

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi di stabilità della coltre superficiale di pendii in presenza di forti precipitazioni.



Relatore

Castelli Marta

Correlatori

Barbero Monica
Butera Ilaria

Candidato

Scotto di Perrotolo Luigi

Luglio 2021

Abstract

Il territorio italiano è decisamente suscettibile a fenomeni franosi e circa il 91% dei comuni italiani è a rischio frane e/o alluvioni. I dati derivanti dall'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI), dicono che circa un terzo degli eventi totali è costituito da frane a cinematismo rapido. All'interno di questa categoria troviamo quei fenomeni che avvengono a spese della coltre superficiale, indotti da piogge severe o persistenti e che interessano maggiormente ambienti collinari e prealpini, noti in letteratura come "soil slip" o, più genericamente, "shallow landslide". Con riferimento a questa tipologia di frana, la tesi propone una metodologia di studio focalizzata sulle condizioni morfologiche, geotecniche e idrologiche che risultano predisponenti dagli studi di letteratura analizzati. Partendo dai dati raccolti nel corso di un progetto Interreg II (Italia-Confederazione Elvetica), è stata effettuata una modellazione del problema attraverso l'ausilio del software Slide 2D. L'obiettivo finale è lo studio dell'evoluzione del fattore di sicurezza del versante in funzione dei parametri (geotecnici, idrologici e geometrici) adottati, al fine di ottenere indicazioni utili per l'analisi della pericolosità a piccola scala del fenomeno.

Indice

1	Contesto del problema.....	9
1.1	Contesto italiano	9
1.2	Soil slip	12
2	Richiami Teorici.....	15
2.1	Comportamento meccanico del terreno	15
2.2	Comportamento idraulico dei materiali	17
2.3	Metodi dell'equilibrio limite.....	20
3	Caso studio	23
3.1	Descrizione generale dell'evento.....	23
3.2	Analisi delle precipitazioni	24
3.3	Analisi dei dissesti sui versanti.....	28
3.4	Analisi a posteriori delle situazioni di instabilità relative all'evento de 7 agosto 1978	31
4	Modellazione con Slide 2D	37
4.1	Impostazioni generali del modello.....	37
4.2	Pendio continuo	38
4.3	Pendio con discontinuità topografica.....	48
5	Conclusioni.....	55
6	Bibliografia.....	57
7	Allegati	58

Indice delle figure

Figura 1: Densità di frane (area in frana/area cella) su maglia di lato 1 km. Fonte: Rapporto ISPRA 287/2018.....	9
Figura 2: Percentuale dei movimenti franosi suddivisi per tipologia. Fonte: Rapporto ISPRA 287/2018.....	10
Figura 3: Popolazione in aree a pericolosità PAI. Fonte: Rapporto Ispra 287/2018.....	10
Figura 4: Pericolosità da frana, zone PAI. Fonte: Rapporto Ispra 287/2018.....	11
Figura 5: Raggruppamento di frane in testata di impluvio presso l’abitato di Cerreto Langhe, 1994. Fonte: Programma Interreg II, Azione 3	12
Figura 6: Effetti dell’alluvione del 2/11/1968 in Biellese. Fonte: Programma interreg II, Azione 3.....	13
Figura 7: Criterio di Mohr-Coulomb. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica.....	16
Figura 8: Pendio indefinito asciutto. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica	20
Figura 9: Pendio indefinito completamente immerso nell'acqua.. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica	21
Figura 10: Pendio indefinito con falda parallela al versante.. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica	22
Figura 11: Bannio Anzino, Pontegrande. Effetti dell'evento alluvionale de 7 agosto 1978. Fonte: http://polaris.irpi.cnr.it/event/levento-alluvionale-dellagosto-1978-provincia-di-verbano-cusio-ossola/	23
Figura 12: Calasca-Castiglione. Effetti dell'evento alluvionale de 7 agosto 1978. Fonte: http://polaris.irpi.cnr.it/event/levento-alluvionale-dellagosto-1978-provincia-di-verbano-cusio-ossola/	24
Figura 13: Eventi alluvionali in Piemonte suddivisi per bacino idrografico. Fonte: Programma INTERREG II, “Gestione del territorio e prevenzione delle inondazioni”	25
Figura 14: Dati precipitazioni giornaliere del 7 agosto 1978. Fonte: Anselmo, 1979. ...	26
Figura 15: : Dati precipitazioni giornaliere del 7 agosto 1978. Fonte: Anselmo, 1979. 27	
Figura 16: Letture altezze di pioggia a 1,3,6 e 12 ore. Fonte: Anselmo, 1979.....	27
Figura 17: Copertura vegetale tipicamente alpina. Vegetazione ad alto fusto con apparati radicali poco sviluppati, poggianti su uno strato di materiale sciolto di spessore variabile. Fonte: Anselmo 1980.	28
Figura 18: Alta concentrazione di frane in Val Vigezzo, innescatesi tutte durante l’evento alluvionale del 7-8 agosto 1978. Fonte: carta “i dissesti nei bacini dei torrenti Melezze, Fenechchio, e basso Isorno”, regione Piemonte e CNR-IRPI 1981).....	29

Figura 19: Alto bacino del Melezzo Orientale dopo evento alluvionale 7/8/78. Fonte: Progetto Interreg II, Azione 3.....	30
Figura 20: Incisione rocciosa nel bacino del Melezzo Orientale, azione ripulitrice. Fonte: Progetto Interreg II, Azione 3.....	30
Figura 21: Percentuali di uso del suolo franato	32
Figura 22: Massa mobilizzata-tipo di accumulo	33
Figura 23: Altezza nicchia di distacco.....	33
Figura 24: Profilo longitudinale continuo (N), profilo longitudinale in presenza di un forte cambio di pendenza (S).	34
Figura 25: Schema profilo con cambio di pendenza	34
Figura 26: Inclinazione del tratto AX.....	35
Figura 27: Inclinazione del tratto BX.....	35
Figura 28: Angolo Alfa	36
Figura 29: Inclinazione pendio continuo	36
Figura 30: Project settings, Groundwater method analysis.	37
Figura 31: Project Settings, transient analysis stages.....	38
Figura 32: Modalità d'analisi separate su Slide 2D.	39
Figura 33: Slope Stability model.....	39
Figura 34: Define material proprieties.....	39
Figura 35: Mesch setup.	40
Figura 36: Sezione di valle.	40
Figura 37: Sezione di monte.....	40
Figura 38: Hydraulic bounday condition.....	41
Figura 39: Evento alluvionale del 7 agosto 1978 riprodotto come infiltrazione verticale nelle condizioni al contorno transitorie.	41
Figura 40: Hydraulic proprieties.....	42
Figura 41: F.S stage iniziale.	42
Figura 42: Andamento della falda nella zona centrale del versante dopo 36 ore.....	43
Figura 43: F.S. a 36 ore.	43
Figura 44: Andamento della falda nella zona centrale del versante dopo 39 ore.....	44
Figura 45: F.S. minimo, a 39 ore. $K_s = 3.6 \cdot 10^{-4}$	44
Figura 46: Confronto del F.S. con diversi valori di coesione, permeabilità satura pari a $3,6 \cdot 10^{-4}$ m/s	45
Figura 47: Confronto del F.S. con diversi valori di coesione, permeabilità satura pari a $3,6 \cdot 10^{-5}$ m/s.....	46

Figura 48: Confronto del F.S. con diversi valori di coesione, permeabilità satura pari a $3,6 \cdot 10^{-6}$ m/s.....	46
Figura 49: Confronto dell'andamento del F.S. in funzione dei diversi valori di permeabilità satura studiati, a parità di coesione (si propone il caso in cui $c'=3$).....	47
Figura 50: Interfaccia "Slope stability" del modello con taglio.	48
Figura 51: Interfaccia "Transient groundwater" del modello con taglio.	48
Figura 52: water table a 36 ore. $K_s=10^{-5}$	49
Figura 53: water table a 36 ore. $K_s=10^{-4}$	49
Figura 54: water table a 36 ore. $K_s=10^{-6}$	49
Figura 55: water table a 37 ore. $K_s=10^{-5}$	50
Figura 56: water table a 37 ore. $K_s=10^{-4}$	50
Figura 57: water table a 37 ore. $K_s=10^{-6}$	50
Figura 58: water table massima a 48 ore. $K_s=10^{-5}$	51
Figura 59: water table massima a 39 ore. $K_s=10^{-4}$	51
Figura 60: water table massima a 70 ore. $K_s=10^{-6}$	51
Figura 61: F.S minimo pendio con taglio. $K_s=10^{-5}$. $c'=3$	52
Figura 62: confronto dei F.S. per le tre condizioni di permeabilità per un pedio con taglio.	52
Figura 63: F.S. di un pendio continuo e di un pendio con taglio con le stesse caratteristiche. $K_s= 10^{-4}$, $c'=3$	53

1 CONTESTO DEL PROBLEMA

1.1 CONTESTO ITALIANO

Il territorio italiano è decisamente suscettibile a fenomeni franosi e circa il 91% dei comuni italiani è a rischio frane e/o alluvioni. Il rapporto “Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio – Edizione 2018” realizzato dall’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), fornisce il quadro di riferimento aggiornato sulla pericolosità per frane e alluvioni sull’intero territorio nazionale.

Da questo rapporto emerge che l’Italia è uno dei paesi europei maggiormente interessati da fenomeni franosi. Nelle banche dati dei maggiori paesi europei sono state censite circa 900.000 frane e quasi due terzi di esse sono italiane e raccolte nel progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) realizzato dall’ISPRA e dalle Regioni e Province Autonome.

Gli eventi franosi censiti e catalogati nell’inventario IFFI sono 620.808 e interessano un’area pari a 23.700 km², circa il 7.9% dell’intero territorio nazionale. Un quadro sulla distribuzione delle frane in Italia può essere ricavato dall’indice di franosità, pari al rapporto tra l’area in frana e la superficie totale, calcolato su maglia di lato 1 km.

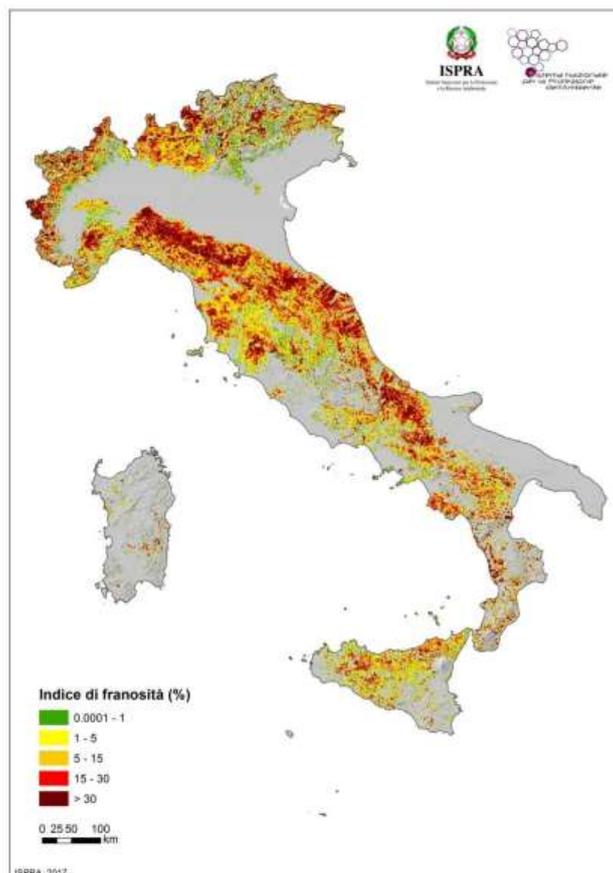


Figura 1: Densità di frane (area in frana/area cella) su maglia di lato 1 km. Fonte: Rapporto ISPRA 287/2018

Il 28% delle frane osservate è costituito da fenomeni a cinematismo rapido (crolli, colate rapide di fango e detrito), aventi velocità elevate (alcuni metri al secondo) ed elevata distruttività. Altre tipologie di movimento (es. colate lente, frane complesse),

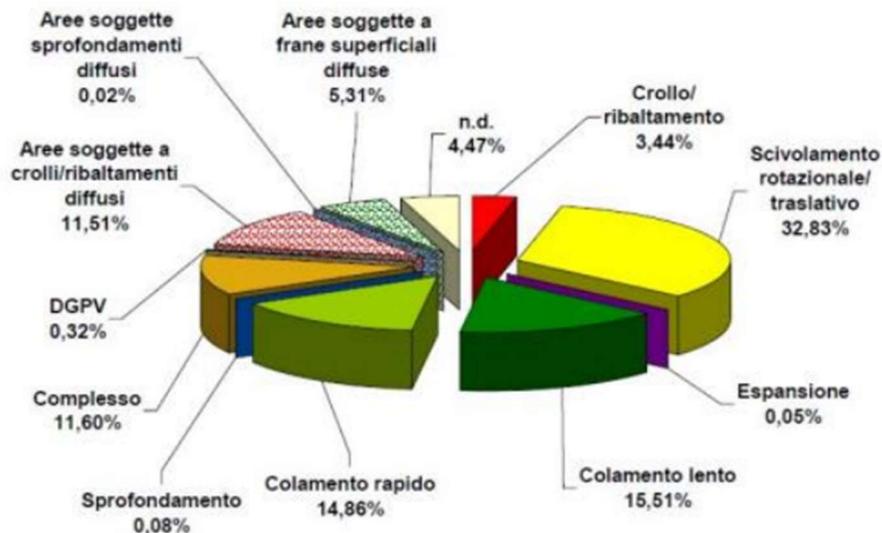


Figura 2: Percentuale dei movimenti franosi suddivisi per tipologia. Fonte: Rapporto ISPRA 287/2018

caratterizzate da velocità moderate o lente, possono causare ingenti danni a centri abitati e infrastrutture lineari di comunicazione. I fattori più importanti per l'innescio delle frane sono le precipitazioni brevi e intense, quelle persistenti e i terremoti. Una classificazione degli eventi franosi censiti in funzione della tipologia di movimento viene proposta in Figura 2.

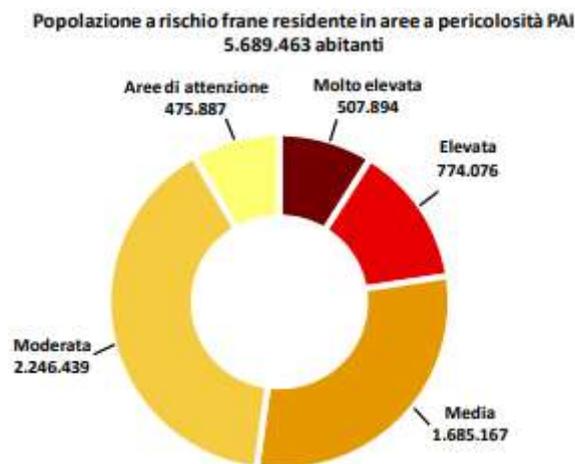


Figura 3: Popolazione in aree a pericolosità PAI. Fonte: Rapporto Ispra 287/2018.

Lo studio condotto dall'ISPRA, inoltre, ci dice che 1,28 milioni di persone in Italia risiede in zone a rischio frana (ovvero zone con pericolosità PAI elevata o molto elevata) e che circa il 16,6% del territorio nazionale è classificato a maggiore pericolosità.

I Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) sono strumenti in continua evoluzione e negli anni sono stati soggetti a integrazioni e modifiche da parte delle Autorità di Bacino (oggi Autorità di Bacino Distrettuali), a seguito di nuovi studi, nuovi eventi idrogeologici o al completamento di interventi di mitigazione del rischio frana. Costituiscono uno strumento essenziale per una pianificazione territoriale corretta, attraverso l'applicazione di vincoli e regolamentazioni di uso del suolo.

L'ISPRA, al fine di aggiornare la mappa della pericolosità da frana sull'intero territorio nazionale, ha proceduto, nel 2017, alla Mosaicatura nazionale delle aree a pericolosità dei Piani di Assetto Idrogeologico. È stata utilizzata una classificazione della pericolosità per l'intero territorio nazionale in 5 classi: pericolosità molto elevata P4, elevata P3, media P2, moderata P1 e aree di attenzione AA.

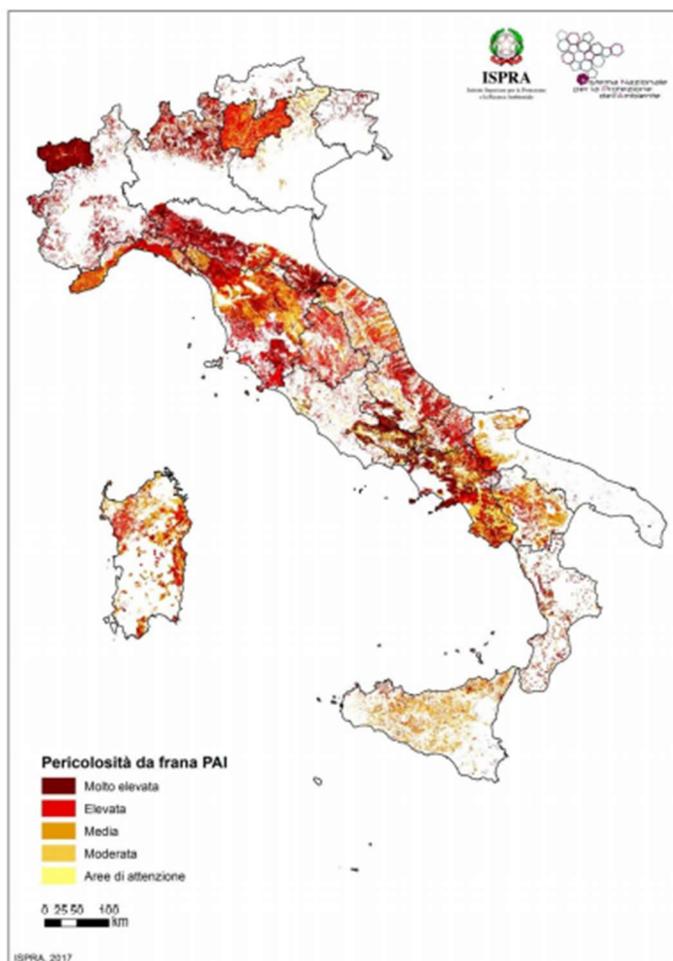


Figura 4: Pericolosità da frana, zone PAI. Fonte: Rapporto Ispra 287/2018.

1.2 SOIL SLIP

All'interno del quadro descritto nel paragrafo precedente, si inseriscono i fenomeni franosi che avvengono a spese delle coltri superficiali, con sviluppi areali e volumi convolti molto modesti.

Questi fenomeni, meglio noti come *soil slip*, interessano prevalentemente ambienti di tipo collinare e prealpino, hanno un cinematismo rapido e risultano difficili da prevedere.

Alcune caratteristiche rilevati di questa tipologia di frane sono:

- Spessori (s) e volumi (v) molto modesti:
 - s : da qualche cm a 100-150 cm;
 - v : da qualche m^3 a qualche centinaio di m^3 , raramente oltre 1000 m^3 ;
- elevato numeri di fenomeni in aree relativamente circoscritte;
- elevata densità di singoli fenomeni per unità di superficie;

spesso tendenti a:

- innesco di fenomeni di trasporto in massa torrentizio, a causa del trasferimento dei volumi accumulati nella rete idrografica;
- coalescenza delle nicchie di distacco (aggregazione di singole frane, anche diverse decine);



Figura 5: Raggruppamento di frane in testata di impluvio presso l'abitato di Cerreto Langhe, 1994. Fonte: Programma Interreg II, Azione 3

- notevole velocità di movimento (anche maggiore di 50 km/h);

- traslazione dell'accumulo oltre il piede del versante, su suolo pianeggiante;
- condizionamento delle precipitazioni di elevata intensità;
- scarsa quantità di indizi premonitori;
- bassa probabilità di riattivazione nello stesso luogo, ma alta probabilità di accadimento in aree adiacenti;
- forte condizionamento da variazioni morfologiche locali.

Le porzioni di versante interessate da questa tipologia di frane sono generalmente prive di vegetazione ad alto fusto, spesso si tratta di prati, pascoli, vigneti o frutteti. Molto frequentemente, infatti, questi tipi di colture si avvalgono di terrazzamenti che risultano dannosi in termini di stabilità del pendio.

Come già detto, nel movimento vengono coinvolte piccole porzioni di terreno superficiale non coesivo, dunque il volume mobilitato in un singolo evento risulta piuttosto contenuto. Tuttavia, l'aggregazione di singoli eventi insieme all'elevata densità di distribuzione per unità di superficie, fa sì che i volumi in gioco aumentino considerevolmente, aumentando la probabilità che il tessuto antropico circostante possa essere coinvolto.

L'interesse alle frane superficiali iniziò a crescere a seguito del catastrofico evento alluvionale del novembre 1966 nel Triveneto, ma si deve a M. Govi (studio dell'evento alluvionale del novembre 1968 in Biellese) la prima rappresentazione cartografica di dettaglio e le prime osservazioni sui caratteri distintivi di questa tipologia di fenomeni.

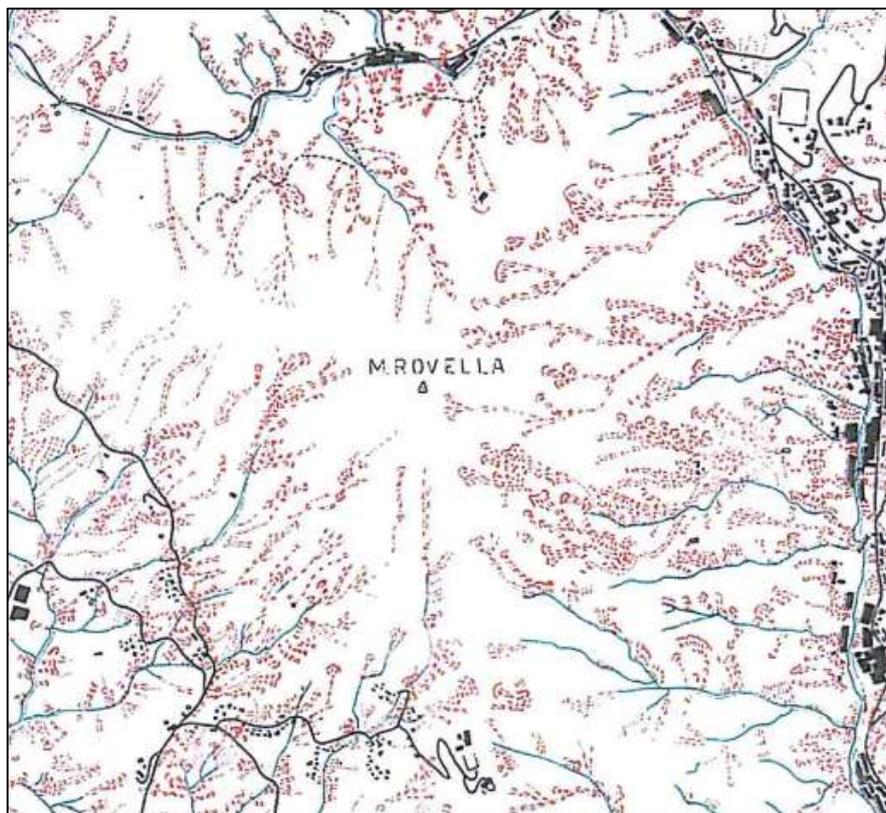


Figura 6: Effetti dell'alluvione del 2/11/1968 in Biellese. Fonte: Programma interreg II, Azione 3

La carta realizzata da Govi riporta accuratamente le migliaia di frane che devastarono il bacino del torrente Strona di Cossato ed è la dimostrazione delle potenzialità distruttive di questo fenomeno franoso.

Diversi e severi eventi alluvionali susseguitisi in Italia dopo il 1968, diedero il via ad un approfondimento delle conoscenze in materia di frane superficiali. Si riportano di seguito gli eventi più rilevanti avvenuti fino all'anno 2000 (*Rapporto Interreg II, Azione 3*):

- Biellese Orientale, novembre 1951 e novembre 1968;
- Entroterra di Genova, ottobre 1970;
- Val Seriana (BS), luglio 1972;
- Pinerolese maggio 1977;
- Alessandrino meridionale, ottobre 1977;
- Val Vigezzo, agosto 1978
- Tresenda, maggio 1983;
- Carna settembre 1983;
- Valle tartano luglio 1987;
- Prealpi bresciane gigno 1990;
- Valle olona 1992 giugno;
- Langhe e Valsesia novembre 1994;
- Valle d'Aosta ottobre 2000.

In occasione dell'evento alluvionale avvenuto nell'ottobre del 1977 in Alessandrino, venne delineato un primo modello previsionale in funzione delle caratteristiche medie dell'area colpita e dell'evento scatenante (Govì & Sorzana, 1980; Govì et al., 1985).

La vastità di eventi catastrofici successivi, diede ulteriore slancio allo studio di questa tipologie di frane, che sempre più frequentemente viene affrontato con un approccio interdisciplinare (geotecnico, idrologico, pedologico, ecc.) motivato dalla complessità di questi fenomeni naturali, semplici solo in apparenza.

2 RICHIAMI TEORICI

Nei capitoli successivi verrà proposto un modello di analisi di un versante esposto al rischio di fenomeni di mobilitazione della coltre superficiale. Per svolgere l'analisi ci si avvarrà del software Slide 2D del pacchetto Rocscience. Il programma lavora su un modello geotecnico-idrologico e, sulla base dei dati immessi, restituisce il calcolo del Fattore di Sicurezza (F.S.) del versante. Il calcolo del F.S. avviene tramite il metodo dell'equilibrio limite, nella fattispecie il programma consente di scegliere tra diversi modelli. Nel presente capitolo vengono descritti gli strumenti di cui si avvale il software per rappresentare il comportamento geotecnico e idraulico dei materiali.

2.1 COMPORTAMENTO MECCANICO DEL TERRENO

Per modellare diversi tipi di terreno in funzione dei loro parametri geotecnici su Slide 2D, è stato scelto il criterio di rottura di Mohr-Coulomb tra quelli a disposizione da software.

Un criterio di rottura definisce le condizioni che comportano la rottura di un materiale. Nel caso in cui venga applicato ad un mezzo granulare, con il termine rottura si considera lo scorrimento relativo che avviene su una qualsiasi superficie interna, quando il rapporto la tensione tangenziale e la tensione normale efficace agenti su questa superficie raggiunge un valore critico.

Per i terreni, dunque, si può fare riferimento al criterio di Mohr-Coulomb che risale all'equazione data da Coulomb nel 1773:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.1)$$

che ci dice che la resistenza a taglio τ disponibile su un piano di scorrimento è funzione della tensione normale σ_n agente sul piano stesso e delle caratteristiche del materiale c e φ .

Successivamente, nel 1923, venne postulato da Terzaghi il principio degli sforzi efficaci secondo cui:

“Tutti gli effetti misurabili di una variazione dello stato di tensione, come la compressione, la distorsione e la variazione di resistenza al taglio, sono dovuti esclusivamente a variazioni delle tensioni efficaci. La tensione efficace normale è pari alla differenza tra la tensione totale e la pressione interstiziale”

Sul principio degli sforzi efficaci si possono due considerazioni molto importanti:

- 1- Contiene la definizione di tensione efficace:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.2)$$

In cui:

σ è la tensione totale agente sul terreno

u è la pressione del fluido interstiziale

σ' è la tensione efficace agente sullo scheletro del terreno

Dunque, gli sforzi normali sono supportati sia dalla parte solida che dalla parte liquida, per cui vale la (2.2).

Inoltre, gli sforzi tangenziali sono interamente supportati dalla parte solida, ovvero l'acqua non sopporta sollecitazioni di taglio. Quindi:

$$\tau' = \tau \quad (2.3)$$

2- Evidenzia l'importanza e gli effetti della tensione efficace:

Tutti gli effetti misurabili di una variazione dello stato di tensione, come la compressione, la distorsione e la variazione della resistenza al taglio, sono dovuti esclusivamente a variazioni delle tensioni efficaci. Per questo motivo il comportamento meccanico del terreno dipende solo dagli sforzi efficaci.

Introdotta il principio degli sforzi efficaci, l'equazione di Coulomb (2.1) può essere riscritta come:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u)\tan\phi' = c' + \sigma' \tan\phi' \quad (2.4)$$

In cui:

σ_n = tensione totale normale al piano di scorrimento considerato;

u = pressione dell'acqua;

c' = coesione;

ϕ' = angolo di resistenza a taglio.

La relazione (2.4) è rappresentata nel piano di Mohr da una retta (figura x): i punti rossi rappresentano stati tensionali di rottura; tutti i punti che si trovano al di sotto della retta con pendenza ϕ' individuano stati tensionali ammissibili, mentre quelli al di sopra rappresentano situazioni prive di significato fisico, poiché non compatibili con la resistenza del materiale. Questa retta prende il nome di *inviluppo di rottura*, proprio perché individua le situazioni di equilibrio.

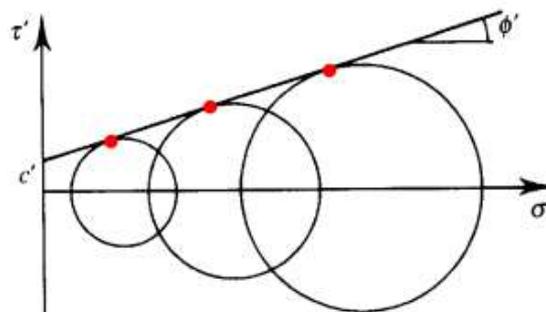


Figura 7: Criterio di Mohr-Coulomb. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica.

In assenza di coesione ($c'=0$) l'involuppo passerebbe per l'origine e la relazione (3) potrebbe essere espressa come:

$$\tau = (\sigma_n - u)\tan\varphi' \quad (2.5)$$

Che può essere espressa in termini di tensioni totali come:

$$\sigma_1' = \sigma_3' \frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'} \quad (2.6)$$

Se invece si volesse esprimere la (3) in funzione delle tensioni totali, bisognerebbe operare una traslazione dell'asse delle ordinate di una quantità pari a $c'\cot\varphi'$, ottenendo:

$$\frac{\sigma_1'+c'\cot\varphi'}{\sigma_3'+c'\cot\varphi'} = \frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'} \quad (2.7)$$

2.2 COMPORTAMENTO IDRAULICO DEI MATERIALI

Per quel che riguarda il comportamento idraulico dei materiali, il terreno è stato caratterizzato secondo la funzione di permeabilità di Van Genuchten.

Tale funzione di permeabilità esprime la relazione tra i valori di contenuto idrico o di suzione del terreno e i valori di permeabilità. Si può osservare che diminuendo il contenuto idrico volumetrico, la permeabilità del materiale decresce. La forma della curva di permeabilità, dunque, ha un effetto molto importante sulla caratterizzazione del moto di filtrazione.

È importante conoscere la curva di permeabilità nel caso in cui si abbia la necessità di eseguire una simulazione del moto di filtrazione nella situazione di materiale in condizioni insature. Nel seguito verrà descritta la procedura di Van Genuchten (1980), grazie alla quale è possibile stimare la conducibilità idraulica di un materiale partendo dalla curva di ritenzione.

Ad oggi, esistono diverse metodologie, in laboratorio, utili alla misurazione dei valori di permeabilità in funzione dei diversi valori di suzione. Queste procedure sono poco diffuse nei laboratori geotecnici per via delle grandi incertezze che le affiggono e perché le misurazioni risultano lunghe e costose, soprattutto se il materiale da caratterizzare prevede la realizzazione di numerosi provini.

Nella pratica, dunque, vengono utilizzati dei metodi a base empirica per la determinazione della funzione di permeabilità. Misurare o stimare la permeabilità del materiale saturo, successivamente misurare o stimare la curva di ritenzione e da quest'ultima ottenere la funzione di permeabilità, è uno dei metodi più comunemente utilizzati, per il quale esistono diverse procedure comprovate per stimare la funzione di permeabilità. Tra queste, la procedura di Van Genuchten (1980) risulta, al momento, la più usata per la caratterizzazione dei materiali a scopi ingegneristici. È possibile implementare questa procedura nei software di calcolo agli elementi finiti.

Nel 1980 Van Genuchten creò una metodologia, ad oggi ancora una delle più affidabili e usate, per la stima della curva di permeabilità dei terreni in condizioni insature. Nel caso

studio oggetto del presente lavoro di tesi è stato utilizzato proprio il modello di Van Genuchten per la risoluzione dell'equazione della filtrazione, implementata nei codici di calcolo agli elementi finiti.

Questo metodo si basa sul ricavare un'equazione analitica per la curva di permeabilità, partendo da una curva di ritenzione, con derivata prima basata sul modello di Mualem (1976).

Mualem derivò la seguente equazione per la curva di permeabilità, nel 1976:

$$K_r(h) = \theta^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\int_0^{\theta} \frac{1}{h(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx} \right]^2 \quad (2.8)$$

In cui:

$$K_r = \frac{K(h)}{K_s} \quad (2.9)$$

- K_r : conducibilità relativa;

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.10)$$

- θ : contenuto d'acqua adimensionale e risulta dipendente dai valori di θ_r e θ_s ;
- θ_r : contenuto di acqua residuo;
- θ_s : contenuto di acqua saturo;
- h : carico di suzione, che dovrebbe essere negativo e in valore assoluto.

L'equazione (2.8) risulta essere un'equazione integrale risolvibile solamente per via numerica, per una curva caratteristica $\vartheta(h)$ qualsiasi.

Van Genuchten, ricavò una funzione $K_r(h)$ descrivibile con un'equazione analitica inserendo nell'equazione (2.8) l'equazione per il contenuto d'acqua adimensionale seguente:

$$\theta = \left[\frac{1}{1+(ah)^n} \right]^m \quad (2.11)$$

Sostituendo la (2.10) nella (2.11) e ricavando il contenuto idrico volumetrico si ottiene:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(ah)^n]^m} \quad (2.12)$$

In cui:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.13)$$

La classe di funzioni descritta dalla (2.12) è compatibile fisicamente con la forma delle curve di ritenzione sperimentali. È caratterizzata, infatti, da una forma a S e da dei valori

di $\frac{d\theta}{dh}$ tendenti a zero per valori di contenuto idrico che a loro volta tendono ai contenuti idrici saturo e residuo.

Dalla risoluzione della (2.8) introducendo la (2.11) si ottiene:

$$K_r(\theta) = \theta^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.14)$$

Tale equazione rappresenta una soluzione in forma chiusa per l'integrale di Mualem.

I valori noti di ϑ_s , ϑ_r , n e α definiscono univocamente le curve di ritenzione e di permeabilità del terreno.

Indagini geotecniche su campioni di terreno possono individuare il valore di ϑ_s che può essere considerato coincidente con la porosità del terreno.

Il valore ϑ_r può corrispondere al contenuto idrico misurato per elevati valori di suzione (come assunto da Van Genuchten nel suo lavoro, che suggerisce il valore di -15000 cm).

Restano da determinare i parametri α e n per i quali Van Genuchten propose la seguente procedura:

La stima di n può essere effettuata determinando il valore di m dalla seguente equazione:

$$S_p = 1,151 \frac{m}{1-m} \left(1 - 2^{-\frac{1}{m}} \right) \quad (2.15)$$

In cui:

$$S_p = \frac{1}{\vartheta_s - \vartheta_r} \left| \frac{d\theta}{d(\log h)} \right|_{\theta=\theta_p} \quad (2.16)$$

$$\theta_p = \frac{\vartheta_s + \vartheta_r}{2} \quad (2.17)$$

$\frac{d\theta}{d(\log h)}$ rappresenta la pendenza su piano semilogaritmico della curva caratteristica misurata.

La (2.15) determinata il parametro m mediante un risolutore numerico. In seguito, è possibile invertire la (2.13) per ricavare il valore di n . Il parametro n sarà caratterizzato dalla pendenza su piano logaritmico della curva caratteristica e dai valori di contenuto idrico saturo e residuo. È possibile, in questo modo, ricavare il valore di α invertendo la seguente equazione:

$$h_p = \frac{1}{\alpha} \left(2^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad (2.18)$$

In cui:

- h_p : suzione in corrispondenza del valore θ_p del contenuto idrico per la curva caratteristica misurata.

2.3 METODI DELL'EQUILIBRIO LIMITE

Il calcolo del fattore di sicurezza da parte del software Slide 2D avviene per mezzo di metodi dell'equilibrio limite.

Nelle analisi riconducibili al metodo dell'equilibrio limite, il comportamento del terreno è riconducibile ad un mezzo rigido-plastico. L'analisi, infatti, considera soltanto le condizioni nell'istante di rottura, risultando indipendente da tutti i processi deformativi che precedono questo istante. Inoltre, il comportamento rigido-plastico non consente di prendere in considerazione il comportamento meccanico del terreno in condizioni di latente instabilità, né le condizioni post rottura, che sono spesso quelle più significative in termini di conseguenze che la rottura di un pendio può avere.

Tutti i metodi basati sull'equilibrio limite globale hanno in comune le seguenti assunzioni:

- si assume che lo scivolamento avvenga su una superficie di geometria nota;
- l'analisi si effettua in condizioni di deformazione piana;
- la resistenza a taglio lungo la superficie di scivolamento è confrontata con il valore necessario a garantire l'equilibrio. Tale rapporto è assunto come parametro per la misura della sicurezza del pendio. Pertanto, il coefficiente di sicurezza può essere descritto come il valore per cui dividere la resistenza a taglio per ottenere le condizioni di equilibrio limite al pendio ed è assunto costante lungo l'intera superficie di scivolamento.

Pendio indefinito

A questo punto può essere utile fare riferimento ad un pendio di estensione infinita:

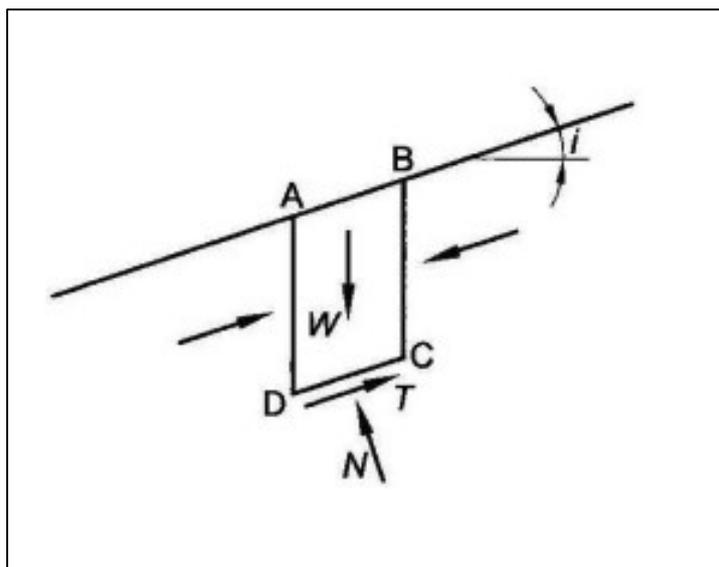


Figura 8: Pendio indefinito asciutto. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica

Per pendio indefinito si intende il semispazio delimitato da un piano avente inclinazione $i < \varphi'$, rappresentato in figura, con proprietà costanti lungo la verticale, qualunque essa sia.

Date queste ipotesi, l'azione tagliante su tratto CD si può esprimere come:

$$T = W \operatorname{sen} i = N \operatorname{tg} i \quad (2.19)$$

L'equilibrio è garantito fino al momento in cui questa forza supera la resistenza a taglio garantita dal materiale. Quest'ultima, nell'ipotesi di materiale puramente attritivo, può essere espressa come:

$$T_r = N \operatorname{tg} \varphi' \quad (2.20)$$

Il Fattore di Sicurezza (F.S.) sarà definito nel modo:

$$F.S. = \frac{T_r}{T} = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} i} \quad (2.21)$$

Da questo risultato si osserva che:

- in un pendio indefinito, la condizione di instabilità è raggiunta quando l'angolo i assume il valore di angolo di resistenza a taglio;
- F.S. è indipendente dalla profondità;
- L'unico parametro richiesto per valutare il F.S. è l'angolo di resistenza a taglio.

Se il pendio risulta totalmente sommerso e l'acqua è in condizioni idrostatiche, l'equilibrio del concio richiede la presa in esame di tutte le forze agenti al contorno, compresa la risultante delle forze dell'acqua.

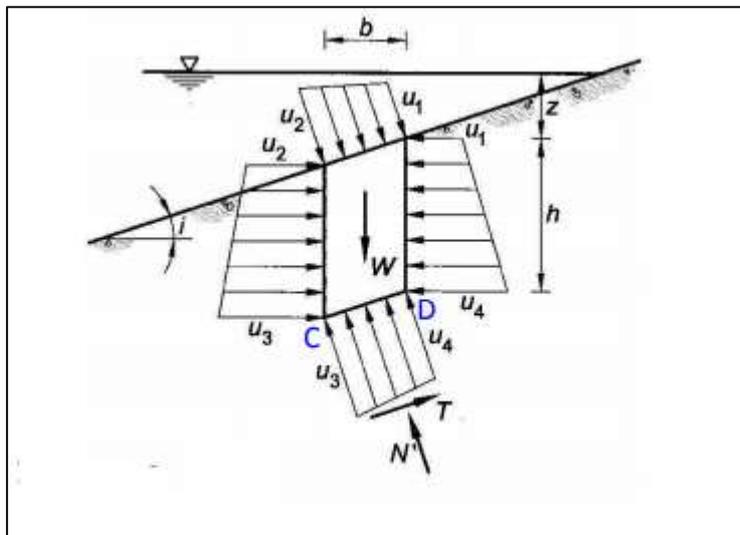


Figura 9: Pendio indefinito completamente immerso nell'acqua.. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica

La risultante delle azioni esercitate dall'acqua è una forza verticale pari a:

$$U = b h \gamma_w \quad (2.22)$$

Per cui continua ad essere ritenuta valida l'espressione 2.21.

Se invece il pendio è interessato da un moto di filtrazione, con linee di flusso parallele al piano campagna (figura), l'analisi si complica leggermente.

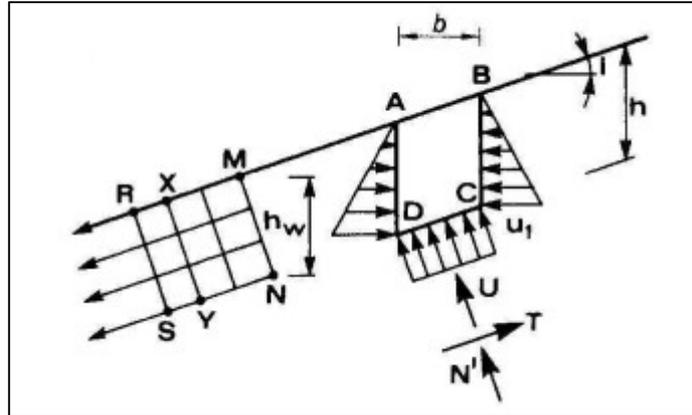


Figura 10: Pendio indefinito con falda parallela al versante.. Fonte: Lancellotta, 2012, Geotecnica

Si analizza nuovamente l'equilibrio del concio ABCD, soggetto al peso proprio e alle azioni agenti al contorno. La risultante delle forze di filtrazione è pari a

$$F_i = b h \gamma_w i_w \quad (2.23)$$

In cui i_w rappresenta il gradiente idraulico.

Le linee RS ed XY in figura, sono equipotenziali, quindi il gradiente idraulico è pari a:

$$i_w = \frac{RX \text{sen } i}{RX} = \text{sen } i \quad (2.24)$$

Le forze T ed N' varranno:

$$T = \gamma' b h \text{sen } i + \gamma_w b h \text{sen } i = \gamma b h \text{sen } i \quad (2.25)$$

$$N' = \gamma' b h \cos i \quad (2.26)$$

Il F.S., dunque, diventa il seguente:

$$F.S. = \frac{\text{tg } \varphi' \gamma'}{\text{tg } i \gamma} \quad (2.27)$$

Il fattore di sicurezza così ottenuto, risulta quasi dimezzato rispetto ai casi precedenti. Per questo motivo si può dire che un moto di filtrazione influenza significativamente la stabilità di un pendio.

Se il livello di falda si colloca al di sotto della superficie del terreno, ad una profondità z_w il F.S. si esprime come:

$$F.S. = \frac{\text{tg } \varphi'}{\text{tg } i} \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma} + \frac{\gamma_w z_w}{\gamma z} \right) \quad (2.28)$$

Adesso il F.S. decresce con l'aumentare della profondità z della superficie di scivolamento.

3 Caso studio

3.1 DESCRIZIONE GENERALE DELL'EVENTO

Tra i giorni 7 e 8 agosto 1978, precipitazioni eccezionalmente violente colpirono in un primo momento la Valle d'Aosta, poi la Valsesia e il medio bacino del Toce (investendo con particolare intensità la Val Vigizzo), ed infine andarono ad esaurirsi nella Valle del Melezzo orientale in territorio svizzero.

L'evento alluvionale colpì in tutto 20 centri abitati, causando ingenti danni a persone, infrastrutture, agricoltura e, più in generale, a tutto il tessuto antropico circostante. Il dato senza dubbio più drammatico riguarda le perdite di vite umane. Vennero accertate 15 vittime e 4 dispersi in Italia, mentre in Svizzera le vittime furono 6 più un disperso.

Molto gravi furono anche i danni alla morfologia del territorio, con pesanti alterazioni dell'assetto idrogeologico delle aree colpite (per estensione e gravità dei danni subiti, la Val Vigizzo risulta essere la più devastata dal nubifragio).



Figura 11: Bannio Anzino, Pontegrande. Effetti dell'evento alluvionale de 7 agosto 1978.

Fonte: <http://polaris.irpi.cnr.it/event/levento-alluvionale-dellagosto-1978-provincia-di-verbano-cusio-ossola/>



Figura 12: Calasca-Castiglione. Effetti dell'evento alluvionale de 7 agosto 1978.

Fonte: <http://polaris.irpi.cnr.it/event/levento-alluvionale-dellagosto-1978-provincia-di-verbano-cusio-ossola/>

3.2 ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI

Le intense precipitazioni che si verificarono durante l'evento alluvionale del 7-8 agosto in Val d'Ossola nacquero da un contesto meteorologico noto, verificatosi più volte nel passato (alluvione del 19-20 agosto 1958 in val Bognanco e Divedro, 12-13 luglio in val Vigizzo).

Nella stagione estiva, la regione mediterranea è spesso affetta da uno strato d'aria calda e umida. Ciò è dovuto al forte riscaldamento solare tipicamente estivo, che comporta alta e alta pressione, ed alla presenza del mar Mediterraneo. Parallelamente, oltre le Alpi, si creano sovente aree di bassa pressione che generano un afflusso, proprio attraverso le alpi, di quell'aria calda e umida della zona mediterranea. In questo processo entrano in contatto due masse di aria umida con temperature diverse, una calda e l'altra fredda, provocando così l'innesco di forti precipitazioni.

In figura (successiva) è rappresentato un quadro degli eventi alluvionali occorsi nella regione Piemonte tra il 1705-1994; la Val d'Ossola e la Val Vigizzo sono zone con probabilità di accadimento medio-alta di fenomeni alluvionali.

Questo primo dato è molto importante perché i fenomeni franosi inerenti la coltre superficiale sono strettamente connessi agli eventi alluvionali, perciò individuare una

zona predisposta a questa tipologia di eventi costituisce un primo passo nella definizione delle aree a rischio.

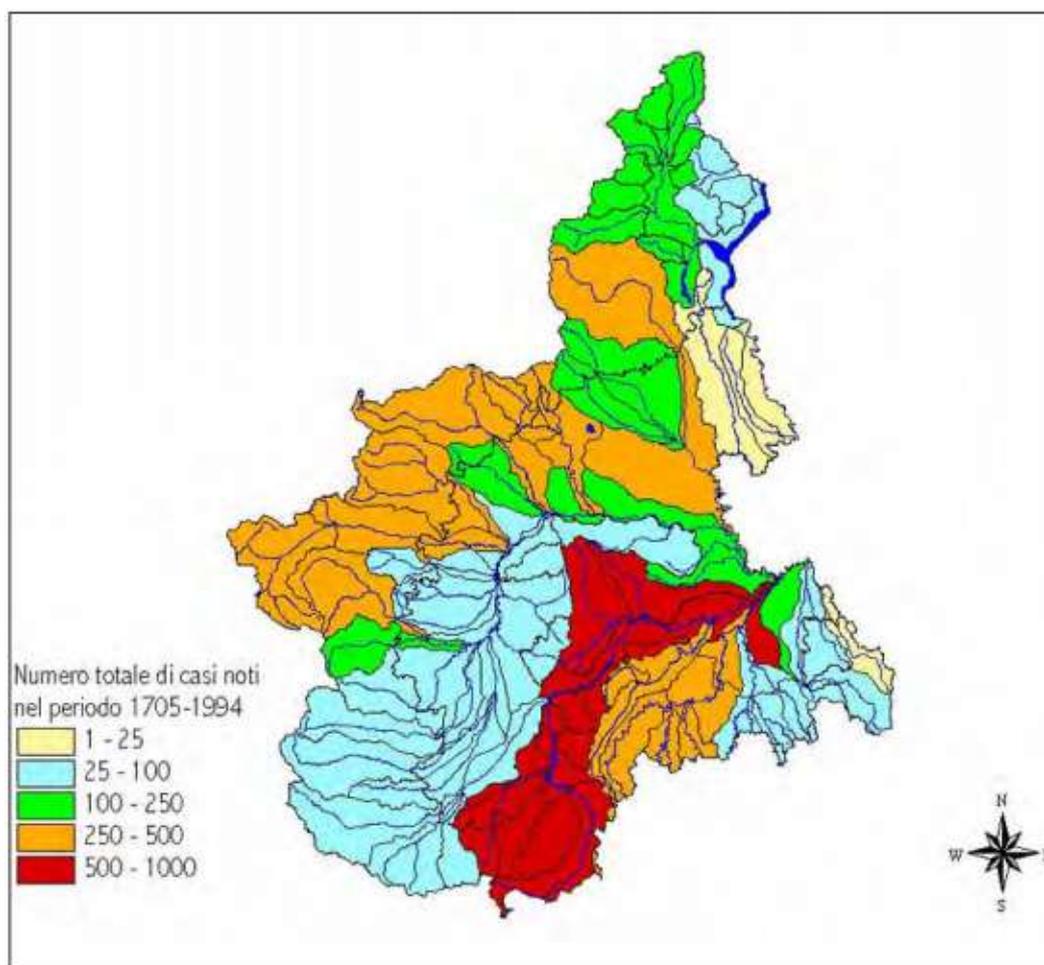


Figura 13: Eventi alluvionali in Piemonte suddivisi per bacino idrografico. Fonte: Programma INTERREG II, "Gestione del territorio e prevenzione delle inondazioni"

Descritte brevemente le cause d'innescio del fenomeno, si può passare ad una ricostruzione delle precipitazioni avvenute durante l'evento alluvionale.

"[...] in Val Vigizzo cominciò a piovere la sera del 6 agosto e piovve abbastanza intensamente tutta la notte fino alla mattina del giorno seguente. Il 7 agosto la pioggia ebbe alcuni intervalli di sospensione fra le 8 e le 13, dopo di che essa riprese in crescendo. Altra breve sospensione della precipitazione verso le 18, durante la quale riemersero le cime dei monti dalle nubi. Poi improvvisamente dalle 18:15 in avanti l'aria sembrò più calda e si addensarono rapidamente nel cielo nubi grigio-giallo mentre una luce verdastra avvolgeva tutta la valle. Le precipitazioni furono subito intensissime: pioggia e grandine che non permettevano la visibilità a due metri di distanza."

“[...] Tutto questo durò fino alle 19:30, dopo di che cessò la grandine, ma continuò a piovere con minor intensità, sempre però elevata, fino alle ore 4 del giorno 8 agosto. Il periodo di massima intensità della pioggia è stato dunque dalle 18:15 alle 19:30.”

“Durante questo breve tempo si verificarono tutte le frane, gli smottamenti, tutto il disastro in alto; improvvisamente i ruscelli diventarono torrenti, i torrenti fiumi” [Bertamini, 1978]

La cronaca riportata dal Bertamini trova ulteriori conferme nei dati raccolti dai pluviografi a disposizione.

PRECIPITAZIONI DEL 7 AGOSTO 1978			
Stazione	Bacino	Quota (m)	Precipitazione (mm)
Toggia (1)	Toce	2.170	60
Sabbione (1)	Toce	2.460	88
Vannino (1)	Toce	2.175	60
Formazza Ponte (1)	Toce	1.280	68
Codelago (1)	Devero	1.885	94
Devero (1)	Devero	1.640	92
Goglio (1)	Devero	1.100	94
Agaro (1)	Toce	1.561	93
Cadarese (1)	Toce	725	115
Verampio (1)	Toce	570	125
Engeloch (5)	Diveria	1.795	60,1
Simplon Dorf (5)	Diveria	1.470	50,6
Lago d'Avino (1)	Diveria	2.240	64
Gebbo (1)	Diveria	1.015	88
Varzo (1)	Diveria	550	81
Crevola d'Ossola (1)	Diveria	337	190
Larecchio (3)	Isorno	2.126	230
Agarina (3)	Isorno	1.226	265
Domodossola (Calice) (1)	Toce	277	223
Lago Cingino (1)	Ovesca	2.281	80
Campliccioli (1)	Ovesca	1.310	99
Camposecco (1)	Ovesca	2.281	72
Rovesca (1)	Ovesca	760	136
Alpe Cavalli (1)	Ovesca	1.510	106
Pallanzeno (1)	Toce	228	213
Macugnaga (2)	Anza	1.200	100
Ceppo Morelli (4)	Anza	750	91
Bannio Anzino (2)	Anza	687	235
Candoglia (2)	Toce	201	98
Cicogna (2)	Toce	770	164
Campello Monti (2)	Strona	1.300	240
Forno (2)	Strona	892	240
Marmo Sambughetto (2)	Strona	765	180
Cireggio (2)	Lago d'Orta	370	80
Boletto (2)	Lago d'Orta	696	65
Mergozzo (2)	Toce	205	71
Airolo (5)	Ticino	1.149	97
Chiggiona (5)	Ticino	695	204
Olivone (5)	Ticino	905	200
Biasca (5)	Ticino	293	112,5
S. Bernardino (5)	Ticino	1.628	175,5
Mesocco (5)	Ticino	815	170,5
Braggio (5)	Ticino	1.320	155,8
Grono (5)	Ticino	357	183,6
Bellinzona (5)	Ticino	230	32,8
Frasco (5)	Verzasca	890	260
Locarno Aeroporto (6)	Ticino	198	180,1
Locarno Monti (5)	Lago Maggiore	379	155,4
Vira (5)	Lago Maggiore	210	160,5
Peccia (6)	Maggia	—	181,0
Cavergho (6)	Maggia	—	250
Bosco Gurin (5)	Maggia	1.510	197,4
Cevio (5)	Maggia	418	246,5
Camedo (5)	Maggia	570	318
Palagnedra (6)	Maggia	495	275

(Segue)

Figura 14: Dati precipitazioni giornaliere del 7 agosto 1978. Fonte: Anselmo, 1979.

PRECIPITAZIONI DEL 7 AGOSTO 1978			
Stazione	Bacino	Quota (m)	Precipitazione (mm)
Mosogno ⁽⁵⁾	Maggia	790	236
Brissago ⁽⁵⁾	Lago Maggiore	280	93,8
Cannobio ⁽²⁾	Lago Maggiore	220	60
Falmenta ⁽²⁾	Lago Maggiore	662	141
Pallanza ⁽²⁾	Lago Maggiore	241	33
Ispra ⁽²⁾	Lago Maggiore	220	6
Coldrerio ⁽⁵⁾	Lago Lugano	330	72
Scudellate ⁽⁵⁾	Lago Lugano	904	51
Bruzella ⁽⁵⁾	Lago Lugano	620	43,5
Morbio Superiore ⁽⁵⁾	Lago Lugano	480	49,9
Monte Bre ⁽⁵⁾	Lago Lugano	910	56,2
Lugano ⁽⁵⁾	Lago Lugano	276	59,4
Crana Torricella ⁽⁵⁾	Lago Lugano	1.002	188,9
Fescoggia ⁽⁵⁾	Lago Lugano	855	184
Ponte Tresa ⁽⁵⁾	Lago Lugano	274	100,6

FONTI:

(1) Enel.
(2) Ufficio Idrografico del Po, Milano.
(3) Sisma, Villadossola.
(4) Montedison.
(5) Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Zurich.
(6) Fonti diverse (Ambrosetti et al., 1978; Rima, 1978).

Figura 15: : Dati precipitazioni giornaliere del 7 agosto 1978. Fonte: Anselmo, 1979.

LETTURE DEL 7 AGOSTO 1978	1 ora [mm]	3 ore [mm]	6 ore [mm]	12 ore [mm]
Domodossola (C.le Calice, ENEL)	50	138	190	205
Palagnedra (O.I.M., Rima, 1979)	65.5	117	155	232
Larecchio (SISMA)	58	134	172	202

Figura 16: Letture altezze di pioggia a 1,3,6 e 12 ore. Fonte: Anselmo, 1979.

Dallo studio effettuato da Anselmo (1980), le precipitazioni massime registrate alle diverse stazioni (figura 16) risultarono essere in linea con i massimi annui registrati in letteratura. La Val Vigizzo, infatti, risulta essere incline a precipitazioni giornaliere anche maggiori ed i valori giornalieri registrati il 7 agosto sono stati superati spesso nel corso degli anni.

Ciò che invece risultò eccezionale furono le precipitazioni con durata inferiore alle 24 ore (figura y). Molti dei dati orari registrati andarono perduti con il crollo della Centrale Ceretti durante il nubifragio, tuttavia restano disponibili i dati di Domodossola e Palagnedra. In particolare, i valori registrati a Domodossola per le fasce orarie di 3,6 e 12 ore hanno una frequenza ultrasecolare e quelle riferite all'intervallo di 1 ora mostrano un tempo di ritorno di 50 anni circa.

I dati sulle precipitazioni avvenute durante l'alluvione del 7 agosto 1978 in 2/3 ore, furono talmente rari che la Regione Piemonte collocò l'evento tra quelli più intensi mai verificatisi in Val d'Ossola.

3.3 ANALISI DEI DISSESTI SUI VERSANTI

Uno degli effetti principali sul territorio dell'intensità dell'evento del 7 agosto '78, fu l'innescò di un numero elevato di fenomeni franosi lungo i versanti.

Un'intensità di pioggia pari a 400-500 mm nell'arco di poche ore, infatti, supera di molto i normali quantitativi di precipitazione che non comportano l'instabilità di un generico pendio. In questo caso resta solo il sistema radicale a contrastare la spinta dovuta al gradiente idraulico che si genera nello strato superficiale di un versante, tipicamente costituito da terreno incoerente e scarsamente resistente.

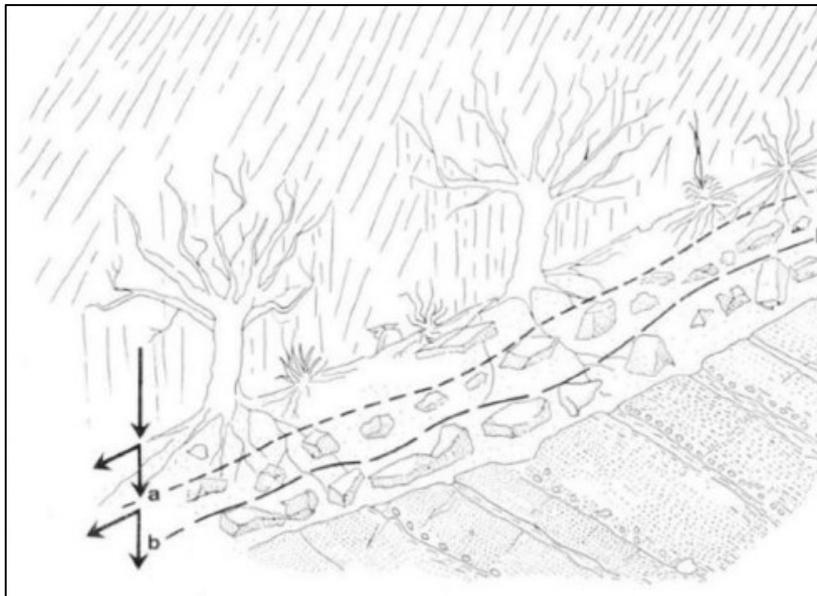


Figura 17: Copertura vegetale tipicamente alpina. Vegetazione ad alto fusto con apparati radicali poco sviluppati, poggianti su uno strato di materiale sciolto di spessore variabile. Fonte: Anselmo 1980.

In Val d'Ossola, lo studio di rilievi e di aerofotografie effettuate immediatamente dopo l'evento alluvionale, riscontrò alcune evidenze empiriche riguardo i versanti interessati da fenomeni franosi e le attività torrentizie (C.N.R.-I.R.P.I., 1999):

- le frane con alta frequenza per unità di superficie (70-90 eventi per km²) coinvolsero prevalentemente i materiali incoerenti della coltre superficiale;
- l'elevata intensità di precipitazione saturò velocemente i suoli superficiali dando origine a fenomeni di distacco, talvolta estesi fino al bedrock, con successiva fluidificazione ed incanalamento nella rete idrografica minore dei volumi mobilitati;
- l'attività torrentizia fu ostacolata dai volumi di detriti incanalati (spesso associati a legname proveniente dalla copertura boschiva) che, formando degli sbarramenti in alveo temporanei, diedero vita a fenomeni di alluvionamento su conoidi e nelle zone a fondovalle;

- i fenomeni di instabilità dei versanti si svilupparono ed esaurirono nel lasso di 2 ore circa, tra le 19.00 e le 21.00;
- le elevate intensità orarie registrate durante la fase finale dell'alluvione svolsero un ruolo determinante per lo sviluppo di fenomeni franosi, così come lo stato di imbibizione del terreno per via delle precipitazioni avvenute precedentemente.

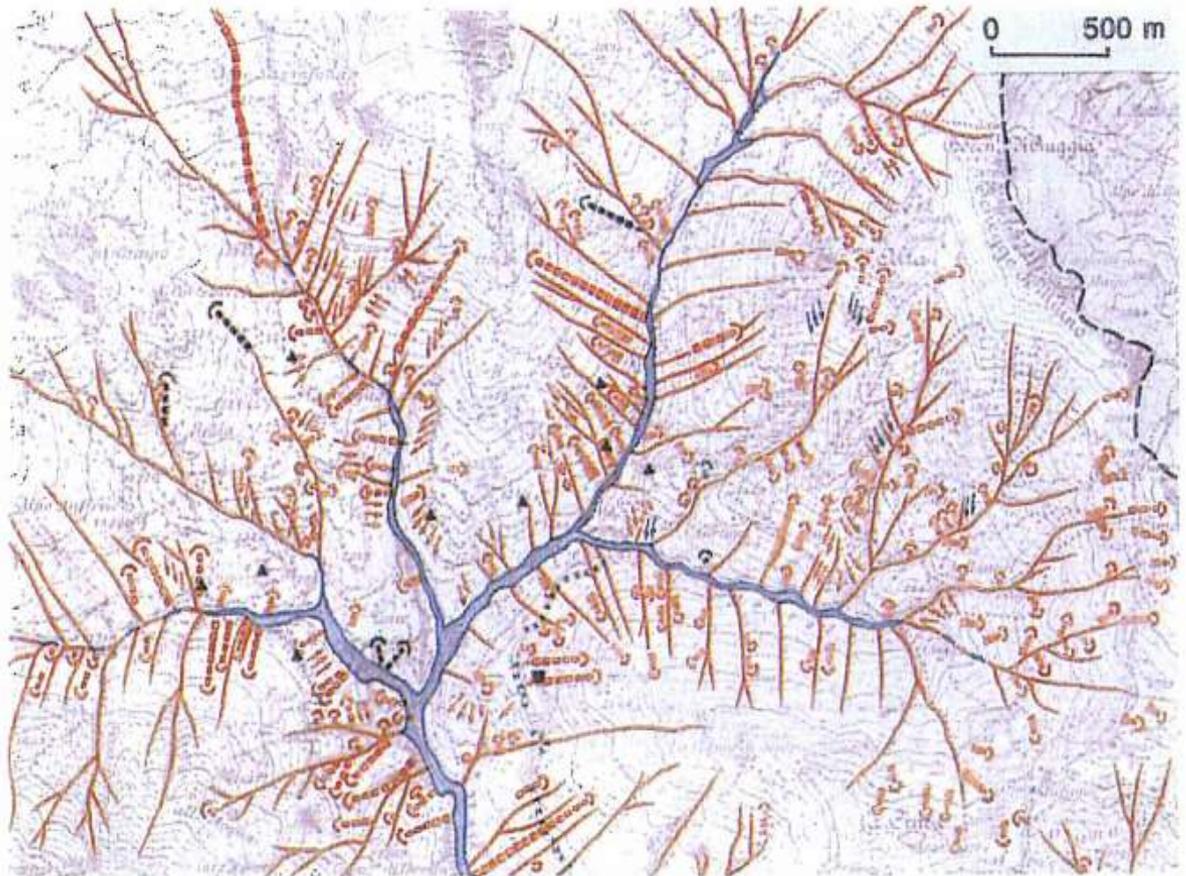


Figura 18: Alta concentrazione di frane in Val Vigizzo, innescatesi tutte durante l'evento alluvionale del 7-8 agosto 1978. Fonte: carta "i dissesti nei bacini dei torrenti Melezzo, Fenechio, e basso Isorno", regione Piemonte e CNR-IRPI 1981).

Guardando più nel dettaglio, nell'alto bacino del Melezzo Orientale, si verificarono soprattutto frane per decorticamento di terreni privi di vegetazione ad alto fusto (prevalentemente prati o terreni agrari destinati al pascolo), in particolar modo al cospetto di piccoli avvallamenti lungo il versante. Tuttavia, anche su versanti coperti da vegetazione di tipo boschiva si verificarono fenomeni di distacco di terreno superficiale, talvolta estesi fino al substrato roccioso.

Un'elevata concentrazione di fenomeni franosi di tipo soil slip (figura a), dunque, caratterizzò l'evento alluvionale fin qui studiato. Questa tipologia di eventi risultò localizzata per lo più alla testata dei tributari di primo ordine, andando successivamente a riversare nei corsi d'acqua principali i volumi di materiale mobilitato. Per questo motivo nei corsi d'acqua principali si registrarono importanti fenomeni di trasporto solido, con accumuli di migliaia di metri cubi di materiale detritico. In particolare, al bacino

idroelettrico di Palagnedra, sul Melezze Orientale, si registrò una resa in sedimenti unitaria di circa $14.000 \text{ m}^3/\text{km}^2$.

Al contempo, in molte incisioni rocciose, i corsi d'acqua esercitarono un'azione "ripulitrice" molto intensa (figura b), andando ad intensificare i fenomeni di sovralluvionamento descritti.



Figura 19: Alto bacino del Melezze Orientale dopo evento alluvionale 7/8/78. Fonte: Progetto Interreg II, Azione 3

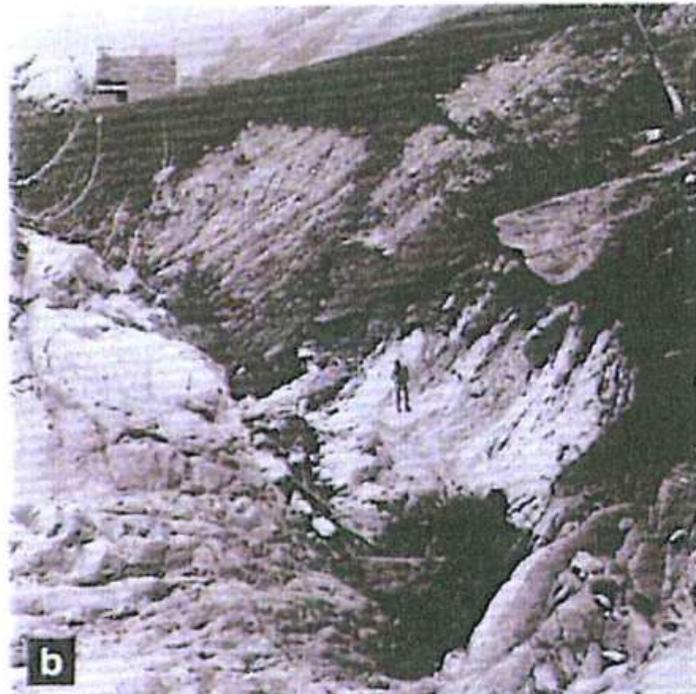


Figura 20: Incisione rocciosa nel bacino del Melezze Orientale, azione ripulitrice. Fonte: Progetto Interreg II, Azione 3.

Per quanto visto finora, i fenomeni di soil slip risultano essere molto distruttivi in quanto direttamente collegati all'attività dei corsi d'acqua limitrofi. Numerosi eventi, in aree abbastanza limitate, implicano la mobilitazione di immensi volumi di materiale solido nella rete idrografica, dando origine a colate detritiche torrentizie che risultano essere infinitamente più pericolose dei singoli eventi originari.

3.4 ANALISI A POSTERIORI DELLE SITUAZIONI DI INSTABILITÀ RELATIVE ALL'EVENTO DE 7 AGOSTO 1978

Si riporta di seguito un riassunto dell'analisi statistica a posteriori delle situazioni di instabilità dei versanti in Val Vigizzo, in seguito all'evento alluvionale del 7 agosto 1978 (tratta da rapporto interreg II, azione 3).

Tale analisi è incentrata sullo studio del quadro di dissesto idrogeologico verificatosi in seguito all'evento alluvionale summenzionato, con l'obiettivo di ricavare informazioni utili in chiave previsionale.

In prima battuta, è stata studiata una metodologia specifica per il rilevamento dei fenomeni franosi e la caratterizzazione dei materiali interessati. Successivamente, sono state informatizzate e georeferite le informazioni raccolte, con l'obiettivo di creare un'apposita banca dati. Ciò ha consentito di analizzare in chiave statistica diversi fattori, individuando così le situazioni predisponenti l'insacco di fenomeni di instabilità della coltre superficiale.

Il lavoro ha previsto una prima fase di fotointerpretazione eseguita attraverso il confronto dei fotogrammi del volo "post alluvione Ossola", riferiti ai giorni successivi il 7 agosto 1978, e quelli del volo "Ferretti" dell'anno precedente (luglio 1977). Attraverso questo confronto è stato possibile fare delle considerazioni sulle aree d'insacco delle frane e sulla modificazione dei versanti. Oltretutto, sono emersi numerosi danni indotti dall'alluvione che non erano emersi negli studi precedenti (allegato 2).

La caratterizzazione del terreno è avvenuta tramite una specifica "Scheda di rilevamento frane per mobilitazione della coltre superficiale" studiata proprio per raccogliere, nel modo più chiaro e oggettivo possibile, tutti gli aspetti relativi a questa tipologia di fenomeni. Questa scheda è stata applicata a 276 eventi su un campione di più di 550 dissesti cartografati (Allegato 1). La scelta dei 276 casi non è stata casuale, ma è stata effettuata in modo da ottenere un campione di frane rappresentativo di tutta l'area indagata (alta Val Vigizzo).

Infine, è stata svolta l'analisi statistica sulla base dei dati raccolti. Quest'analisi è stata eseguita sui parametri considerati significativi per la caratterizzazione tipologica dei processi in questione. Tra i dati contenuti nelle 276 schede di rilevamento, sono stati analizzati solo quelli che portano ad una classificazione dei fenomeni in classi di frequenza. Tali dati sono stati inseriti in un programma di analisi statistica (*Statistica, Ver. 5*) ed elaborati singolarmente attraverso un'analisi statistica univariata.

Vengono di seguito riportati i principali risultati estrapolati:

I fenomeni franosi censiti sono avvenuti in aree con il un uso del suolo descritto in figura 20: prato nel 56% dei casi, bosco nel 30% dei casi e aree arbustive nel restante 14%;

Il materiale accumulato risulta completamente destrutturato e disperso lungo il versante nel 95% dei casi studiati: 3+4+5. Figura

La massa mobilizzata risulta:

- 1= integra o debolmente scomposta
- 2= caratterizzata dalla presenza di zolle integre disunite
- 3= totalmente destrutturata e in parte dispersa lungo il versante
- 4= totalmente destrutturata e dispersa lungo il versante,
- 5= la massa mobilizzata ha raggiunto il fondovalle ed è stata asportata, totalmente o parzialmente, da un corso d'acqua.

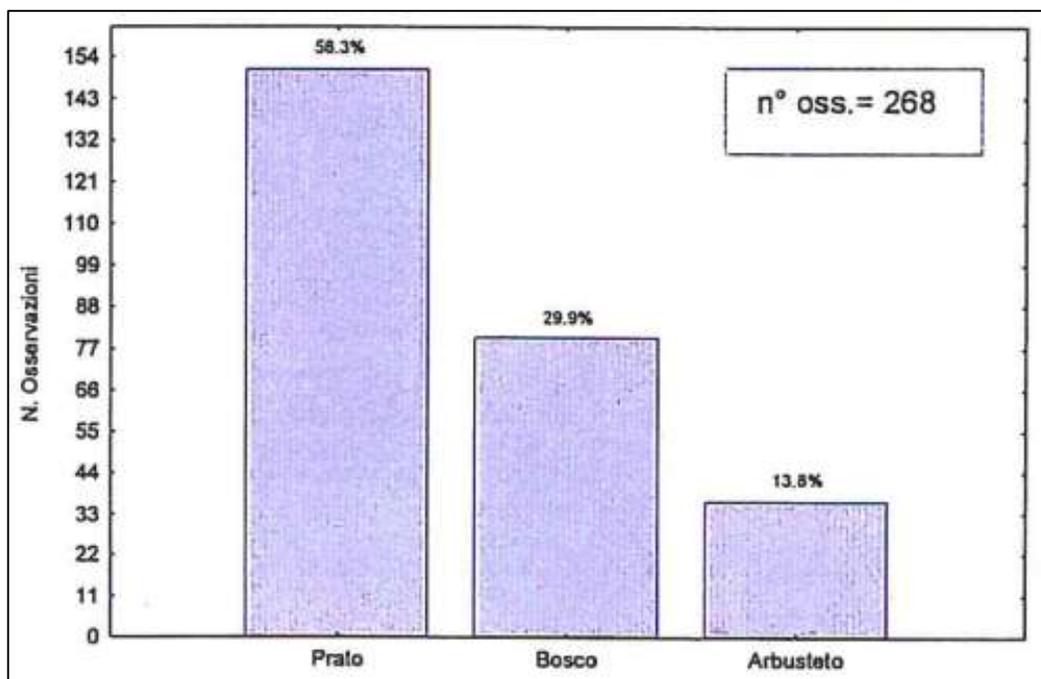


Figura 21: Percentuali di uso del suolo franato

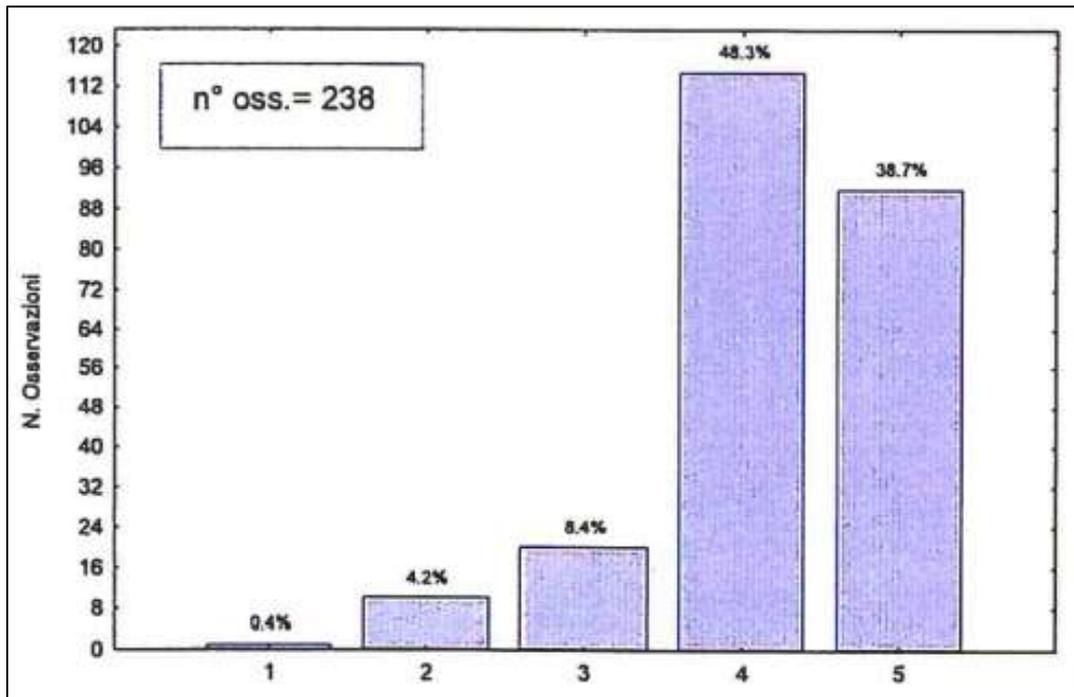


Figura 22: Massa mobilizzata-tipo di accumulo

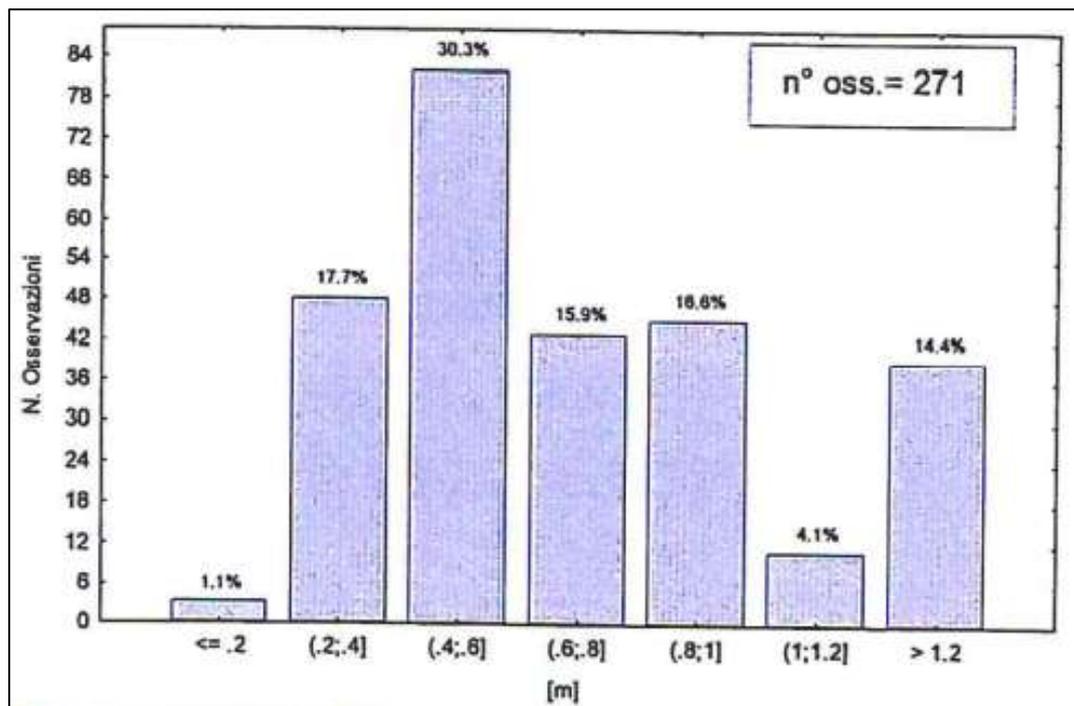


Figura 23: Altezza nicchia di distacco

Nell'80% circa dei casi osservati l'altezza della nicchia di distacco è inferiore ad 1 m.

Bisogna riportare che nel Progetto Interreg viene specificato che la densità di dissesti su profili terrazzati è molto elevata. Pur non essendo una condizione necessaria, quindi, la discontinuità morfologica rappresenta una condizione predisponente al rischio di frana.

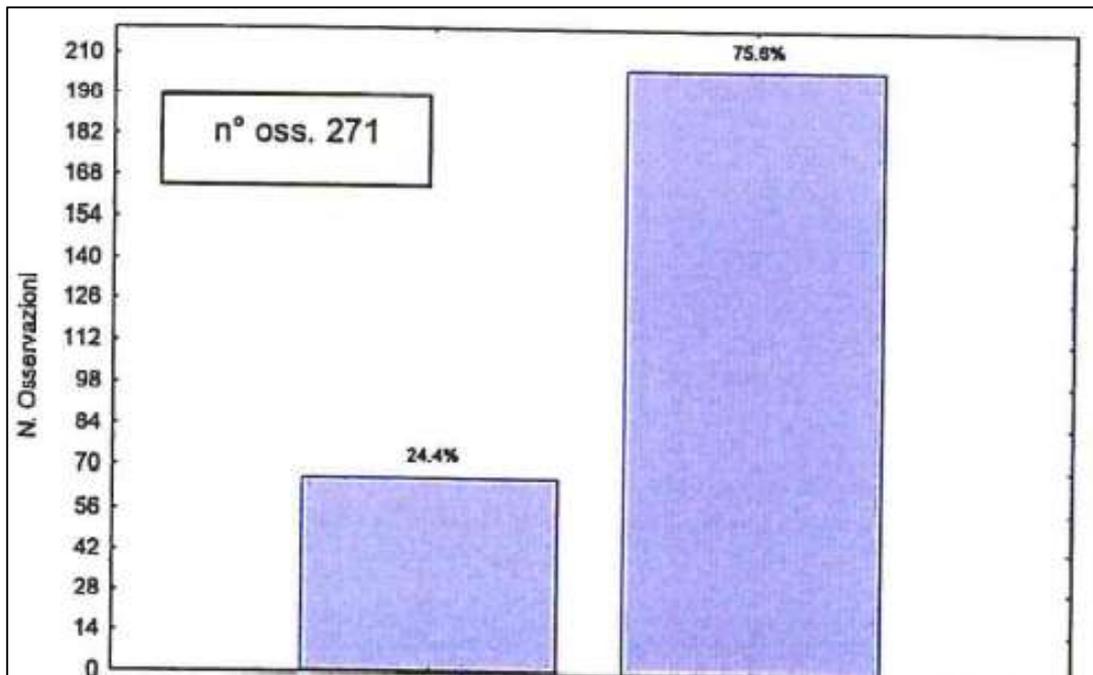


Figura 24: Profilo longitudinale continuo (N), profilo longitudinale in presenza di un forte cambio di pendenza (S).

Nel caso di pendio con forte cambio di pendenza (figura 25), le percentuali riferite ai casi osservati dell'inclinazione dei tratti AX e BX sono riportate in figura 26 e 27.

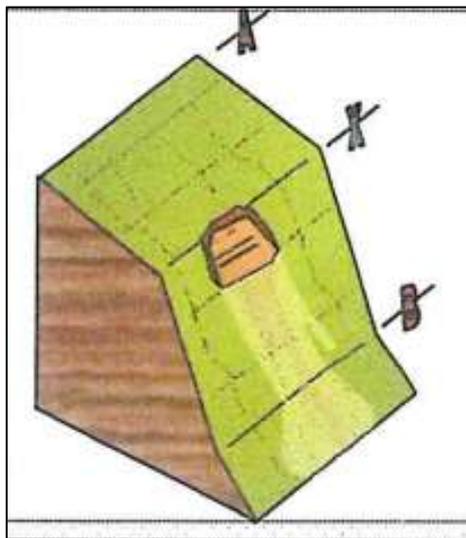


Figura 25: Schema profilo con cambio di pendenza

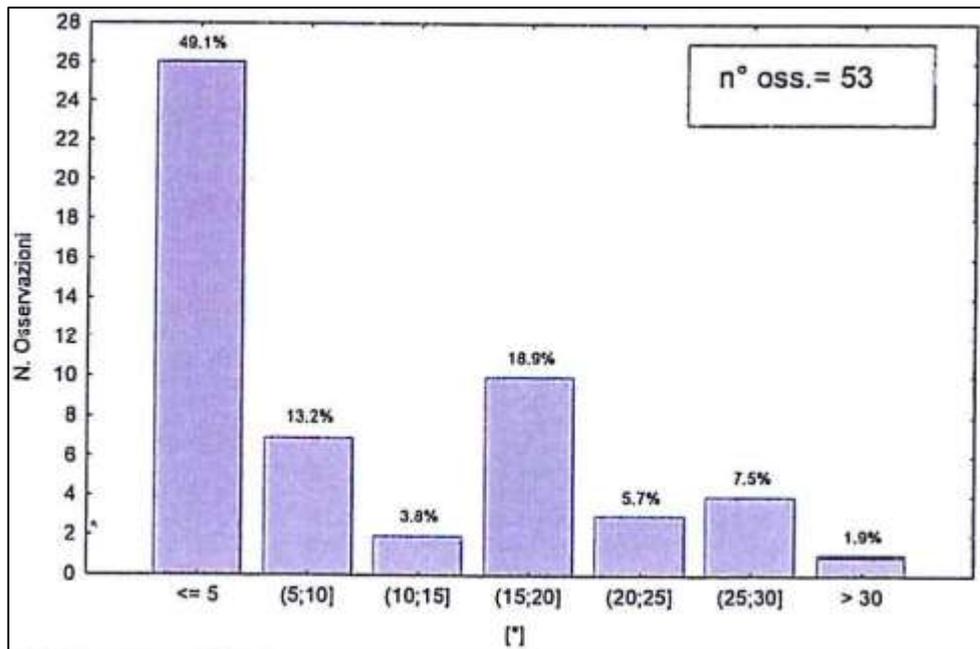


Figura 26: Inclinazione del tratto AX

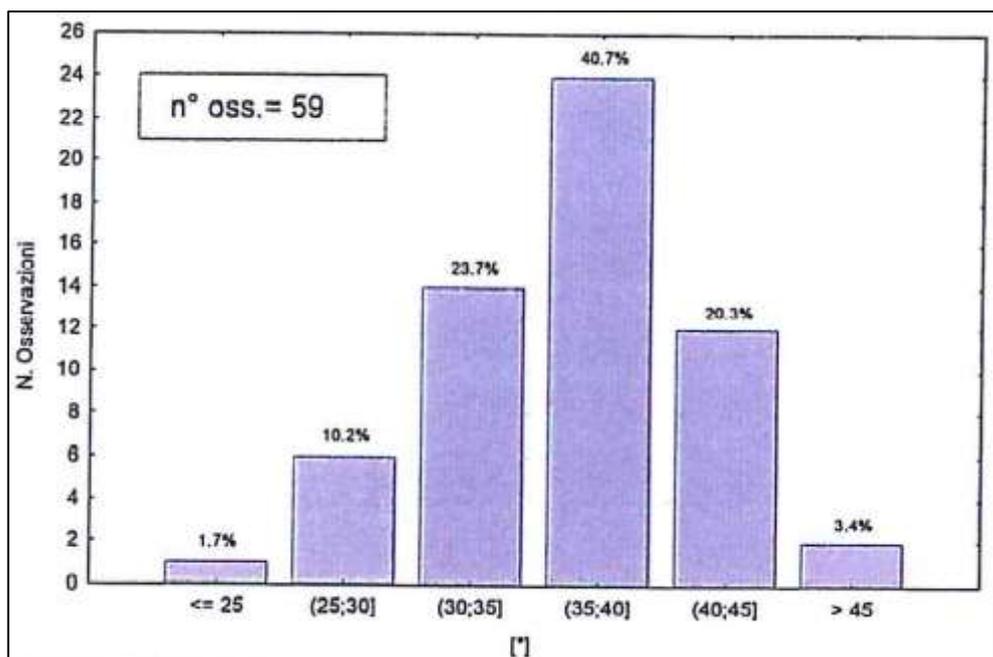


Figura 27: Inclinazione del tratto BX

L'angolo α che descrive l'intersezione dei piani AX e BX, ha la seguente distribuzione di valori. Il valor medio è di 150° circa.

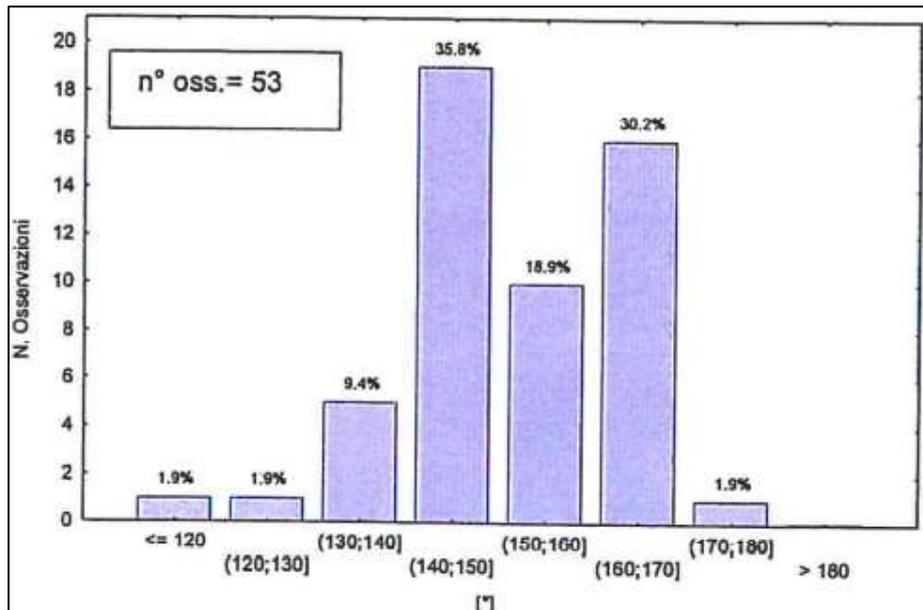


Figura 28: Angolo Alfa

L'inclinazione di un versante continuo ha una distribuzione normale (figura 28) con il massimo individuato nell'intervallo tra 35° e 40°.

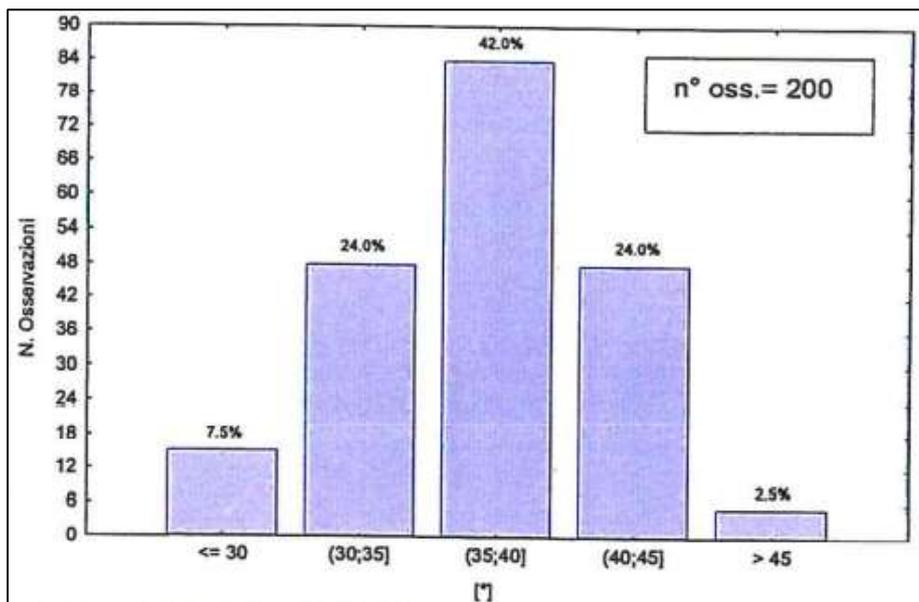


Figura 29: Inclinazione pendio continuo

4 MODELLAZIONE CON SLIDE 2D

Il modello creato per lo studio dei fenomeni fin qui descritti è stato creato tramite l'ausilio del software Slide 2D del pacchetto Rockscience. Tale modello racchiude i dati raccolti e descritti nei capitoli precedenti ed è stato realizzato con l'obiettivo di descrivere al meglio i flussi idrologici causati da una precipitazione di intensità nota. Grazie ad un modello idrologico coerente con la realtà, sarà dunque possibile studiare l'evoluzione del fattore di sicurezza in funzione dell'avanzamento della precipitazione imposta.

Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

- Definizione della geometria del modello (“External Boundary”);
- Scelta del modello di analisi in funzione della definizione delle condizioni iniziali (“Groundwater method”);
- Definizione dei parametri geotecnici e idraulici (“Material Propieties” ed “Hydraulic Proprieties”);
- Impostazione della mesh (“Mesh setup”);
- Definizione delle condizioni al contorno idrauliche e transitorie (“Hydraulic Boundary Condition” ed “Transient Boundary Conditions”);
- Computazione ed interpretazione dei risultati.

4.1 IMPOSTAZIONI GENERALI DEL MODELLO

Il metodo scelto è “water surface”. In questo modo sarà possibile definire le condizioni iniziali attraverso la un'altezza di falda definita nell'interfaccia “Slope Stability Analysis Mode”. Questo metodo definisce la pressione dei pori in funzione dell'andamento della falda acquifera. Nel nostro caso è importante disabilitare l'opzione “negative pore pressure cutoff”, perché ci interessano anche le zone con pressione negativa che si generano insieme al moto di filtrazione.

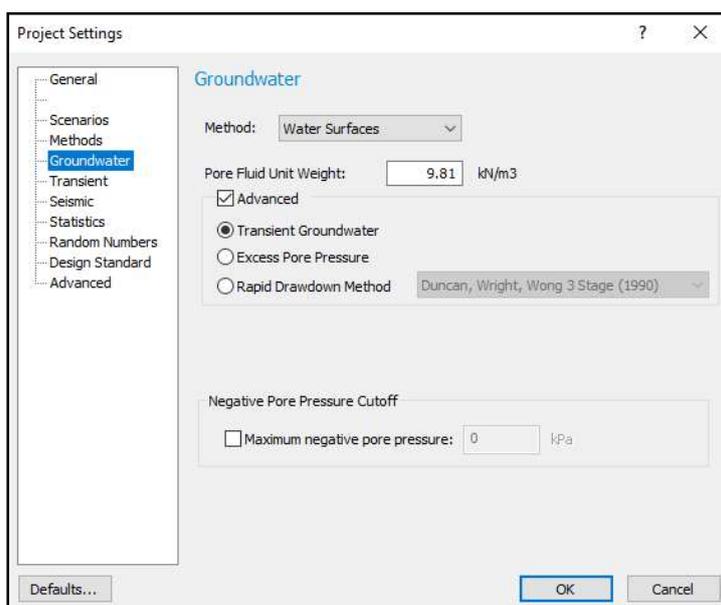


Figura 30: Project settings, Groundwater method analysis.

Selezionando l'opzione *advanced e transient groundwater*, sarà possibile effettuare un'analisi temporale impostando un numero di stage congruente con gli orari che si vogliono indagare.

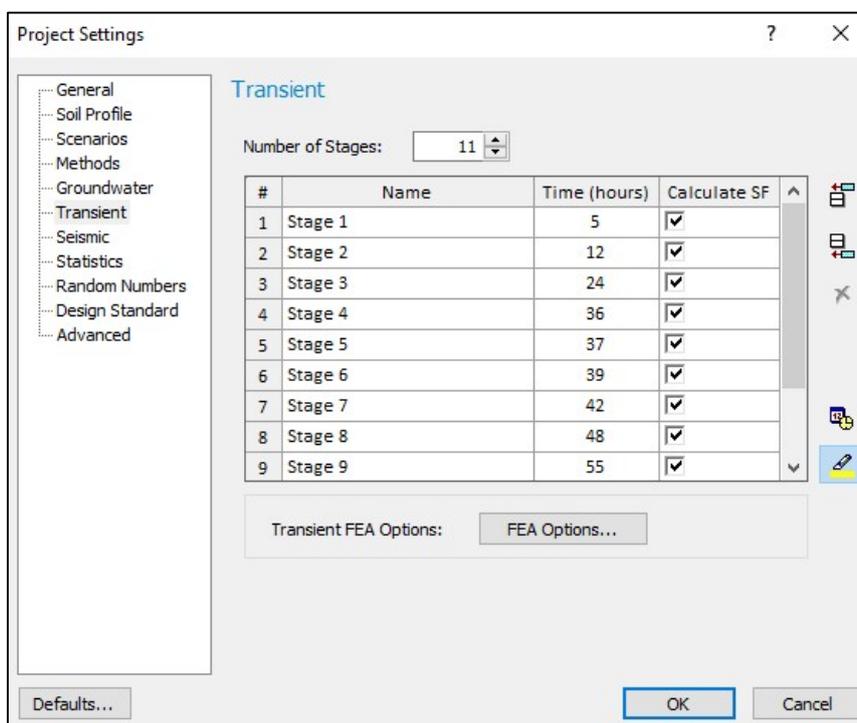


Figura 31: Project Settings, transient analysis stages.

4.2 PENDIO CONTINUO

Una volta definite le impostazioni generali del modello, si passa alla costruzione del modello geometrico. Il primo caso indagato ha le seguenti caratteristiche:

- Inclinazione pari a 45°;
- Altezza dello strato pari a 1 m;
- Estensione del modello pari a 150 m. Si è scelto di creare un modello sufficientemente grande da non risultare influenzato dalle condizioni al contorno.

Bisogna ricordare che Slide 2D ha la capacità di effettuare un'analisi gli elementi finiti dei flussi d'acqua in regime stazionario e/o transitorio. Quest'analisi avviene in modo separato dall'analisi di stabilità del pendio. Ciononostante, i risultati del modello idrologico (Groundwater analysis compute) vengono automaticamente utilizzati per la computazione dei risultati della stabilità del versante (Slope stability compute).

Per questo motivo, quando si effettua una “*groundwater analysis*” come la nostra, il programma ti consente di lavorare con due diverse modalità d'analisi:

- Slope stability
- Transient Groundwater (le cui condizioni iniziali vengono definite da una *water table* opportunamente inserita in modalità *slope stability*)

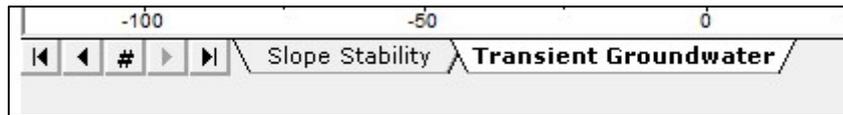


Figura 32: Modalità d'analisi separate su Slide 2D.

Una volta inserita la condizione iniziale tramite il comando add water table, nella modalità slope stability il modello apparirà come segue (sezione di monte).

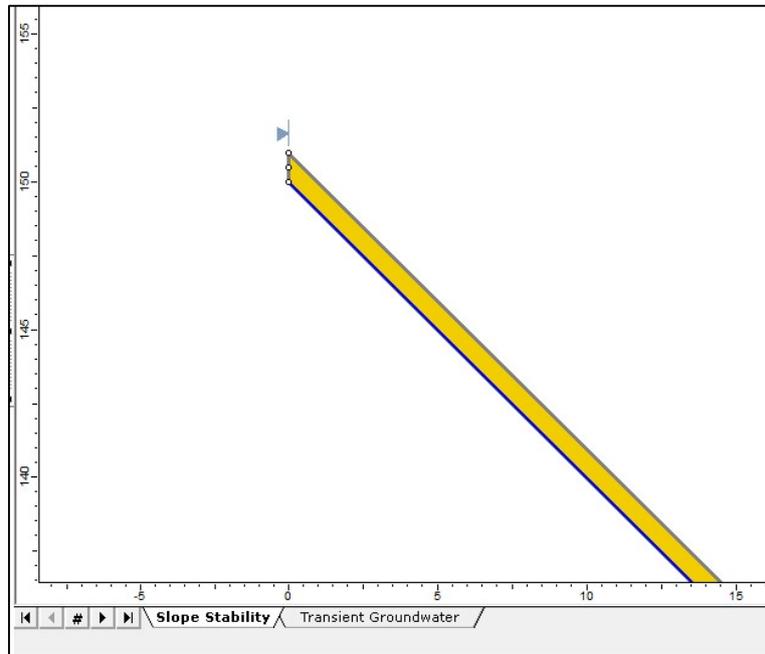


Figura 33: Slope Stability model.

A questo punto si definiscono le caratteristiche geotecniche del modello e si passa alla modalità “transient groundwater”.

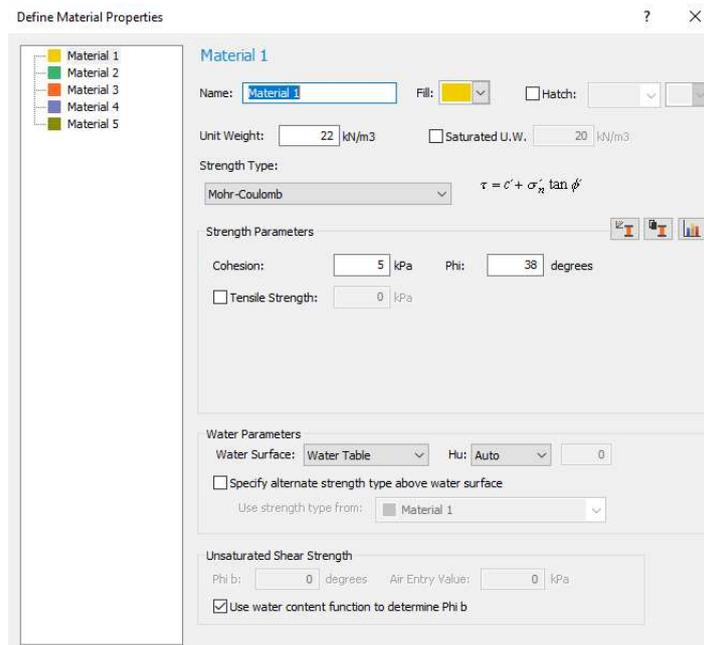


Figura 34: Define material properties..

Il primo passo consiste nella definizione della mesh da utilizzare. Sulla base dei risultati ottenuti in numerose simulazioni, si è scelto di impostare utilizzare una mesh con un numero di elementi pari a circa 9000, con elementi triangolari a tre nodi. Queste impostazioni consentono di avere a disposizione, per ogni sezione trasversale, almeno 4 elementi.

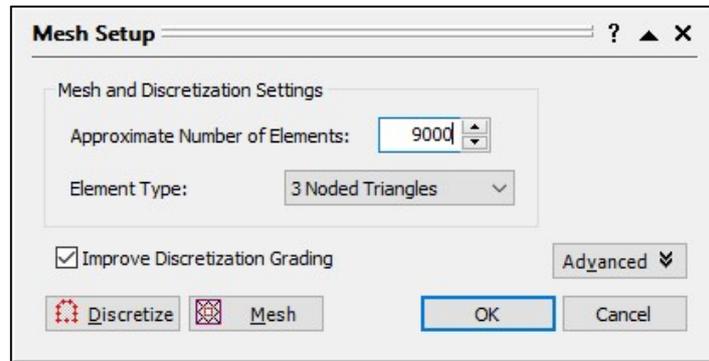


Figura 35: Mesh setup.

Dopo la discretizzazione del modello e la creazione della mesh (figure 35 e 36), è possibile inserire le condizioni al contorno idrauliche e transitorie.

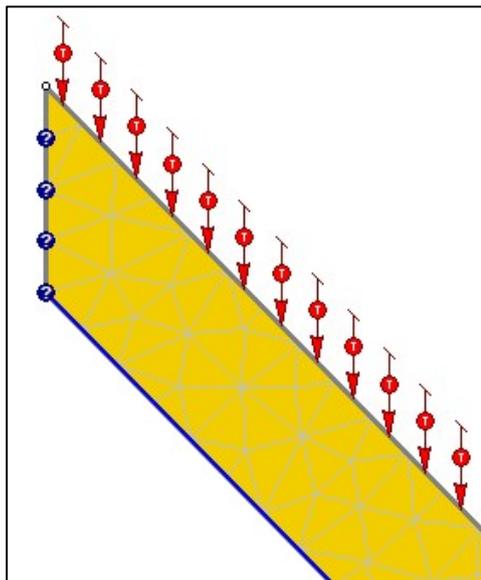


Figura 37: Sezione di monte.

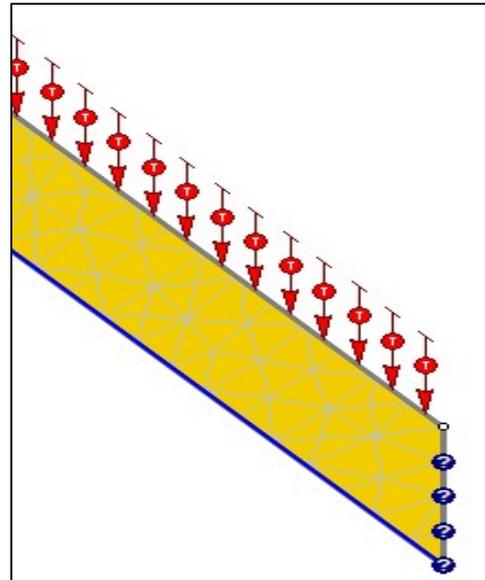


Figura 36: Sezione di valle.

In questo modello le uniche condizioni al contorno idrauliche da inserire sono quelle di monte e di valle. Essendo queste delle superfici libere è stata applicata la condizione “*unknown boundary condition*” che impone $P=0$ o $Q=0$.

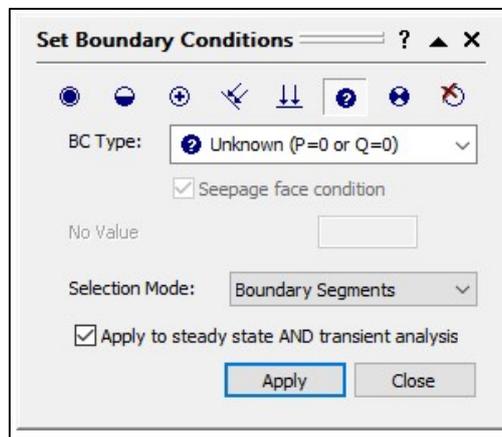


Figura 38: Hydraulic boundary condition.

Al bordo superiore le modello, invece, sono state applicate delle condizioni idrauliche di natura transitoria. Sulla base dei dati riportati nei capitoli precedenti (dati pluviometrici della stazione di Larecchio con intensità massima giornaliera) è stato ricostruito un diagramma di infiltrazione verticale che ricostruisce l'intensità di precipitazione registrata il 7 luglio 1978.

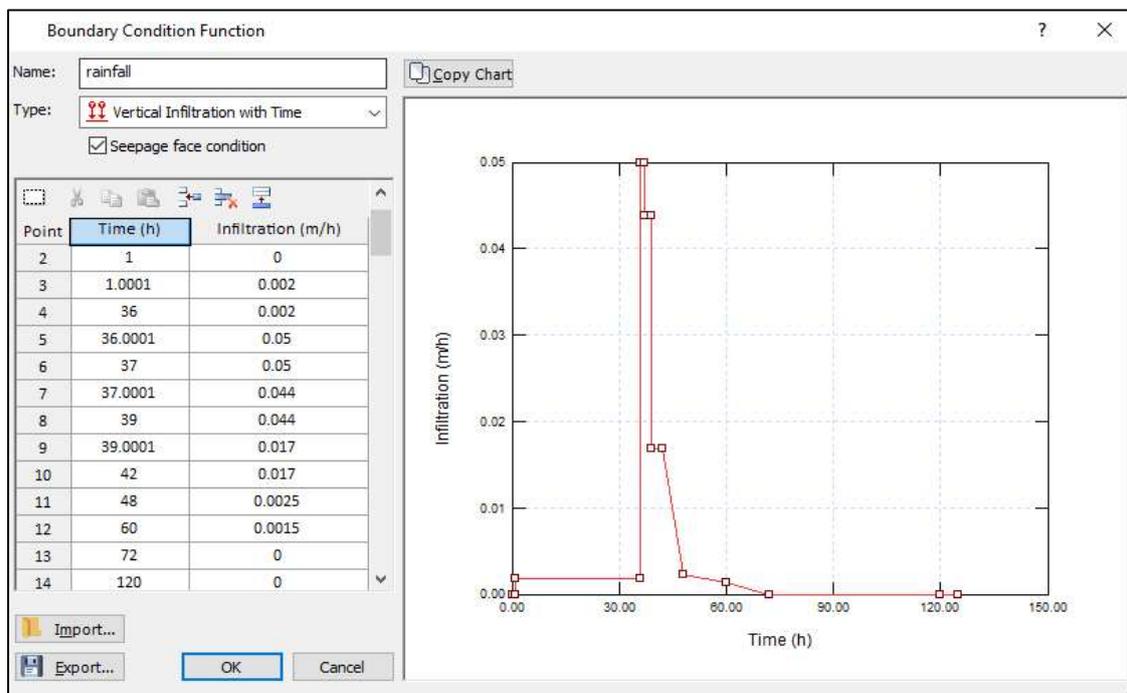


Figura 39: Evento alluvionale del 7 agosto 1978 riprodotto come infiltrazione verticale nelle condizioni al contorno transitorie.

Nei giorni precedenti l'evento furono caratterizzati da precipitazioni non intense ma persistenti. Lo stato di imbibizione del terreno, al momento del verificarsi dell'evento, è stato simulato attraverso una precipitazione di bassa intensità, pari a 0.002 mm/h e di durata uguale a 36 ore, ovvero 48 mm al giorno.

A questo punto restano solo da definire le proprietà idrauliche del modello. Si è scelto di utilizzare il modello di Van Genuchten, caratterizzato da una permeabilità satura di $3.6 \cdot 10^{-4}$ m/s.

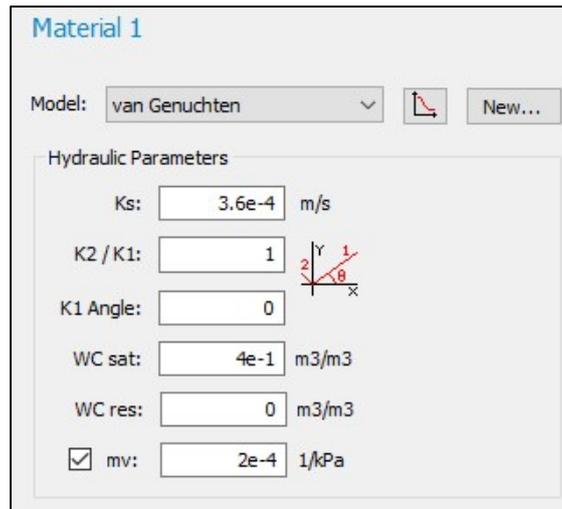


Figura 40: Hydraulic proprieties.

Conclusa la fase di impostazione del modello, attraverso il comando “Interpret”, Slide 2D effettua l’analisi e restituisce i risultati.

In primo luogo si verifica che il versante sia stabile in assenza di precipitazioni.

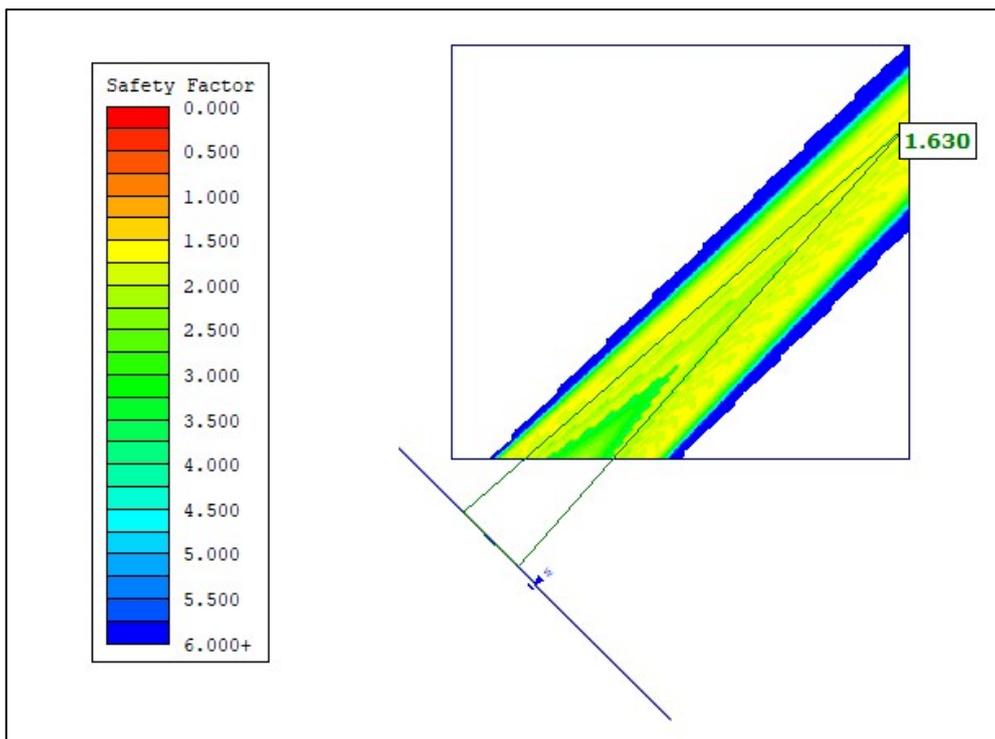


Figura 41: F.S stage iniziale.

Il versante, dunque, risulta stabile prima delle precipitazioni.

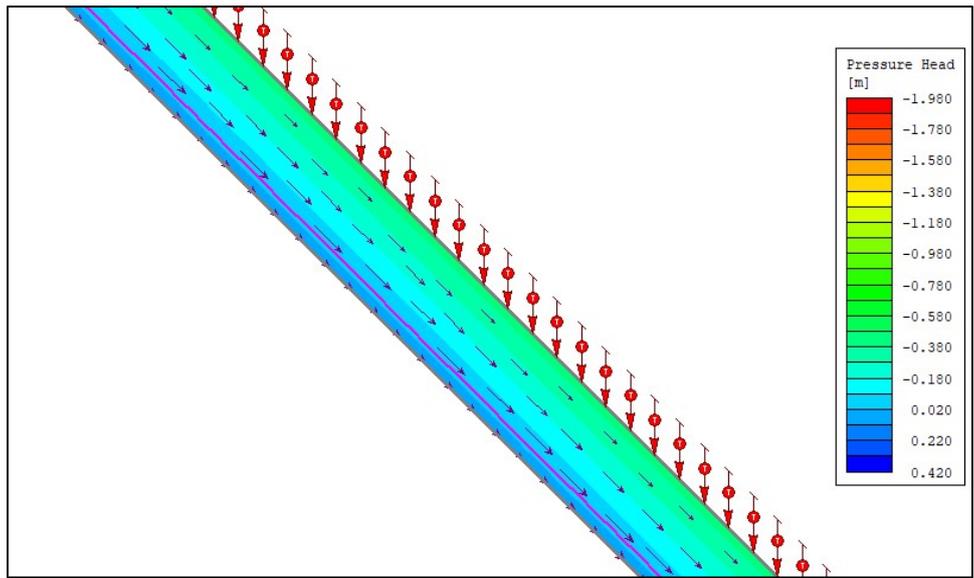


Figura 42: Andamento della falda nella zona centrale del versante dopo 36 ore.

A 36 ore, dopo una precipitazione di intensità modesta ma prolungata, si instaura una falda, parallela al versante, piuttosto bassa. Si osserva, inoltre, che i vettori di flusso sono paralleli al pendio e rivolti verso fondo valle.

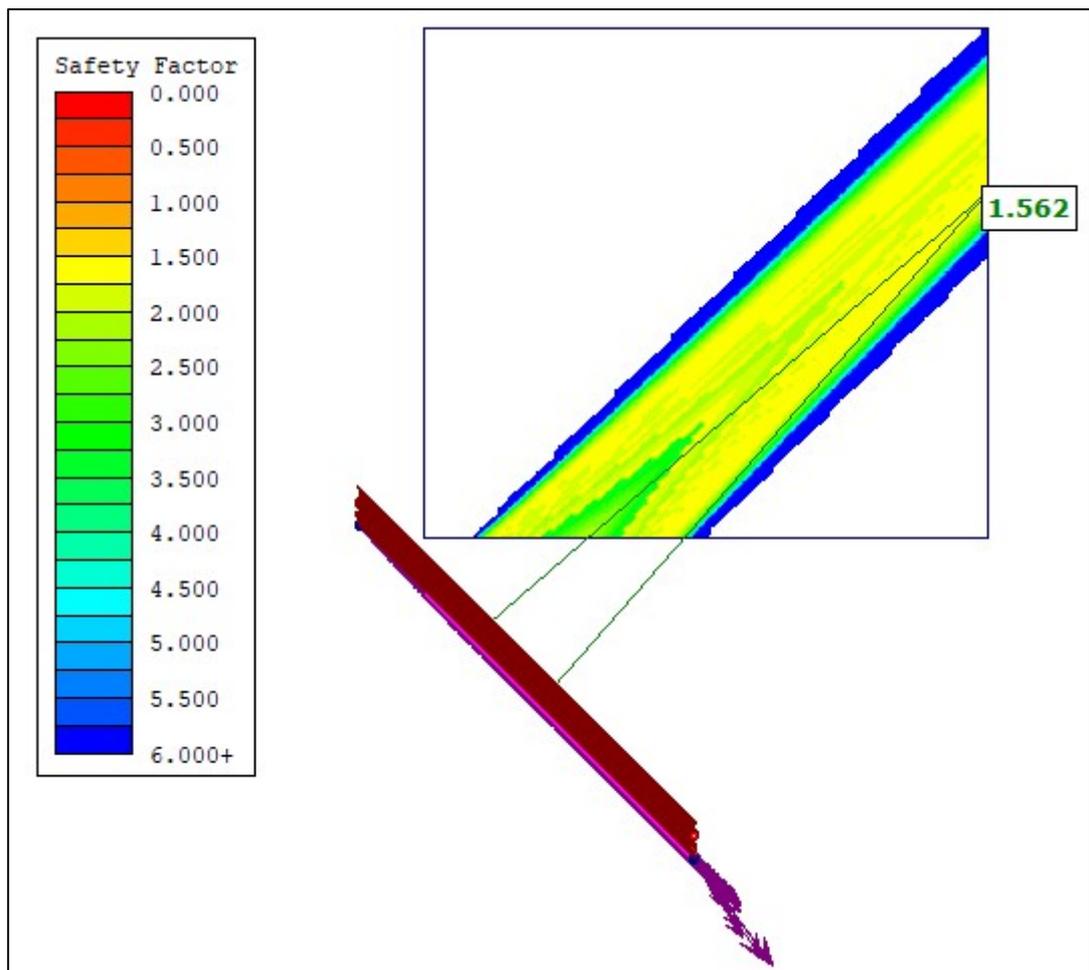


Figura 43: F.S. a 36 ore.

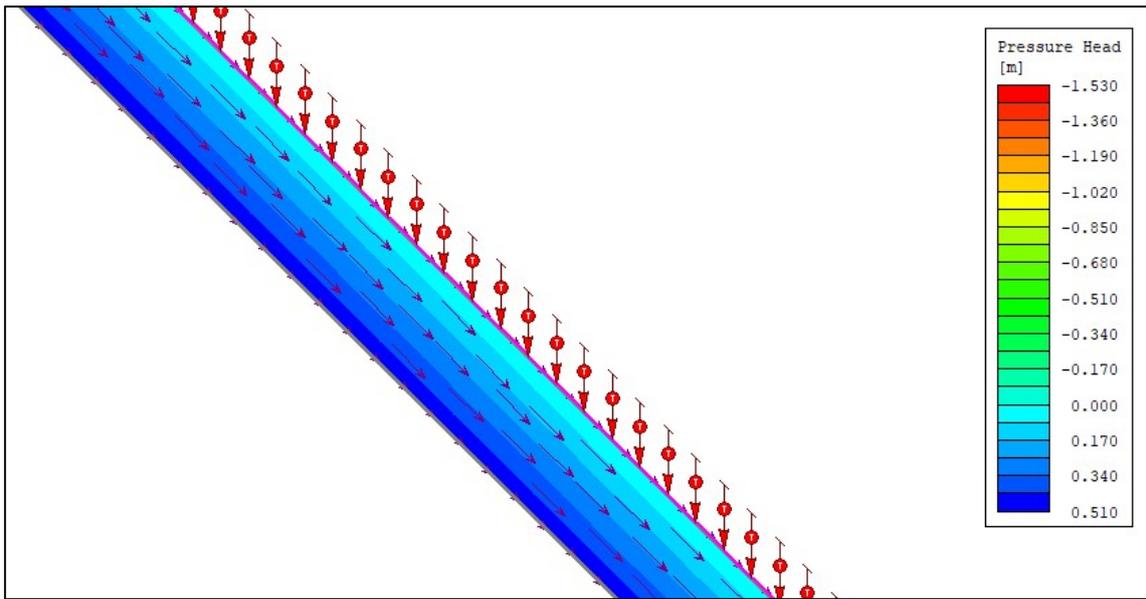


Figura 44: Andamento della falda nella zona centrale del versante dopo 39 ore.

Dopo 36 ore, il fattore di sicurezza è diminuito poco rispetto a quello iniziale. A 39 ore, invece, il versante risulta completamente saturo nella zona di interesse, con la falda che arriva fino al bordo superiore del versante. Il pendio risponde quasi immediatamente alla forte precipitazione, infatti, in sole 3 ore, il versante si satura completamente ed il fattore di sicurezza diminuisce drasticamente.

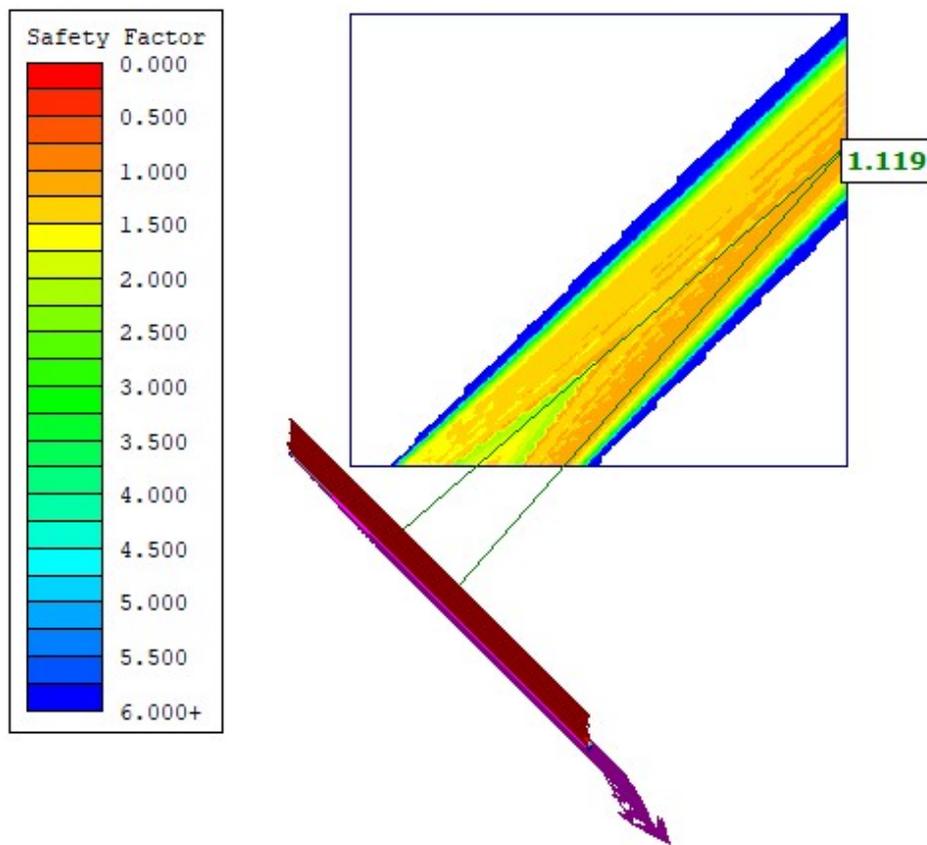


Figura 45: F.S. minimo, a 39 ore. $K_s = 3.6 \cdot 10^{-4}$.

Il fattore di sicurezza resta pressoché invariato fino all’inizio delle precipitazioni più intense. Poi decresce rapidamente in un breve lasso di tempo e a 39 ore si trova il valore minimo. In questo modello, il pendio non risulta mai instabile, nonostante si creino zone completamente sature che sappiamo essere le più pericolose per la stabilità del versante in termini di equilibrio limite.

Si decide, dunque, di far diminuire la coesione ed analizzare i risultati. Si eseguono tre analisi diverse con valori di coesione pari a 5 kPa, 3 kPa e 1kPa. Il fattore di sicurezza iniziale è sempre superiore ad uno; le curve hanno lo stesso andamento, ma risultano traslate verso il basso sull’asse delle ascisse, per via della diminuzione del contributo dato dalla coesione.

In tutti e tre i casi si arriva al valore minimo del fattore di sicurezza a 39 ore, nel mezzo delle precipitazioni più intense.

Questo avviene con una permeabilità satura pari $3.6 \cdot 10^{-4}$. Vediamo cosa succede al variare di questo parametro.

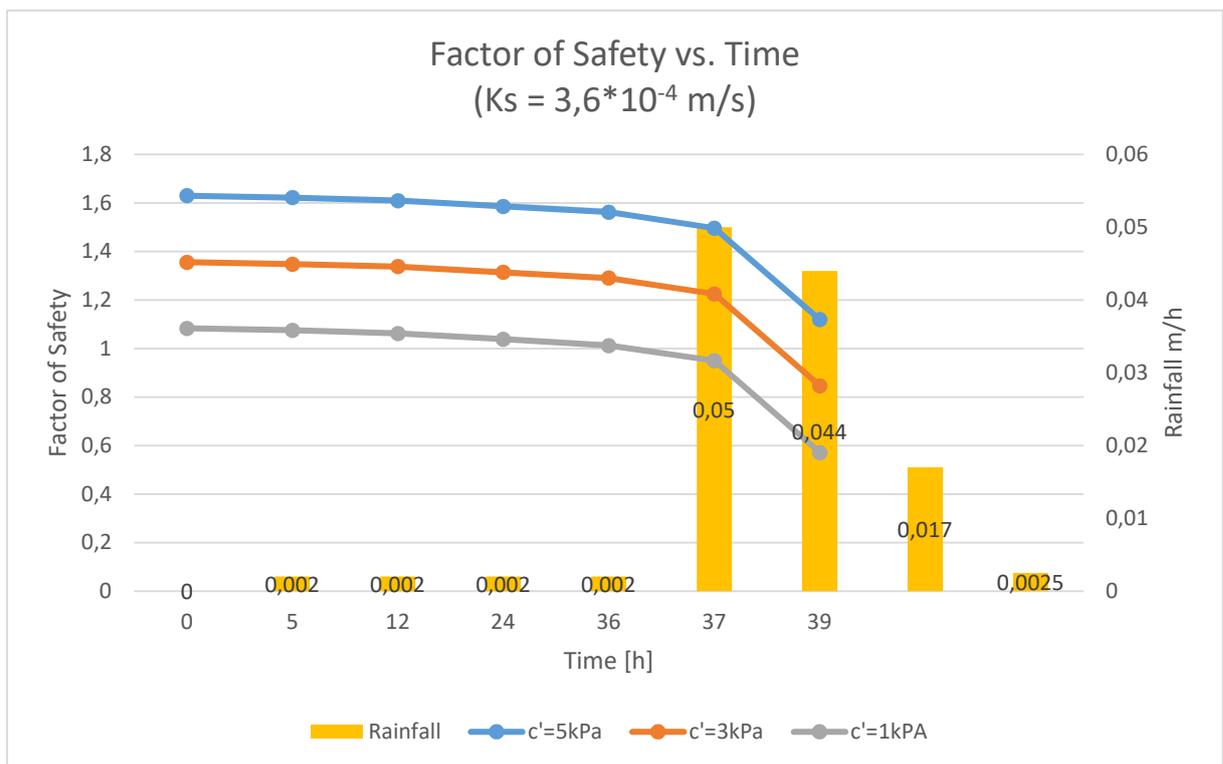


Figura 46: Confronto del F.S. con diversi valori di coesione, permeabilità satura pari a $3,6 \cdot 10^{-4}$ m/s .

Si ripete, quindi, lo stesso procedimento con diversi valori di permeabilità (i risultati dei modelli idrologici con la massima altezza di falda sono riportati nell’Allegato 3). I valori del F.S. ottenuti sono riportati nelle figure 46 e 47. Si osserva che, al diminuire del valore di permeabilità satura, il F.S. decresce più lentamente e presenta dei valori minimi più alti. I valori minimi del F.S., infatti, si presentano dopo 39 ore nel primo caso, dopo 48 ore nel secondo caso e dopo 70 ore nel terzo. L’andamento della falda, inoltre, è molto

diverso per le tre permeabilità assegnate. Più la permeabilità è bassa, infatti, più bassa sarà la capacità di drenaggio e la falda si formerà più a monte rispetto al primo caso.

Come la coesione, dunque, il valore della permeabilità satura influenza in modo notevole il modello, in particolar modo per quanto riguarda le tempistiche che portano all'instabilità.

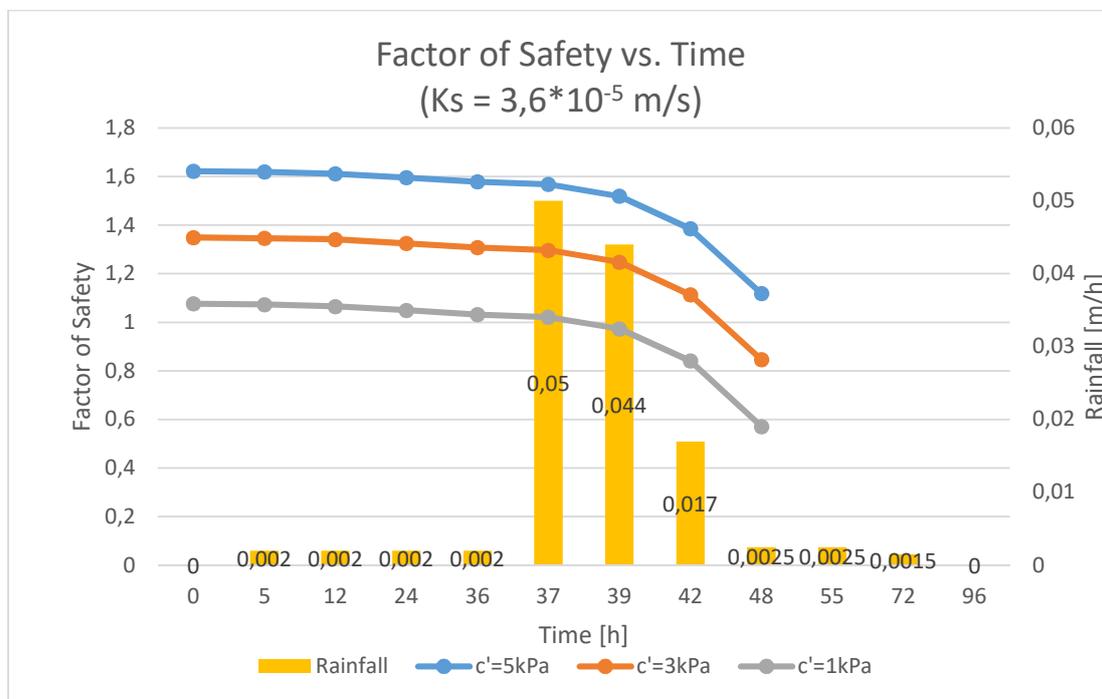


Figura 47: Confronto del F.S. con diversi valori di coesione, permeabilità satura pari a 3,6*10⁻⁵ m/s

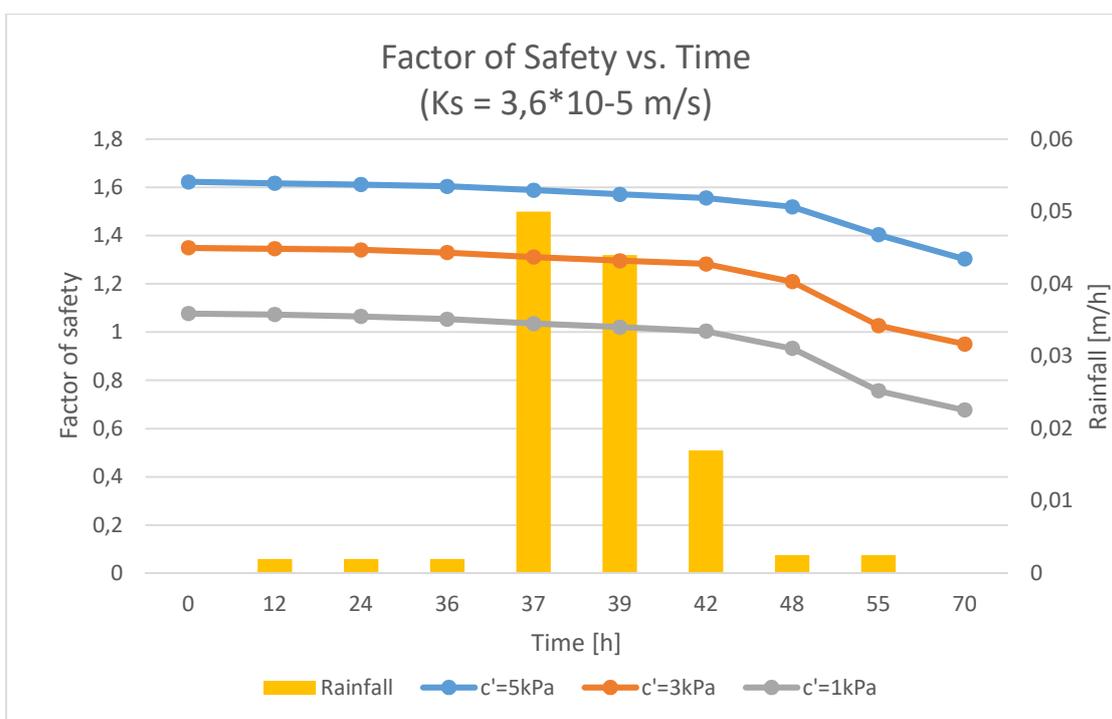


Figura 48: Confronto del F.S. con diversi valori di coesione, permeabilità satura pari a 3,6*10⁻⁶ m/s

In figura si può osservare un confronto dell'andamento del F.S. in funzione dei diversi valori di permeabilità satura studiati, a parità di coesione (si propone il caso in cui $c'=3$).

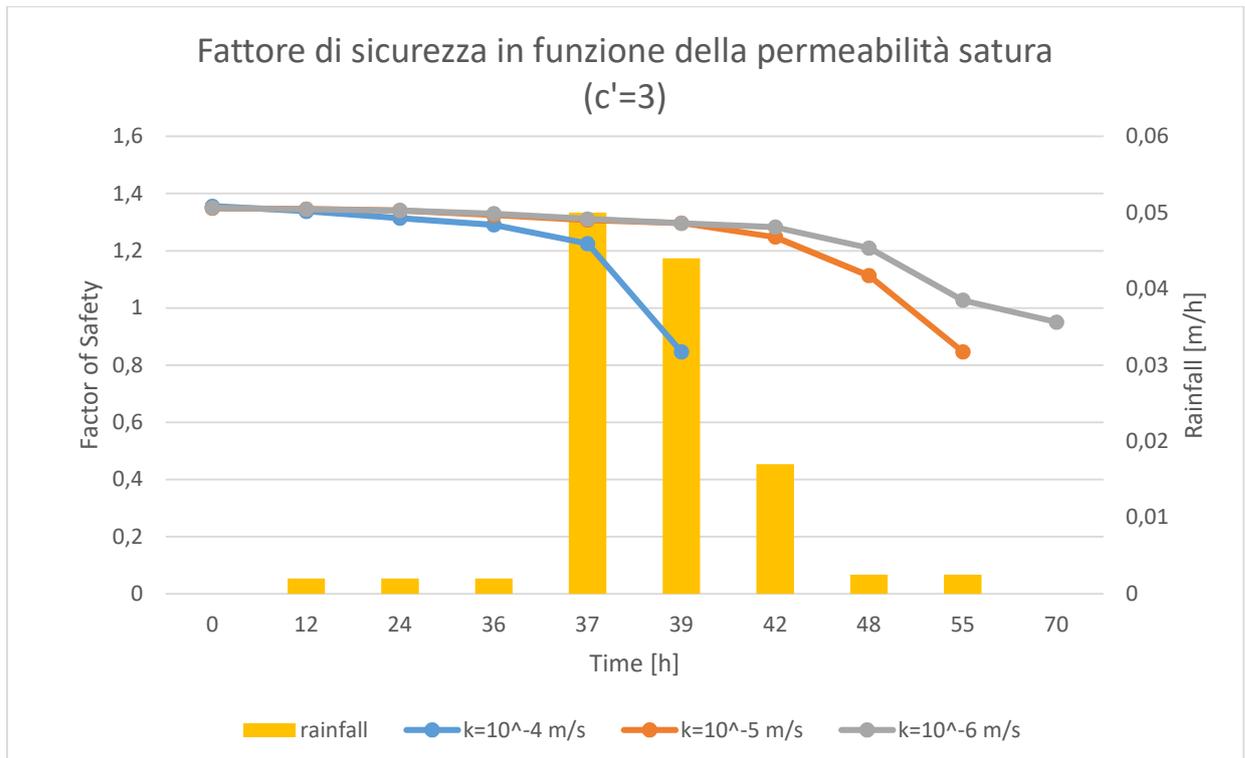


Figura 49: Confronto dell'andamento del F.S. in funzione dei diversi valori di permeabilità satura studiati, a parità di coesione (si propone il caso in cui $c'=3$).

4.3 PENDIO CON DISCONTINUITÀ TOPOGRAFICA

Dopo aver studiato cosa accade per un pendio continuo, si passa allo studio di un versante che presenta una discontinuità topografica. Come nel caso precedente, l'altezza dello strato studiato è pari a 1 m e il taglio inserito è profondo 0.5 m. Date le dimensioni del modello, quello che si andrà a studiare è un versante in presenza di una piccola discontinuità naturale, non un taglio stradale o un terrazzamento di natura antropica.

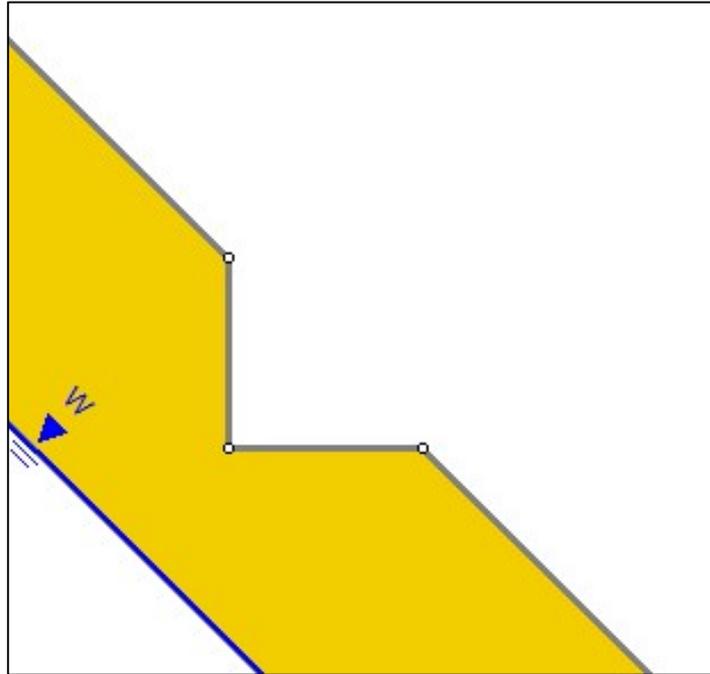


Figura 50: Interfaccia "Slope stability" del modello con taglio.

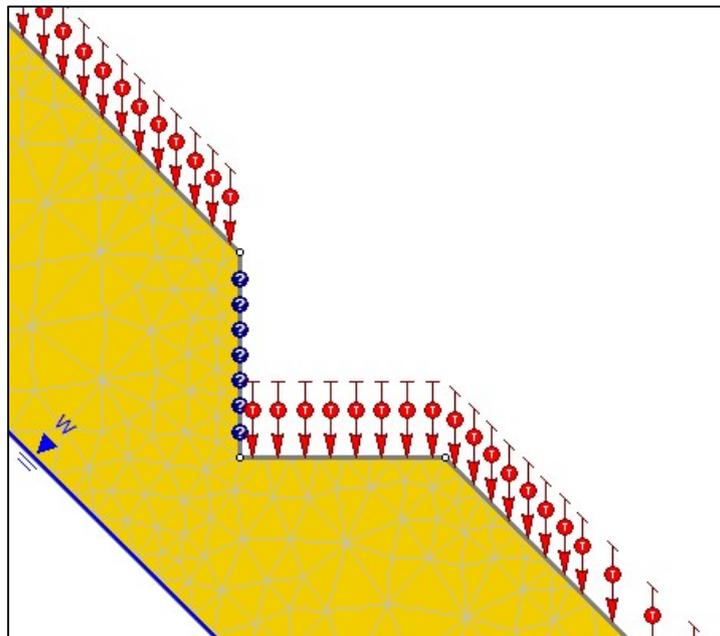


Figura 51: Interfaccia "Transient groundwater" del modello con taglio.

Come nel caso precedente, sono state effettuate diverse simulazioni in funzione della coesione e della permeabilità satura.

Nuovamente, al diminuire della coesione scendono anche i valori del F.S.

È interessante osservare come l'andamento dei vettori di flusso cambi al variare della permeabilità satura assegnata. Si guarda al caso in cui la coesione è pari a 3 kPa.

Osserviamo prima la situazione a 36 ore, dopo una pioggia di modesta intensità.

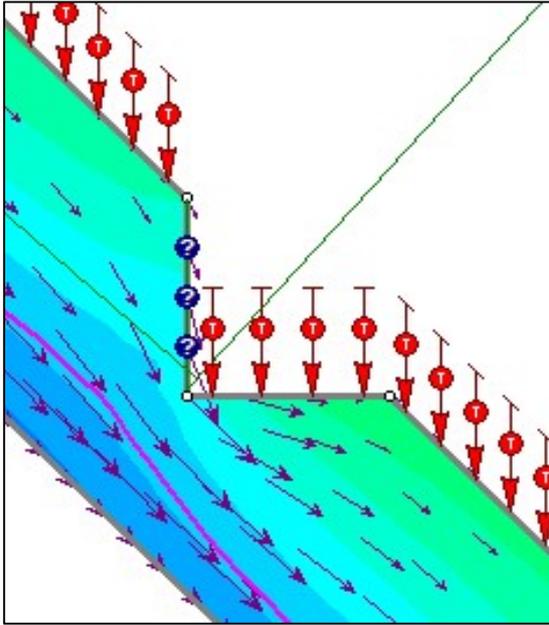


Figura 53: water table a 36 ore. $K_s=10^{-4}$.

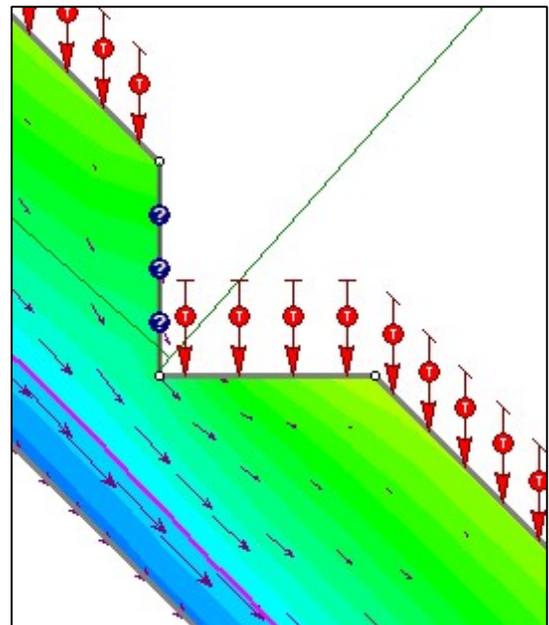


Figura 52: water table a 36 ore. $K_s=10^{-5}$.

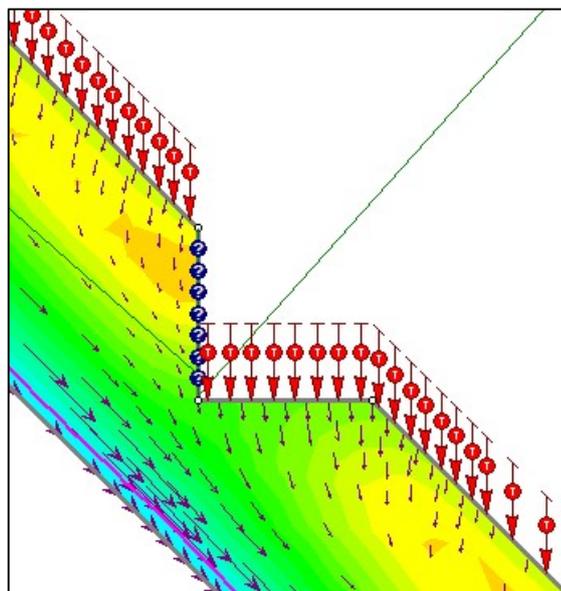


Figura 54: water table a 36 ore. $K_s=10^{-6}$.

Adesso vediamo cosa succede a 37 ore, ovvero un'ora dopo 'inizio delle precipitazioni più intense.

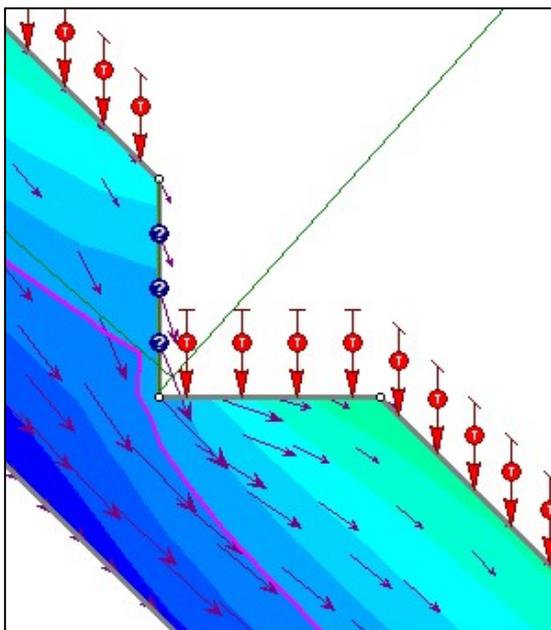


Figura 56: water table a 37 ore. $K_s=10^{-4}$.

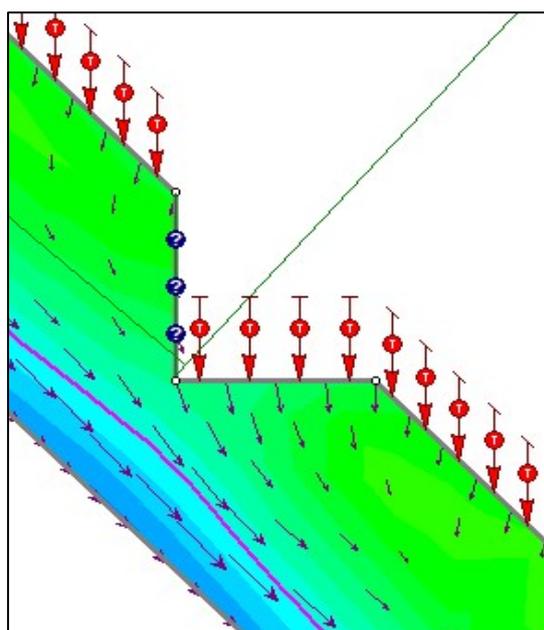


Figura 55: water table a 37 ore. $K_s=10^{-5}$.

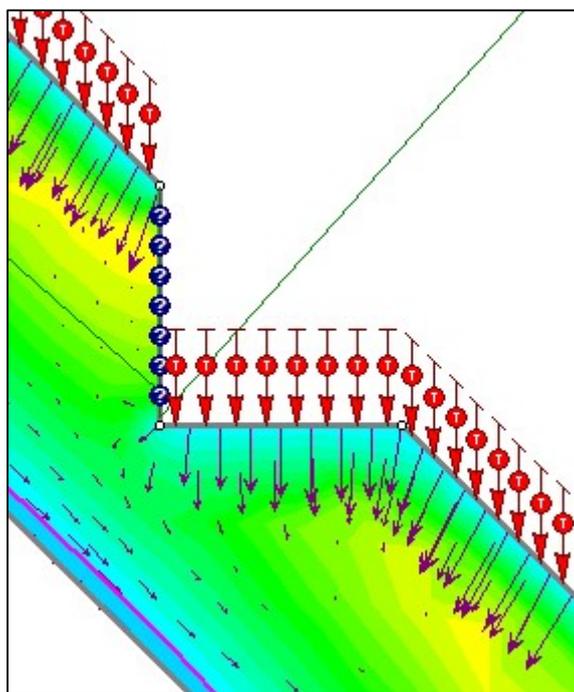


Figura 57: water table a 37 ore. $K_s=10^{-6}$.

Infine si guardano alle condizioni che comportano il fattore di sicurezza minimo del pendio, che si concretizzano ad orari diversi per ciascuno dei valori di permeabilità satura assegnato.

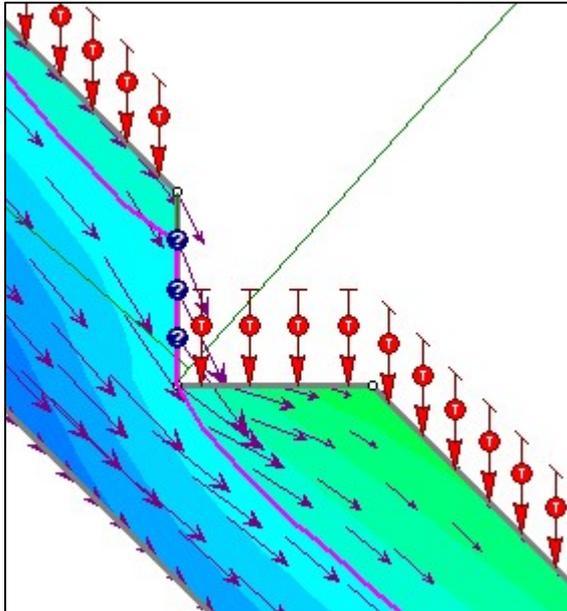


Figura 59: water table massima a 39 ore. $K_s=10^{-4}$.

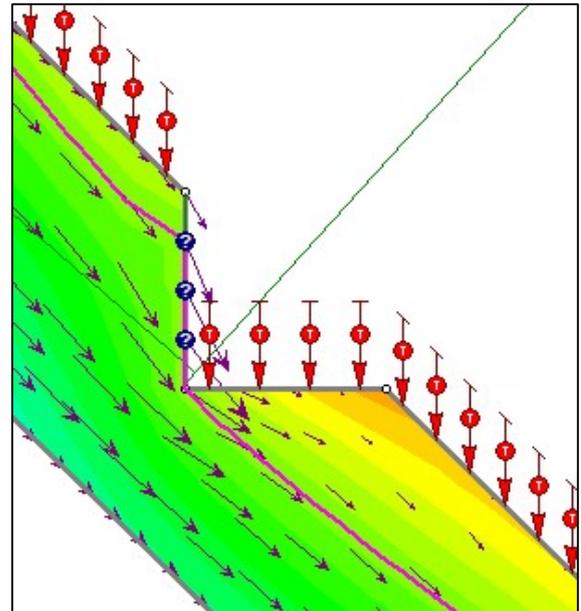


Figura 58: water table massima a 48 ore. $K_s=10^{-6}$.

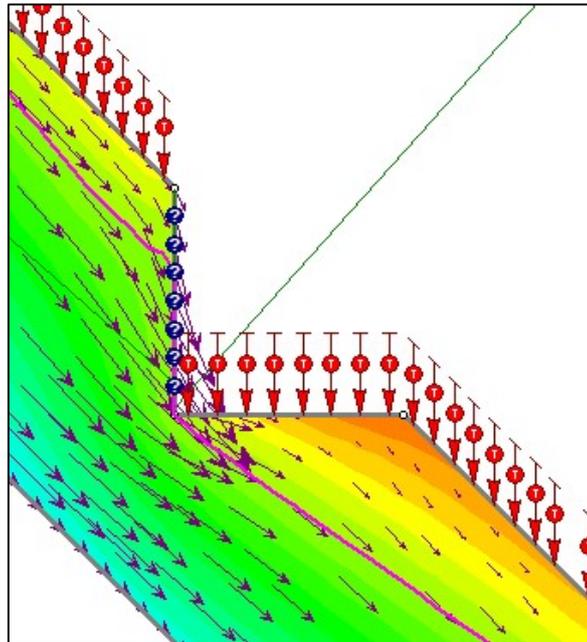


Figura 60: water table massima a 70 ore. $K_s=10^{-6}$.

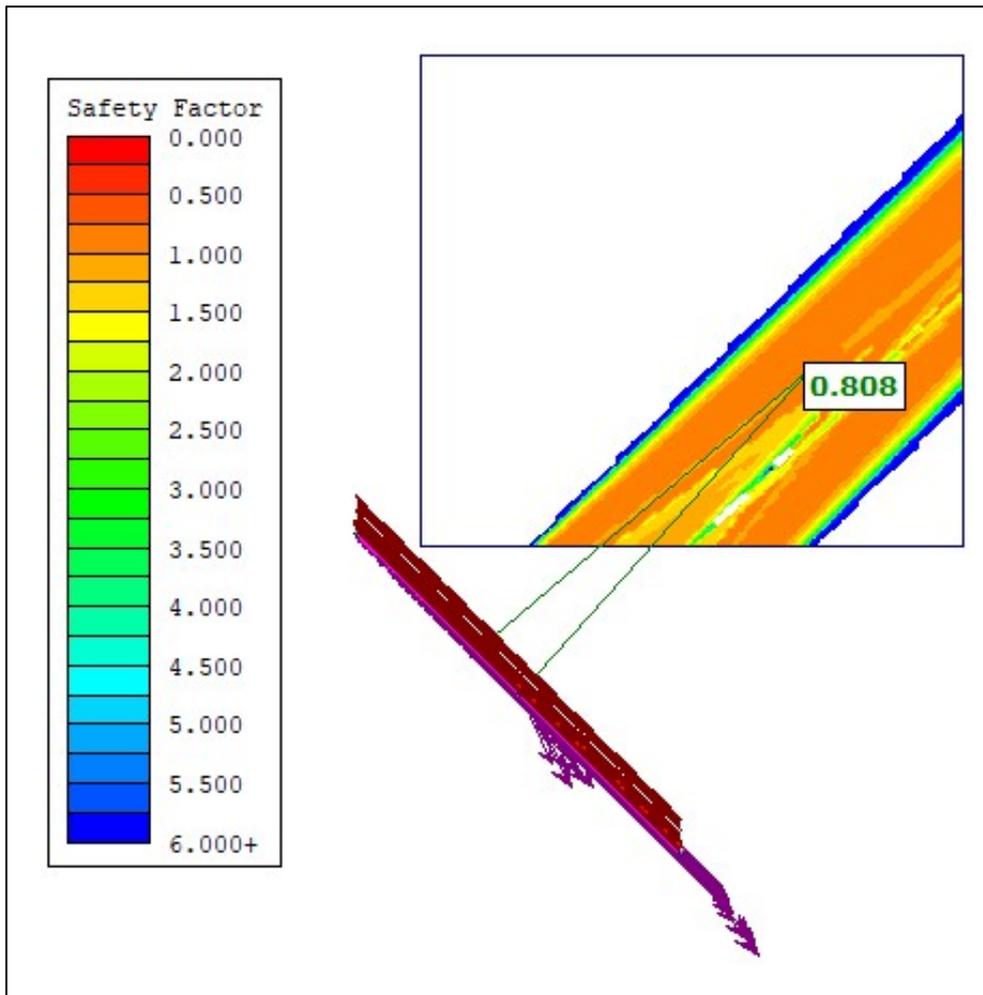


Figura 61: F.S minimo pendio con taglio. $K_s=10^{-5}$. $c'=3$.

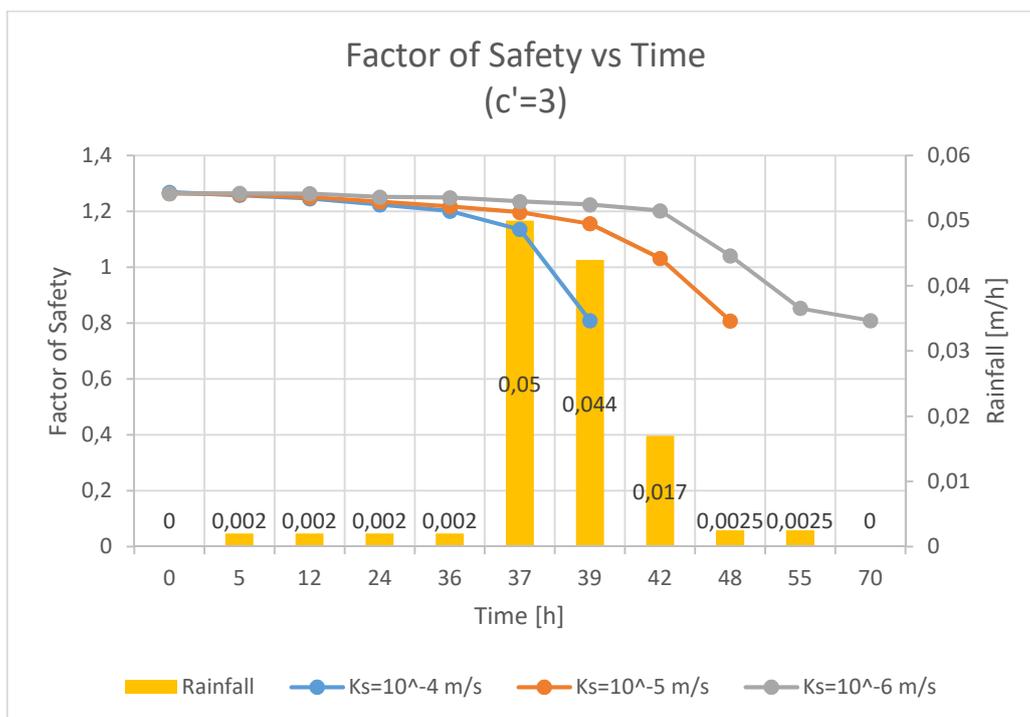


Figura 62: confronto dei F.S. per le tre condizioni di permeabilità per un pendio con taglio.

Il F.S. minimo risulta essere lo stesso in tutti e tre i casi (figura 62), ma si verifica ad orari differenti (39 ore, 48 ore e 70 ore). Inoltre la superficie di scivolamento ha sempre la stessa posizione, a monte del taglio. Questo perché, nella condizione critica, la falda che si crea è molto simile nonostante le differenze in termini di flussi e tempistiche.

Si osserva, inoltre, che rispetto al caso di pendio continuo il F.S. minimo è leggermente più piccolo.

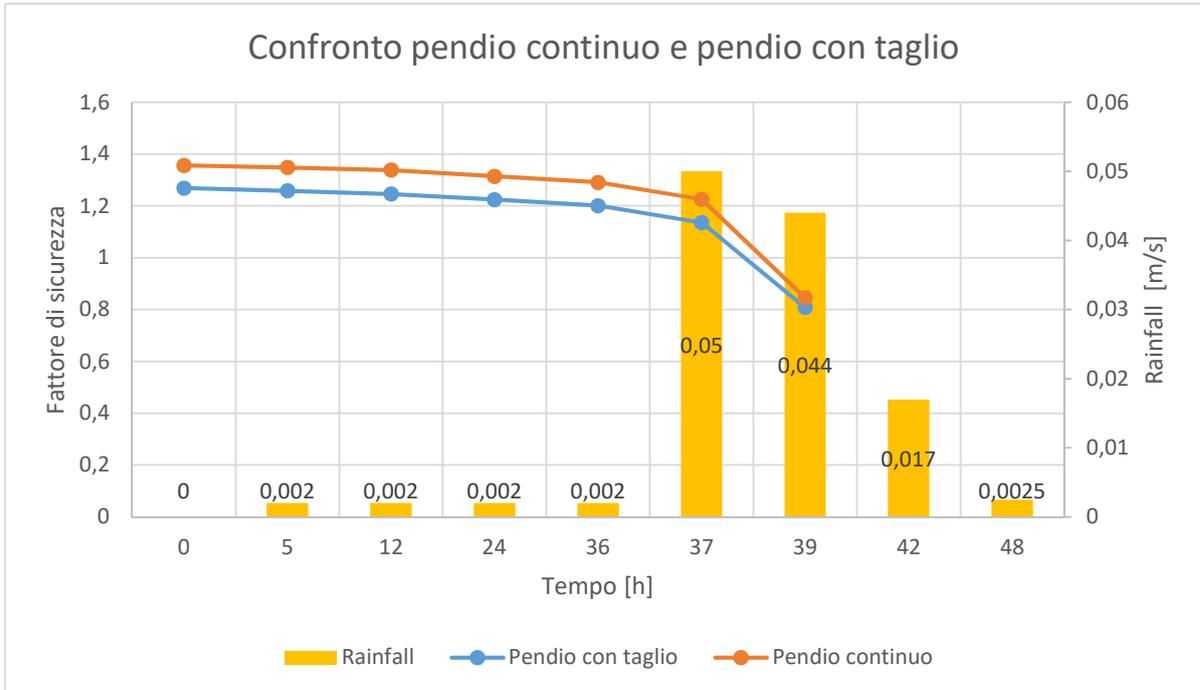


Figura 63: F.S. di un pendio continuo e di un pendio con taglio con le stesse caratteristiche. $K_s = 10^{-4}$, $c' = 3$.

5 CONCLUSIONI

Lo studio condotto con questo lavoro di tesi, ha riprodotto alcune interessanti caratteristiche dei fenomeni di instabilità della coltre superficiale.

Con l'ausilio del software Slide 2D del pacchetto Rocscience, è stato possibile realizzare un modello idrologico-semplificato attraverso un'analisi agli elementi finiti. Tali risultati sono stati successivamente utilizzati nell'analisi all'equilibrio limite che ha restituito il valore del fattore di sicurezza del pendio.

Dalle analisi svolte risulta una stretta correlazione tra instabilità del versante e precipitazioni di forte intensità. Nei modelli realizzati, specialmente in quelli con una permeabilità satura più elevata (ordine di grandezza pari a 10^{-4} m/s), si è osservato che l'instabilità si verificava poco dopo l'inizio delle piogge più severe e non durante le ore precedenti, quando il pendio era soggetto ad una precipitazione di intensità modesta ma persistente. Questo risultato è emerso sia nel caso di pendio continuo che nel caso di discontinuità topografica. Ciò trova riscontro nelle descrizioni dell'evento alluvionale del 7 agosto 1978. Le numerose frane di tipo soil slip infatti, avvennero quasi simultaneamente nell'arco di 2 ore, poco dopo l'avvento delle piogge più intense. Per valori più bassi di permeabilità il versante è comunque divenuto instabile, ma ciò è avvenuto con un ritardo che, soprattutto nel caso di permeabilità satura dell'ordine di 10^{-6} m/s, rende poco realistica la descrizione del fenomeno e inficia l'attendibilità del modello.

Un'ulteriore evidenza di questo lavoro riguarda il contributo della coesione. In prima battuta è stato utilizzato un valore di coesione pari a 5 kPa e si è osservato che, nonostante la forte sollecitazione indotta da una precipitazione molto intensa, il versante rimaneva in condizioni di equilibrio. Bisogna ricordare che il valore di 5 kPa è stato estrapolato dal Programma Interreg II, Azione 3, che ha calcolato questo parametro attraverso un'analisi a ritroso per ottenere i valori che portano ad una situazione di equilibrio limite (F.S.=1), tenendo in considerazione l'incremento dovuto agli apparati radicali. I modelli realizzati producono ad un fattore di sicurezza molto prossimo al valore limite (F.S.=1.12 per $K_s=10^{-4}$ e $K_s=10^{-5}$) nel caso di coesione pari a 5 kPa e, quindi, risultano coerenti con le assunzioni iniziali.

Dall'analisi di letteratura svolta (Anselmo 1979, Martello et al. 2000, Turner 1996), inoltre, risulta che la densità e l'approfondimento radicale influenzano il contributo coesivo degli strati superficiali del terreno. I fenomeni di soil slip, infatti, avvengono in presenza di precipitazioni intense perché i terreni superficiali non riescono a gestire le eccessive quantità d'acqua introdotte dalle piogge, dando vita ad una falda temporanea che cresce fino a saturare interamente il terreno. A causa di ciò, il contributo stabilizzante dovuto agli apparati radicali viene meno perché le radici non riescono più a trovare appiglio in un terreno completamente pregno d'acqua, tendenzialmente fangoso. Nel lavoro svolto questo meccanismo è stato riprodotto, approssimativamente, diminuendo i

valori di coesione. Si raccomandano a studi successivi approfondimenti riguardo tale fenomeno.

Il modello con una piccola discontinuità topografica, infine, ha prodotto valori più bassi del fattore di sicurezza e costituisce una situazione maggiormente propensa al dissesto, come riportato ampiamente in letteratura. La variazione del fattore di sicurezza rispetto al caso di pendio continuo, tuttavia, risulta talmente ridotta da non costituire una prova certa. Un'ulteriore raccomandazione per studi futuri potrebbe essere quella di implementare il modello geometrico, indagando strati più profondi e stratigrafie più realistiche. In questo modo anche discontinuità più realistiche, come terrazzamenti o tagli stradali, potrebbero essere studiate con maggiore efficacia.

6 BIBLIOGRAFIA

Anselmo V., 1979, Il nubifragio del 7 agosto 1978 nel bacino del Toce, estratto da Bollettino della Associazione Mineraria Subalpina, N°2, Anno XVI.

Anselmo V, 1980, L'alluvione del 7 agosto 1978 in Val d'Ossola. Aspetti idrologici del nubifragio e considerazioni sui metodi di intervento, estratto dalla Rivista della Camera di Commercio e Industria Artigianato e Agricoltura di Novara Novara, N° 1, per Lions Club International, Domodossola.

Bertamini T., 1978, Alluvione in Ossola – 7 agosto 1978, estratto dalla rivista Oscellana, Anno 8, N. 3.

Lancellotta R., 1993, Geotecnica, Zanichelli, Bologna.

Martello S. Catani F. Casagli N., 2000, The role of geomorphological settings and triggering factor in debris flow iniriati during 19th june 1996 metereological event in Versilia and Garfagnana (Tuscany, Italy), in E. Bromhead (ed), Landslides in research, Teory and practice: 1017-1022. Cardiff: Telford.

Regione Piemonte, Scuola Universitaria professionale della Svizzera Italiana, Istituto di scienze della Terra. Programma Interreg. 1999. Definizione di una metodologia per la valutazione dell'instabilità dei versanti in relazione a processi di mobilitazione della coltre superficiale.

Turner A.K., 1996, Colluvium and talus. In A.K. turner e R.L. Schuster (eds), Landslides investigation: 525-554. Washington D.C.: Nat. Academy press.

Sitografia

Geoportale Arpa Piemonte:

<https://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/>

Geoportale Regione Piemonte:

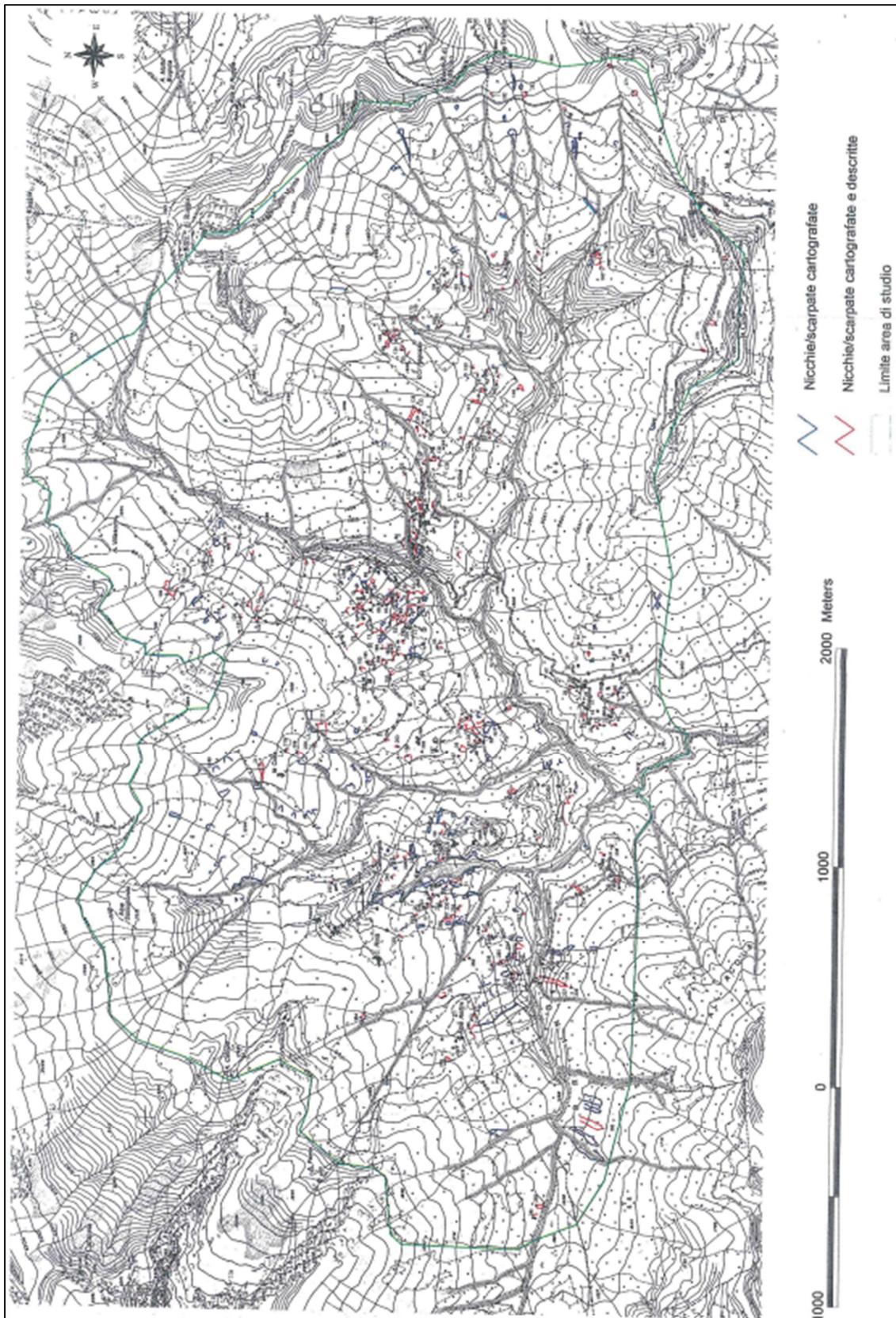
<https://www.geoportale.piemonte.it/cms/>

Piemonte SIFRAP – Sistema Informativo dei fenomeni franosi:

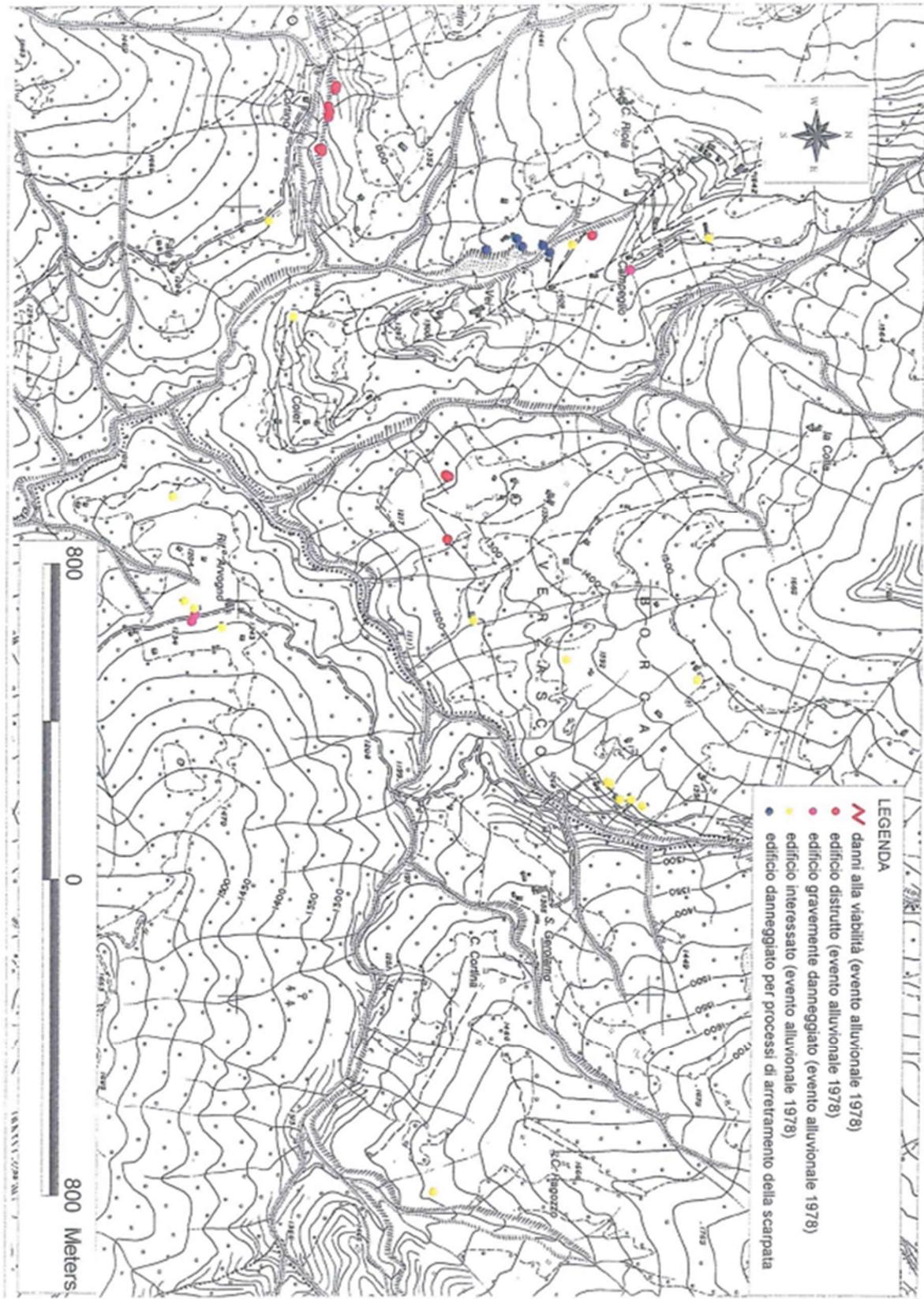
https://webgis.arpa.piemonte.it/Geoviewer2D/?config=other-configs/SIFRAP_config.json

7 ALLEGATI

Allegato 1: Cartografia dissesti, Fonte: Progetto Interreg II, azione 3



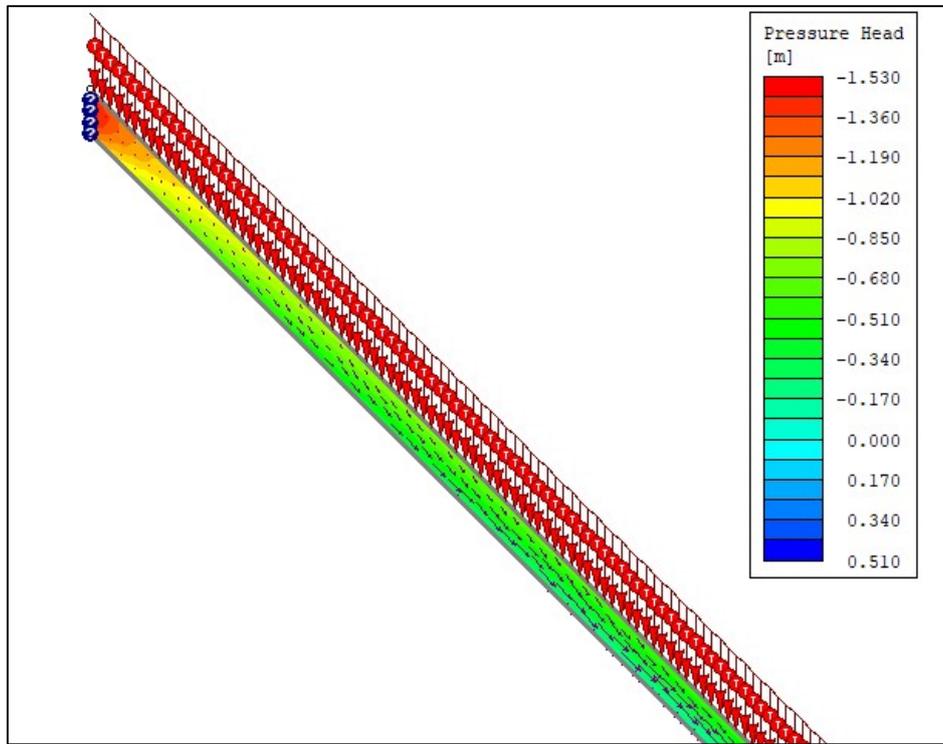
Allegato 2: Cartografia danni, Fonte: Progetto Interreg II, azione 3



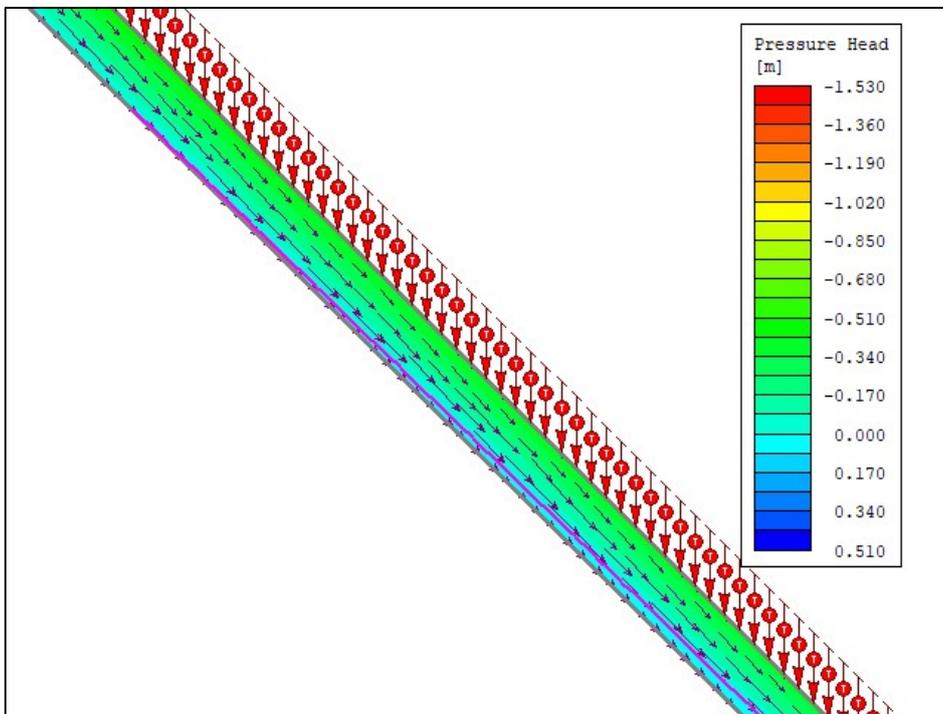
Allegato 3: risultati dei modelli idrologici dei pendii saturi.

1- Permeabilità satura pari a $3.6 \cdot 10^{-4}$. L'altezza massima della falda è a 39 ore.

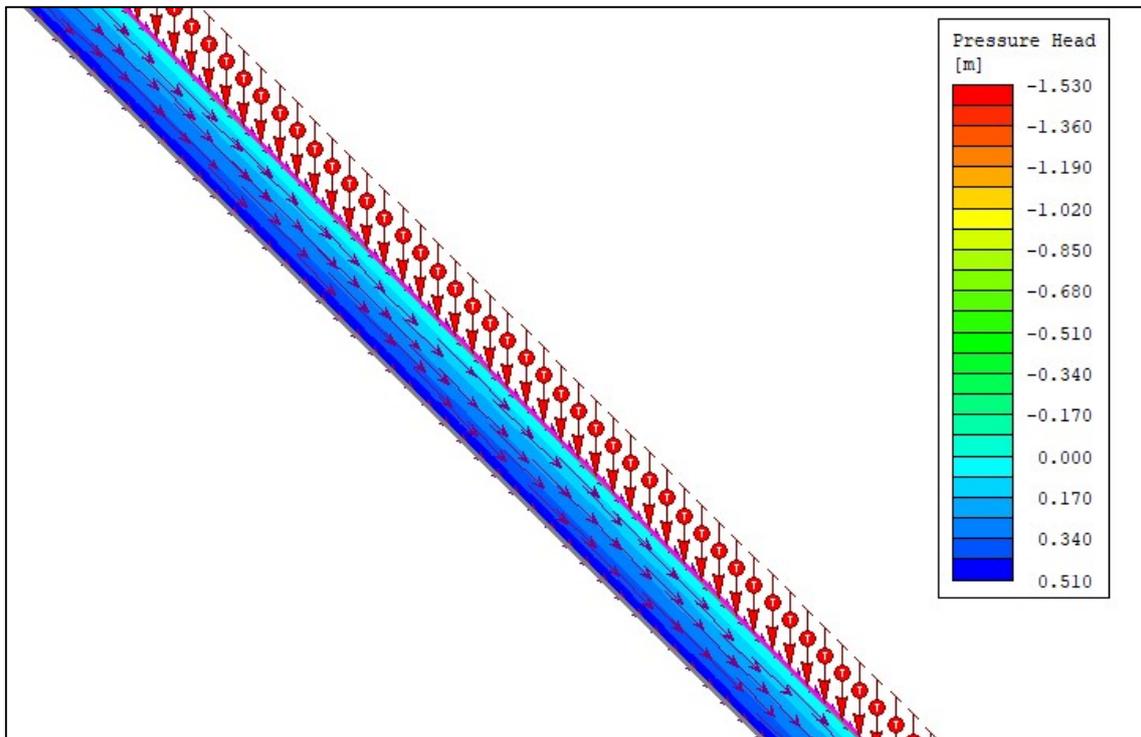
Zona a monte:



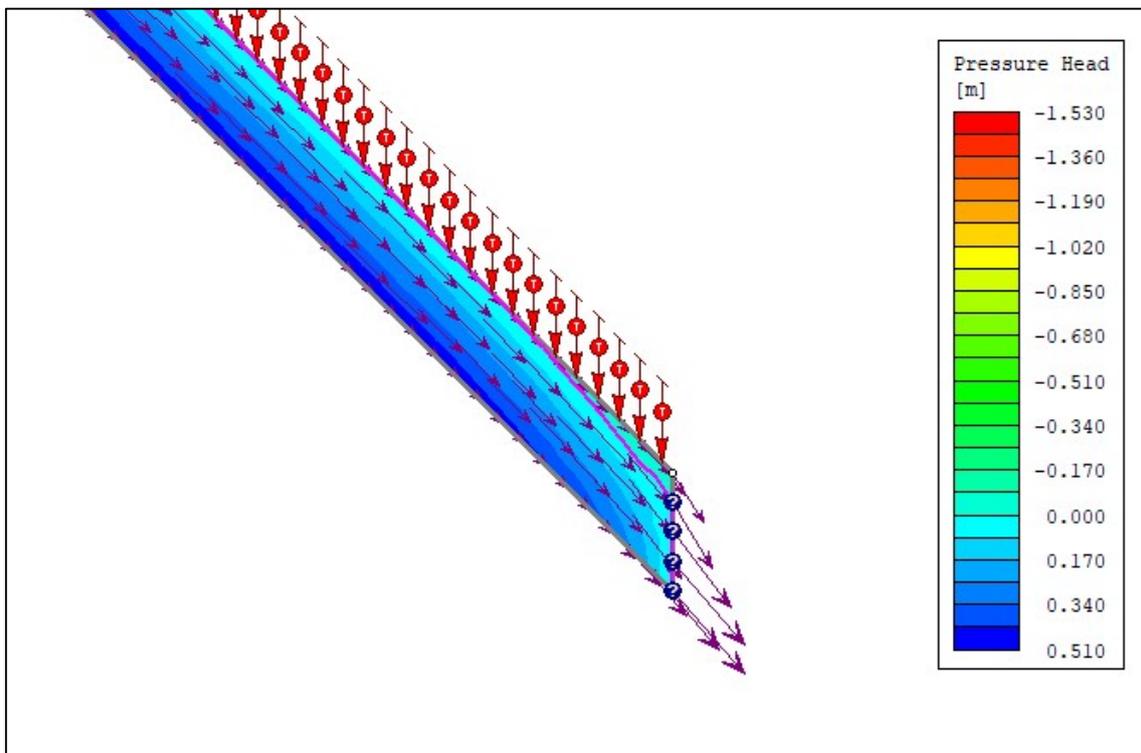
Formazione della falda a 20.8 m dalla sezione di monte.



Sezione in mezzeria:

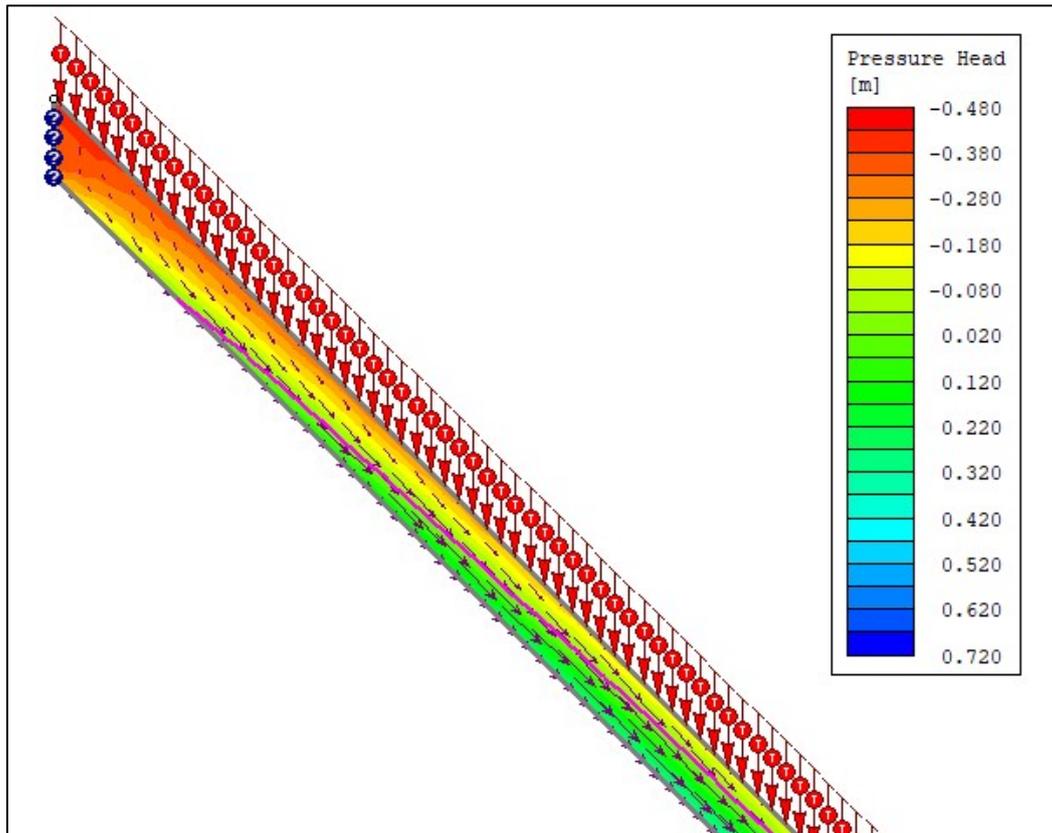


Sezione di valle:

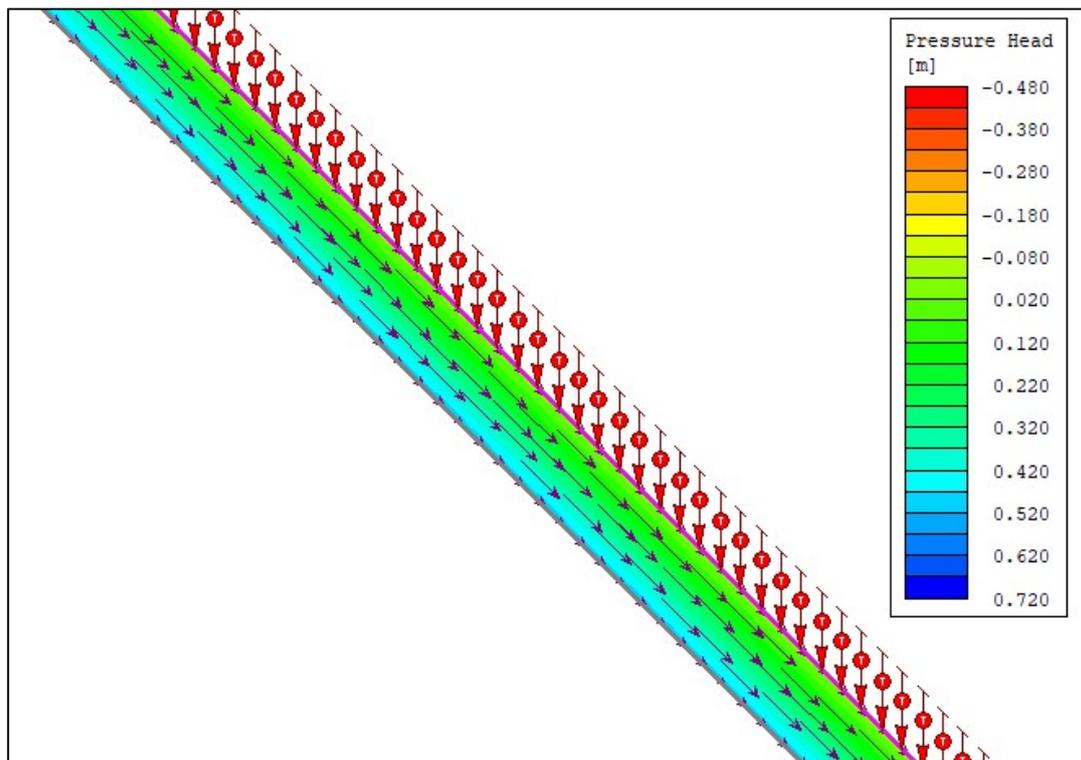


2- Permeabilità satura pari a $3.6 \cdot 10^{-5}$. L'altezza massima della falda è a 48 ore.

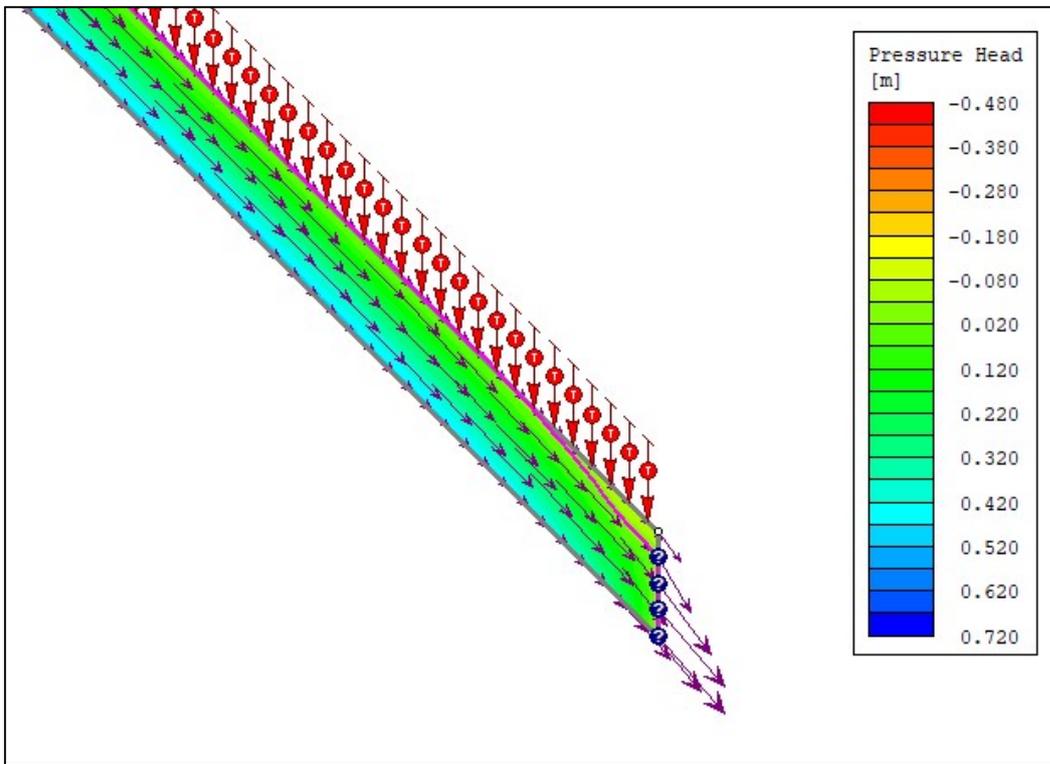
Sezione di monte:



Sezione di mezzaria:

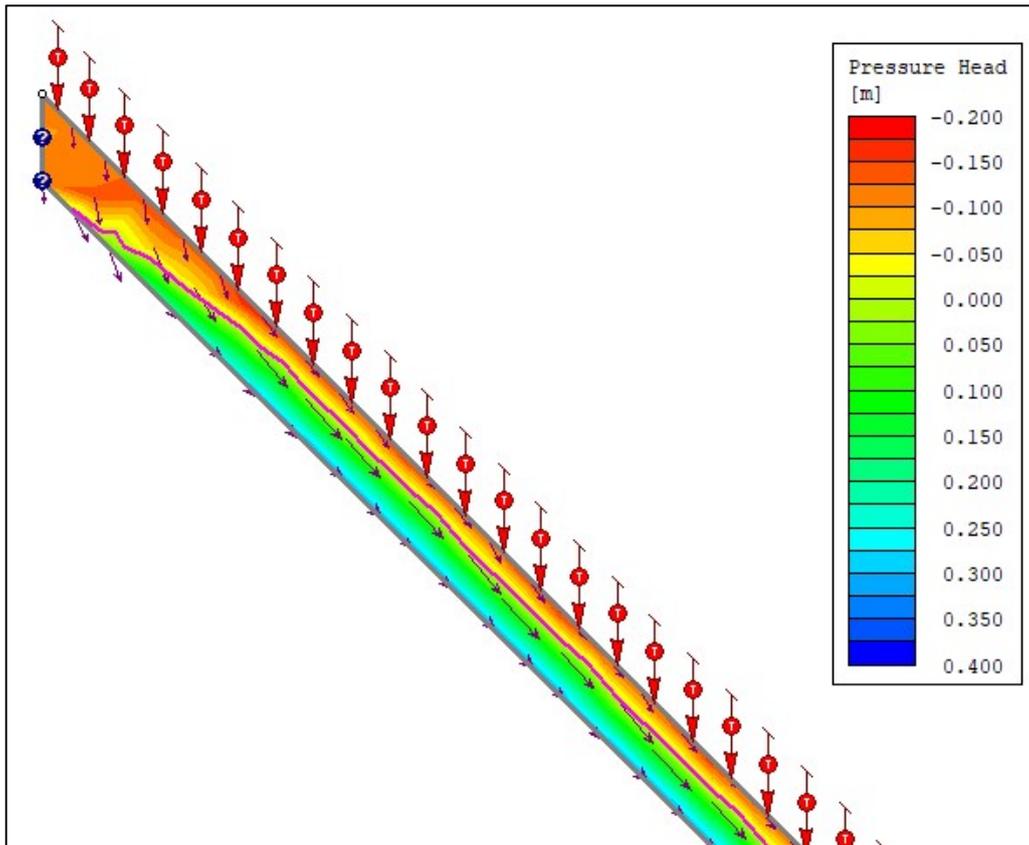


Sezione di valle:

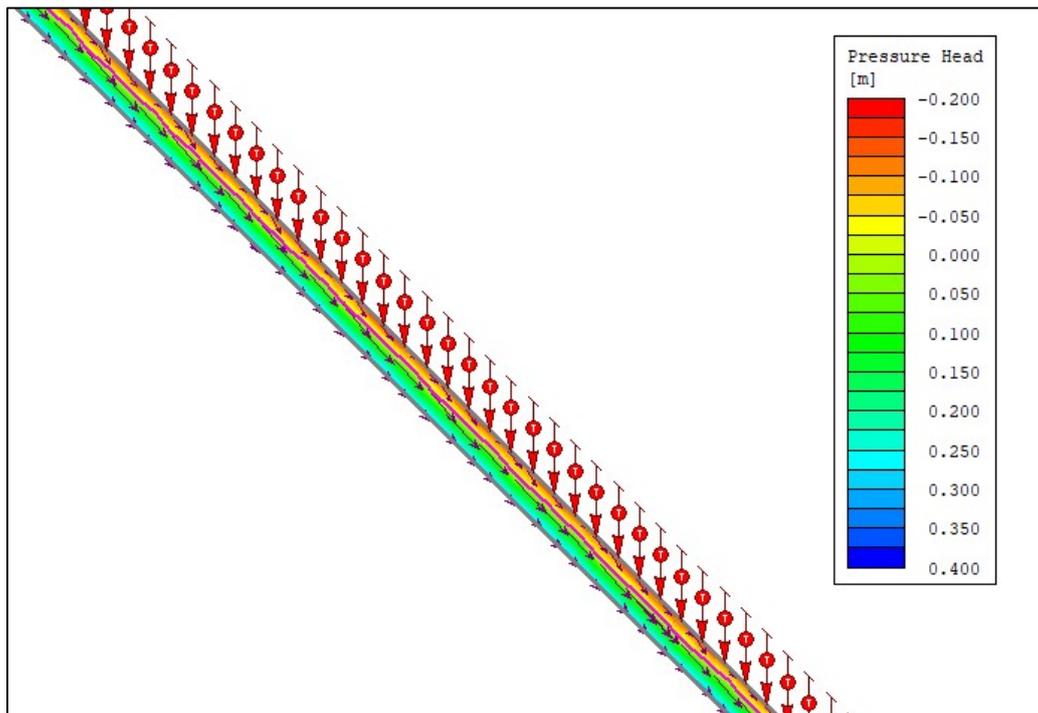


1- Permeabilità satura pari a $3.6 \cdot 10^{-5}$. L'altezza massima della falda è a 70 ore.

Sezione di monte:



Sezione di mezzaria:



Sezione di valle:

