cos \alpha - [c' + (\gamma \cos^2 \alpha - p_w) \tan \phi'] = ma + \tau \left( \frac{v}{A} \right)^{1/x} \quad (4.27)$$

Le equazioni precedenti sono state risolte numericamente in termini di spostamenti, utilizzando uno classico schema alle differenze finite. Utilizzando lo stesso approccio numerico, è possibile ricavare direttamente la velocità e l'accelerazione del pendio. Dopo l'integrazione numerica delle equazioni, sono stati ottenuto i valori dei parametri del materiale (parametri viscosi e l'angolo di attrito  $\phi'$ ) mediante una regressione non lineare per minimizzare le differenze tra la misura e gli spostamenti calcolati. Gli spostamenti franosi utilizzati per il confronto con le previsioni dei modelli sono stati ricavati dagli spostamenti misurati in loco dagli estensimetri. La pendenza della zona di taglio è stata determinata da profili risultanti dalle misure inclinometriche.

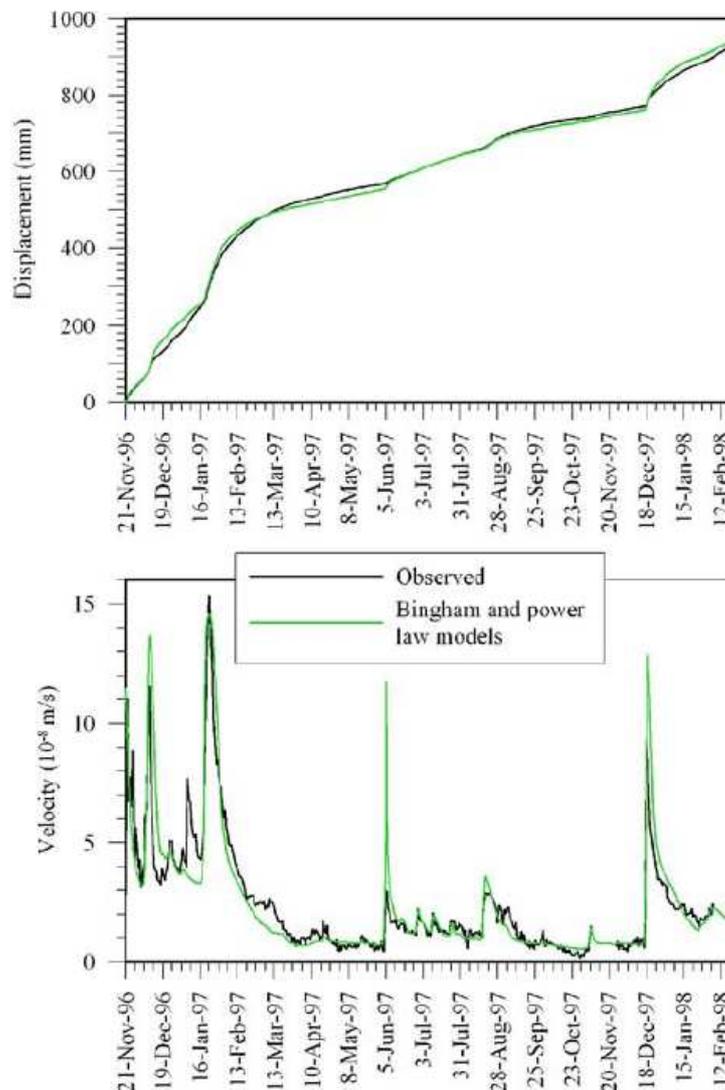


FIGURA 4.31 : Andamento dei dati monitorati confrontati con quelli calcolati con i modelli di Bingham e di Vulliet

La Figura 4.31 presenta un confronto tra spostamenti e le velocità misurate e previste, utilizzando i modelli di Bingham e potenziale applicati al foro di monitoraggio S2. Si può osservare che entrambi i modelli forniscono una buona simulazione del comportamento monitorato. La tabella

sotto riporta i valori stimati dei parametri del materiale. I valori previsti dai due modelli sono quasi gli stessi, perché quando l'esponente della legge potenziale è vicino ad uno, come avviene nel nostro caso, i due modelli sono equivalenti, e il valore di  $\eta/z$  è uguale a  $\tau/A$ .

Borehole			S2	S9	S11
Thickness of shear zone (cm)			31.5	21.5	32.0
Friction angle $\phi'$ (°)			7.3	6.1	6.2
Bingham model	$\eta$ (kPa × s)		$1.51 \times 10^7$	$1.52 \times 10^7$	$1.60 \times 10^7$
Power law model	A (m/s)		$0.55 \times 10^{-6}$	$0.44 \times 10^{-6}$	$4.06 \times 10^{-6}$
	x		1.0023	1.39	1.83
Goodness of fit	Bingham model	Displacement (mm)	12.7	21.2	36.4
		Velocity (m/s)	$1.05 \times 10^{-8}$	$1.48 \times 10^{-8}$	$1.69 \times 10^{-8}$
RMSE	Power law model	Displacement (mm)	12.7	14.7	36.2
		Velocity (m/s)	$1.05 \times 10^{-8}$	$1.36 \times 10^{-8}$	$1.59 \times 10^{-8}$

FIGURA 4.32: Parametri del terreno ricavati

In conclusione, gli autori di questo articolo affermano che il monitoraggio continuo della frana di Vallcebre ha permesso di osservare alcune caratteristiche del comportamento franoso che altrimenti non sarebbero state notate.

La frana è molto sensibile alle precipitazioni piovose, e si denota come le fratture presenti per la particolare formazione geologica sono vi di infiltrazione e di drenaggio preferenziali per l'acqua.

La rete di monitoraggio installata ha evidenziato la dipendenza della velocità di spostamento in relazione al livello di falda sotterranea da cui è stato dedotto l'esistenza di una componente viscosa nel comportamento della frana.

Dal punto di vista delle condizioni di equilibrio limite nell'analisi di stabilità, la frana presenta un fattore di sicurezza nell'intorno dell'unità. Tuttavia, quando si raggiungono condizioni critiche la movimentazione della massa franosa non avviene immediatamente poiché si produce solo una piccola accelerazione della massa in gioco. In questo modo si accerta che un'analisi più completa dovrà considerare la dinamica della frana invece che un semplice sistema a due termine, velocità vs spostamento. La simulazione del comportamento dinamico della frana, considerando la componente di viscosità, è stata eseguita usando parametri ottenuti dall'analisi retrospettiva dei dati registrati (back analysis). Tale simulazione si ritiene valida dato che i parametri dell'analisi sono coerenti con i dati ottenuti sul campo e in laboratorio.

Così, l'andamento della frana in punti singolari (noi abbiamo considerati quelli dei fori di monitoraggio), può essere riprodotto usando le procedure elencate, in futuro si cercherà di modellare il comportamento della frana in maniera globale mediante l'associazione di analisi 3D, e modelli meccanici e idrologici associati.

## 5. APPLICAZIONE DEI MODELLI MISTI AL SETTORE PIAN DE CICE

Dopo aver analizzato e compreso i modelli proposti dagli autori per l'analisi dei movimenti franosi da loro presi in esame, si vuole ricercare, a partire da tali modelli, se il comportamento del movimento franoso in atto nel settore Pian de Cice della Frana del Tessina può essere riprodotto e analizzato mediante tali modelli a partire dai dati forniti dal monitoraggio in sito.

Anche nel nostro caso, si ricerca la correlazione tra le precipitazioni piovose registrate e la velocità di spostamento della frana, anch'essa regolata dalla variazione di quota del livello di falda, la quale agisce direttamente sulle caratteristiche reologiche del terreno posto nella zona di taglio.

Ricordando che l'effetto delle precipitazioni consiste in un aumento della pressione dell'acqua interstiziale nei terreni, la quale determina una riduzione degli sforzi efficaci in linea con quanto afferma il principio di Terzaghi, si potrà trovare una correlazione diretta tra pressione interstiziale e velocità di spostamento della frana, attraverso il parametro reologico viscosità del terreno.

### 5.1 Modello viscoso di Bingham

L'applicazione del modello viscoso di Bingham nel settore Pian de Cice, corrisponde a voler trovare una corrispondenza tra il livello di falda e la viscosità del terreno, essendoci tra le due una relazione diretta. L'applicazione di tale metodo nel caso della frana di Vallcebre studiata da Corominas et al. (2005) ha portato a ricavare un valore di viscosità pressoché costante per il terreno caratterizzante la superficie di rottura. Il modello applicato da Corominas et al. si basa sulla legge che governa il comportamento di un corpo in base alla differenza tra le forze instabilizzanti e di resistenza, tra le quali rientrano anche le forze viscosive. Per un problema piano in condizioni di scivolamento lungo una superficie parallela al piano campagna, l'equilibrio delle forze agenti sul un tratto unitario si scrive:

$$\tau - [c' + (\sigma - p_w) \tan \phi'] - \tau_v = ma \quad (5.1)$$

o in alternativa:

$$\tau - (\tau_v + \tau_r) = ma \quad (5.2)$$

Essendo:

$$\tau_r = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (5.3)$$

la resistenza a taglio del terreno lungo la superficie di scivolamento e:

$\tau$  = sforzo di taglio destabilizzante agente lungo la superficie di scivolamento

$c'$  = coesione in termini efficaci

$\sigma$  = sforzo normale totale agente sulla superficie

$p_w$  = pressione interstiziale

$\phi'$  = angolo di attrito in termini efficaci

$\tau_v$  = componente viscosa dello sforzo di taglio dipendente dalla velocità.

Vediamo ora come tale approccio è stato da noi considerato e successivamente modificato.

### 5.1.1 Correlazione precipitazioni - falda - viscosità

Ai dati forniti mediante monitoraggio in sito, elaborati come spiegato nel capitolo 3 del presente lavoro e illustrati in Figura 5.1, si è applicato il procedimento di calcolo ipotizzando alcuni parametri caratteristici dei terreni ancora ignoti.

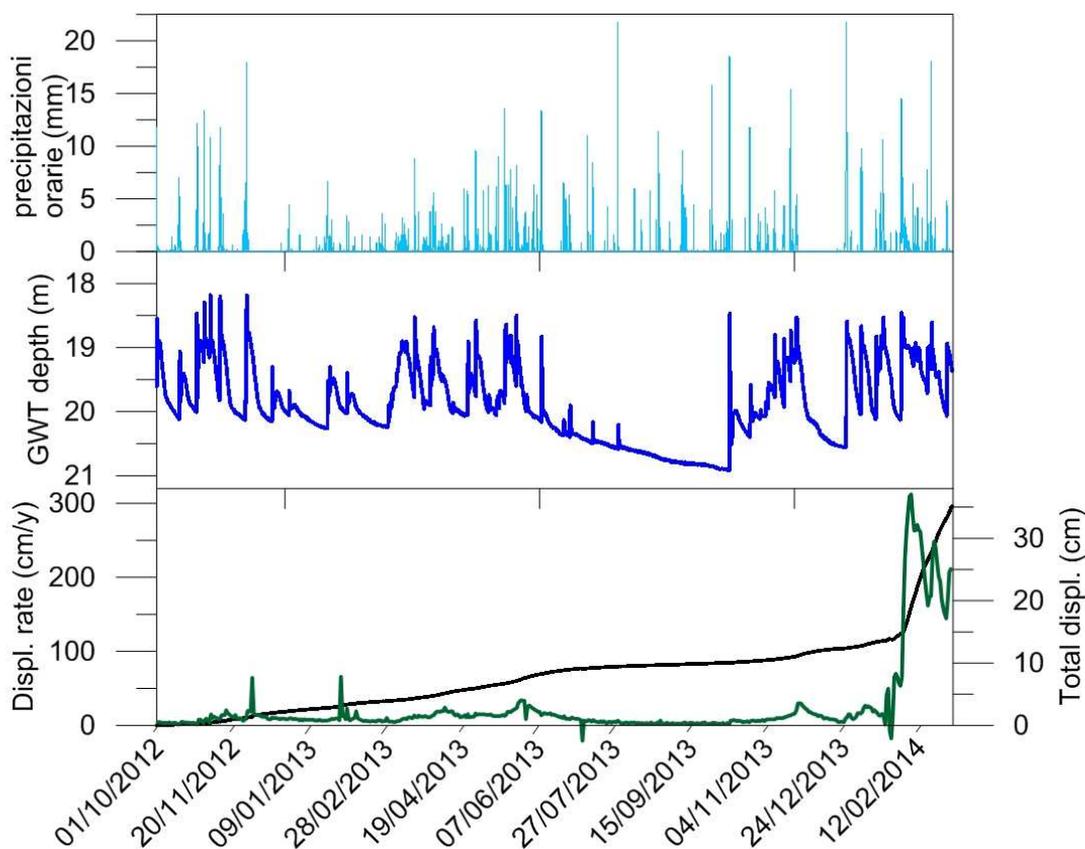


FIGURA 5.1: Diagramma temporale riepilogativo dei dati raccolti di precipitazioni orarie, profondità GWT, spostamento registrato dall'inclinometro inferiore e la velocità di spostamento giornaliera durante il periodo dal 01/10/2012 al 05/05/2014

Nella tabella seguente si riportano i dati assunti come caratteristici del settore Pian de Cice: l'angolo di attrito è stato considerato come angolo di attrito residuo in quanto si tratta di un movimento franoso già attivo e quindi con una superficie di taglio già formata.

DATI				
Angolo di attrito	$\phi'$	[rad]	0,305	17,5°
Peso di volume del terreno	$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20	
Inclinazione piano di slittamento	$\alpha$	[rad]	0,314	18°
Coesione	$c'$	/	0	
Spessore dello strato in movimento	L	[m]	27	
Peso di volume dell'acqua	$\gamma_w$	[kN/m <sup>3</sup> ]	10	
Spessore banda di taglio	Z	[m]	2	

TABELLA 5.1: Caratteristiche geometriche e proprietà del terreno ipotizzati per l'applicazione del modello

Il procedimento è implementato all'interno di un foglio di calcolo elettronico, dove vengono gestiti i 12490 dati rilevati dal monitoraggio, ogni dato corrispondente alla rilevazione di un'ora. Il procedimento di calcolo è suddiviso nei seguenti step:

- dalle letture di profondità del livello di falda si calcola la pressione dell'acqua interstiziale assumendo un superficie di falda parallela alla superficie di scivolamento e applicando la formula:

$$p_w = \gamma_w \cos^2 \alpha h = \gamma_w \cos^2 \alpha (l - D_w) \quad (5.4)$$

dove  $D_w$  è la profondità del livello di falda.

Dall'equazione (5.1) si estrae la differenza tra la componente instabilizzante (componente del peso parallela alla superficie di scivolamento) e la resistenza al taglio riscrivendo l'equazione nella seguente forma:

$$\gamma \sin \alpha \cos \alpha - [c' + (\gamma \cos^2 \alpha - p_w) \tan \phi'] = ma + \tau_v \quad (5.5)$$

Si riporta l'andamento grafico dei risultati:

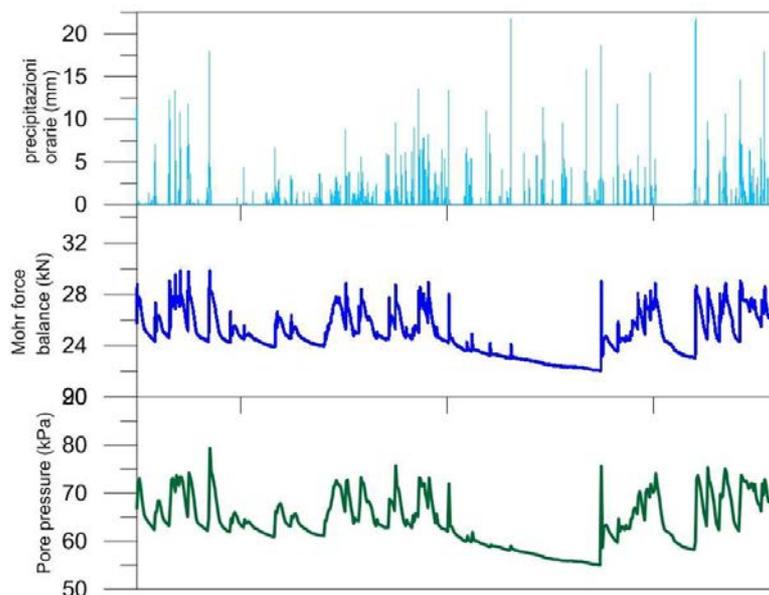


FIGURA 5.2: Diagramma dei valori calcolati di pressione interstiziale e il primo termine dell'equazione (5.5): equilibrio delle forze in gioco

Dato che il modello di Bingham ipotizza una relazione lineare tra velocità e componente viscosa del taglio:

$$\tau_v = \frac{\eta v}{z} \quad (5.6)$$

$\eta$  = viscosità

$v$  = velocità

$z$  = spessore della zona di taglio

L'equazione (5.5) si riscrive come:

$$\gamma \sin \alpha \cos \alpha - [c' + (\gamma \cos^2 \alpha - pw) \tan \phi'] = m \frac{dv}{dt} + \eta \frac{v}{z} \quad (5.7)$$

dalla quale è possibile ricavare la viscosità. Per evitare errori di interpretazione nell'elaborazione dei dati, dovuti alla forte oscillazione del valore di accelerazione, dato dalla differenza tra due valori di velocità ricavati in due ore successive, si è voluto associare un comportamento di falda crescente a valori di velocità crescenti (accelerazione positiva) e, viceversa, comportamento di falda decrescente con fasi di diminuzione della velocità (accelerazione negativa). Il procedimento seguito è:

- 1) Estrazione di intervalli caratterizzati da falda crescente; (l'extrapolazione è un'altra cosa dal punto di vista matematico)
- 2) Successiva estrazione dal precedente set di dati degli intervalli di velocità crescente. I valori di velocità decrescente in presenza di falda crescente non sono tenuti in considerazione.
- 3) Calcolo del termine  $m \cdot a$  da inserire nell'equazione;
- 4) Calcolo del parametro di viscosità relativa ad un movimento di falda crescente con velocità crescente (accelerazione positiva).
- 7) Ripetizione dei punti 1) - 4) per valori di falda decrescente o costante in presenza di velocità crescente della frana. In questo modo non teniamo conto delle decelerazioni e delle velocità negative in quanto possono causare errori.
- 8) Ricavo un set di valori di viscosità relativi alla falda crescente  $F+$  e uno di valori relativi alla falda decrescente  $F-$ ;
- 9) Unisco i valori di viscosità trovati dopo aver fatto, per ogni serie di valori  $F+$  e  $F-$  la media per ogni coppia di valori successivi (solo se la coppia si riferisce a un intervallo di un'ora?), eliminando così le singolarità.

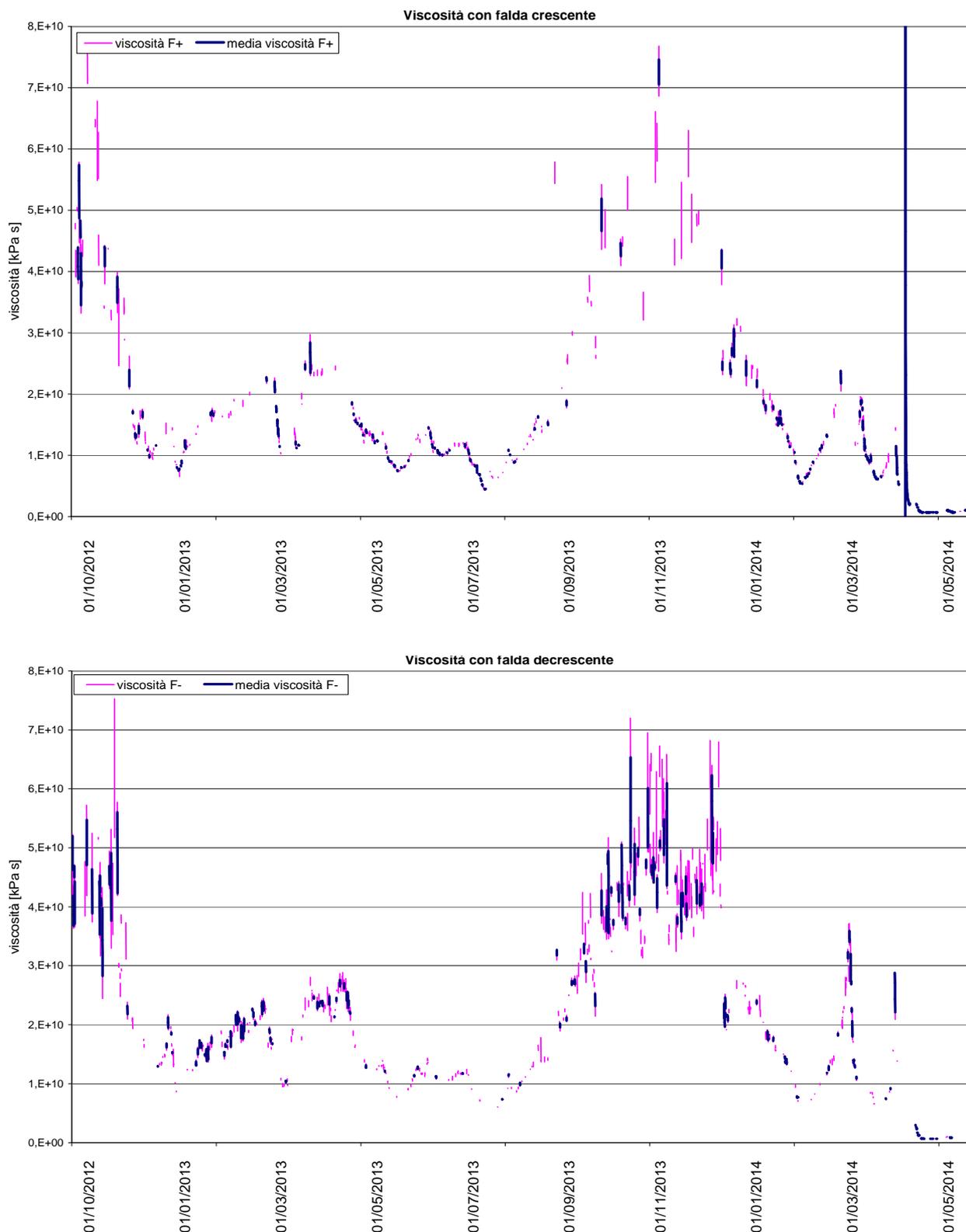


FIGURE 5.3 - 5.4: Diagramma temporale dei valori di viscosità calcolati in base al comportamento del livello di falda e della velocità di spostamento della frana

10) Infine eseguo una media mobile su 24 ore eliminando così i picchi insignificanti e collegando tra loro gli andamenti fin qui ottenuti. Ottengo così un andamento continuo della viscosità:

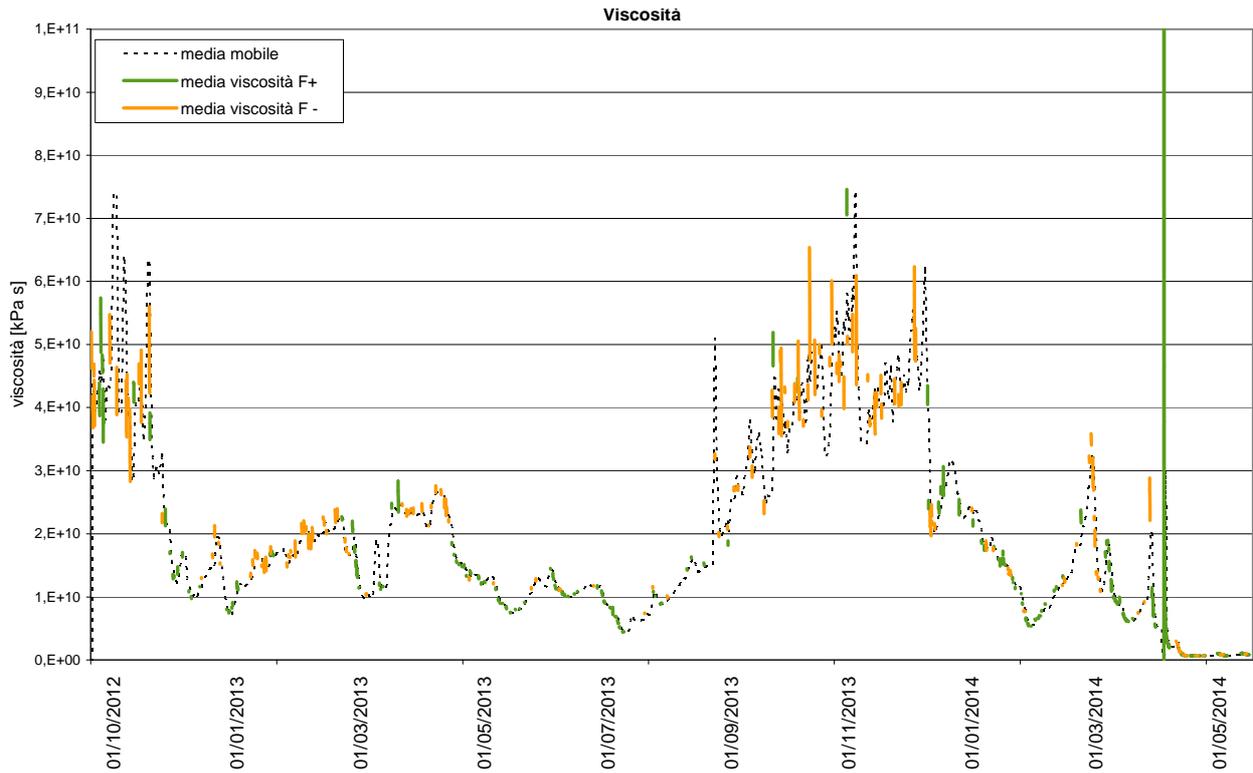


FIGURA 5.5: Diagramma temporale dei valori di viscosità mediati mediante media mobile

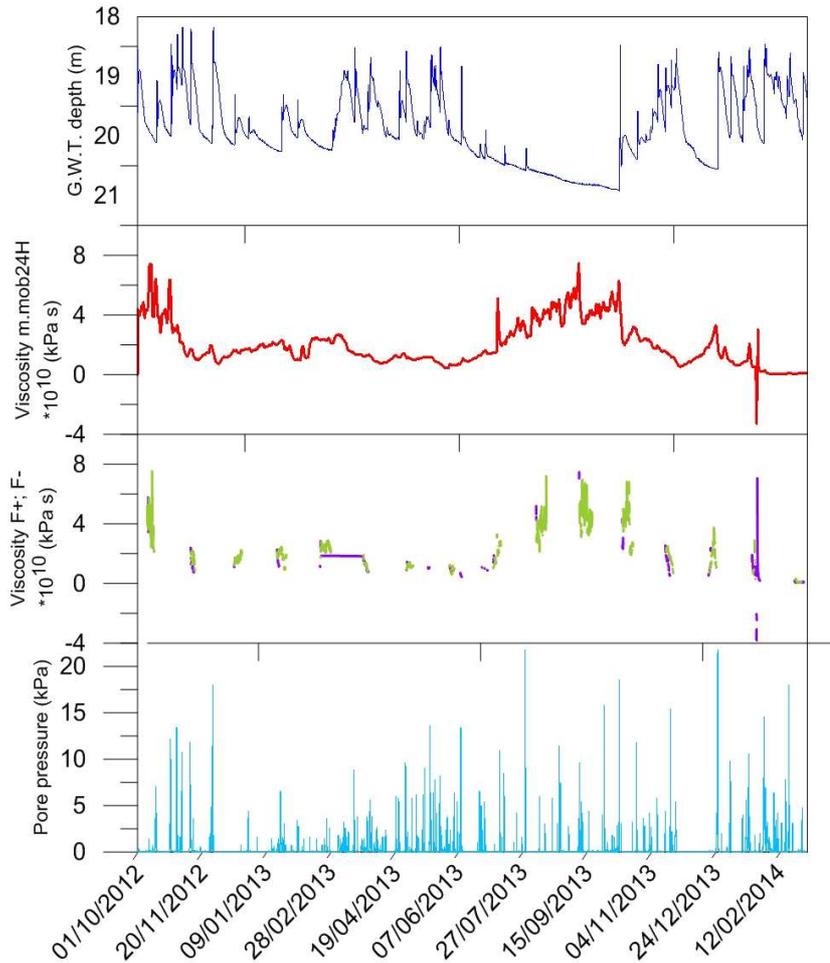


FIGURA 5.6: Diagramma temporale riepilogativo dei valori di viscosità calcolati in funzione di falda e precipitazioni orarie

Dalla Figura 5.6, si nota l'ampio margine di variazione della viscosità calcolata.

Si osserva facilmente che la viscosità è strettamente collegata al livello di falda: in particolare, quando il livello di falda tende ad alzarsi, la viscosità ha un andamento decrescente e viceversa. Inoltre è possibile fin da ora affermare che il modello così posto non ci consente di determinare un unico valore di viscosità per il terreno, e sempre differentemente da quanto trovato da Corominas, i nostri valori risultano più grandi di tre ordini di grandezza rispetto quelli da lui ricavati.

I dati ipotizzati (come per esempio l'angolo di attrito) non influiscono particolarmente sui risultati, in quanto cambiano i valori di viscosità ma non l'ordine di grandezza. Lo spessore della zona di taglio, essendo un moltiplicatore diretto nella formula della viscosità, ha una forte influenza nei risultati finali: se per esempio poniamo uno spessore della zona di taglio molto piccolo, come nel caso di Vallcembre (circa 0.5 m) notiamo che la viscosità si evolve in un intervallo più piccolo rispetto a quello da noi trovato:

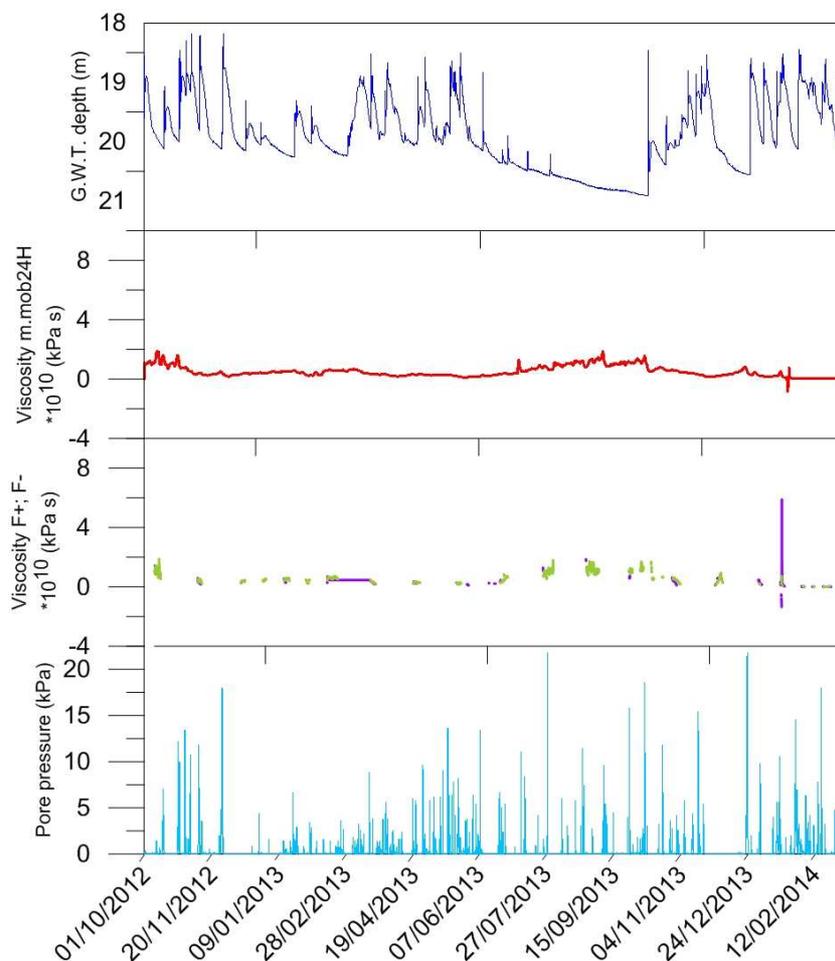


FIGURA 5.6: Diagramma temporale riepilogativo delle precipitazioni orarie e dei valori di viscosità calcolati in funzione della falda con uno spessore della zona di taglio di 0.5 m

Questo potrebbe prima di tutto indurre a pensare che tale modello non è applicabile nel caso di movimenti franosi caratterizzati da un zona di taglio di considerevole spessore come nel caso Pian de Cice.

### 5.1.2 Caratterizzazione del comportamento viscoso per periodi significativi di falda

Non trovando una buona applicabilità del precedente modello al nostro caso di studio, è stato eseguito in questo lavoro una ricerca di periodi significativi all'interno del periodo di monitoraggio, i quali fossero caratterizzati da una certa quota di falda costante in presenza di velocità costante, ovvero accelerazione nulla. In questo modo, trascurando il termine inerziale  $m \cdot a$ , si vuole ricercare un valore significativo di viscosità proprio di certe condizioni del livello di falda.

Sono stati considerati tre livelli di falda: falda bassa (profondità maggiore di 20.5 m s.p.c.), falda media (profondità compresa tra 20.5 e 19.5 m s.p.c.) e infine falda alta (profondità minore di 19.5 m s.p.c.). Tramite un foglio elettronico abbinato ad un breve programma scritto in *matlab* sono state estrapolate 63 serie significative con 4 modalità diverse.

1) mediante foglio elettronico sono state estratte 19 serie di 24 valori (corrispondenti quindi ad un intervallo 24 ore o 1 giorno) in base ai seguenti due criteri:

- a) il valore assoluto della differenza tra la media dei valori della serie e ogni singolo valore della serie non deve essere più grande di 0,02 m;
- b) lo scarto tra il primo valore della serie e l'ultimo non deve essere maggiore di 0,01 m.

Dopo aver eseguito una prima temporanea regressione per verificare la bontà dei dati estrapolati, si susseguì con l'elaborazione del programma in *matlab* per la scelta delle successive serie di dati. La scrittura del programma in *matlab* ci ha permesso di variare facilmente i parametri vincolanti per la scelta delle serie. Abbiamo così imposto altre 3 modalità di scelta delle serie:

2) intervalli da 24 ore, 2cm (uguale alle scelta 1) ma senza vincoli di data:

- a) il valore assoluto della differenza tra la media dei valori della serie e ogni singolo valore della serie non deve essere più grande di 0,02 m;
- b) lo scarto tra il primo valore della serie e l'ultimo non deve essere maggiore di 0,01 m;

3) intervalli da 24 ore, 5 cm:

- a) il valore assoluto della differenza tra la media dei valori della serie e ogni singolo valore della serie non deve essere più grande di 0,05 metri;
- b) lo scarto tra il primo valore della serie e l'ultimo non deve essere maggiore di 0,01 m;

4) intervalli da 6h, 5 cm:

- a) il valore assoluto della differenza tra la media dei valori della serie e ogni singolo valore della serie non deve essere più grande di 0,05 m;
- b) lo scarto tra il primo valore della serie e l'ultimo non deve essere maggiore di 0,01 m.

Nella Tabella 5.2 si riportano le serie di dati estratte: In Figura 5.7 ciascuna serie è individuata mediante un punto nel diagramma temporale delle velocità.

SERIE	Rif. Iniziale	Rif. Finale	Data Inizio	Data Fine	Durata (ore)	Vel media (m/s)	Prof. media falda (m)	Falda max (m)	Falda min (m)	Variazione max (m)	Falda	Pioggia cumulata (mm)
1	1430	1459	29/11/2012 11.00.00	30/11/2012 16.00.00	29	6,22E-09	18,77	18,79	18,75	0,04	ALTA	4,40
56	771	788	02/11/2012 0.00.00	02/11/2012 17.00.00	17	2,26E-09	18,87	18,88	18,88	0,00	ALTA	0,20
51	39	56	02/10/2012 12.00.00	03/10/2012 5.00.00	17	1,40E-09	18,91	18,93	18,90	0,04	ALTA	1,00
55	681	704	29/10/2012 6.00.00	30/10/2012 5.00.00	23	2,26E-09	18,87	18,93	18,89	0,05	ALTA	0,20
59	3867	3884	11/03/2013 0.00.00	16/10/2012 21.00.00	17	2,68E-09	18,97	18,98	18,96	0,02	ALTA	0,00
48	11091	11114	06/01/2014 0,01,00	06/01/2014 23.00.00	23	3,28E-09	18,99	19,01	18,97	0,04	ALTA	0,00
19	11769	11795	03/02/2014 6,01,00	04/02/2014 8,01,00	26	8,02E-08	19,00	19,01	18,97	0,04	ALTA	17,60
44	4371	4393	01/04/2013 0.00.00	01/04/2013 22.00.00	22	5,55E-09	19,04	19,07	19,02	0,05	ALTA	16,20
5	5043	5066	29/04/2013 0.00.00	29/04/2013 23.00.00	23	4,96E-09	19,13	19,15	19,13	0,02	ALTA	6,20
35	3816	3844	08/03/2013 21.00.00	10/03/2013 1.00.00	28	2,27E-09	19,08	19,12	19,06	0,05	ALTA	10,60
7	5061	5067	29/04/2013 18.00.00	30/04/2013 0.00.00	6	4,94E-09	19,14	19,15	19,13	0,01	ALTA	0,00
17	9969	10001	20/11/2013 6.01.00	21/11/2013 14.01.00	32	4,81E-09	19,19	19,21	19,17	0,04	ALTA	7,20
16	9739	9759	10/11/2013 16.00.00	11/11/2013 12.00.00	20	3,41E-09	19,23	19,24	19,22	0,02	ALTA	0,20
61	11325	11336	15/01/2014 18.00.00	16/01/2014 5.00.00	11	5,67E-09	19,38	19,40	19,36	0,04	ALTA	9,20
53	399	422	17/10/2012 12.00.00	18/10/2012 11.00.00	23	1,49E-09	19,44	19,47	19,42	0,05	ALTA	0,00
45	4923	4946	24/04/2013 0.00.00	24/04/2013 23.00.00	23	3,71E-09	19,42	19,44	19,41	0,04	ALTA	0,00
49	12051	12074	15/02/2014 0,00,00	15/02/2014 23,00,00	23	6,48E-08	19,52	19,44	19,41	0,04	MEDIA	0,00
43	3723	3746	05/03/2013 0.00.00	05/03/2013 23.00.00	23	1,80E-09	19,64	19,65	19,63	0,02	MEDIA	0,00
46	5403	5426	14/05/2013 0.00.00	14/05/2013 23.00.00	23	4,32E-09	19,71	19,72	19,68	0,04	MEDIA	0,00
42	3051	3074	05/02/2013 0.00.00	05/02/2013 23.00.00	23	2,68E-09	19,73	19,75	19,72	0,02	MEDIA	0,00
6	4241	4289	26/03/2013 14.00.00	28/03/2013 14.00.00	48	3,85E-09	19,88	19,89	19,86	0,03	MEDIA	6,40
58	1881	1904	18/12/2012 6.00.00	19/12/2012 5.00.00	23	3,32E-09	19,70	19,72	19,68	0,04	MEDIA	0,00
40	2163	2186	30/12/2012 0.00.00	30/12/2012 23.00.00	23	2,91E-09	19,91	19,93	19,90	0,04	MEDIA	0,00
54	603	626	26/10/2012 0.00.00	26/10/2012 23.00.00	23	9,72E-10	20,00	20,01	19,99	0,02	MEDIA	26,40
39	2115	2138	28/12/2012 0.00.00	28/12/2012 23.00.00	23	3,08E-09	19,95	19,95	19,93	0,02	MEDIA	0,20
52	147	165	07/10/2012 0.00.00	07/10/2012 18.00.00	18	1,98E+01	19,79	19,81	19,76	0,04	MEDIA	0,20
22	4683	4730	14/04/2013 0.00.00	15/04/2013 23.00.00	47	4,73E-09	19,98	19,99	19,97	0,03	MEDIA	0,00
37	1203	1232	20/11/2012 0.00.00	21/11/2012 5.00.00	29	3,58E-09	19,98	20,00	19,97	0,04	MEDIA	0,00
63	11745	11828	02/02/2014 6,01,00	05/02/2014 17,00,00	83	7,78E-08	18,99	19,01	18,96	0,05	MEDIA	62,20
36	603	626	26/10/2012 0.00.00	26/10/2012 23.00.00	23	9,72E-10	20,00	20,01	19,99	0,02	MEDIA	26,40
47	9051	9098	13/10/2013 0.00.00	14/10/2013 23.00.00	47	2,31E-09	20,01	20,03	19,99	0,05	MEDIA	0,00
50	2955	2978	01/02/2013 0.00.00	01/02/2013 23.00.00	23	4,68E-09	20,02	20,03	20,01	0,02	MEDIA	0,00
14	9387	9410	27/10/2013 0.00.00	27/10/2013 23.00.00	23	2,14E-09	20,03	20,04	20,02	0,02	MEDIA	0,00
60	5907	5980	04/06/2013 0.00.00	07/06/2013 1.00.00	73	7,50E-09	20,05	20,10	20,06	0,04	MEDIA	17,00
15	9550	9565	02/11/2013 19.00.00	03/11/2013 10.01.00	15	2,33E-09	20,07	20,07	20,06	0,00	MEDIA	11,60
38	1275	1322	23/11/2012 0.00.00	24/11/2012 23.00.00	47	3,13E-09	20,05	20,07	20,03	0,04	MEDIA	0,00
8	5950	5981	05/06/2013 19.00.00	07/06/2013 2.00.00	31	6,64E-09	20,09	20,10	20,08	0,02	MEDIA	6,60
20	1755	1802	13/12/2012 0.00.00	14/12/2012 23.00.00	47	2,93E-09	20,14	20,15	20,12	0,03	MEDIA	0,00
3	3334	3381	16/02/2013 19.00.00	18/02/2013 18.00.00	47	1,99E-09	20,15	20,17	20,13	0,04	MEDIA	2,80
41	2283	2306	04/01/2013 0.00.00	04/01/2013 23.00.00	23	2,36E-09	20,07	20,07	20,05	0,02	MEDIA	0,00
2	2283	2306	04/01/2013 0.00.00	04/01/2013 23.00.00	23	2,36E-09	20,07	20,07	20,05	0,02	MEDIA	0,00

4	3430	3494	20/02/2013 19.00.00	23/02/2013 11.00.00	64	2,00E-09	20,20	20,22	20,18	0,04	MEDIA	3,00
21	3483	3626	23/02/2013 0.00.00	28/02/2013 23.00.00	143	2,04E-09	20,23	20,25	20,21	0,04	MEDIA	17,20
23	6555	6602	01/07/2013 0.00.00	02/07/2013 23.00.00	47	3,21E-09	20,36	20,37	20,35	0,02	MEDIA	0,00
24	6675	6722	06/07/2013 0.00.00	07/07/2013 23.00.00	47	1,06E-09	20,42	20,44	20,41	0,03	MEDIA	0,00
25	6891	7034	15/07/2013 0.00.00	20/07/2013 23.00.00	143	1,63E-09	20,48	20,51	20,46	0,04	MEDIA	0,00
26	7059	7106	22/07/2013 0.00.00	23/07/2013 23.00.00	47	1,22E-09	20,52	20,53	20,51	0,02	BASSA	4,20
34	10587	10706	16/12/2013 0.00.00	20/12/2013 23.00.00	119	2,31E-09	20,51	20,53	20,48	0,05	BASSA	0,20
9	7051	7167	21/07/2013 16.00.00	26/07/2013 12.00.00	116	1,28E-09	20,53	20,56	20,50	0,06	BASSA	4,40
18	10630	10807	17/12/2013 19.00.00	25/12/2013 4,01,00	177	2,03E-09	20,54	20,56	20,51	0,05	BASSA	3,20
27	7131	7250	25/07/2013 0.00.00	29/07/2013 23.00.00	119	1,43E-09	20,56	20,59	20,54	0,05	BASSA	41,00
10	7416	7518	05/08/2013 21.00.00	10/08/2013 3.00.00	102	1,09E-09	20,60	20,62	20,59	0,03	BASSA	8,00
28	7323	7634	02/08/2013 0.00.00	14/08/2013 23.00.00	311	1,07E-09	20,61	20,65	20,56	0,09	BASSA	21,80
29	7659	7706	16/08/2013 0.00.00	17/08/2013 23.00.00	47	1,05E-09	20,65	20,66	20,64	0,02	BASSA	0,00
11	7746	7791	19/08/2013 15.00.00	21/08/2013 12.00.00	45	8,47E-10	20,68	20,69	20,66	0,04	BASSA	12,00
30	7899	8042	26/08/2013 0.00.00	31/08/2013 23.00.00	143	9,65E-10	20,75	20,77	20,73	0,04	BASSA	19,00
31	8067	8282	02/09/2013 0.00.00	10/09/2013 23.00.00	215	8,42E-10	20,79	20,81	20,77	0,05	BASSA	35,80
32	8331	8570	13/09/2013 0.00.00	22/09/2013 23.00.00	239	1,02E-09	20,82	20,83	20,80	0,04	BASSA	7,00
12	8513	8607	20/09/2013 14.00.00	24/09/2013 12.00.00	94	9,47E-10	20,83	20,84	20,81	0,03	BASSA	0,20
13	8642	8738	25/09/2013 23.00.00	29/09/2013 23.00.00	96	9,50E-10	20,85	20,86	20,83	0,03	BASSA	26,80
33	8763	8978	01/10/2013 0.00.00	09/10/2013 23.00.00	215	8,31E-10	20,89	20,92	20,86	0,05	BASSA	24,00

= su 2 cm, 24 ore  
 = su 5 cm, 24 ore  
 = su 5 cm 6 ore

TABELLA 5.2 : Serie estrapolate e relative proprietà

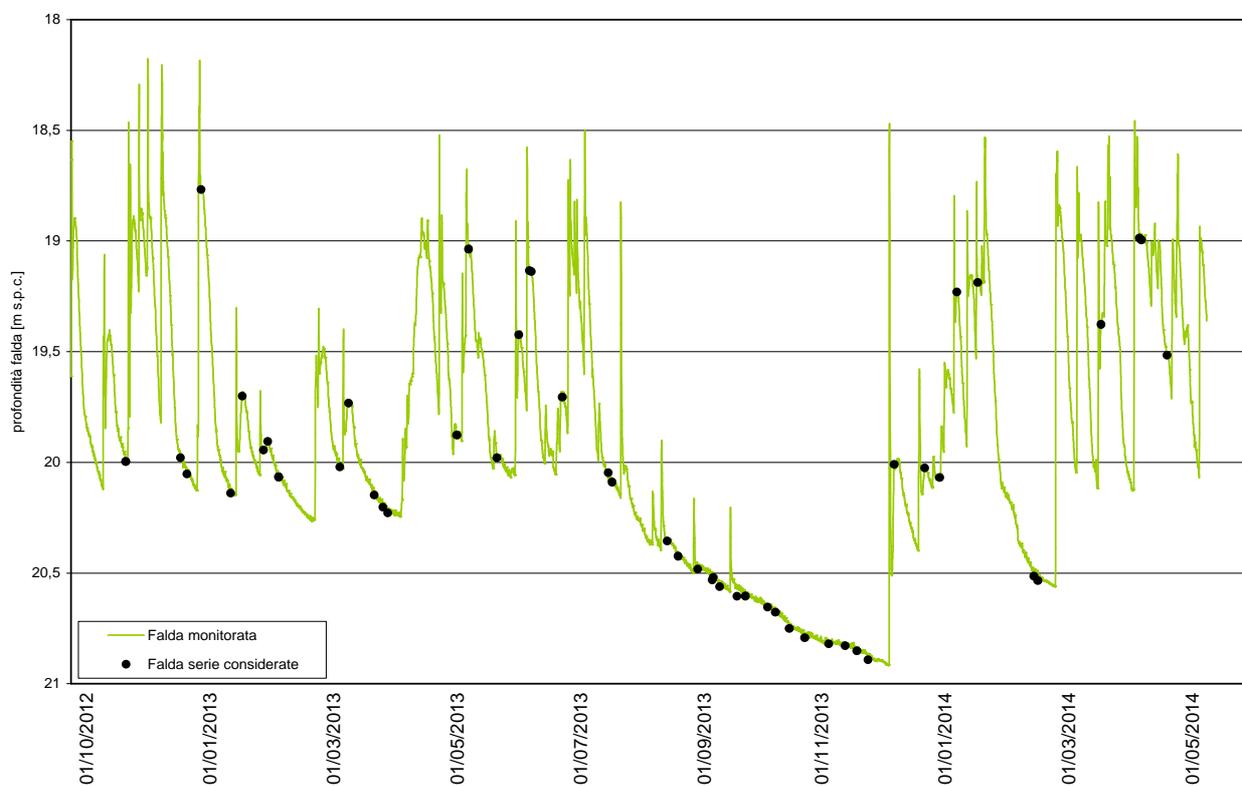


FIGURA 5.7: Diagramma temporale del livello di falda e della posizione delle serie estrapolate

Si procede ora ad applicare il modello di Bingham, ricercando un valore di viscosità caratteristico in base al livello di falda, per ogni serie considerata. Si esegue quindi una regressione logaritmica per valutare la bontà dei risultati.

SERIE	Vel media (m/s)	Prof. media falda (m)	$\eta$ (kPa*s)	Falda	Pw (kPa)	R/ins	1-R/ins	log(1-R/ins)	log(v)
1	6,22E-09	18,77	9,06E+09	ALTA	74,5	0,8225	0,1775	-0,751	-8,206
57	6,28E-09	18,77	8,97E+09	ALTA	74,4	0,8225	0,1775	-0,751	-8,202
56	2,26E-09	18,87	2,47E+10	ALTA	73,6	0,8243	0,1757	-0,755	-8,646
51	1,40E-09	18,91	3,96E+10	ALTA	73,2	0,8250	0,1750	-0,757	-8,853
55	1,71E-09	18,92	3,25E+10	ALTA	73,1	0,8253	0,1747	-0,758	-8,767
59	2,68E-09	18,97	2,06E+10	ALTA	72,6	0,8261	0,1739	-0,760	-8,572
48	3,28E-09	18,99	1,68E+10	ALTA	72,5	0,8264	0,1736	-0,760	-8,485
19	8,02E-08	19,00	6,87E+08	ALTA	72,4	0,8265	0,1735	-0,761	-7,096
44	5,55E-09	19,04	9,87E+09	ALTA	72,0	0,8273	0,1727	-0,763	-8,255
5	2,27E-09	19,08	2,41E+10	ALTA	71,6	0,8281	0,1719	-0,765	-8,645
35	4,96E-09	19,13	1,09E+10	ALTA	71,2	0,8290	0,1710	-0,767	-8,304
7	4,94E-09	19,14	1,10E+10	ALTA	71,1	0,8291	0,1709	-0,767	-8,306
17	4,81E-09	19,19	1,12E+10	ALTA	70,7	0,8300	0,1700	-0,770	-8,318
16	3,41E-09	19,23	1,58E+10	ALTA	70,3	0,8308	0,1692	-0,772	-8,467
61	5,19E-09	19,35	1,02E+10	ALTA	69,2	0,8329	0,1671	-0,777	-8,285
53	1,53E-09	19,44	3,42E+10	ALTA	68,4	0,8346	0,1654	-0,781	-8,814
45	3,71E-09	19,42	1,42E+10	ALTA	68,5	0,8342	0,1658	-0,781	-8,431
49	6,48E-08	19,52	6,77E+01	MEDIA	67,7	0,8359	0,1641	-0,785	-7,188
43	1,80E-09	19,64	2,86E+10	MEDIA	66,6	0,8381	0,1619	-0,791	-8,745
46	4,32E-09	19,71	1,18E+10	MEDIA	66,0	0,8393	0,1607	-0,794	-8,364
42	2,68E-09	19,73	1,90E+10	MEDIA	65,7	0,8398	0,1602	-0,795	-8,572
6	3,85E-09	19,88	1,30E+10	MEDIA	64,4	0,8424	0,1576	-0,802	-8,414
58	2,93E-09	19,89	1,70E+10	MEDIA	64,3	0,8426	0,1574	-0,803	-8,533
40	2,91E-09	19,91	1,71E+10	MEDIA	64,2	0,8429	0,1571	-0,804	-8,535
54	1,10E-09	19,93	4,53E+10	MEDIA	64,0	0,8433	0,1567	-0,805	-8,960
39	3,08E-09	19,95	1,61E+10	MEDIA	63,8	0,8436	0,1564	-0,806	-8,512
52	9,95E-10	19,95	4,99E+10	MEDIA	63,7	0,8438	0,1562	-0,806	-9,002
22	4,73E-09	19,98	1,05E+10	MEDIA	63,5	0,8442	0,1558	-0,807	-8,325
37	3,57E-09	19,99	1,38E+10	MEDIA	63,4	0,8444	0,1556	-0,808	-8,448
63	7,79E-08	18,99	7,07E+08	MEDIA	72,5	0,8264	0,1736	-0,761	-7,109
36	9,72E-10	20,00	5,08E+10	MEDIA	63,3	0,8445	0,1555	-0,808	-9,013
47	2,31E-09	20,01	2,13E+10	MEDIA	63,2	0,8448	0,1552	-0,809	-8,636
50	4,68E-09	20,02	1,05E+10	MEDIA	63,1	0,8450	0,1550	-0,810	-8,329
14	2,09E-09	20,06	2,35E+10	MEDIA	62,7	0,8457	0,1543	-0,812	-8,680
60	6,94E-09	20,07	7,05E+09	MEDIA	62,7	0,8459	0,1541	-0,812	-8,159
15	2,33E-09	20,07	2,10E+10	MEDIA	62,7	0,8458	0,1542	-0,812	-8,633
38	2,72E-09	20,08	1,79E+10	MEDIA	62,6	0,8460	0,1540	-0,812	-8,565
8	6,64E-09	20,09	7,35E+09	MEDIA	62,5	0,8462	0,1538	-0,813	-8,178
20	2,93E-09	20,14	1,65E+10	MEDIA	62,1	0,8471	0,1529	-0,816	-8,533
3	1,99E-09	20,15	2,44E+10	MEDIA	62,0	0,8473	0,1527	-0,816	-8,701

41	2,33E-09	20,18	2,07E+10	MEDIA	61,7	0,8477	0,1523	-0,817	-8,632
2	2,30E-09	20,20	2,10E+10	MEDIA	61,5	0,8481	0,1519	-0,819	-8,639
4	2,00E-09	20,20	2,41E+10	MEDIA	61,5	0,8482	0,1518	-0,819	-8,699
21	2,04E-09	20,23	2,36E+10	MEDIA	61,3	0,8487	0,1513	-0,820	-8,691
23	3,21E-09	20,36	1,47E+10	MEDIA	60,1	0,8510	0,1490	-0,827	-8,494
24	1,06E-09	20,42	4,43E+10	MEDIA	59,5	0,8522	0,1478	-0,830	-8,975
25	1,63E-09	20,48	2,85E+10	MEDIA	58,9	0,8533	0,1467	-0,834	-8,787
26	1,22E-09	20,52	3,79E+10	BASSA	58,6	0,8540	0,1460	-0,836	-8,913
34	1,99E-09	20,53	2,33E+10	BASSA	58,5	0,8541	0,1459	-0,836	-8,702
9	1,28E-09	20,53	3,61E+10	BASSA	58,5	0,8542	0,1458	-0,836	-8,892
18	2,03E-09	20,54	2,28E+10	BASSA	58,5	0,8542	0,1458	-0,836	-8,693
27	1,43E-09	20,56	3,22E+10	BASSA	58,2	0,8547	0,1453	-0,838	-8,844
10	1,09E-09	20,60	4,22E+10	BASSA	57,8	0,8555	0,1445	-0,840	-8,964
28	1,07E-09	20,61	4,30E+10	BASSA	57,8	0,8555	0,1445	-0,840	-8,972
29	1,05E-09	20,65	4,35E+10	BASSA	57,4	0,8563	0,1437	-0,843	-8,979
11	8,47E-10	20,68	5,37E+10	BASSA	57,2	0,8568	0,1432	-0,844	-9,072
30	9,65E-10	20,75	4,72E+10	BASSA	56,5	0,8581	0,1419	-0,848	-9,015
31	8,42E-10	20,79	5,32E+10	BASSA	56,1	0,8588	0,1412	-0,850	-9,074
32	9,97E-10	20,83	4,47E+10	BASSA	55,8	0,8595	0,1405	-0,852	-9,001
12	9,47E-10	20,83	4,71E+10	BASSA	55,8	0,8595	0,1405	-0,852	-9,024
13	8,90E-10	20,88	4,98E+10	BASSA	55,4	0,8604	0,1396	-0,855	-9,051
33	8,31E-10	20,89	5,32E+10	BASSA	55,2	0,8606	0,1394	-0,856	-9,081

TABELLA 5.3 : Serie estrapolate e calcolo della regressione lineare

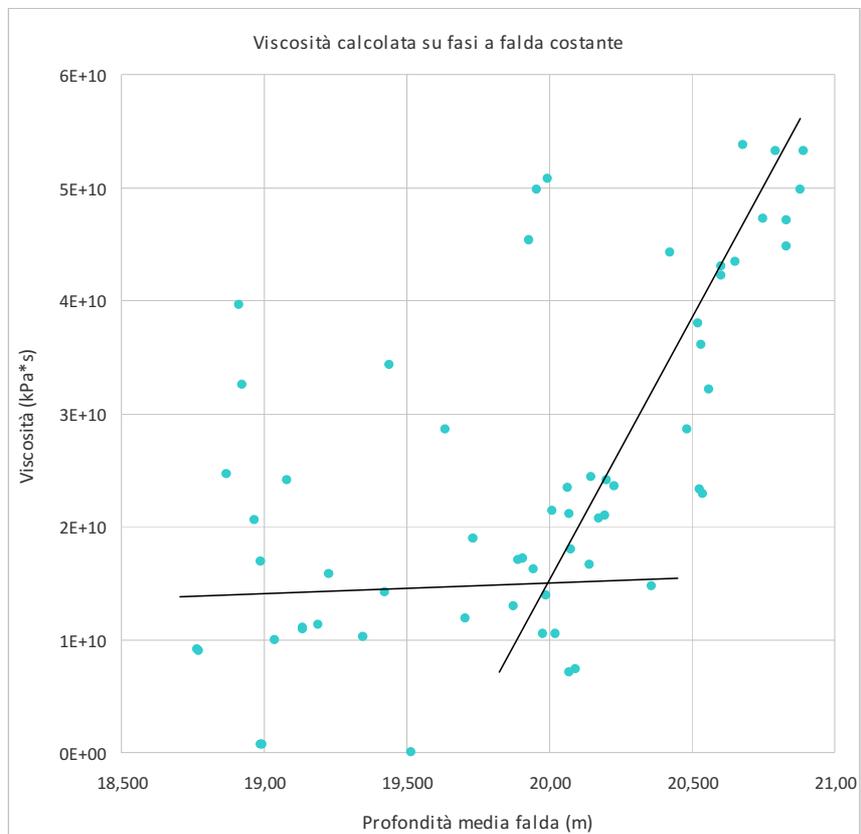


FIGURA 5.8 : Regressione lineare dei valori di viscosità e profondità di falda ottenuti dall'applicazione del modello di Bingham

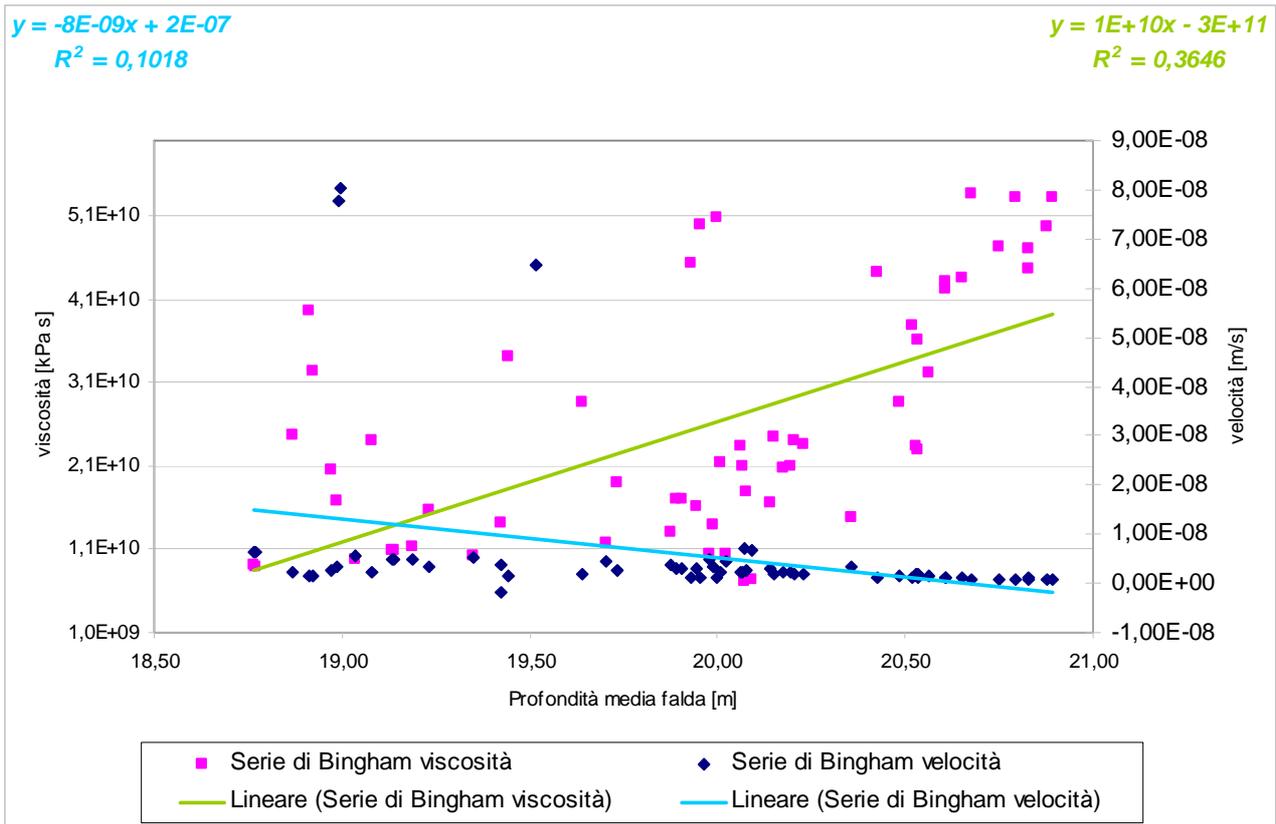


FIGURA 5.9 : Regressione lineare dei valori di viscosità e profondità di falda confrontata con la regressione lineare tra i valori di velocità e profondità di falda ottenuti dall'applicazione del modello di Bingham

Si evince dai risultati ottenuti, dagli andamenti dei grafici, e dal coefficiente di regressione lineare, sempre basso, che il modello di Bingham non riesce a rappresentare una correlazione stabile tra i valori ricercati a partire dal livello di falda. Dalla figura 5.9 si denota come sia la regressione lineare tra la quota di falda e la viscosità e tra la quota di falda e la velocità di spostamento della frana sia caratterizzata da coefficienti di regressione rispettivamente uguali ad  $R^2=0.36$  e  $R^2=0.1$ , non appare quindi una relazione tra i parametri considerati. Si conferma però il fatto (figura 5.8) che la viscosità, al di fuori di punti molto lontani dall'andamento comune, si alza con l'abbassamento del livello di falda, andamento destro del grafico di regressione presentato. Dalle due rette tracciate è interessante notare la tendenza allo sviluppo di due relazioni lineari distinte alla profondità della falda corrispondente a 20 metri sotto il piano campagna. Tale andamento potrebbe far pensare di applicare tale modello a soglie di profondità di falda ben definite.

## 5.2 Modello viscoso di Vulliet e Hutter

Un altro modello proposto è quello Vulliet e Hutter, basata su una legge potenziale che lega la posizione della falda alla velocità viscosa. Vuillet ha proposto che, in generale, la velocità  $v$  sia espressa come:

$$v = F(\sigma'_n; \tau) \quad (5.8)$$

essendo  $F$  una funzione dello sforzo normale efficace  $\sigma'_n$  e della tensione di taglio  $\tau$  agenti sulla superficie di scivolamento.

Questa funzione può assumere molte forme, tra cui una formulazione potenziale:

$$F = a \left( \frac{\tau}{\sigma'_n \tan \phi'} \right)^n \quad (5.9)$$

La non linearità di  $v$  con  $\tau$  è confermata da osservazioni sul campo. Hutchinson (1988) ha citato due casi di frane riattivate (Sandnes in Norvegia e Sandgate in Inghilterra) per le quali i movimenti diventavano trascurabili quando il fattore di sicurezza supera il valore di 1.05. Dati ancora più significativi sono riportati da Bertini et al. (1986) e Cartier e Pouget (1988), i quali fecero dettagliate osservazioni su alcuni scivolamenti lungo superfici di taglio pre-esistenti (frane di San Martino e Salledes). Se, nel caso di San Martino, i movimenti diventavano insignificanti con un fattore di sicurezza maggiore di 1.05, come nel caso riportato da Hutchinson, nel caso di Salledes i movimenti erano ancora osservati ad un fattore di sicurezza di 1.1-1.15: ciò dimostra che anche la risposta del movimento della frana ad un cambio di pressione interstiziale non è esattamente la stessa quando le pressioni interstiziali aumentano o diminuiscono. La velocità di spostamento dipende da molti fattori, compresi: la geometria locale della frana e del sottostante pendio, le tensioni totali e le pressioni interstiziali indotte dalla spinta esercitata dalle masse più alte (se ci sono), la velocità di dissipazione della pressione interstiziale che consegue a tali cambiamenti e le fluttuazioni stagionali del livello di acque sotterranee. Il risultato è una velocità di spostamento altamente variabile in termini di spazio e tempo, e questi termini sono estremamente difficili da predire. Considerando i profili ottenuti da misure inclinometriche nei casi analizzati, i movimenti locali spesso sembrano essere del tipo blocco a blocco, con piccole tensioni nel corpo della frana e grandi distorsioni di taglio alla base. Tuttavia, in alcuni casi, sono stati osservati movimenti di tipo visco-plastico nel corpo della frana.

La forza di taglio mobilizzata nella fascia di taglio, alla base della colata di terra, è quindi la forza residua di taglio. In tale modello la velocità  $v$  è quindi valutata sulla base dall'eccesso di tensione tangenziale  $\tau - \tau_0$ , essendo  $\tau_0$  la resistenza residua. Questo modello offre il vantaggio di non richiedere un calcolo dell'accelerazione in quanto la formula lega direttamente la velocità all'eccesso di tensione tangenziale.

$$v = A \left( \frac{\tau}{\tau - \tau_0} \right)^{-x} \quad \text{per } \tau > \tau_0 \quad (5.10)$$

dove A e x sono parametri propri del materiale che possono essere calibrati sulla base dei dati acquisiti con un monitoraggio.

Il termine  $\tau - \tau_0$  corrisponde alla componente viscosa  $\tau_v$  e l'espressione potenziale può essere riscritta come segue:

$$\tau_v(\text{power}) = \tau \left( \frac{v}{A} \right)^{1/x} \quad (5.11)$$

### 5.2.1 Correlazione precipitazioni - falda – viscosità

A partire dai dati del pendio precedentemente ipotizzati (Tabella 5.1), il modello in esame è stato applicato, mediante l'ausilio di un foglio di calcolo, alle serie di dati precedentemente estratte (Tabella 5.2). Il procedimento di calcolo continua attraverso i seguenti step:

- si calcola la pressione dell'acqua interstiziale (pore water pressure) che non si misura in modo diretto, ma viene stimata dalle letture di profondità del livello di falda. Assumendo un superficie di falda parallela a quella della frana ottengo i valori per ogni dato orario mediante la seguente formula:

$$p_w = \gamma_w \cos^2 \alpha h = \gamma_w \cos^2 \alpha (l - Dw) \quad (5.12)$$

Dove Dw è la profondità del livello di falda.

- Si determina il rapporto tra taglio mobilitato e resistenza residua (sempre minore di 1):

$$R = \frac{W_{\parallel}}{(W_{\perp} - p_w) \tan \phi} \quad (5.13)$$

Ricordiamo che:

$$\sigma'_n = W_{\perp} - p_w \quad \sigma'_n \tan \phi = \tau - \tau_0 = \tau_v \quad (5.14) (5.15)$$

- Si calcola quindi per ogni valore orario del periodo monitorato il valore di velocità dato dal modello:

$$v = \frac{\tau}{\tau_{fr}} * A * n \quad (5.16)$$

Dove  $A$  e  $n$  sono coefficienti ottenuti dalla calibrazione del modello di Vulliet, prendendo gli intervalli di falda costante (le serie ottenute precedentemente).

I valori dei coefficienti sono pari a:

$$A=5e-7 ; n=65$$

SERIE	Durata (ore)	Vel media (m/s)	Prof. Media falda (m)	Falda max (m)	Falda min (m)	Variazione max (m)	Falda	Pioggia cumulata (mm)	Pw (kPa)	R	log v	log R
1	29	6,22E-09	18,77	18,79	18,75	0,04	ALTA	4,40	74,5	0,94885923	-8,206382334	-0,022798214
2	23	2,36E-09	20,07	20,07	20,05	0,02	MEDIA	0,00	62,7	0,922680651	-8,627540288	-0,034948587
3	47	1,99E-09	20,15	20,17	20,13	0,04	MEDIA	2,80	62,0	0,921062903	-8,701353064	-0,035710709
4	64	2,00E-09	20,20	20,22	20,18	0,04	MEDIA	3,00	61,5	0,920006559	-8,699232782	-0,036209076
5	23	4,96E-09	19,13	19,15	19,13	0,02	ALTA	6,20	71,2	0,941332499	-8,304335418	-0,026256947
6	48	3,85E-09	19,88	19,89	19,86	0,03	MEDIA	6,40	64,4	0,926392325	-8,414206532	-0,033205052
7	6	4,94E-09	19,14	19,15	19,13	0,01	ALTA	0,00	71,1	0,941254046	-8,306197109	-0,026293144
8	31	6,64E-09	20,09	20,10	20,08	0,02	MEDIA	6,60	62,5	0,922216272	-8,177749425	-0,035167219
9	116	1,28E-09	20,53	20,56	20,50	0,06	BASSA	4,40	58,5	0,913626169	-8,891929233	-0,039231469
10	102	1,09E-09	20,60	20,62	20,59	0,03	BASSA	8,00	57,8	0,912237907	-8,963594066	-0,039891885
11	45	8,47E-10	20,68	20,69	20,66	0,04	BASSA	12,00	57,2	0,910846892	-9,072136698	-0,040554619
12	94	9,47E-10	20,83	20,84	20,81	0,03	BASSA	0,20	55,8	0,907960255	-9,023723487	-0,041933162
13	96	9,50E-10	20,85	20,86	20,83	0,03	BASSA	26,80	55,6	0,907532736	-9,02228324	-0,0421377
14	23	2,14E-09	20,03	20,04	20,02	0,02	MEDIA	0,00	63,1	0,923473657	-8,670290884	-0,034575489
15	15	2,33E-09	20,07	20,07	20,06	0,00	MEDIA	11,60	62,7	0,922642262	-8,633265503	-0,034966656
16	20	3,41E-09	19,23	19,24	19,22	0,02	ALTA	0,20	70,3	0,939366366	-8,467180301	-0,027164994
17	32	4,81E-09	19,19	19,21	19,17	0,04	ALTA	7,20	70,7	0,940229632	-8,318170379	-0,026766066
18	177	2,03E-09	20,54	20,56	20,51	0,05	BASSA	3,20	58,5	0,913570403	-8,693156726	-0,039257979
19	26	8,02E-08	19,00	19,01	18,97	0,04	ALTA	17,60	72,4	0,944164795	-7,095965279	-0,024952197
20	47	2,93E-09	20,14	20,15	20,12	0,03	MEDIA	0,00	62,1	0,921249339	-8,53260162	-0,035622811
21	143	2,04E-09	20,23	20,25	20,21	0,04	MEDIA	17,20	61,3	0,919517335	-8,691381709	-0,036440079
22	47	4,73E-09	19,98	19,99	19,97	0,03	MEDIA	0,00	63,5	0,924395088	-8,325442839	-0,034142371
23	47	3,21E-09	20,36	20,37	20,35	0,02	MEDIA	0,00	60,1	0,917032754	-8,493936906	-0,037615152
24	47	1,06E-09	20,42	20,44	20,41	0,03	MEDIA	0,00	59,5	0,915721467	-8,974967454	-0,038236605
25	143	1,63E-09	20,48	20,51	20,46	0,04	MEDIA	0,00	58,9	0,914578551	-8,787188654	-0,038778988
26	47	1,22E-09	20,52	20,53	20,51	0,02	BASSA	4,20	58,6	0,913859499	-8,912984055	-0,039120569
27	119	1,43E-09	20,56	20,59	20,54	0,05	BASSA	41,00	58,2	0,913052597	-8,843651655	-0,039504204
28	311	1,07E-09	20,61	20,65	20,56	0,09	BASSA	21,80	57,8	0,912228317	-8,971972531	-0,039896451
29	47	1,05E-09	20,65	20,66	20,64	0,02	BASSA	0,00	57,4	0,911305348	-8,979170743	-0,040336081
30	143	9,65E-10	20,75	20,77	20,73	0,04	BASSA	19,00	56,5	0,909435091	-9,015312098	-0,041228293
31	215	8,42E-10	20,79	20,81	20,77	0,05	BASSA	35,80	56,1	0,908654647	-9,074451219	-0,041601148
32	239	1,02E-09	20,82	20,83	20,80	0,04	BASSA	7,00	55,9	0,908115912	-8,990393322	-0,041858715
33	215	8,31E-10	20,89	20,92	20,86	0,05	BASSA	24,00	55,2	0,906750713	-9,080500438	-0,042512094
34	119	2,31E-09	20,51	20,53	20,48	0,05	BASSA	0,20	58,7	0,913987803	-8,635643959	-0,0390596
36	23	9,72E-10	20,00	20,01	19,99	0,02	MEDIA	26,40	63,3	0,924045957	-9,012505511	-0,034306429
37	29	3,58E-09	19,98	20,00	19,97	0,04	MEDIA	0,00	63,5	0,924374264	-8,445813723	-0,034152154
38	47	3,13E-09	20,05	20,07	20,03	0,04	MEDIA	0,00	62,8	0,922934829	-8,503779606	-0,034828965
39	23	3,08E-09	19,95	19,95	19,93	0,02	MEDIA	0,20	63,8	0,92506048	-8,511800127	-0,033829873
40	23	2,91E-09	19,91	19,93	19,90	0,04	MEDIA	0,00	64,2	0,925846617	-8,535471963	-0,033460956
41	23	2,36E-09	20,07	20,07	20,05	0,02	MEDIA	0,00	62,7	0,922680651	-8,627540288	-0,034948587

42	23	2,68E-09	19,73	19,75	19,72	0,02	MEDIA	0,00	65,7	0,929269353	-8,571909216	-0,031858386
44	22	5,55E-09	19,04	19,07	19,02	0,05	ALTA	16,20	72,0	0,943317613	-8,255492716	-0,025342057
45	23	3,71E-09	19,42	19,44	19,41	0,04	ALTA	0,00	68,5	0,935453839	-8,430727211	-0,028977638
46	23	4,32E-09	19,71	19,72	19,68	0,04	MEDIA	0,00	66,0	0,929806555	-8,364363343	-0,031607397
47	47	2,31E-09	20,01	20,03	19,99	0,05	MEDIA	0,00	63,2	0,923796972	-8,636258383	-0,034423466
49	23	6,48E-08	19,52	19,44	19,41	0,04	MEDIA	0,00	67,7	0,93360032	-7,188404274	-0,029839008
50	23	4,68E-09	20,02	20,03	20,01	0,02	MEDIA	0,00	63,1	0,923568581	-8,329495217	-0,03453085
54	23	9,72E-10	20,00	20,01	19,99	0,02	MEDIA	26,40	63,3	0,924045957	-9,012505511	-0,034306429
58	23	3,32E-09	19,70	19,72	19,68	0,04	MEDIA	0,00	66,0	0,929892001	-8,479448586	-0,031567488
60	73	7,50E-09	20,05	20,10	20,06	0,04	MEDIA	17,00	62,9	0,92305453	-8,124866528	-0,034772642
61	11	5,67E-09	19,38	19,40	19,36	0,04	ALTA	9,20	69,0	0,936398504	-8,246165759	-0,028539289
63	83	7,78E-08	18,99	19,01	18,96	0,05	MEDIA	62,20	72,5	0,944322725	-7,109249694	-0,024879559

TABELLA 5.4 : Applicazione del modello di Vulliet e dati ricavati per la regressione lineare

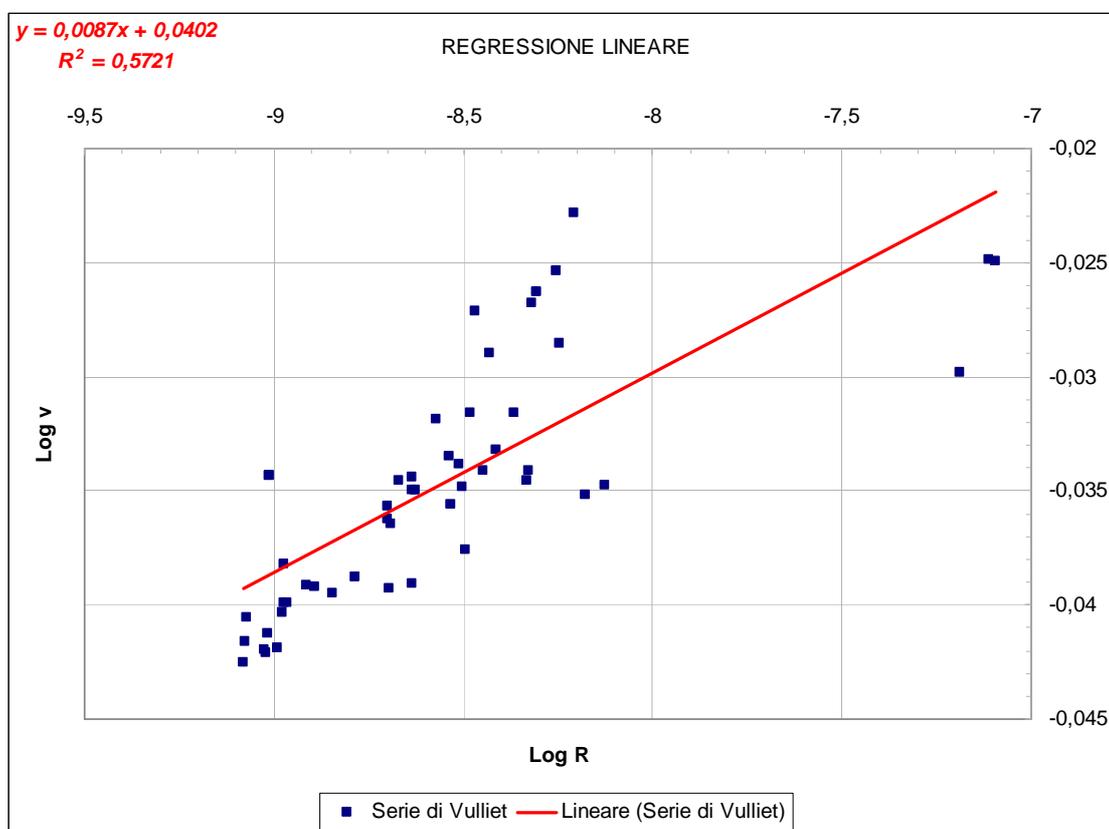


FIGURA 5.10 : Regressione lineare dei valori ottenuti dall'applicazione del modello di Vulliet

- Infine si ottiene lo spostamento cumulato [cm] e la velocità di spostamento [cm/y].

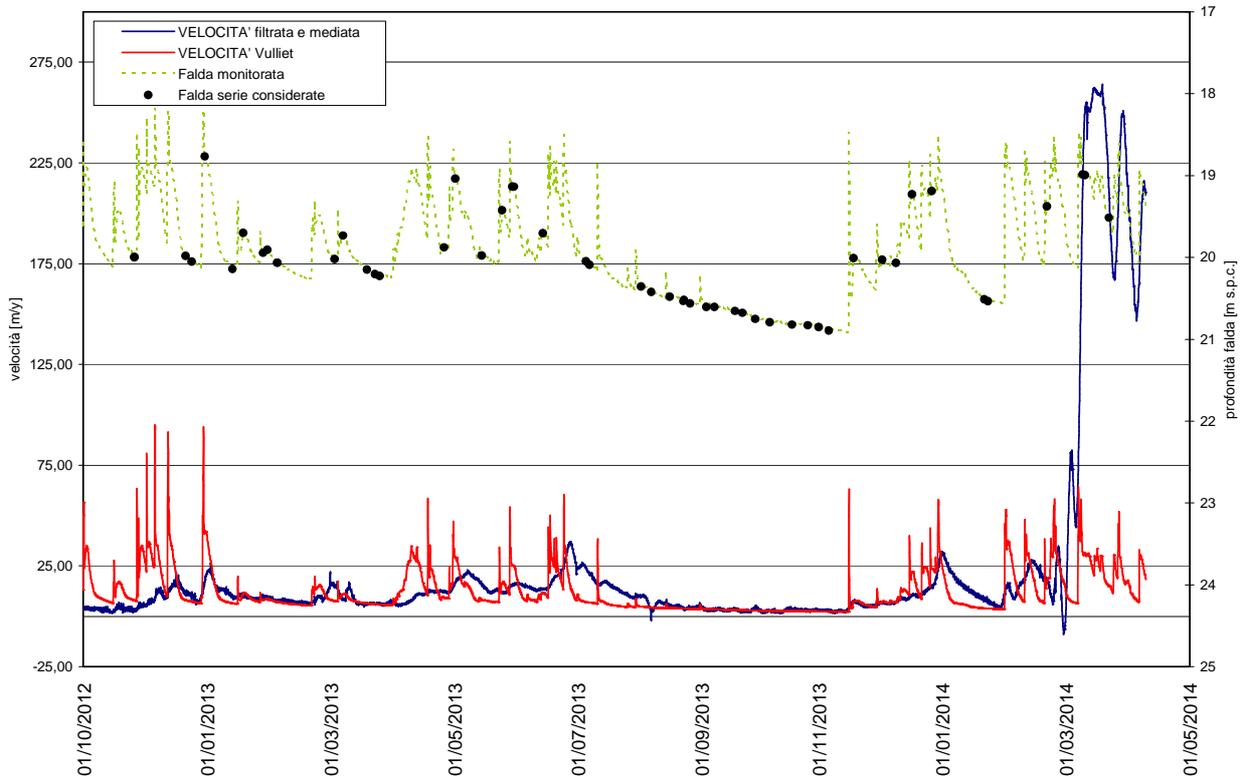


FIGURA 5.12 : Risultati dal modello di Vulliet

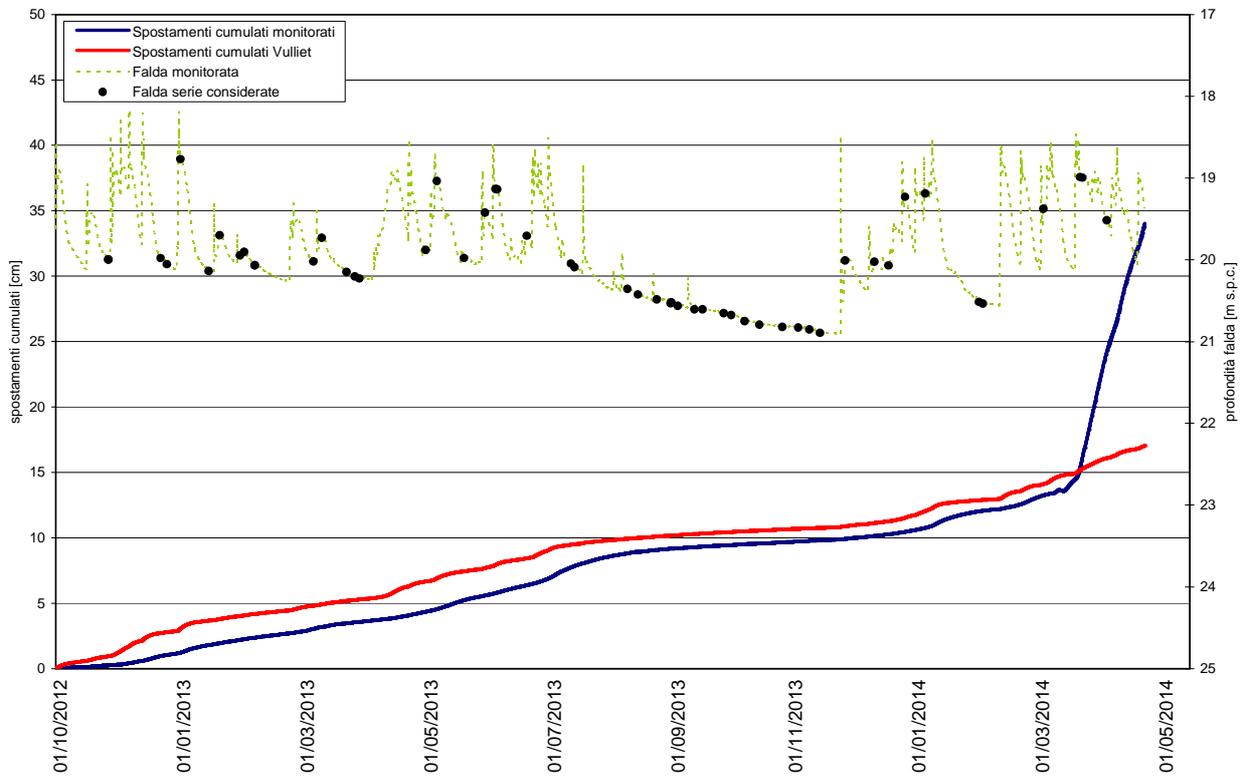


FIGURA 5.13 : Risultati dal modello di Vulliet

Dai risultati ottenuti (Figura 5.12) si evince che Vuillet prevede velocità troppo alte nelle fasi di picco della falda (fase di crescita della falda immediatamente successive all'evento di pioggia) e nelle prime fasi di svuotamento del pendio: sembra invece cogliere abbastanza bene le velocità nei periodi caratterizzati da valori molto bassi della falda.

Nel caso di precipitazioni si notano dei picchi amplificati totalmente fuori misura, e dal comportamento anomalo rispetto all'andamento della velocità reale. Anche in fase di discesa della falda, a seguito del termine delle precipitazioni, l'andamento di velocità reale segue in modo gradualmente discendente quello della falda, al contrario la velocità ricavata dal modello di Vuillet decade rapidamente.

I risultati possono essere accettati solo in parte osservando l'andamento generale degli spostamenti cumulati, ove l'errore cumulato tende a compensarsi.

Come si evince dalla Figura 5.13, gli spostamenti trovati da modello risultano maggiori di quello monitorato, tale comportamento è probabilmente il risultato dell'influenza della falda nel modello che porta a considerare variazioni di velocità molto alte nei picchi di precipitazioni. L'andamento generale, seppur traslato verso l'alto, segue l'andamento monitorato.

Il modello risulta comunque dare più informazioni, dimostrando una maggiore applicabilità, del precedente modello alla Bingham. La ricerca di una funzione di velocità che elimini le singolarità date dai picchi potrebbe portare a più soddisfacenti risultati. Inoltre sarebbe opportuna una migliore calibrazione del modello tramite un maggiore numero di dati elaborati su più serie ricavate nell'arco temporale.

Altrettanto importante sarebbe estendere il monitoraggio in sito su più punti del settore per un futuro arco temporale. Tutto ciò può sicuramente portare ad avere più soddisfacenti risultati prossimi al comportamento reale del settore Pian de Cice.

## 6. ANALISI BIDIMENSIONALE DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO CON PROGRAMMA AGLI ELEMENTI FINITI

Al fine di comprendere a pieno il comportamento idrologico del versante di frana nel settore Pian de Cice si è deciso di eseguire una analisi di filtrazione mediante codice di calcolo agli elementi finiti, in grado di simulare il comportamento della falda acquifera e del flusso di filtrazione nel caso di assenza di precipitazione o durante un evento piovoso in modo da meglio definire la relazione esistente tra piovosità, livello di falda e movimento dei versanti. In particolare si vuole comprendere se è possibile simulare le osservazioni fatte con il monitoraggio.

Dato che molte caratteristiche del versante non sono note è stato necessario ipotizzare molti parametri geotecnici del terreno come la permeabilità dei diversi strati litologici e le relative funzioni di saturazione mantenendo nel modello delle condizioni al contorno note.

Per l'analisi dell'effetto di una precipitazione sul regime di filtrazione e sulla variazione della quota di falda si è considerato l'evento piovoso verificatosi tra il 22 novembre e il 19 dicembre 2012 (Figura 6.1).

L'evento preso in considerazione risulta eccezionalmente interessante data la cadenza particolarmente isolata da altri rilevanti eventi piovoso ad esso antecedenti e seguenti. In particolare risulta che nell'arco temporale considerato, la precipitazione si concentra in 4 giorni, tra il 26 e il 29 novembre 2012, con un picco di precipitazione al terzo giorno.

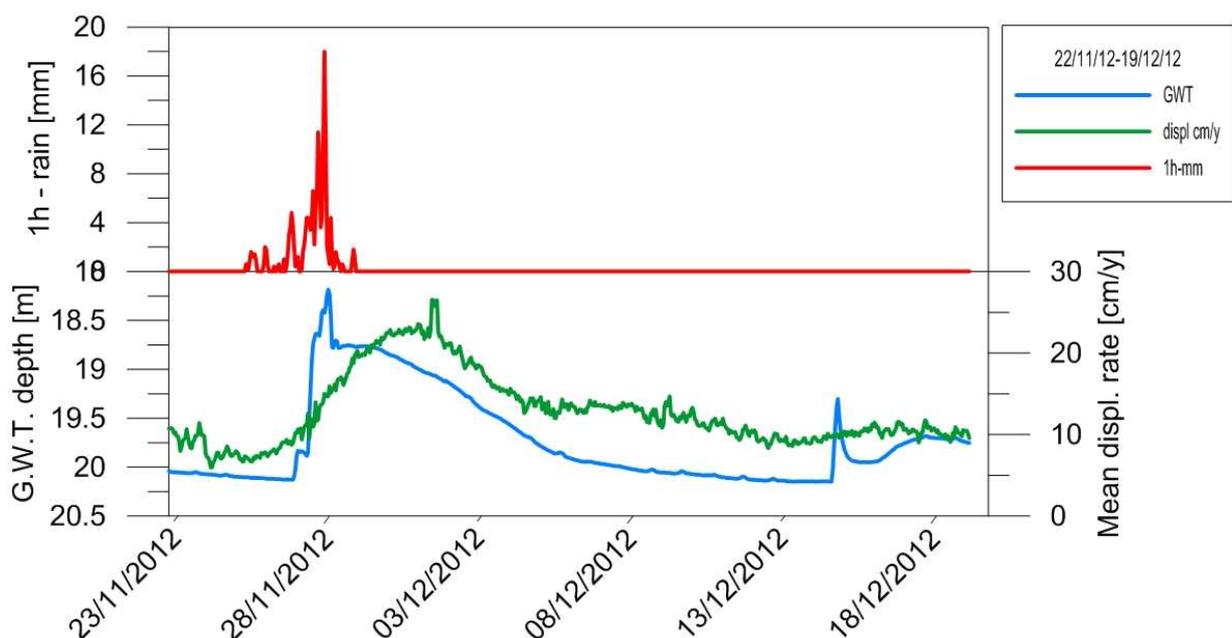


FIGURA 6.1 : Confronto tra i dati monitorati nel periodo 22/11/12 – 19/12/12

Dal confronto degli andamenti è possibile osservare una correlazione tra le precipitazioni ed il livello di falda, evidenziato dalla corrispondenza dei picchi massimi della falda quasi in corrispondenza, se non per un lieve ritardo, dei picchi massimi delle precipitazioni.

Il livello di riposo può essere fissato a 20 m s.p.c., infatti quando le precipitazioni si esauriscono, la falda scende a tale quota fino al successivo evento piovoso. Il livello della falda, successivamente al picco massimo di precipitazione, presenta un andamento graduale fino alla quota di 20 m sotto il piano campagna che si sviluppa in circa 12 – 13 giorni, per effetto del comportamento permeabile del terreno il quale genera un moto di filtrazione tra gli strati di Flysch alterato e la morena superficiale, ove si localizza la zona di taglio della frana.

## 6.1 Cenni teorici sui moti di filtrazione nei terreni

Il moto di un fluido viscoso, attraverso un mezzo poroso saturo, avviene nei meati lasciati liberi dalle particelle solide. Il regime idraulico è di solito laminare ed il campo del vettore velocità è conservativo ammettendo come potenziale la quota piezometriche  $h$ .

Nel 1856, H. Darcy provò sperimentalmente che in un acquifero teorico di sezione  $S$  (poroso, continuo, omogeneo, isotropo e poggiante su un substrato impermeabile orizzontale) nel quale la falda defluisce in regime laminare, la portata  $Q$  è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'acquifero e direttamente proporzionale alla perdita di carico piezometrico ( $\Delta h$ ):

$$Q = K_{sat} S \frac{\Delta h}{l} \quad (6.1)$$

Dove  $K_{sat}$  (m/s) è un coefficiente di proporzionalità legato alle caratteristiche dell'acquifero.

Un fluido si muove quando nel sistema sono presenti gradienti di potenziali.

Con approccio termodinamico il potenziale si definisce come la differenza di energia libera specifica tra l'acqua presente nel suolo e quella nella condizione standard di riferimento (energia posseduta da una quantità unitaria di acqua pura, libera).

Il potenziale totale ( $\Phi$ ) si può considerare come somma di tre componenti:

$$\Phi = \Phi_g + \Phi_t + \Phi_p \quad (6.2)$$

In cui:

$\Phi_g$  = potenziale gravitazionale (dovuto agli effetti delle differenze di quota sullo stato energetico dell'acqua).

$\Phi_t$  = potenziale osmotico (dovuto agli eventuali soluti disciolti)

$\Phi_p$  = potenziale di pressione (comprende tutte le azioni che si esercitano sull'acqua nel suolo, tiene conto, quindi, dei legami con la matrice solida, della curvatura dei menischi acqua – aria, del

peso dell'ammasso poroso sovrastante, della pressione della fase gassosa presente nell'ammasso poroso).

Il flusso dell'acqua  $q_w$  attraverso un terreno non saturo in condizioni isoterme si definisce attraverso l'equazione di Darcy generalizzata (Bear, 1972):

$$q_w = -k_w \nabla \Phi \quad (6.3)$$

in cui:

$k_w$  è la conducibilità idraulica per un terreno parzialmente saturo;

$\nabla \Phi$  è il gradiente del potenziale totale.

Il flusso è sempre riferito all'intera sezione ortogonale al moto. Tale sezione interseca tutte le fasi (aria, acqua, solido), ma il flusso avviene solo attraverso le porzioni di tale sezione occupate dalla fase liquida. Il flusso, dunque, a parità di gradiente, si riduce al ridursi del contenuto d'acqua. La permeabilità è, quindi, una funzione del contenuto d'acqua e, conseguentemente, tramite la curva caratteristica del potenziale.

In definitiva, al crescere della suzione, la fase liquida diventa più discontinua e inoltre occupa i vuoti di minore dimensione, sarà pertanto necessario un gradiente maggiore per mettere in movimento un'assegnata portata d'acqua.

Al fine di ricavare l'equazione del moto di un fluido in un terreno parzialmente saturo all'equazione di Darcy generalizzata, va affiancata l'equazione di continuità.

Ipotizzando l'incompressibilità del fluido, il principio di conservazione della massa all'interno di un volumetto elementare può scriversi nel seguente modo:

$$\nabla(\rho\theta) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) = 0 \quad (6.4)$$

Dove:

$t$  è il tempo;

$\rho$  è la densità del fluido;

$\theta$  il contenuto d'acqua volumetrico.

Per la previsione e l'insacco di fenomeni franosi ad opera di eventi meteorici è fondamentale lo studio dell'infiltrazione, al fine di conoscere i tempi di saturazione, le variazioni di contenuto d'acqua e quindi di resistenza dei terreni presenti.

## 6.2 Descrizione del modello ad elementi finiti

Per effettuare la modellazione con il metodo degli elementi finiti del regime di filtrazione del versante si è fatto uso del codice di calcolo *Slide* (Rocscience).

Il primo passo per la costruzione di un buon modello è la schematizzazione e suddivisione dei diversi domini geomeccanici.

Le misure inclinometriche, la descrizione delle carote recuperate durante l'esecuzione dei sondaggi, assieme alle osservazioni sulle formazioni affioranti e ai risultati dell'indagine geoelettrica, hanno consentito di ricostruire con sufficiente approssimazione la geometria dell'area da investigare e i rapporti tra le diverse zone litologiche, permettendo di schematizzare la sezione esposta in Figura 6.2 e 6.3

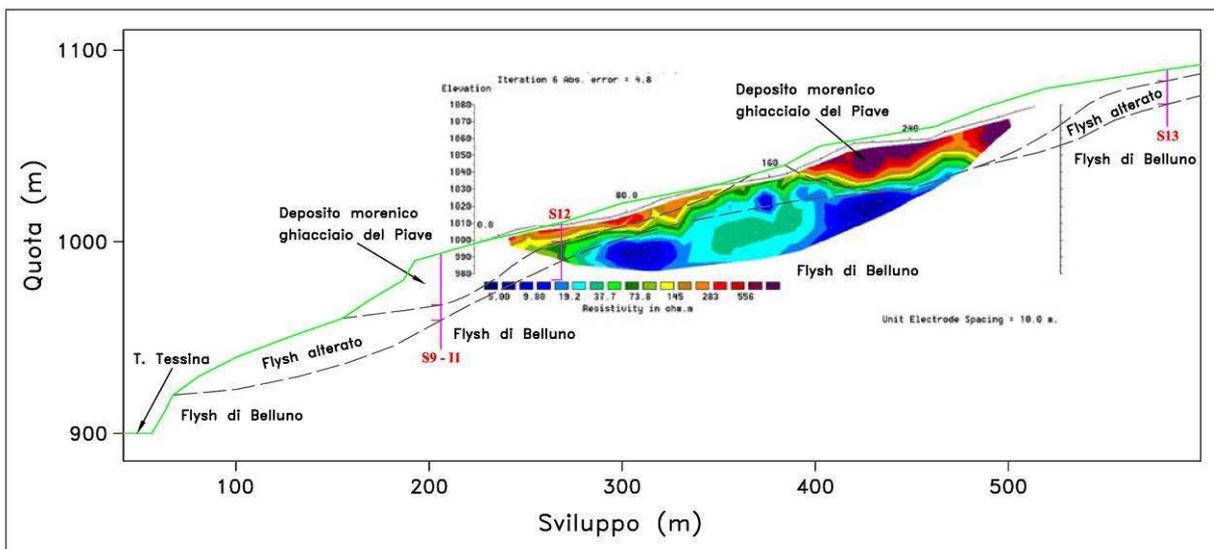


FIGURA 6.2 : Profilo termografico e schema stratigrafico della sezione longitudinale analizzata

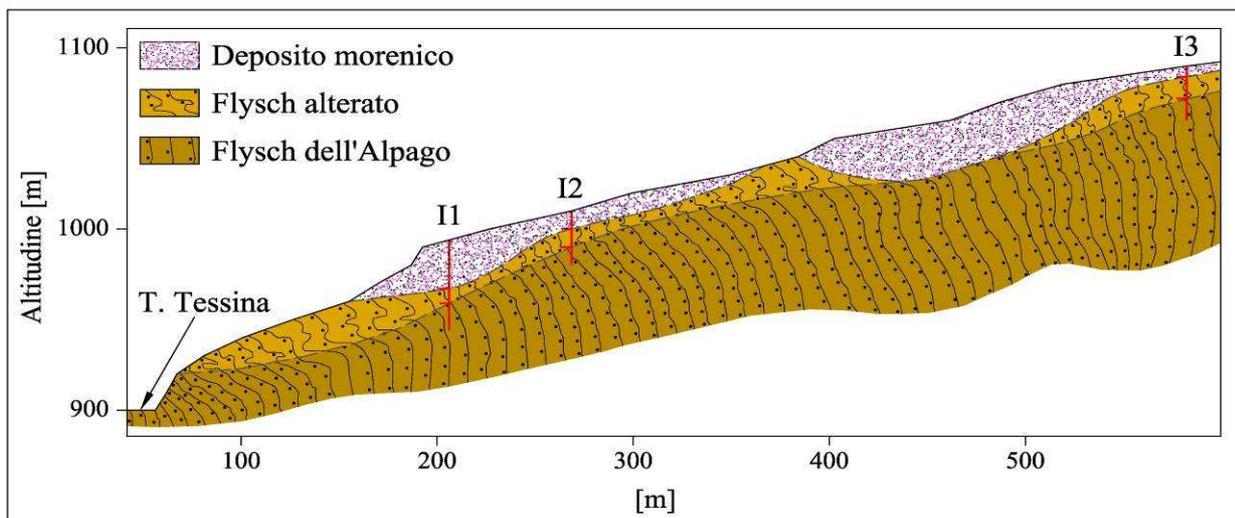


FIGURA 6.3 : Ricostruzione geologica lungo la sezione longitudinale di Pian de Cice

Dal momento che le informazioni geologiche sono di buona qualità, sia il modello geotecnico sia quello numerico sono semplici: il versante è stato diviso in tre parti, ovvero flysch sano (substrato), flysch alterato e materiale morenico di superficie. I parametri meccanici del terreno sono stati scelti in base alle precedenti simulazioni alle differenze finite applicate al settore. Si riporta di seguito la schematizzazione nel versante nel codice di calcolo con le relative proprietà meccaniche.

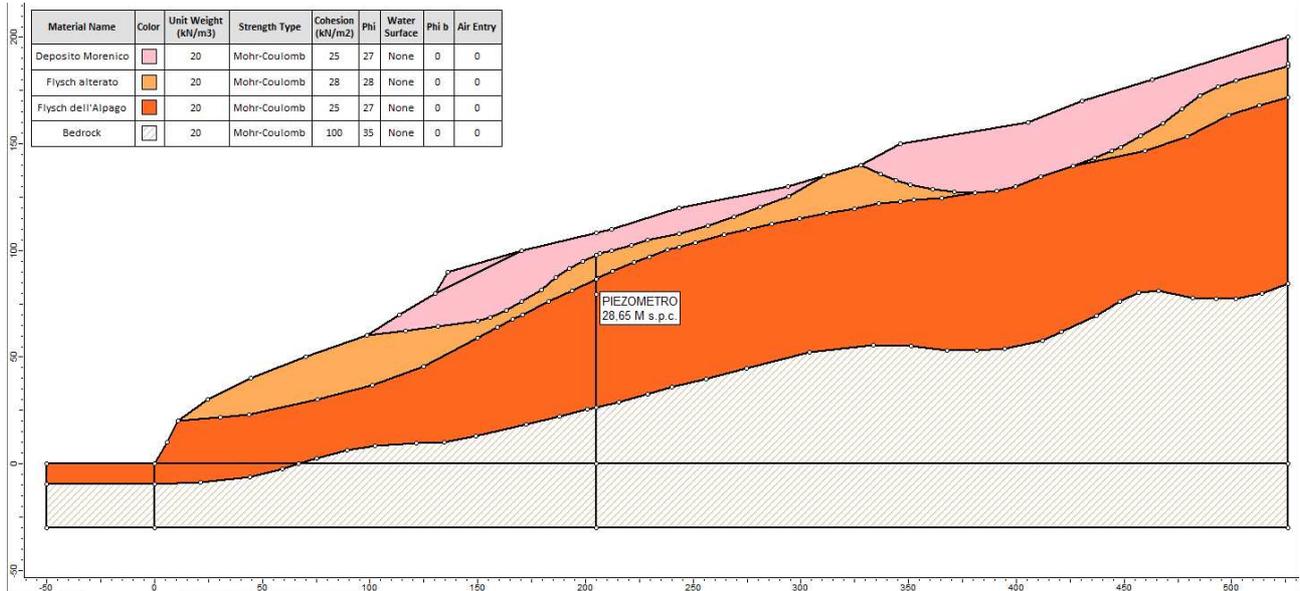


FIGURA 6.4 : Ricostruzione del settore Pian de Cice nel codice di calcolo e suddivisione geomorfologica

Impostando una serie di parametri personalizzabili come il numero e il tipo di mesh desiderati il codice di calcolo crea automaticamente la mesh, ovvero la discretizzazione del modello, nel nostro caso sono stati utilizzati circa 2000 elementi triangolari a 6 nodi.

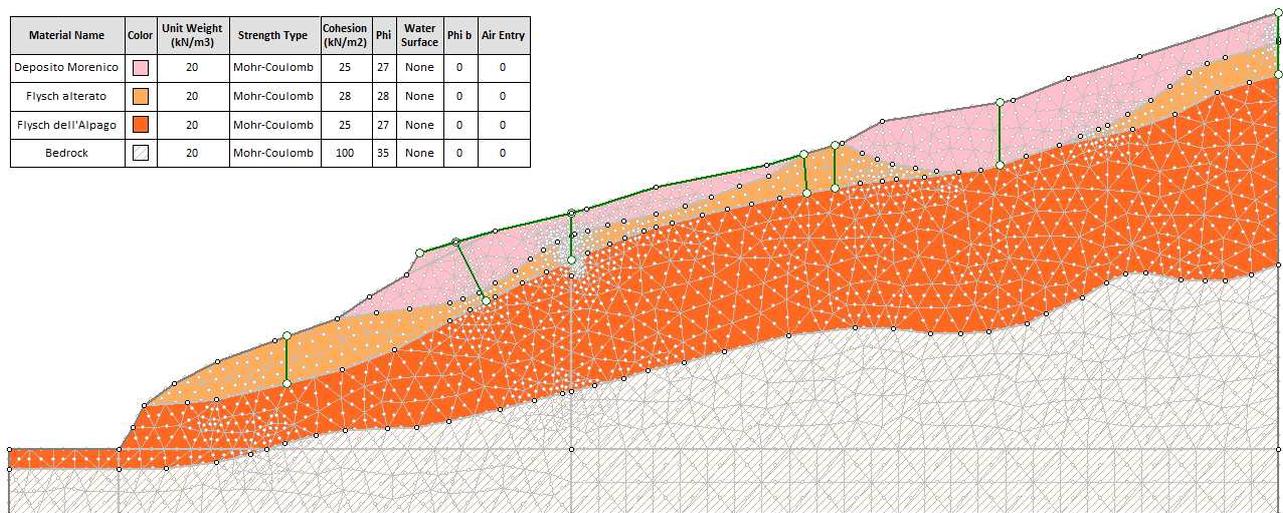


FIGURA 6.5 : Discretizzazione del modello con elementi triangolari a 6 nodi.

### 6.2.1 Scelta dei parametri geotecnici e delle condizioni al contorno mediante calibrazione in regime stazionario

I parametri che più di tutti influenzano il comportamento della filtrazione nel terreno sono i coefficienti di permeabilità  $K$  [m/s] e il rapporto  $R$  che regola l'anisotropia, cioè il rapporto tra i coefficienti di permeabilità verticale  $K_v$  e orizzontale  $K_h$ .

Fondamentale in un modello di calcolo agli elementi finiti è la ricerca delle condizioni al contorno che meglio descrivono la realtà del caso in esame. A tal fine si è inizialmente considerata la falda ad una profondità di 20 m sotto il piano campagna in corrispondenza della verticale del piezometro posto in sito, emulando una condizione di stazionarietà in assenza di precipitazioni. In tali condizioni, gli uniche variabili in gioco sono il livello della falda a monte del modello, a noi ignota, e i coefficienti di permeabilità. Ipotizzando diversi valori di  $K$  e assegnando una condizione al contorno a monte, si ricerca mediante calibrazione, di convergere al valore di falda ricercato variando i valori imposti.

La permeabilità dello strato morenico è stato ipotizzato pari  $K_h=2.5e-4$  m/s concorde ai precedenti studi che indicavano una permeabilità del primo strato molto alta. Non avendo ulteriori indicazioni o studi a riguardo si è considerato tale strato come anisotropo, valutando rapporti di anisotropia variabili tra 0.01 e 4 .

Il Flysch non alterato di base è considerato impermeabile data la sua composizione: si è ipotizzato un coefficiente di filtrazione orizzontale  $K_h=1e-7$  m/s.

La calibrazione si è quindi concentrata sul coefficiente di filtrazione  $K_h$  del Flysch alterato che a monte si localizza nell'intervallo tra 28.3 m e 13.9 m sotto il piano campagna. Inoltre, come vedremo si è reso indispensabile per una buona taratura del modello agire sul rapporto di anisotropia  $R$ . Infine, per la convergenza della calibrazione si è proceduti nel far variare la quota di falda a monte in un intorno del tetto dello strato del Flysch alterato.

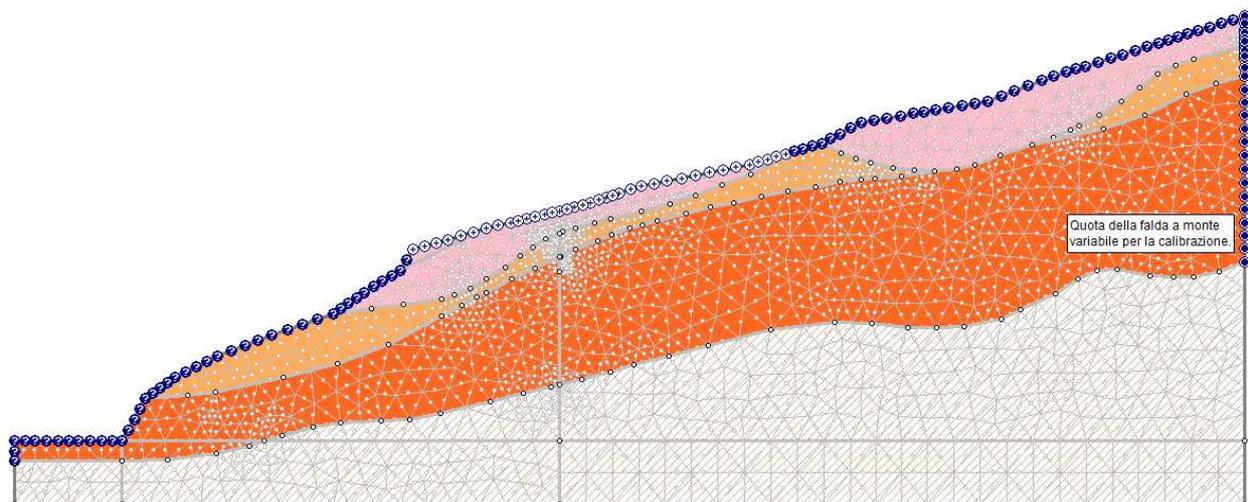


FIGURA 6.6 : Discretizzazione del modello e condizioni al contorno per la calibrazione

Su tutto il profilo superiore del modello (piano campagna) si sono impostate condizioni al contorno incognite, lasciando libero il programma di studiare la conformazione del profilo di filtrazione nascente dalla quota di falda a monte, ad eccezione della parte caratterizzante lo strato morenico al centro della sezione ove si è imposto un valore nullo della portata in ingresso per assicurare una continuità di flusso nello strato di Flysch alterato. Il coefficiente di permeabilità del Flysch alterato è stato fatto variare da  $5e-5$  a  $1e-8$  m/s, mentre le quote di falda a monte sono state fatte variare tra 160 e 175 m (quota del modello), corrispondente a 40 e 25 m sotto il piano campagna. Lo strato di Flysch alterato è collocato in uno strato che varia tra 171.722 m e 186.099 m nel modello, corrispondenti rispettivamente a 28.278 m e 13.901 m sotto il piano campagna. Il primo passo della calibrazione è stato eseguito considerando il Flysch isotropo. Si riportano di seguito i risultati:

Kv/Kh=1	K [ms] (1,2,...,8)	A	B	C	D	E	F
Liv.falda monte [m] (A,B,...,F)	u [kPa]	160	165	170	175	180	185
1	5,00E-05	12,639	143,355	143,187	144,060	142,127	143,108
2	1,00E-05	134,848	134,858	134,878	134,897	134,966	134,995
3	5,00E-06	99,925	100,239	101,092	100,513	97,774	96,319
4	1,00E-06	128,599	131,582	135,123	140,705	107,596	101,249
5	5,00E-07	126,186	129,100	130,238	129,904	93,365	92,320
6	1,00E-07	84,438	84,753	85,079	87,092	87,473	88,037
7	5,00E-08	85,299	80,336	80,932	84,086	84,577	85,299
8	1,00E-08	99,905	100,625	101,779	104,614	105,516	106,399

Kv/Kh=1	K [ms]	A	B	C	D	E	F
Liv.falda monte [m]	G.W.T.d [m]	160	165	170	175	180	185
1	5,00E-05	27,36	14,04	14,05	13,96	14,16	14,06
2	1,00E-05	14,90	14,90	14,90	14,90	14,89	14,89
3	5,00E-06	18,46	18,43	18,35	18,40	18,68	18,83
4	1,00E-06	15,54	15,24	14,88	14,31	17,68	18,33
5	5,00E-07	15,79	15,49	15,37	15,41	19,13	19,24
6	1,00E-07	20,04	20,01	19,98	19,77	19,73	19,68
7	5,00E-08	19,95	20,46	20,40	20,08	20,03	19,95
8	1,00E-08	18,47	18,39	18,27	17,99	17,89	17,80

TABELLA 6.1 – 6.2 : Calibrazione del modello nel caso isotropo

Si nota come i valori di pressione dei pori e quindi di profondità di falda si avvicinano ai valori cercati solo impostando una permeabilità molto bassa dello strato di Flysch alterato.

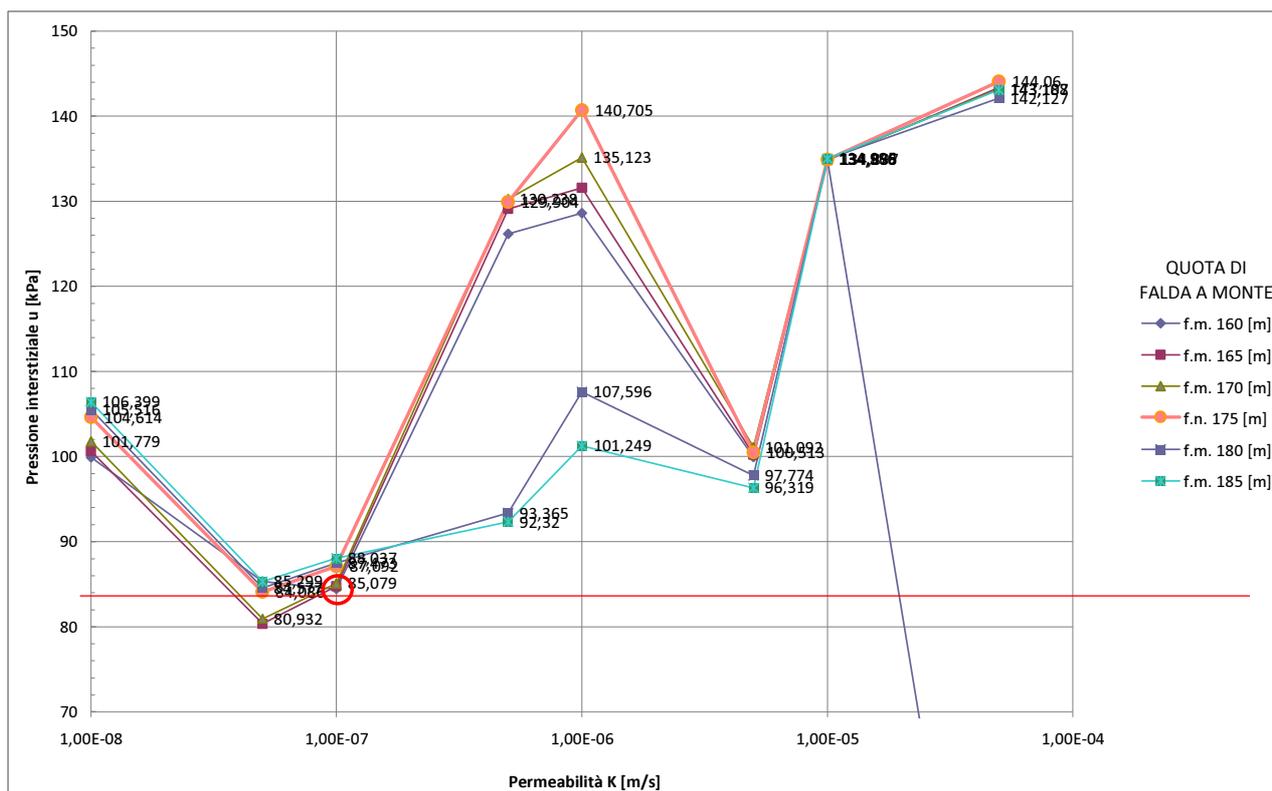


FIGURA 6.7 : Andamento di pressione interstiziale al variare della quota di falda al contorno e della permeabilità

Da grafico si evince che impostando la permeabilità orizzontale  $K_h$  al valore di  $1e-7$  m/s i risultati convergono al valore desiderato, in particolare si nota come con tale valore di permeabilità, la quota di falda a monte non influisce particolarmente sul valore di pressione in uscita dal modello. I dati oscillano al variare della permeabilità, ma seguono invece un andamento quasi comune (più distaccato per le quote di 180 e 185 m) variando la quota di falda al contorno.

L'andamento per gli altri valori di coefficienti ipotizzati risulta altamente discontinuo, probabilmente variando il  $K_h$  si innestano dei percorsi di filtrazione che coinvolgono in modo particolare il punto in cui leggiamo la pressione nel modello (punto del piezometro).

Non accettando tale condizione in quanto si annullerebbe di fatto la differenza tra i due strati di Flysch è stato studiato l'influenza del rapporto di anisotropia sulla variazione della quota di falda mantenendo costante la quota di falda a monte caratterizzante la condizione a contorno trovata.

$K_v/K_h$	0,01	0,1	0,5	1	2	4
u [kPa]	49,461	61,738	79,235	<b>85,079</b>	91,733	98,228
G.W.T.d [m s.p.c.]	23,608104	22,3566259	20,5730377	<b>19,9773191</b>	19,2990316	18,6369521

TABELLA 6.3 : Variazione della pressione interstiziale al variare del rapporto di anisotropia

Si nota come i risultati variano sensibilmente impostando una anisotropia dello strato di Flysch alterato.

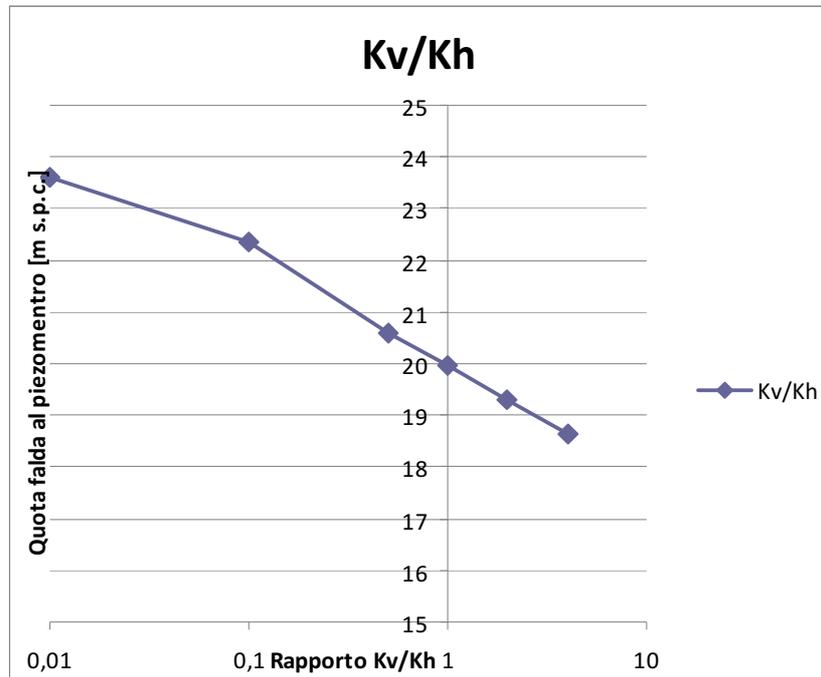


FIGURA 6.8 : Andamento della quota di falda al variare del rapporto R

Si riporta in primo luogo il risultato della modellazione nel caso isotropo:

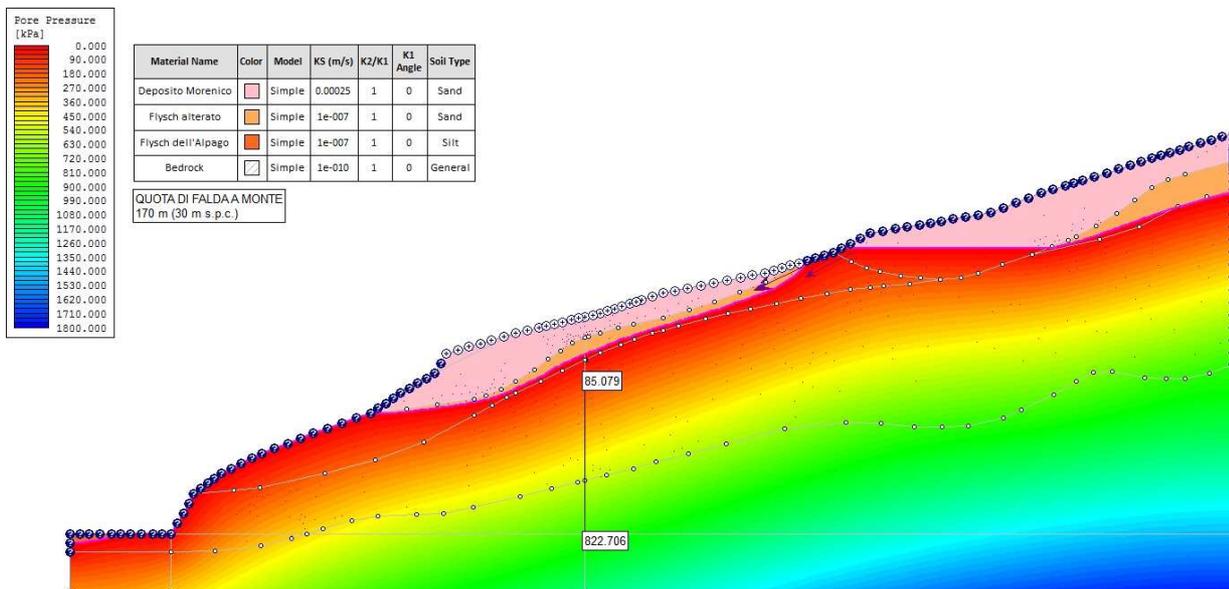


FIGURA 6.9 : Risultato della calibrazione nel caso di isotropia del Flysch alterato

Dato che i risultati variano sensibilmente impostando una anisotropia, e il valore di permeabilità trovato in questa prima calibrazione non soddisfa le aspettative si è cercato quindi il valore del

rapporto  $R=K_v/K_h$  per il quale si raggiunge il valore di pressione desiderato con un coefficiente di almeno un ordine di grandezza superiore  $K_h=1e-6$  m/s.

Si è ottenuto mediante una seconda calibrazione un valore di coefficiente  $K_h$  di  $5 \cdot 10^{-6}$  con anisotropia  $R=0.5$ , inoltre secondo me, analizzando il comportamento del flusso di filtrazione, tale modellazione sembra più coerente con i dati monitorati e per il comportamento delle portate delle falda acquifere. Inoltre in tale configurazione di anisotropia, la quota di falda a monte si assesta esattamente nell'intorno del Flysch alterato.

Si riportano di seguito i risultati della calibrazione nel caso anisotropo. I risultati ottenuti portano a considerare una quota di falda a monte di 185 m (15 m sotto il piano campagna).

Kv/Kh=0,5	K [ms] (1,2,...,8)	A	B	C	D	E	F	G
Liv.falda monte [m] (A,B,...,F)	u [kPa]	170	175	180	185	186	187	190
1	5,00E-05	130,218	131,013	128,707	131,444	128,982	131,856	132,121
2	1,00E-05	148,062	148,219	150,623	150,780	150,986	151,594	120,173
3	5,00E-06	85,544	85,566	85,009	85,003	85,476	85,009	89,255
4	1,00E-06	93,831	102,201	98,620	90,802	85,548	78,276	115,366
5	5,00E-07	91,857	97,058	94,564	89,065	84,187	83,049	103,250
6	1,00E-07	79,235	81,375	81,737	82,239	82,502	83,842	87,151

Kv/Kh=0,5	K [ms] (1,2,...,8)	A	B	C	D	E	F	g
Liv.falda monte [m] (A,B,...,F)	G.W.T.d [m]	170	175	180	185	186	187	190
1	5,00E-05	15,38	15,29	15,53	15,25	15,50	15,21	15,18
2	1,00E-05	13,56	13,54	13,30	13,28	13,26	13,20	16,40
3	5,00E-06	19,93	19,93	19,98	19,99	19,94	19,98	19,55
4	1,00E-06	19,09	18,23	18,60	19,39	19,93	20,67	16,89
5	5,00E-07	19,29	18,76	19,01	19,57	20,07	20,18	18,13
6	1,00E-07	20,57	20,35	20,32	20,27	20,24	20,10	19,77

TABELLA 6.4 – 6.5 : Calibrazione del modello nel caso anisotropo

Anche in questo caso si è valutato l'influenza del rapporto di anisotropia, registrando una discontinuità dei risultati al variare di R e a parità di condizioni al contorno.

Kv/Kh	0,01	0,1	0,5	1	2	4
u [kPa]	128,835	138,164	85,003	96,319	152,183	138,144
G.W.T.d [m s.p.c.]	15,5169725	14,5660041	19,9850663	18,8315494	13,1369521	14,5680428

TABELLA 6.6 : Variazione della pressione interstiziale al variare del rapporto di anisotropia

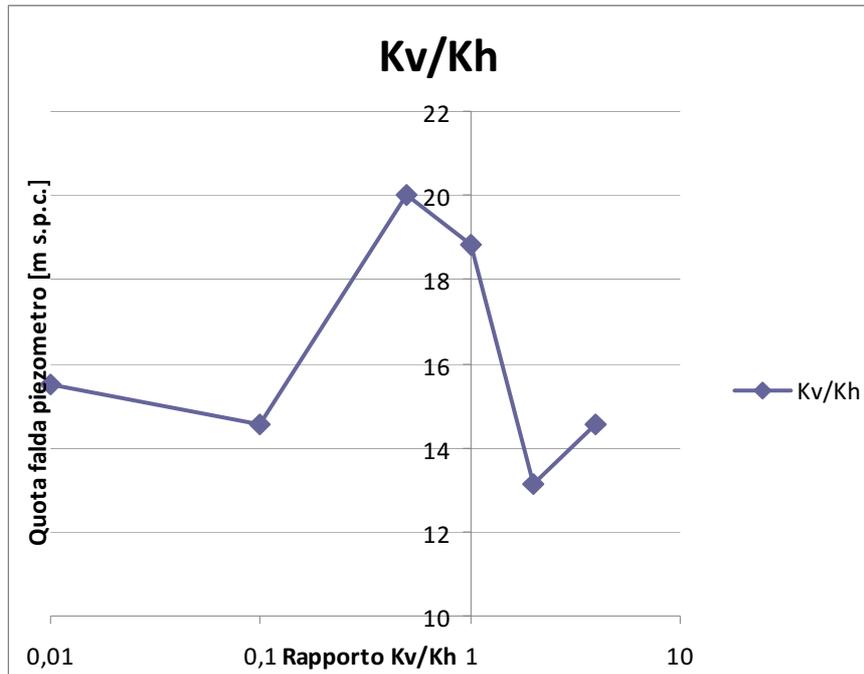


FIGURA 6.10 : Andamento della quota di falda al variare del rapporto R

Si riporta il risultato della modellazione nel caso anisotropo:

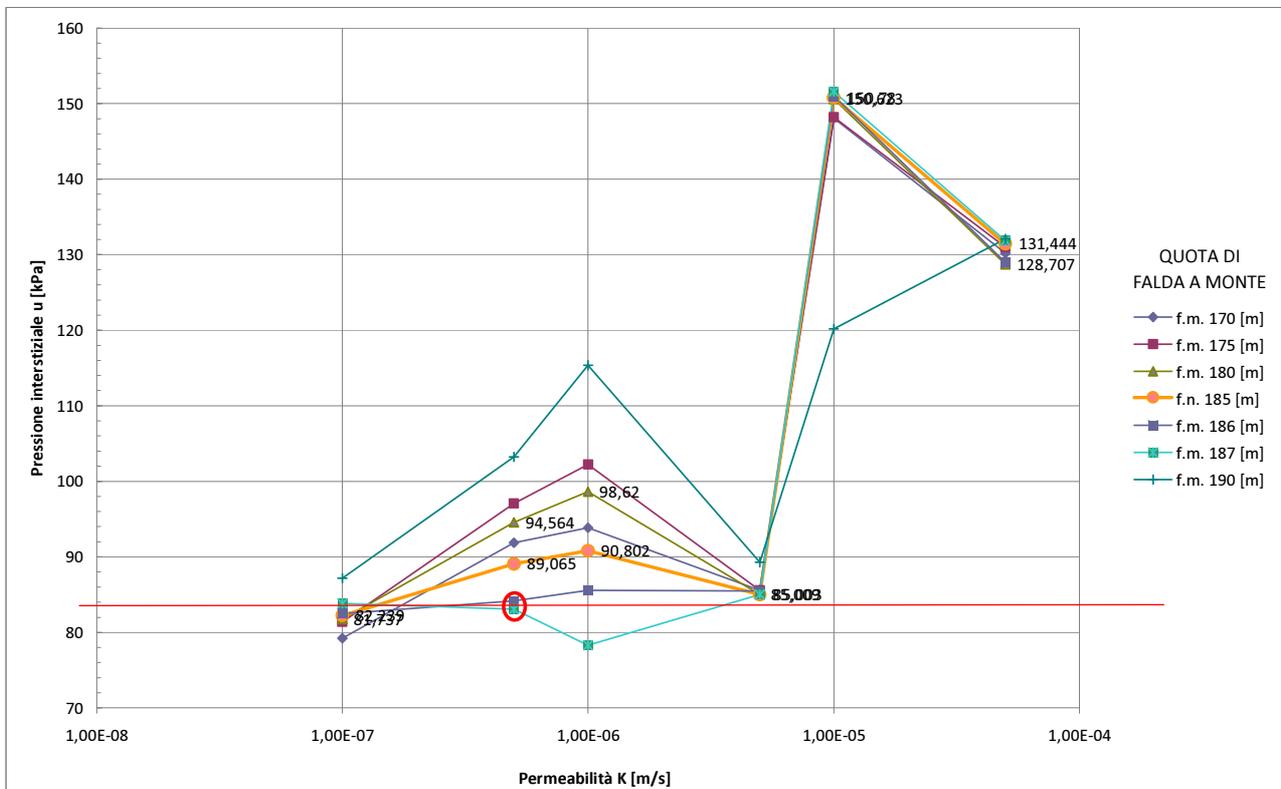


FIGURA 6.11 : Andamento di pressione interstiziale al variare della quota di falda al contorno e della permeabilità

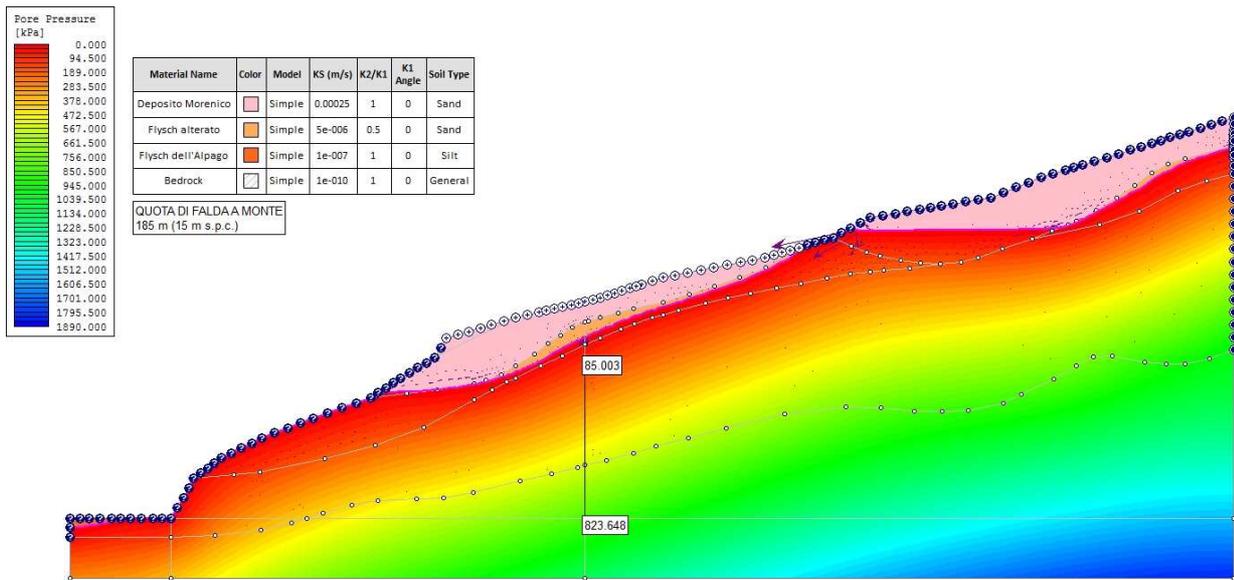


FIGURA 6.12 : Risultato della calibrazione nel caso di anisotropia del Flysch alterato

Il risultato in tali condizioni al contorno e con questi valori di parametri geotecnici soddisfa le aspettative di calibrazione, a partire da questi risultati si andrà a eseguire la modellazione agli elementi finiti studiando il comportamento della falda nel caso dell'evento di precipitazione considerato.

Una ultima osservazione riguarda la legge di saturazione propria dei materiali caratterizzanti gli strati del modello, vista l'impossibilità di avere informazioni precise a riguardo per l'assenza di dati certi si sono lasciati dei modelli di default dati dal codice di calcolo caratterizzanti i terreni argillosi per lo strato di Flysch e sabbiosi-ghiaiosi per gli strati avente permeabilità più alta quali la morena e lo strato di Flysch alterato. Si riportano gli andamenti delle leggi di filtrazione:

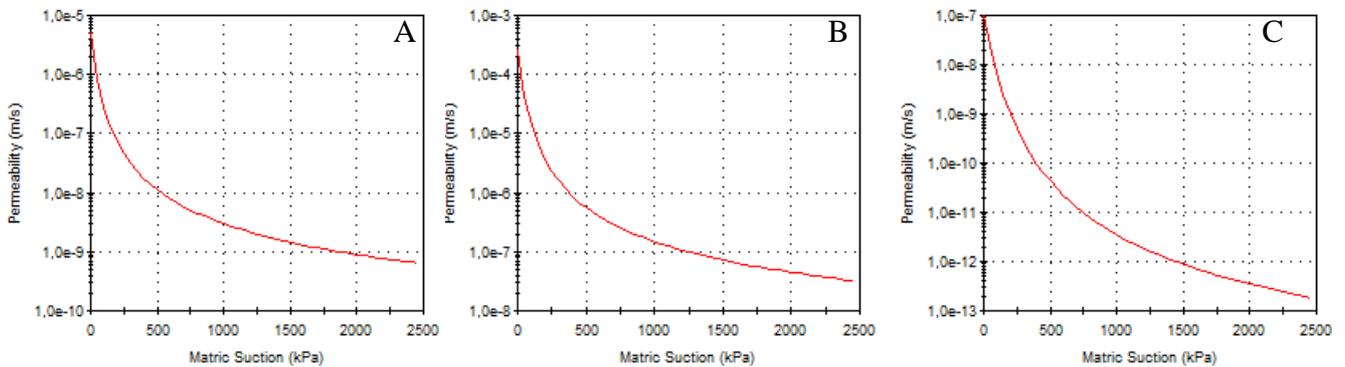


FIGURA 6.13 : Leggi di saturazione per lo strato morenico (A), il Flysch alterato (B) e il Flysch di basamento (C)

### 6.3 Analisi del regime di filtrazione in condizioni di precipitazione piovosa

Per implementare nel modello agli elementi finiti la precipitazione piovosa verificatosi tra il 22 novembre e il 19 dicembre 2012 si è scelto di semplificare il modello trasformando la portata di pioggia oraria in portata di pioggia cumulata giornaliera. In questo modo si andrà a diminuire il tempo computazionale occorrente al codice di calcolo per elaborare i risultati e si eviteranno errori di incertezza dettati da un maggiore numero di variabili di ingresso, inoltre confrontando i risultati ottenuti tra il modello semplificato e un modello analogo ma implementato con un pluviogramma non semplificato mediante una prova eseguita considerando le prime ore di precipitazione, non si sono registrate significative differenze potendo affermare la bontà della semplificazione eseguita. Considerando la portata di pioggia oraria infatti si andrebbero a imporre dei valori nulli alternati a valori positivi dell'ordine di pochi mm di precipitazione creando discontinuità nei risultati finali. Si sono quindi considerati i quattro giorni di precipitazione ognuno caratterizzato dalla propria portata di pioggia cumulata, il terzo giorno caratterizza il picco di piovosità come si evince dalla tabella 6.7 e dalla Figura 6.14.

TABELLA 6.7 : Andamento della precipitazione giornaliera nel periodo considerato

Giorno	Precipitazione [mm/24h]
26/11/2012	13,4
27/11/2012	24
28/11/2012	119,2
29/11/2012	15,6

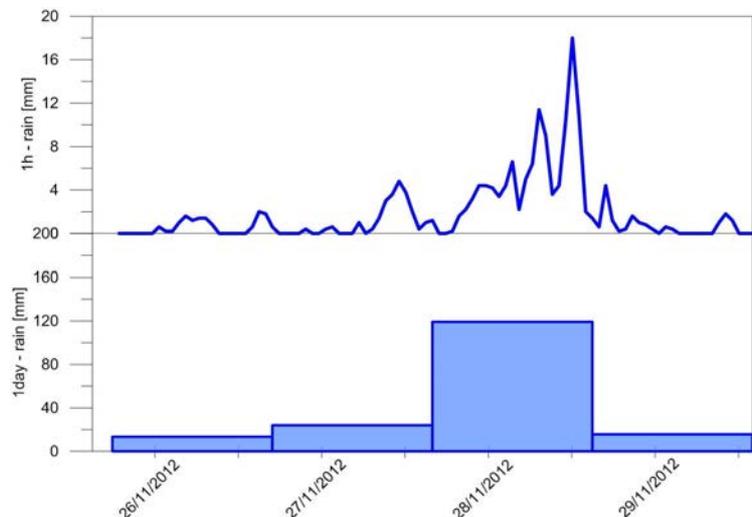


FIGURA 6.14 : Andamento temporale della precipitazione monitorata e cumulata giornaliera implementata del modello agli elementi finiti

A partire dalle condizioni a contorno di stazionarietà, si sono scelte delle nuove condizioni a contorno per simulare la precipitazione sul versante. In particolare si è imposta una filtrazione verticale sul contorno relativo allo strato morenico centrale e sulla zona di monte del settore, lasciando libero il settore più a valle della frana in modo che una precipitazione imposta sul contorno di valle non andasse nel codice di calcolo ad influire nelle condizioni a monte ove

vogliamo simulare l'andamento del livello di falda monitorato. Si è quindi implementato il codice di calcolo per step da 1 ora per le prime 100 ore (i 4 giorni relativi alla precipitazione) per osservare un andamento preciso dell'onda di piena causata dalla pioggia all'interno della frana e successivamente si è incrementato lo step ad intervalli più grandi fino a raggiungere 744 ore (31 giorni) per una analisi della propagazione della filtrazione a precipitazione finita.

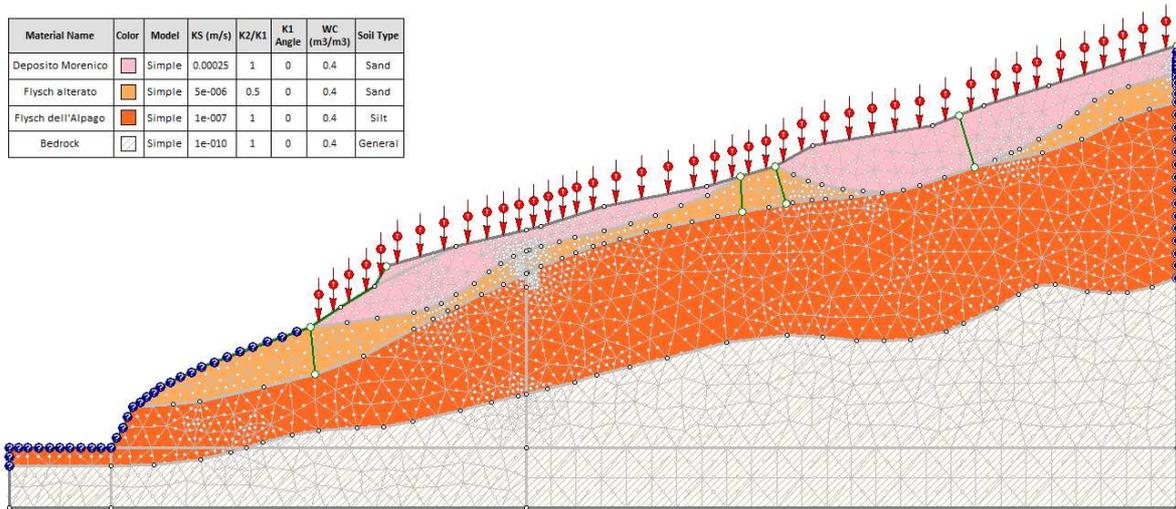
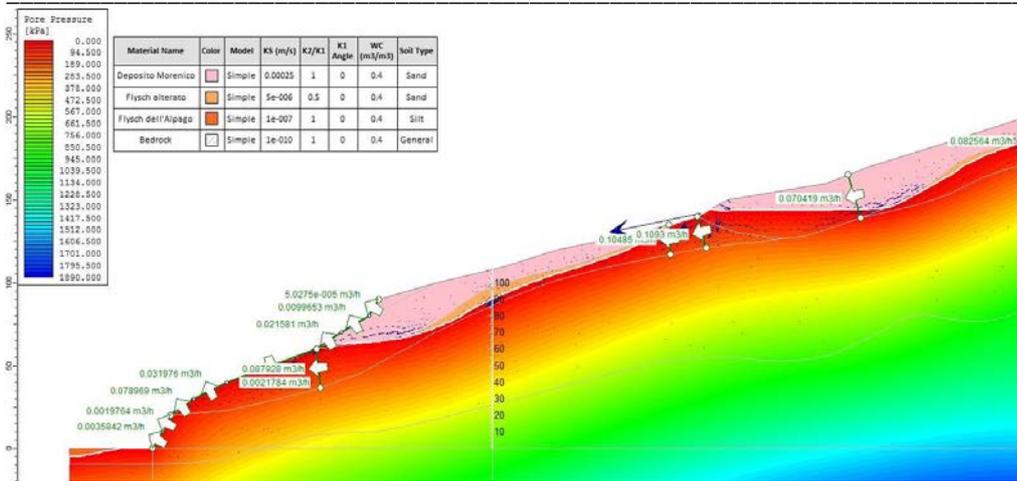


FIGURA 6.15 : Discretizzazione del modello e condizioni al contorno per l'analisi in condizioni di precipitazione piovosa

Seppure il modello proponeva soluzioni accettabili in caso di regime stazionario in assenza di precipitazione, la modellazione con l'evento piovoso fornisce dei risultati totalmente sovrastimati rispetto quelli aspettati. È possibile effettuare diverse considerazioni in merito, prima tra tutte il fatto di avere ipotizzato i parametri geotecnici dei materiali su considerazioni personali senza l'ausilio di dati provenienti da prove di laboratorio può aver portato ad una errata stima dei valori dei coefficienti di permeabilità e del rapporto di anisotropia che viene maggiormente risentito in caso di flusso di filtrazione caratterizzato da portate importanti. In secondo luogo, la morfologia della sezione di frana analizzata può essere cambiata in successione ai continui spostamenti che caratterizzano il settore rispetto alle analisi precedentemente effettuate sulle quali è stato modellato il codice di calcolo. Risulta però apprezzabile l'andamento dell'onda di piena della filtrazione dal momento che comincia la precipitazione.

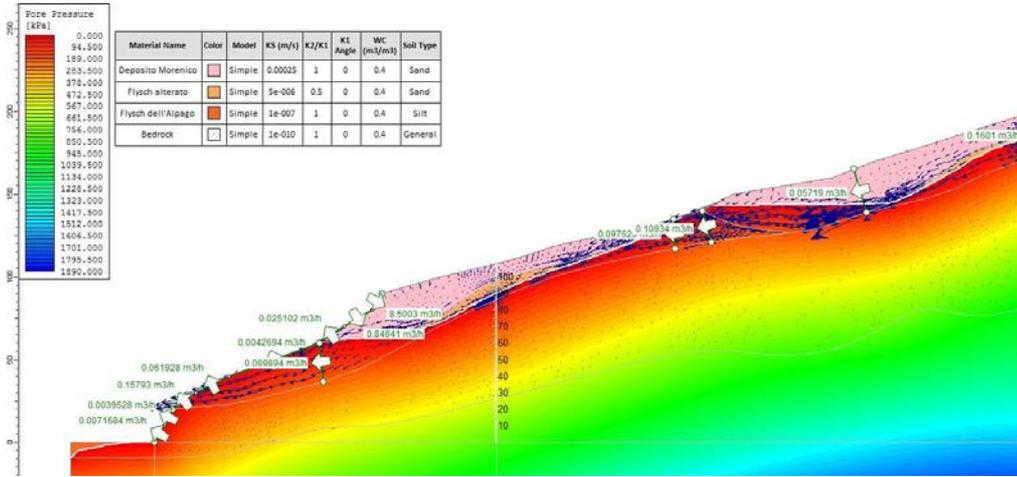
Nel modello è stato implementato un primo periodo di 24 h a precipitazione zero per verificare che il regime stazionario non venisse influenzato dal cambio di condizioni a contorno, dopodiché a partire dalla 25esima ora ha inizio la precipitazione imposta da pluviogramma semplificato (Figura 6.14) fino alla 121esima ora, momento in cui finisce il quarto giorno di precipitazione. Si riportano alcuni step significativi della modellazione compiuta: Figure 6.16 a-h

CAPITOLO 6 – ANALISI BIDIMENSIONALE DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO CON PROGRAMMA AGLI ELEMENTI FINITI



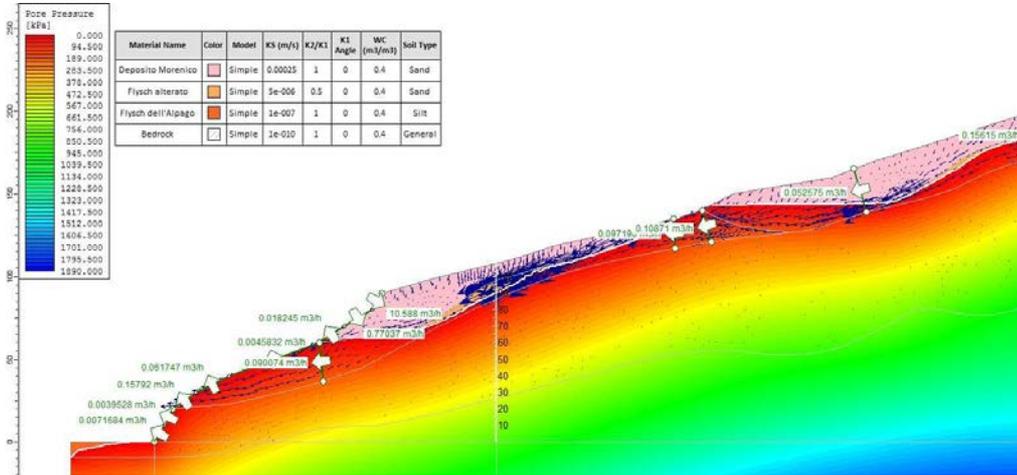
a) Tempo t=0  
Precipitazione p=0 mm/d  
Quota di falda pf=20 m spc

Il regime è stazionario in assenza di precipitazione, le portate sono minime, dell'ordine di 0.08 m<sup>3</sup>/h a monte e di 0.03 – 0.02 m<sup>3</sup>/h a valle.  
Il livello di falda è assestato a circa 20 m sotto il piano campagna in prossimità dello strato di Flysch alterato.



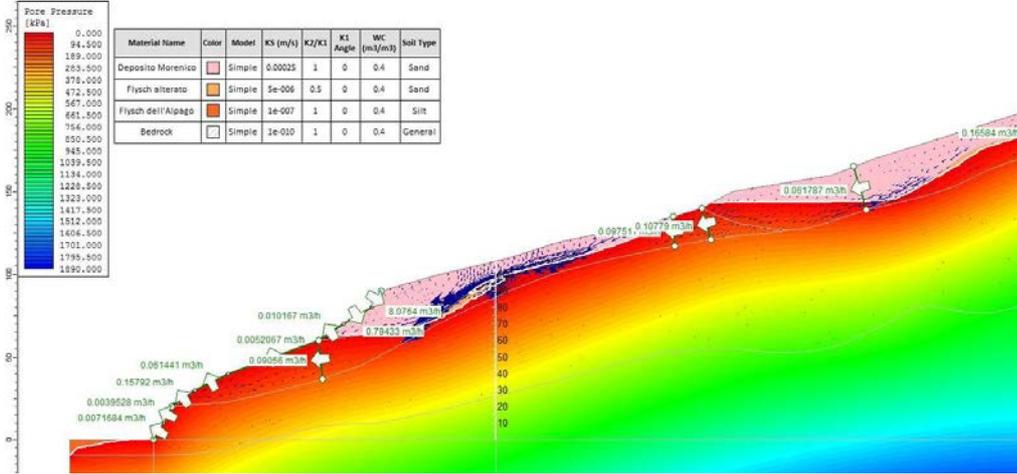
b) Tempo t = 25 h  
Precipitazione p=13.4 mm/d  
Quota di falda pf=20 m spc

Il regime non è più stazionario, bensì siamo all'inizio del primo giorno di precipitazione con una portata unitaria di 13.4 mm/d che ancora non agiscono sulla profondità della falda. È evidente come sia cominciato il regime di filtrazione con un aumento di portate che dell'ordine di 0.15 m<sup>3</sup>/h a monte e valle.



c) Tempo t = 36 h  
Precipitazione p=13.4 mm/d  
Quota di falda pf=20 m spc

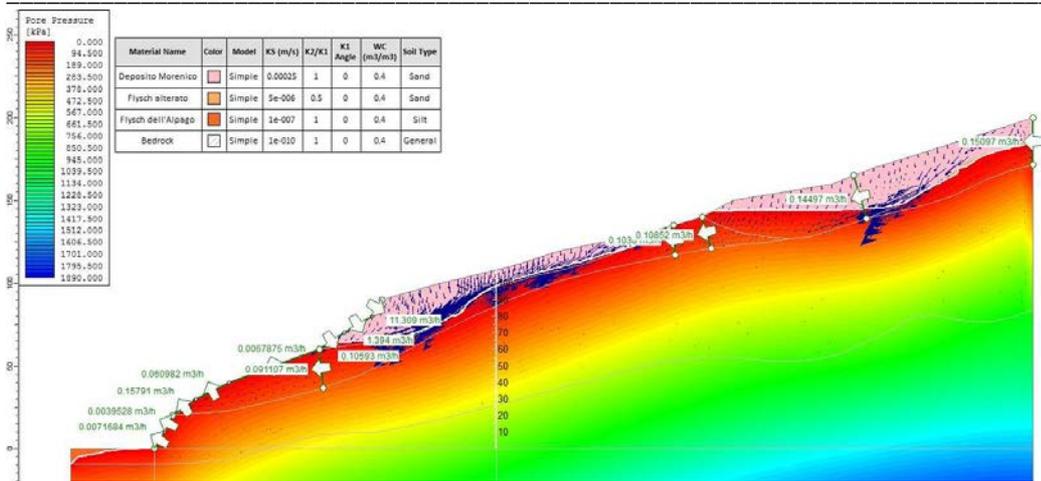
Siamo ancora nel primo giorno di precipitazione a 12 ore dall'inizio delle piogge. La falda ancora non risente della portata di filtrazione se non nella zona di valle. Il regime di filtrazione si sposta verso il basso cominciando a far nascere un'onda nella zona caratterizzante la zona di taglio con un aumento di portate che dell'ordine di 0.15 m<sup>3</sup>/h a monte e valle.



d) Tempo t = 48 h  
Precipitazione p=24 mm/d  
Quota di falda pf=17 m spc

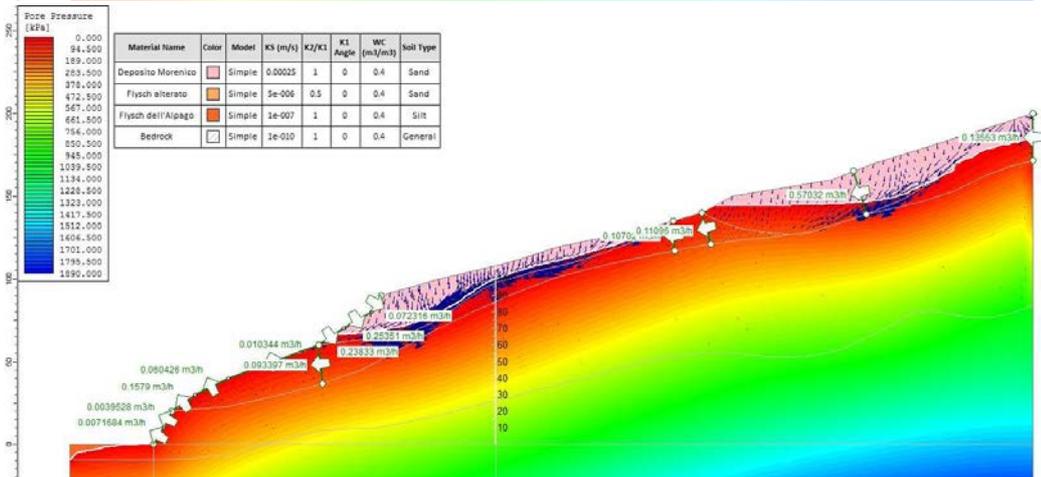
Entriamo ora nel secondo giorno di precipitazione con un aumento della portata unitaria di pioggia. La falda si alza a circa 17 m sotto il piano campagna e l'onda di filtrazione si propaga con una certa intensità a circa metà dello strato morenico.

CAPILO 6 – ANALISI BIDIMENSIONALE DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO CON PROGRAMMA AGLI ELEMENTI FINITI



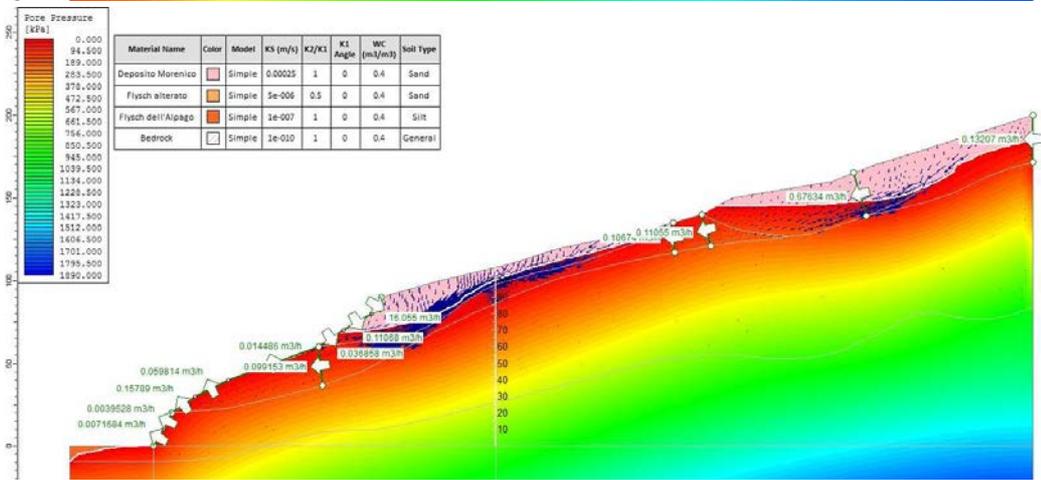
e) Tempo t = 60 h  
Precipitazione p=24 mm/d  
Quota di falda pf=12 m spc

Siamo ancora nel secondo giorno di precipitazione con portata unitaria di pioggia di 24mm/d. La falda si alza a circa 12 m sotto il piano campagna e l'onda di filtrazione continua a propagarsi con una certa intensità oltre la metà dello strato morenico. Le portate di filtrazioni sono dell'ordine di 0.15 m<sup>3</sup>/h a monte quasi costanti nell'intero flusso.



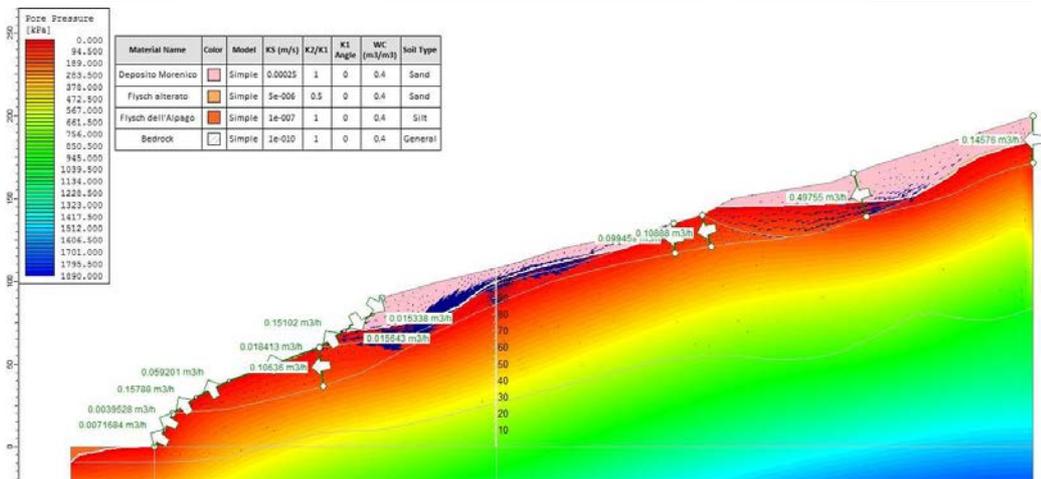
f) Tempo t = 72 h  
Precipitazione p=119 mm/d  
Quota di falda pf=10 m spc

Il terzo giorno è caratterizzato dal picco della precipitazione piovosa con una portata unitaria molto alta che alza di circa 2 metri la quota di falda. In verità tale variazione è data per una certa aliquota anche dalla precipitazione dei giorni precedenti il cui effetto è ritardato per la permeabilità del terreno.



g) Tempo t = 84 h  
Precipitazione p=119 mm/d  
Quota di falda pf=9 m spc

Siamo a metà del terzo giorno caratterizzato dal picco della precipitazione piovosa, la quota di falda raggiunge il massimo previsto dal modello a 9 metri sotto il piano campagna. L'onda data dalla portata di filtrazione si porta verso valle facendo prevedere una prossima diminuzione del flusso di filtrazione.



h) Tempo t = 96 h  
Precipitazione p=15.6 mm/d  
Quota di falda pf=10 m spc

L'inizio della quarta giornata di precipitazione è identificata da una diminuzione della quota di falda e del flusso di filtrazione che si porta a valle del settore di frana. Le portate rimangono costanti di circa 0.15 m<sup>3</sup>/h a monte e valle.

Nel modello è stato emulato il comportamento di coda al termine della precipitazione, come si riporta nella figura che segue, a 240 h (10 giorni) non si ottiene una diminuzione considerevole della quota di falda al contrario dei dati monitorati, bensì si assesta a valori di circa 12 metri sotto il piano campagna identificando tempi lunghissimi affinché il regime di filtrazione indotto dalla precipitazione in esame si dissolva del tutto. È ovvio che tale comportamento non riflette la realtà rilevata dall'andamento delle pressioni ricavate da piezometro come si evidenzia anche dal grafico comparativo seguente.

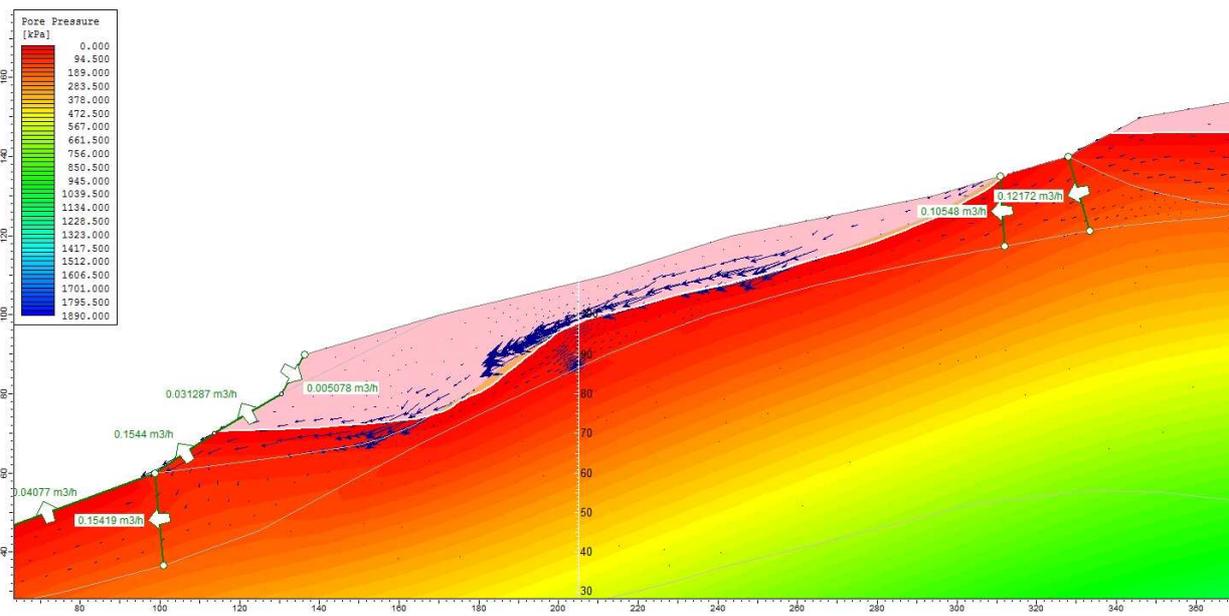


FIGURA 6.17 : Livello di falda calcolata dal codice di calcolo al tempo  $t = 240$  h

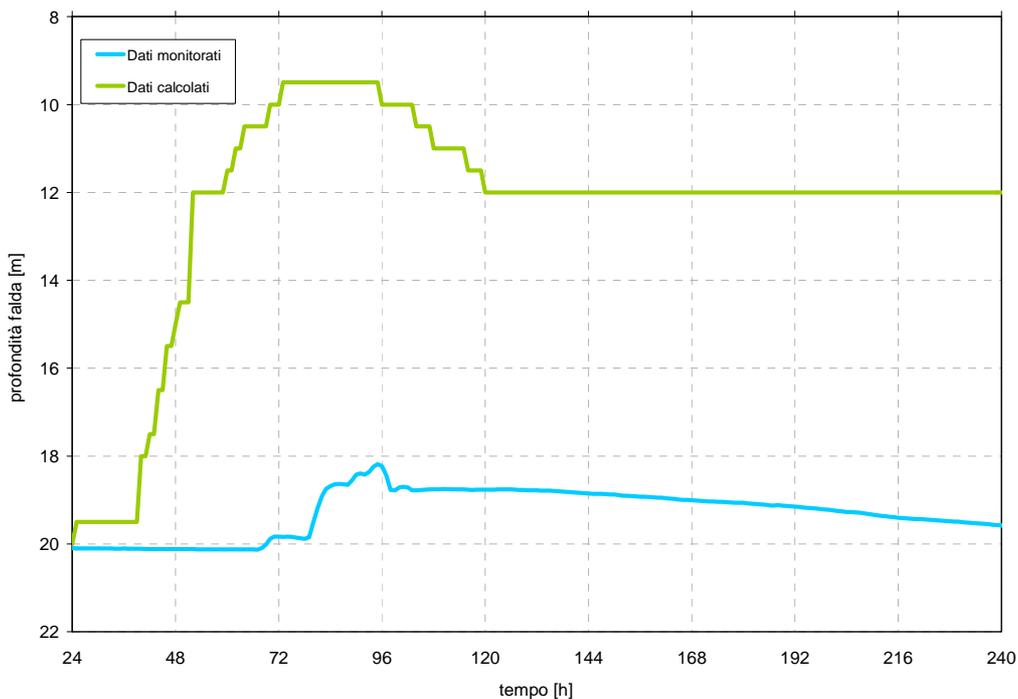


FIGURA 6.18 : Confronto tra i livelli di falda monitorati e calcolati mediante codice di calcolo agli elementi finiti

## 7. CONCLUSIONI

---

Al termine del lavoro di tesi svolto è possibile trarre diverse conclusioni riguardanti il comportamento del settore della Frana del Tessina denominato Pian de Cice nonché una valutazione sul sistema di monitoraggio adottato. L'applicazione dei modelli matematici che tengono conto del comportamento viscoso dei terreni, lo studio delle correlazioni tra precipitazioni utilizzando i dati raccolti dalla stazione meteorologica di Roncadin, vicino a Chies d'Alpago e velocità di spostamento, si è sviluppata nel presente lavoro limitatamente al settore Pian de Cice situato nella zona orientale della frana grazie al sistema di monitoraggio installato nel 2012 composto da due sonde inclinometriche (sonda alta e sonda bassa) e un piezometro a fondo aperto. La sonda bassa si è rivelata inaffidabile e per questo non considerata nell'analisi dei dati. Il resto dell'attrezzatura ha regolarmente funzionato dal 29 settembre 2012 fino allo scorso marzo 2014, momento in cui lo strumento di monitoraggio è arrivato a fine corsa.

A partire dagli spostamenti rilevati e dai valori pluviometrici, si sono realizzate delle rappresentazioni grafiche che mettono in relazione le due variabili, evidenziando così in modo qualitativo la presenza di una relazione piogge/spostamenti.

Nel periodo analizzato si è misurata una velocità annua di circa 10 cm/anno, pari a più del doppio di quella misurata nel 1997-2007 dimostrando una accelerazione del movimento del settore. Nell'ultimo periodo di monitoraggio si denota un picco di accelerazione del tutto superiore all'andamento precedente senza evidenti differenze di andamento delle precipitazioni piovose. Le cause di tale accelerazione non si ci sono ancora note, pertanto le elaborazioni sono state eseguite considerando i dati antecedenti a tale evento.

Per quanto riguarda la falda si sono registrati oscillazioni massime paria 2,7m. Si osserva, inoltre, che dopo l'evento piovoso la falda subisce un rapido innalzamento seguito da una leggera diminuzione e, in molti casi, da un ulteriore aumento successivo, anche senza precipitazione: probabilmente questo comportamento è l'effetto di due fenomeni di filtrazioni diversi legati alle caratteristiche eterogenee ed anisotrope del terreno. Analizzando poi l'andamento dello spostamento, si nota un aumento della velocità nei mesi primaverili, caratterizzati da intense e prolungate precipitazioni.

Quanto esposto permette quindi di osservare una correlazione qualitativa tra spostamento, innalzamento di falda e precipitazioni: le precipitazioni alimentano la falda la quale, innalzandosi, provoca un aumento delle pressioni neutrali con conseguente diminuzione delle tensioni efficaci e mobilitazione del versante.

Il comportamento del settore, caratterizzato da un graduale incremento di velocità che si verifica con un livello costante di falda, ha portato a pensare che la frana stia evolvendo con

un'accelerazione costante, il che definisce una condizione di creep terziario. È plausibile affermare che la frana è già in condizione di rottura, ma la fase di accelerazione presente dopo un evento piovoso e dovuta al persistere di un livello di falda alto è troppo breve per avere il completo collasso del pendio, cosicché, quando il livello di falda torna ad abbassarsi, anche la velocità di spostamento si riduce.

Quindi, una volta raccolti e filtrati i dati, si è proceduto con lo studio mediante dei modelli misti per la ricerca della correlazione tra i valori monitorati e l'evoluzione del movimento franoso. Sono stati illustrati i modelli matematici basati sulla relazione lineare di Bingham e sulla relazione potenziale di Vulliet e Hutter, già applicati in altri casi di frane caratterizzati da un comportamento viscoso.

L'applicazione del modello di Bingham ha evidenziato come la viscosità non sia una costante ma piuttosto dovrebbe variare entro un intervallo di oltre un ordine di grandezza, con un andamento strettamente collegato al livello di falda: in particolare, quando il livello di falda si alza la viscosità decresce e viceversa. Questo risultato permette di affermare che il modello così posto non consente di determinare un unico valore di viscosità per il terreno, diversamente da quanto trovato nelle applicazioni in altri movimenti franosi. Il valore ipotizzato per i dati caratteristici del pendio (quali, ad esempio, l'angolo di attrito) non influisce particolarmente nei risultati, in quanto fa cambiare il valore medio di viscosità ma non l'ampiezza dell'intervallo di variazione della stessa. Si evince quindi che il modello di Bingham non riesce a rappresentare una correlazione affidabile tra velocità e livello di falda. Si conferma però che la viscosità aumenta in funzione dell'abbassamento della falda.

Il modello di Vulliet e Hutter, calibrato sulla base di serie di dati estratti ricercando periodi di 24 ore con velocità costante e falda costante, mostra ancora una velocità troppo influenzata dal livello di falda. Quando la falda sale, immediatamente dopo il picco di pioggia, le velocità crescono troppo bruscamente nel modello rispetto il comportamento reale. Analogamente nelle prime fasi di discesa del livello di falda, la velocità è sovrastimata: sembra, invece, cogliere abbastanza bene le velocità nei periodi caratterizzati da valori molto bassi della falda.

I risultati possono essere accettati solo in parte osservando l'andamento generale degli spostamenti cumulati, ove l'errore cumulato tende a compensarsi. Gli spostamenti trovati da modello risultano maggiori di quello monitorato ma risulta comunque dare più informazioni, dimostrando una maggiore applicabilità, del precedente modello alla Bingham.

Si è infine sviluppata una analisi di filtrazione mediante codice di calcolo agli elementi finiti, per simulare il comportamento della falda nel caso di un evento piovoso e comprendere se sia possibile riprodurre con un'analisi bidimensionale le osservazioni fatte in sito. Dato che molte caratteristiche del versante non sono note, si è scelto di assumere costanti i valore dei parametri

geotecnici meno significativi, come la permeabilità dei diversi strati litologici e le relative funzioni di saturazione, mentre la permeabilità dello strato di Flysch alterato (strato entro il quale si concentra il moto di filtrazione) è stata oggetto di una parziale calibrazione. È stata in primo luogo eseguita una calibrazione del modello per individuare le condizioni al contorno più appropriate (livello piezometrico a monte) con le quali, riferendosi ad un regime stazionario in assenza di precipitazioni, si potesse uguagliare l'altezza di pressione misurata al piezometro; successivamente si è proceduto col simulare l'evento piovoso verificatosi tra il 22 novembre e il 19 dicembre 2012 al fine di capire la capacità di rappresentazione del modello.

Seppure l'analisi in regime stazionario in assenza di precipitazione fornisce risultati ragionevoli, la modellazione dell'evento piovoso prevede, invece, innalzamenti momentanei della falda eccessivamente sovrastimati rispetto quelli misurati, seppur l'andamento nel tempo dell'onda di filtrazione conseguente all'infiltrazione degli apporti meteorici è analoga a quella osservata. Il risultato è certamente affetto da errori dovuti alla scelta arbitraria dei parametri geotecnici, non suffragata da prove di laboratorio o in sito e non è facile una loro calibrazione: in particolare si evidenzia una forte dipendenza del risultato sia dalla permeabilità media che dal rapporto di anisotropia della permeabilità del Flysch alterato. Oltre a ciò, il risultato può essere influenzato da numerosi altri fattori quali: la presenza di vie preferenziali non sempre nel piano trasversale alla frana, tridimensionalità della morfologia ipogea, cambiamenti della geometria nel tempo trascorso tra i rilievi geofisici e morfologici eseguiti nel 2009 e il periodo di monitoraggio, ecc.

In conclusione del lavoro di tesi, per quanto riguarda i modelli misti per l'analisi del comportamento viscoso, possiamo affermare che la loro applicazione a questo caso, seppure fornendo risultati non completamente in linea con le attese, è stata comunque importante per meglio comprendere la dinamica di Pian de Cice. In particolare, il modello di Vuillet-Hutter potrebbe essere ulteriormente migliorato ricercando una funzione che meglio approssimi il comportamento monitorato, eliminando le fasi di innalzamento troppo rapido della falda che non sembrano avere un effetto sugli andamenti della velocità o prevedendo relazioni bilineari velocità-falda. È consigliabile, inoltre, di incrementare il set di dati su cui basare la calibrazione, dati che potrebbero essere acquisiti con un'estensione del sistema di monitoraggio in situ su più punti del settore Pian de Cice.

Allo stesso modo, l'analisi del regime di filtrazione qui effettuata può essere considerata un primo punto dal quale avviare una calibrazione più adeguata con strumenti di ottimizzazione o altri dati di campagna. In questo caso sarebbe molto importante avere almeno due punti di monitoraggio piezometrico al fine di valutare l'andamento e l'inclinazione della falda acquifera con maggiore precisione e avere condizioni al contorno meno approssimative.

## BIBLIOGRAFIA

---

ANGELI M.G., GASPARETTO P., MENOTTI R.M., PASUTO A. & SILVANO S., (1994) - A system of monitoring and warning in a complex landslide in Northeastern Italy

BERTOLO, P. AND BOTTINO, G - Individuazione delle soglie pluviometriche d'innescamento di fenomeni franosi superficiali in funzione delle condizioni idrologiche locali – Analisi di alcune situazioni rappresentative nell'arco alpino occidentale, in “GEAM-Geingegneria Ambientale e Mineraria”, 1-2, marzo-giugno 2006.

BOTTINO, G., CRIVELLARI, R. AND MANDRONE, G. - Eventi pluviometrici critici e dissesti: individuazione delle soglie d'innescamento di colate detritiche nell'Anfiteatro morenico di Ivrea, in: Luino F. (Ed.), La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica, Alba, 5-7 novembre 1996, vol. 2, n. pubbl.

CASON ANGELINI E. (2011) – La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio.

CEVASCO A., SACCHINI A., ROBBIANO A. & VINCENZI E. (2010) – Individuazione delle soglie pluviometriche di innescamento di frane superficiali sul territorio comunale di Genova: il caso della Val Bisagno. In: Italian Journal of Engineering Geology and Environment, pp 36,37

COROMINAS J, MOYA J, LEDESMA A, RIUS J, GILI JA, LLORET A (1999) - Monitoring of the Vallcebre landslide, Eastern Pyrenees, Spain.

COROMINAS J., MOYA J., LEDESMA A., LLORET A. & GILI J.A. (2005) - Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). Landslides 2, 83–96.

COLA S., GABRIELI F., MARCATO G., PASUTO A., SIMONINI P. (2013) – Evolutionary behaviour of the Tessina landslide, Evoluzione della frana del Tessina

DALL'OLIO L., GHIOTTI M., ILICETO V. & SEMENZA E. (1987) - La frana del Tessina, Alpage (Bl). Atti VI Congresso Ordine Nazionale Geologi, Venezia 25-27 settembre 1987, 275-293.

DARIENZO M. (2012) – Legame tra precipitazioni, livello di falda e velocità di scorrimento del settore di Pian de Cice della grande frana del Tessina (Belluno). Tesi triennale presso il dipartimento ICEA dell'Università di Padova

DI MAIO C., VASSALLO R. & VALLARIO M. (2013) - Plastic and viscous shear displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation. Engineering Geology, 126, 53–66.

GOVI, M., MORTARA, G., SORZANA, P. - Eventi idrologici e frane. Geologia Applicata & Ingegneria 20(2): 359–375, 1985.

LEROUEIL S, LOCAT J, VAUNAT J, PICARELLI L, LEE H, FAURE R (1996) – Geotechnical characterization of landslides. In: Senneset K (ed) 7th International Symposium on Landslides.

LUINO FABIO (1996) – La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica, Convegno internazionale del Consiglio Nazionale delle Ricerche

MARCATO G., MANTOVANI M., PASUTO A., TAGLIAVINI F., SILVANO S. & ZABUSKI L. (2009) - Assessing the possible future development of the Tessina landslide using numerical modeling, Proc. of the Landslide Processes Conference: from geomorphologic mapping to dynamic modelling. Strasbourg, France, 6-7 February 2009.

L. PICARELLI - Meccanismi di deformazione e rottura dei versanti. Hevelius, Benevento, 2000.

PUZRIN A. M., SCHMID A. (2012) – Evolution of stabilised creeping landslides

R.A. RICHARDS - Capillary conduction of liquid through porous media.

SUKLJE L. (1969) – Rheological aspects of soil mechanics, Wiley Interscience, London

SKEMPTON A. W. (1964) – Long term stability of clay slopes (4th Rankine lecture).

VULLIET L, HUTTER K (1988) - Some constitutive laws for creeping soil and for rate-dependent sliding at interfaces. In: Swoboda (ed) Numerical methods in geomechanics (Innsbruck 1988).

VAN ASCH T.W.J., VAN BEEK L.P.H., BOGAARD T.A. (2007) - Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. Engineering Geology 91

VAN ASCH THWJ, BUMA JT (1997) - Modelling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the Terres Noires of Barcelonnette (France).

VARNES, D. J. - Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.

---

*Ringrazio la mia relatrice Prof. Cola, per gli insegnamenti ricevuti durante la carriera universitaria, per avermi seguito con pazienza e dedizione nello svolgimento della tesi accompagnandomi a questo importante traguardo della mia vita.*

*Desidero ringraziare in modo particolare per l'affetto dedicatomi la mia famiglia grazie alla quale ho potuto raggiungere questo importante obiettivo con grande supporto morale nonché economico in tutti i miei anni di studio.*

*Grazie infine ai miei amici e amiche con i quali ho condiviso tutti gli anni vissuti fino ad ora, le passioni, i viaggi, lo studio, e gli impegni con spensieratezza e stima reciproca; e grazie a Simona insieme alla quale inizio una nuova e importante parte della mia vita.*

*Andrea*

---