

# POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Civile

Classe LM-23 (DM270)

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

***“Interazione tra modello geotecnico ed idrologico sulle  
condizioni di innesco delle frane superficiali”***

**Relatore:** Prof. Ing. Pierluigi Claps

**Correlatori:** Prof. Ing. Ilaria Butera

Prof. Ing. Stefania Tamea

**Candidato:** Renata Buonocore

Matricola s220278

**ANNO ACCADEMICO**

**2018-19**

*“Qual è quella ruina che nel fianco  
di qua da Trento l’Adice percosse,  
o per tremoto o per sostegno manco,  
che da cima del monte, onde si mosse,  
al piano è sì la roccia discoscesa...”*

*vv. 4-9 Canto XII, Inferno*

*Dante Alighieri*

# ***Indice***

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>1 MODELLI PER L'ANALISI DELLE FRANE INNESCATE DA PIOGGE. ....</b>	<b>5</b>
1.1 Descrizione dei fenomeni franosi superficiali: generalità.....	6
1.2 Modelli idrologici o empirici-soglie pluviometriche.....	12
1.3 Modelli per la previsione di frane superficiali.....	13
A. Modelli fisicamente basati .....	15
B. Modelli meccanici per l'analisi numerica a scala di versante: differenze finite ed elementi finiti ..	43
<b>2 CASI CONCRETI E SCELTA DELL'APPROCCIO: UNA PROBLEMATICA SPECIFICA.....</b>	<b>50</b>
2.1 Fenomeni relativi ad un caso di distacchi multipli: Sarno 5 maggio 1998 .....	50
2.2 Evidenza empirica: sarno 1998 e casi conclamati in ambito internazionale.....	53
<b>3 CASO STUDIO: SARNO 1998 MODELLAZIONE SU SCHEMA SEMPLICE DI VERSANTE.....</b>	<b>69</b>
3.1 Dati disponibili .....	69
3.2 Obiettivi della modellazione.....	78
3.3 Implementazione di software operativi.....	78
A.Modellazione del caso studio tramite MODFLOW .....	78
B.Modellazione del caso studio tramite Slide 2D.....	83
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>118</b>
<b>APPENDICE.....</b>	<b>122</b>
MODFLOW (ModelMuse) .....	122
Il codice e la griglia di calcolo.....	123
Le condizioni al contorno .....	123

<b>Slide (Rocscience) .....</b>	<b>127</b>
Il codice di calcolo e la mesh.....	127
I materiali e le proprietà del mezzo .....	128
Le condizioni al contorno .....	129
Condizioni per la verifica di stabilità.....	130

## INTRODUZIONE

---

L'Italia è un paese vulnerabile e più del 90% dei comuni italiani si trova in zona a rischio idrogeologico, cioè in un'area in cui il pericolo di frana è elevato o molto elevato.

Il rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia è presentato da Ispra (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) che fornisce in maniera aggiornata i dati sulla situazione del nostro paese. La problematica non è tanto il rischio frana in sé, naturale in un paese occupato per tre quarti da rilievi montuosi e collinari, quanto la possibilità che questi fenomeni, in alcuni casi senza evidenti segni premonitori, si abbattano su zone antropizzate provocando danni ingenti.

Il dissesto idrogeologico rappresenta per l'Italia un problema rilevante, in termini di danni e perdite di vite umane. Tra i fattori naturali che predispongono il nostro territorio a frane e alluvioni, ci sono la conformazione geologica e geomorfologica. Il rischio inoltre è fortemente condizionato dall'azione dell'uomo e dalle modifiche del territorio. L'abbandono dei terreni montani, l'abusivismo, il disboscamento, l'uso di tecniche agricole poco rispettose dell'ambiente, l'apertura di cave, l'occupazione di zone fluviali, la mancata manutenzione dei versanti e dei corsi d'acqua aggravano il dissesto.

Circa un terzo delle frane in Italia sono a cinematiso rapido: parliamo quindi di crolli, colate rapide di fango e detriti che per la loro velocità sono le più pericolose e distruttive.

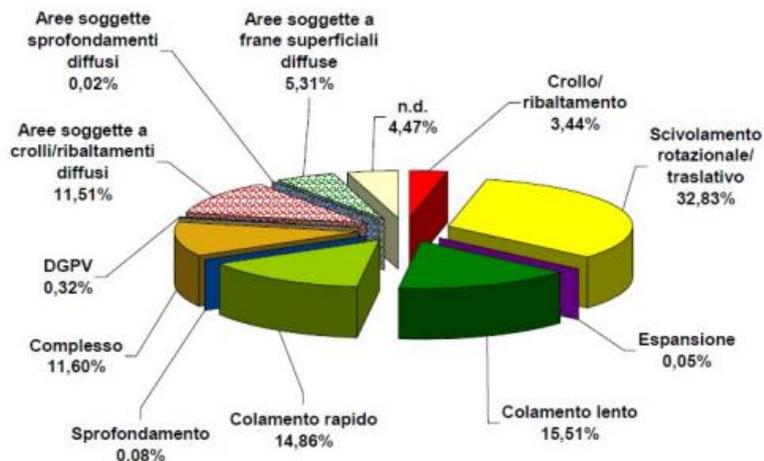


Figura 1-Tipologie e percentuali di movimento frane in Italia..  
Rapporto\_Dissesto\_Idrogeologico\_ISPRA\_287\_2018.

Nel complesso 7 milioni di abitanti risiedono in territori vulnerabili.

Sul nostro territorio molte sono le regioni a rischio, basti pensare che oltre l'80% della superficie della Valle d'Aosta è a pericolosità da frana elevata o molto elevata. Ma se dal questo territorio c'è da aspettarsi una percentuale così elevata, essendo esclusivamente montano c'è da riflettere anche sul 19,6% della Campania, sul 16,1% del Molise e i 1.538 chilometri quadrati della Lombardia, che in termini percentuali rappresentano solo il 6,4% del territorio.

MOVIMENTO	TIPO DI MOVIMENTO	N° FRANE	%
1	Crollo/ribaltamento	907	4.17%
2	Scivolamento rotazionale/traslattivo	4719	21.71%
3	Espansione	12	0.06%
4	Colamento lento	8636	39.73%
5	Colamento rapido	3637	16.73%
6	Sprofondamento	2	0.01%
7	Complesso	3245	14.93%
8	DGPV	36	0.17%
9	Aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi	19	0.09%
10	Aree soggette sprofondamenti diffusi	0	0.00%
11	Aree soggette a frane superficiali diffuse	74	0.34%
0	n.d.	450	2.07%

Provincia	Area totale in frana (kmq)
Napoli	2,28
Caserta	54,50
Avellino	264,73
Benevento	340,29
Salerno	250,49

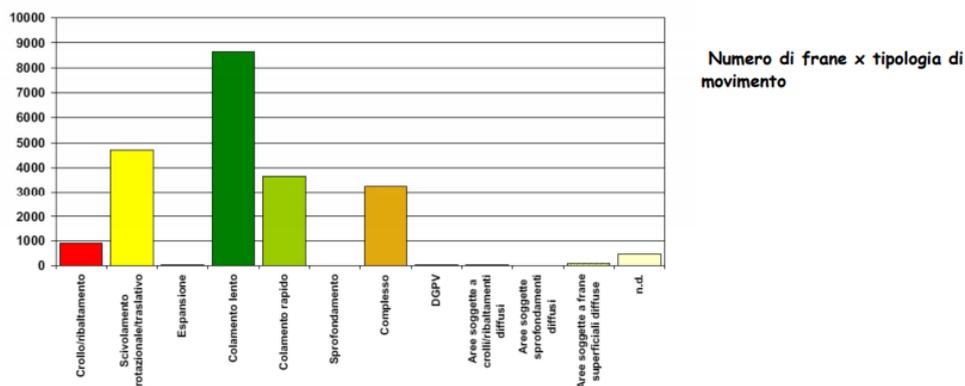


Figura 2-Tipologia di movimenti franosi in Campania. Rapporto\_Dissesto\_Idrogeologico\_ISPRA\_287\_2018

Tra gli eventi catastrofici di maggiore impatto e rilievo rientrano gli eventi di Sarno del 5 maggio del 1998. Numerose colate di fango si staccarono dalle pendici del Pizzo d'Alvano a causa di piogge, diverse ondate di fango e detriti inondarono i paesi limitrofi di Episcopio, Bracigliano e Quindici contando 153 vittime e diverse centinaia di persone evacuate.

A seguito dei tragici eventi di Sarno sono state emanate Norme a livello nazionale grazie alle quali si è dato avvio a un'analisi conoscitiva delle condizioni di rischio, individuando e perimetrando le aree con diverso livello di attenzione.

Nel caso del disastro di Sarno, ad esempio, si ebbero oltre 140 movimenti franosi superficiali che originarono circa 40 colate di fango. Complessivamente furono mobilizzati oltre 2 milioni di metri cubi di materiale.

Le frane superficiali, per loro natura, risultano difficili da prevedere. A differenza delle frane profonde a cinematisimo lento (soggette a mutevoli stati di attività), le frane superficiali non esibiscono segni premonitori di collasso e si manifestano durante isolati eventi meteorici. Inoltre, una volta innescata, una frana di questo tipo può evolvere in una vera e propria colata di detrito o fango, procedono verso valle a velocità sostenute con alto potere distruttivo.

Le caratteristiche di cui sopra (assenza di segni premonitori e velocità di propagazione eccezionalmente elevate) rendono le frane superficiali impossibili da monitorare e, per tale motivo, negli ultimi decenni la comunità scientifica ha proposto diversi approcci per la modellazione dell'innescamento delle frane superficiali indotte pioggia, finalizzata alla gestione del territorio e del rischio indotto sulle zone urbanizzate e le vie di comunicazione.

I metodi per suddividere il territorio sulla base di diversi livelli di pericolosità sono molti e possono essere ripartiti, sostanzialmente, in due tipologie principali: metodi qualitativi e metodi quantitativi. I primi pervengono a una zonazione della pericolosità (o della suscettibilità) in termini descrittivi, ad esempio attraverso la redazione di inventari delle frane (basati sulla foto-interpretazione ed indagine di campagna, eventualmente integrata da fonti storiche), carte di pericolosità derivate dalla cartografia geomorfologica (Carrara et al., 1995) e metodi di sovrapposizione di fattori

ritenuti correlabili all'evento franoso( litologia, pendenza dei versanti, area contribuente, uso del suolo).

I metodi quantitativi sono invece basati su criteri oggettivi e, quindi, riproducibili. Appartengono a questa categoria i metodi deterministici fisicamente basati, che consentono il calcolo quantitativo di un fattore di sicurezza del versante. Questo approccio accoppia un modello idrologico, per lo studio dei regimi di pressione interstiziale indotti dall'infiltrazione dell'acqua nel terreno, con il modello di stabilità del pendio indefinito, per il calcolo del coefficiente di sicurezza nell'area in esame.

In questo lavoro viene posta l'attenzione agli eventi di Sarno del 1998, soffermandosi sulle caratteristiche meccaniche e idrauliche che hanno portato all'innescò di questa tipologia di frane.

Partendo da alcuni casi di frane ben documentati si è messa in evidenza la correlazione che esiste tra l'innescò di un certo tipo di debris avalanche e la presenza di specifiche condizioni al contorno legate alla presenza di discontinuità da tagli antropici per cui si è proceduto ad una modellazione agli elementi finiti che ci permettesse di confermare la relazione tra la stabilità di versante e alcune condizioni di tipo idraulico e morfologico.

# 1 MODELLI PER L'ANALISI DELLE FRANE INNEScate DA PIOGGE

---

I versanti caratterizzati da sottili spessori di suolo sono spesso interessati da movimenti gravitativi quali frane superficiali. Gli eventi meteorici sono solitamente i fenomeni innescanti di tali frane, dando luogo a scorrimenti lungo superfici di rottura, localizzate all'interfaccia tra il suolo e la roccia sottostante.

Lo studio dei processi idrologici e l'analisi geo-meccanica del terreno sono necessari per la comprensione e la modellazione del dissesto di tipo franoso che necessita, per la stima del rischio idrogeologico, di due distinte fasi.

In particolare, i principali fattori che influenzano la suscettività al dissesto di una frana superficiale sono: coefficiente di sicurezza legato alla pendenza del terreno, la coesione del materiale, l'angolo di attrito interno, il peso del terreno (con la componente variabile del contenuto d'acqua) e l'afflusso meteorico con le complesse dinamiche dei flussi idrologici nel suolo.

La letteratura scientifica fornisce numerosi modelli che legano i processi meteo-idrologici con quelli geo-meccanici al fine di prevedere il rischio di frana.

La differenza fra i vari modelli è dovuta a molteplici aspetti:

- la diversità dei contesti geologici di riferimento e i meccanismi secondo i quali le piogge influenzano la stabilità dei versanti;
- il dettaglio e livello di approssimazione adottato per descrivere i processi idrologici e le proprietà geotecniche dei versanti;
- la scala spaziale di indagine, che varia da aree vaste ad aree limitate che possono ridursi anche ad un singolo corpo di frana;
- qualità, quantità dei dati idrologici, idraulici e geotecnici necessari a garantire l'accuratezza del modello.

La modellazione delle relazioni tra piogge e innesco di movimenti di versante viene effettuata seguendo due approcci distinti, in funzione dell'obiettivo da raggiungere e lo scopo del lavoro.

I metodi per analizzare la suscettività delle frane si possono suddividere in tre categorie:

- **Statistici:** questi si basano su una banca dati di calibrazione dove si conoscono i valori delle variabili indipendenti (input e parametri) e la corrispondente variabile dipendente (output). Gli algoritmi contenuti in questi metodi ricercano le relazioni e i coefficienti ottimali che legano le variabili indipendenti a quella dipendente. Sono questi i metodi più adatti all'analisi in aree molto vaste.
- **Fisicamente basati:** sono solitamente composti da un modulo geomeccanico e uno idrologico accoppiati.
- **Empirici:** una mappa di suscettività empirica si basa su rilievi di campagna e/o fotointerpretazione i cui risultati sono poi interpretati da un esperto che indica le zone maggiormente suscettive in base all'esperienza, elaborando i dati. Questo metodo ha il difetto di essere soggettivo e fortemente legato alla qualità dei dati di campagna.

## **1.1 DESCRIZIONE DEI FENOMENI FRANOSI SUPERFICIALI: GENERALITÀ.**

I fenomeni franosi superficiali sono movimenti di massa che coinvolgono rocce, terre e detriti e rappresentano una tipologia alquanto complessa in termini geologici e geomorfologici.

Sono fenomeni che vengono classificate come frane rapide e sono generalmente di primo distacco, e possono verificarsi in presenza di terreni sciolti sia nel caso di pendii ripidi e parzialmente saturi sia di pendii con acclività dolce e saturi. Interessano anche argille intatte consistenti e/o terreni ad elevata componente lapidea, affioranti su pendii ripidi.

Le frane vengono quindi classificate e diversificate tenendo conto di vari fattori. Mentre una prima grande distinzione viene data dai materiali di cui il terreno si costituisce (terre o rocce) un secondo importante parametro suddivide le frane a seconda del movimento prevalente cui sono soggette. I principali tipi di movimento riscontrabili sono la il crollo e il ribaltamento (avviene nei blocchi in roccia), lo

scivolamento planare, rotazionale o a cuneo, i movimenti di colata, ripartiti a loro volta in colate rapide (soil slip, debris flow) e colate lente



*Figura 3-Immagine relativa a una valanga di detrito e un torrente di detrito.*



*Figura 4-Esempio di scorrimento/colata detritica.*

Un altro fattore decisivo che determina la maggiore o minore controllabilità di questi fenomeni è senz'altro la loro velocità, ovvero il tempo che queste frane impiegano per innescarsi e attivarsi.

L'energia cinetica del corpo frana viene trasferita a qualsiasi ostacolo esso incontri lungo il percorso, generando enormi forze di impatto dinamico, motivo per il quale questa tipologia di frana è nota anche per l'elevato potenziale distruttivo che aumenta all'aumentare della velocità e della massa del corpo frana.

*Tabella 1-tipologie di frana, velocità, presenza o assenza di segni premonitori*

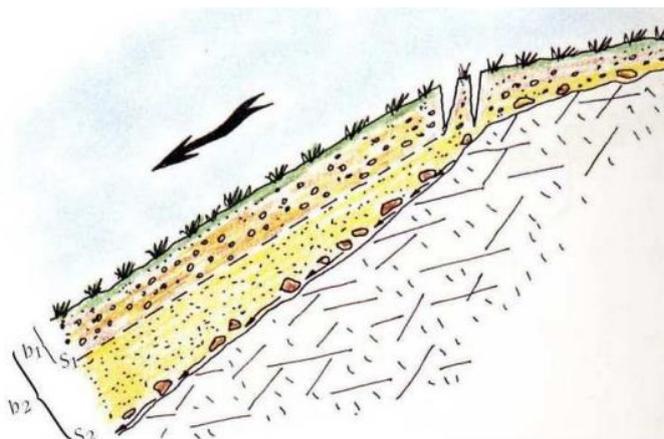
TIPOLOGIA	VELOCITÀ	SEGNI PREMONITORI DELL'EVENTO FRANOSO
COLAMENTO RAPIDO	$> 10^{-4}$ m/s	NO
COLAMENTO LENTO	$< 10^{-8}$ m/s	SI
SCIVOLAMENTO ROT./TRASL.	$10^{-8} \div 10^{-4}$ m/s	SI
CROLLO/RIBALTAMENTO	$> 10^{-4}$ m/s	NO (SI* per grandi volumi)

Le frane da fluidificazione del terreno o colamenti rapidi sono considerate molto pericolose vista l'assenza di segni premonitori e data la loro velocità d'espansione (dell'ordine di pochi minuti al massimo). Fra questi tipi di fenomeni di instabilità è possibile riconoscere le frane per instabilità delle coltri dovute alla saturazione e fluidificazione dei terreni (soil slip) ovvero le frane di debris flow (flussi detritici o lave torrentizie).

Le prime sono frane che investono gli strati più superficiali dei versanti e sono caratteristiche delle zone che si trovano a valle di pendii poco acclivi, terrazzi, strade, campi e piazzali, l'acqua può accumularsi e saturare in breve tempo il terreno. L'innescò è dunque legato alla presenza d'acqua nel terreno: più questa aumenta più il terreno si satura fino a liquefarsi e trasformarsi in una colata di fango e detriti che assume una velocità simile a quella di un fluido viscoso.

Gli strati superficiali di terreno presentano caratteristiche di permeabilità differenti rispetto a quelle degli strati sottostanti, anche se sono simili dal punto di vista litologico. In presenza di forti quantità di acqua si creano delle sovrappressioni all'interfaccia tra i due materiali che possono essere anche piuttosto elevate tanto da provocarne la rottura. L'interfaccia può funzionare come superficie di scivolamento. È anche possibile che si generi, nel terreno saturo, una falda temporanea parallela al

piano di scivolamento, in questo caso vengono coinvolti, oltre al terreno di “copertura”, anche quello di superficiale del primo substrato alterato con cui la copertura è in contatto.



*Figura 5-Schema del cinematiso di frana da scivolamento rapido. Tratto da “INGEGNERIA NATURALISTICA PER LA STABILIZZAZIONE DI PENDII: VALUTAZIONI COMPARATIVE E ANALISI RIFERITE A CASI REALI” Pubblicazione Politecnico di Torino (DISEG)*

Tali fenomeni non presentano particolari segni premonitori dell’innesco ed inoltre la pericolosità di tali fenomeni è determinata dalla rapidità di sviluppo, dal non poterne prevedere il preciso punto d’innesco, e dall’elevata densità di distribuzione delle singole frane.

I tempi di sviluppo, a partire dall’inizio della pioggia, sono molto brevi ed unico indizio per riconoscere potenziali instabilità di questo tipo è fornito talora dalla presenza di tracce di franamenti analoghi avvenuti in passato nella medesima area. Il materiale altamente fluidificato, assimilabile ad una miscela solido-liquida, si muove verso il fondovalle con velocità notevoli, condizionato dalla pendenza del versante, dalla quantità d’acqua accumulata e dalla scabrezza della superficie sulla quale scivola la massa.

Pertanto la previsione, come quella dell’instabilità di versante causate dalle precipitazioni (frane meteo-indotte) assume importanza primaria, ed insieme a un valido sistema di allertamento possono intervenire nella riduzione del rischio.

I debris flow riguardano quindi principalmente flussi detritici e lave i cui flussi possono arrivare a valle sotto forma di vere e proprie frane di detriti solidi con vegetazione e acqua.

Si tratta essenzialmente di un colamento veloce incanalato che prende forma lungo ripide aste torrentizie. L'innesco di tale meccanismo di dissesto è di certo imputabile alla presenza dell'acqua, sia che si tratti di piogge cumulate sia che si tratti di temporali. Le piogge cumulate possono essere valutate sia in termini di pioggia vera e propria sia in termini di neve. Purtroppo anche per questo fenomeno non è possibile definire dei segni premonitori particolari se non controllare la presenza di terra nei corsi d'acqua.



*Figura 6-Tresenda (SO). Esempio di soil slip, generatosi su un versante coltivato a vigneto, abbattutosi su alcune abitazioni il 22 maggio 1983 (Archivio IRPI-CNR Torino)*



*Figura 7- Soil slip con totale asportazione della copertura boschiva innescatasi durante l'evento del 1° giugno 1992 presso i viadotti stradale e ferroviario che sovrappassano il F. Olona (VA)(Archivio IRPI-CNR Torino).*



*Figura 8-Esempi di frane superficiali indotte dal 25 ottobre 2011 evento precipitazioni nel bacino Vernazza.*

In generale, è possibile affermare che questo tipo di fenomeno è innescato dalle componenti argillose fortemente reattive presenti nel terreno. Queste ultime hanno una forte capacità di rigonfiamento se poste a contatto con l'acqua e, pertanto generano delle forze interne alle superfici del terreno che provocano la frana. Per attivarsi questi fenomeni hanno bisogno di precipitazioni prolungate, pertanto periodi continuativi di piogge che anticipano forti precipitazioni improvvise rappresentano eventi meteorologici assai influenti su tale fenomeno. La velocità di sviluppo del fenomeno e in particolare quella di una colata, se pur lenta in generale, risulta diversa se misurata punto per punto all'interno dell'ammasso: nel centro della colata essa risulta infatti più elevata che ai bordi. Per di più le particelle di terreno superficiale muovono più velocemente di quelle di terreno profonde.

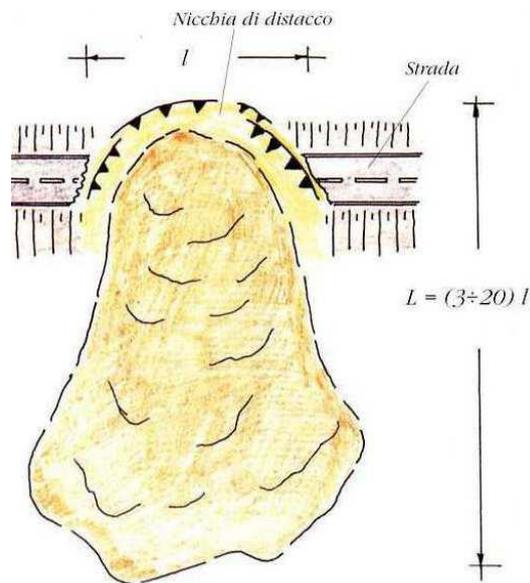


Figura 9-Schema di cinematismo di frane da colamento lento. Tratto da "INGEGNERIA NATURALISTICA PER LA STABILIZZAZIONE DI PENDII: VALUTAZIONI COMPARATIVE E ANALISI RIFERITE A CASI REALI" Pubblicazione Politecnico di Torino (DISEG)

La Figura 9 mostra come la colata si possa sviluppare e i conseguenti spostamenti di terreno corrispondenti. In questo caso, poiché siamo in presenza di un movimento lento, è più facile notare dei segni premonitori quali la presenza di ondulazioni del suolo, corrugamenti, contropendenze, movimenti di alberi e pali della luce lungo il pendio. Talvolta si possono notare anche fessurazioni su alcune strutture.

## 1.2 MODELLI IDROLOGICI O EMPIRICI-SOGGIE PLUVIOMETRICHE

Un modello idrologico è un modello matematico che descrive le relazioni tra la caduta della pioggia e il suo drenaggio in un bacino idrografico o imbrifero.

La complessità che esiste nell'affrontare la modellazione dei processi di infiltrazione e movimento dell'acqua nel sottosuolo rende particolarmente utile il ricorso all'informazione indiretta mediante l'analisi dei dati pluviometrici per cercare di delineare scenari critici di pioggia in modo da spingersi verso lo studio e l'identificazione dei meccanismi di innesco dei dissesti in generale, ed in modo particolare di quelli superficiali.

I modelli empirici identificano le relazioni tra frana e precipitazione sulla base di eventi franosi osservati e delle piogge antecedenti. Del resto il principale fattore di innesco delle frane è rappresentato dalle precipitazioni.

In letteratura è presente molto materiale in merito alla determinazione di un metodo empirico e delle soglie pluviometriche intese come un livello, superato il quale, cambiano le condizioni del sistema.

Questi criteri si distinguono in base allo spessore del corpo frana, l'estensione dell'area interessata dal fenomeno (dalla scala locale a quella regionale) oltre al fatto che prendono in conto geologia e morfologia del suolo.

L'analisi dei singoli fenomeni è effettuata in condizioni stazionarie.

Un approccio puramente empirico, usato ampiamente, è quello delle soglie pluviometriche, basato su dati storici.

La definizione delle cosiddette "soglie pluviometriche", ovvero delle soglie di intensità e durata degli eventi piovosi oltre le quali si innescano fenomeni franosi di neoformazione o si riattivano dissesti preesistenti, rappresenta il problema maggiore nell'utilizzo dei dati pluviometrici con finalità di previsione delle frane. Considerata la grande variabilità delle condizioni geologiche ed idrogeologiche dei pendii, è di norma difficile individuare relazioni empiriche tra piogge critiche e dissesti oltre i contesti locali.

### **1.3 MODELLI PER LA PREVISIONE DI FRANE SUPERFICIALI**

I movimenti franosi come i soil slip sono stati ampiamente descritti in letteratura scientifica da diversi autori in relazione anche alle differenti aree geografiche. I modelli per l'analisi di suscettività da frana sono solitamente composti da un modulo geo-meccanico e uno idrologico accoppiati.

Nell'ambito di questo lavoro si è osservato il problema previsionale di alcuni modelli fisicamente basati che sono stati sviluppati e discussi da vari autori. Questi modelli, molto diffusi in letteratura, prendono in considerazione gli aspetti idrologici, idrogeologici, morfologici e geotecnici del versante, tentando di riprodurre i fenomeni fisici che avvengono nel pendio e che ne determinano instabilità (Montgomery & Dietrich, 1994). Tali modelli si propongono di riprodurre i fenomeni fisici che avvengono alla scala di versante e utilizzano una dettagliata informazione idrologica, idraulica e geotecnica (Iverson, 2000). Sono legati al contesto geologico e al meccanismo con il quale la pioggia influenza la stabilità del pendio.

Solitamente sono composti dall'accoppiamento di due moduli: uno idrologico ed uno di analisi di stabilità. Mentre il calcolo della variazione del Fattore di Sicurezza è eseguito nella maggior parte dei casi attraverso il metodo dell'equilibrio limite sotto l'ipotesi di pendio infinito. Il calcolo di un coefficiente di sicurezza, espresso come rapporto tra resistenza e azione. Quando il valore di FS raggiunge 1, il versante è nella condizione di equilibrio limite e, teoricamente, si rompe.

Solitamente è valida l'analisi all'equilibrio limite di Pendio Infinito, ciò permette di considerare la lunghezza del corpo frana molto maggiore della profondità, trascurando le forze che si generano tra un concio e l'altro e dà la possibilità di ipotizzare la superficie di scorrimento parallela al piano campagna.

Fs assume la seguente espressione:

$$FS = \frac{c + (H\gamma_s \cos^2(\alpha) - u) \tan(\phi)}{H\gamma_s \sin(\alpha) \cos(\alpha)}$$

- $c$  coesione efficace;
- $H$  profondità del piano di scorrimento;
- $\gamma_s$  peso specifico del suolo;
- $\alpha$  pendenza del versante;
- $u$  pressione neutra;
- $\phi$  angolo di attrito interno efficace.

L'accoppiamento tra le due componenti geo-meccanica e idrologica avviene tramite la pressione neutra  $u$ , tale valore, è fisso in casi di modelli stazionari e variabile nel caso di modelli transitori.

Di seguito è riportato un excursus sui modelli presenti in letteratura.

## A. Modelli fisicamente basati

### 1.3.A.1 *Montgomery & Dietrich (1994) - SHALSTAB (SHALlow STAbility)*

Il modello di Montgomery e Dietrich (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994), combina il classico modello all'equilibrio limite per la stabilità dei versanti con un modello idrologico, ed appare idoneo, almeno per alcuni aspetti, alla modellazione dei fenomeni di soil slip.

Concettualmente, il suo schema fa riferimento al modello idrologico TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) in cui il livello di falda in ogni punto del bacino è legato all'intensità della pioggia, all'area drenante a monte del punto stesso, alla pendenza locale del pendio e alle caratteristiche idrologiche del terreno.

È un modello stazionario che presuppone il flusso sub-superficiale orientato prevalentemente in direzione parallela al pendio che si esercita esclusivamente nella porzione satura del suolo. Il suolo è ipotizzato composto da uno strato di altezza  $H$  e permeabilità satura  $K_s$  indipendente dalla profondità; sotto questo strato risiede il bedrock impermeabile.



Figura 10-Schema del modello SHALSTAB. (Sorbino, Sica, Cascini Cuomo)

Le ipotesi alla base della formulazione di questo modello sono:

- pendio indefinito;
- superficie di rottura piana e parallela alla superficie topografica;
- criterio di resistenza del terreno alla Mohr-Coulomb espresso in termini di tensioni efficaci;
- flusso stazionario parallelo al pendio;
- assenza di drenaggio profondo e di flusso nel substrato.

Tale modello prevede, inoltre, la discretizzazione del dominio di studio in celle elementari di lato  $b$  e superficie  $A$  per ciascuna delle quali sono note le variabili ed i parametri in ingresso. In particolare, le variabili sono gli attributi che derivano automaticamente dal Modello Digitale del Terreno (pendenza del versante, area di drenaggio  $A$  e larghezza di deflusso  $b$ ), mentre i parametri sono le grandezze fisico-meccaniche che devono essere attribuite alla coltre superficiale (spessore  $x$ , peso saturo dell'unità di volume  $\gamma_{\text{sat}}$ , coesione  $c$ , angolo di resistenza al taglio  $\phi_{\text{sat}}$ , conducibilità idraulica  $T$  e altezza di pioggia infiltrata).

- *Modello per la stabilità del pendio*

Il modello di stabilità del pendio infinito è basato sulla legge di Mohr-Coulomb, per la quale la resistenza al taglio è legata alla coesione del terreno ( $c$ ), all'angolo di attrito interno ( $\varphi$ ) e allo sforzo normale rispetto al piano di rottura espresso in termini di sforzo efficace ( $\sigma - u$ ;  $u$  = pressione neutra):

$$\tau = c + (\sigma - u)\tan\varphi \quad (1)$$

Per terreni incoerenti  $c = 0$ , la (1) diviene:

$$\rho_s g z \cos\theta \sin\theta = (\rho_s g z \cos^2\theta - \rho_w g h \cos^2\theta) \tan\varphi \quad (2)$$

dove  $z$  è lo spessore della copertura,  $h$  è il livello della falda al di sopra della superficie di rottura,  $\rho_s$  e  $\rho_w$  sono rispettivamente la densità del terreno e dell'acqua,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $\theta$  è l'inclinazione del pendio.

Risolvendo l'equazione per  $h/z$ , ovvero per il grado di saturazione del terreno, si ottiene:

$$h/z = (\rho_s/\rho_w) (1 - (\tan\theta/\tan\varphi)) \quad (3)$$

Sulla base dell'equazione (3) è possibile definire quattro possibili stati del pendio: incondizionatamente stabile (pendio stabile anche in condizioni di saturazione totale), stabile, instabile ed incondizionatamente instabile (pendio soggetto a rottura anche in condizioni di assenza della falda).

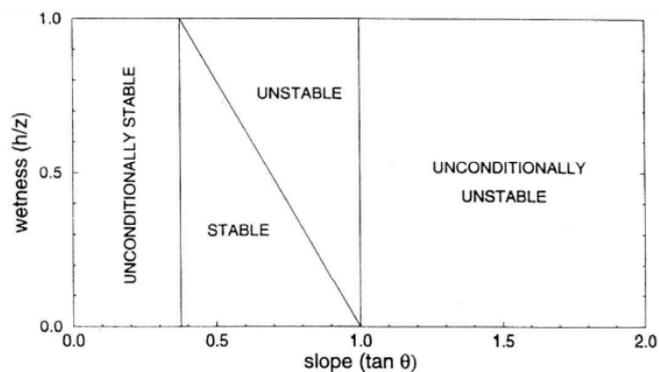


Figura 11-Campi di stabilità definiti sulla base della pendenza del pendio ( $\tan\theta$ ) e del grado di saturazione della coltre ( $h/z$ ) (da Montgomery & Dietrich, 1994).

- *Modello idrologico*

Il modello idrologico è utilizzato per descrivere i processi che controllano il grado di saturazione del terreno ( $h/z$ ). A livello concettuale il modello può essere descritto come in Figura 12 sulla quale è riportata anche la simbologia utilizzata nelle formulazioni che seguono.

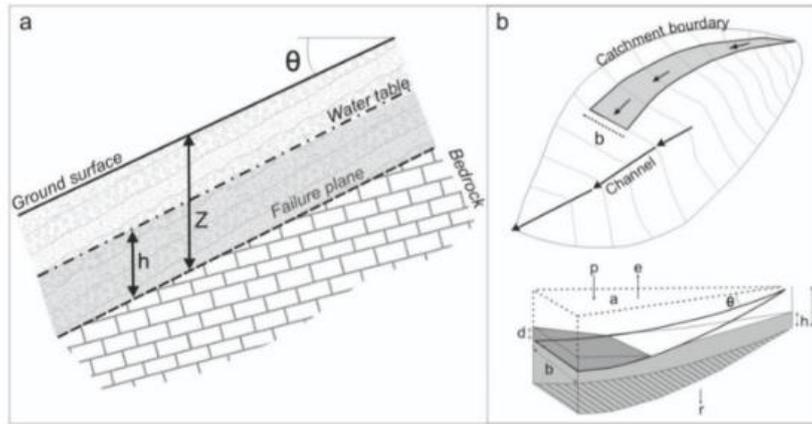


Figura 12- SHALSTAB modello concettuale secondo Montgomery and Dietrich, 1994). a) pendio infinito; b) modello idrologico p, precipitazione; e, evapotraspirazione; r, drenaggio profondo; a, area drenata; h, altezza del livello dell'acqua; z, spessore del suolo; u, velocità del flusso sub superficiale; hw, livello dell'acqua del flusso superficiale;  $\theta$ , pendenza del versante; b, larghezza del canale di flusso).Fonte: "Recommended procedure for validating landslide model 7th Framework Programme Safeland D2-8 2011"

Sulla base di questo modello il grado di saturazione del terreno può essere messo in relazione con la precipitazione efficace q (aliquota di pioggia che si infiltra nel terreno), con la trasmissività del terreno T e con le condizioni morfologiche di drenaggio determinate dall'ampiezza dell'area di drenaggio di monte a e della sezione di deflusso b.

Il grado di saturazione è calcolato, combinando le equazioni di Darcy con quella relativa alla valutazione della stabilità di un pendio infinito pervenendo alla seguente espressione:

$$h/z = (q/T) (a/(b \text{ sen } \theta)) \quad (4)$$

In cui è rilevante il rapporto q/T che ingloba caratteristiche idrauliche rappresentate dalla trasmissività T ( $T = K_s * h$  con  $K_s$  costante) e l'apporto stazionario q inteso come afflusso meteorico critico tale da instabilizzare la cella; le altre variabili geometriche sono contemplate nel fattore  $a/b \text{ sen } \theta$ .

Combinando le equazioni (3) e (4), è possibile calcolare il "rapporto idrologico" (q/T) sulla base dei parametri morfologici e geotecnici:

$$q/T = (\rho_s/\rho_w) (1 - (\tan\theta/\tan\phi)) (b/a) (\text{sen}\theta) \quad (5)$$

Sulla base dell'equazione (5) emerge un quadro geomorfologico per il quale la propensione all'innescò di frane superficiali è funzione di una componente morfologica e di una idrologica ottenendo un indicatore di stabilità distribuito nello spazio.

La *componente morfologica*, considera il rapporto tra la sezione di deflusso  $b$  e l'area di drenaggio a monte  $a$ . Per aree del versante (quali ad esempio avvallamenti) dove la sezione  $b$  può risultare significativamente inferiore rispetto all'area di drenaggio  $a$  si verificano condizioni che ostacolano il deflusso dell'acqua infiltrata, favorendo così fenomeni di saturazione e quindi di rottura.

*Dal punto di vista idrologico*, a parità di infiltrazione  $q$  e di spessore della copertura  $z$ , una minor permeabilità dei terreni (e quindi una minor trasmissività  $T$ ), ostacolando il flusso verso valle dell'acqua, determina l'aumento del grado di saturazione del terreno, diminuendo gli sforzi efficaci e favorendo fenomeni di rottura.

Il modello SHALSTAB permette di calcolare il valore del rapporto  $q/T$  (calcolato come logaritmo di  $q/T$ ) per valutare la capacità drenante del terreno in funzione delle caratteristiche geotecniche del terreno e della morfologia del versante. Sulla base dei valori del logaritmo del rapporto  $q/T$  vengono distinte le condizioni di stabilità del terreno, analogamente a quanto riportato in Figura 11.

### **1.3.A.2 Modello Rosso**

Rosso et al. (2006) hanno elaborato un nuovo modello, rispetto a quello prodotto in SHALSTAB, per il controllo delle frane superficiali. Esso si basa sulla considerazione della fondamentale importanza sia dell'intensità che della durata delle piogge che della durata per la determinazione delle condizioni idrologiche d'innescò delle frane superficiali. Tale modello analizza la variabilità dei tassi di precipitazione e la durata degli eventi precipitativi con l'accoppiamento di una componente di tipo geo-meccanico e una di tipo idrologico.

La *componente geo-meccanica* del modello, preposta all'analisi di stabilità dei versanti, considera le solite caratteristiche del suolo quali l'angolo di resistenza al taglio, l'indice dei vuoti e la gravità specifica dei solidi. L'analisi è eseguita in termini di fattore di sicurezza con alla base l'assunzione di pendio infinitamente esteso.

*La componente idrologica* è modellata associando il principio di conservazione della massa con la legge di Darcy. L'accoppiamento delle due componenti produce un semplice modello analitico capace di descrivere gli effetti combinati della durata e dell'intensità di un episodio di precipitazione innescante una frana superficiale.

Tale modello è stato introdotto da Rosso allo scopo di analizzare proprio la relazione che intercorre tra la superficie topografica, la dinamica idrologica e la stabilità del terreno in modo da individuare le aree a rischio frana. Rispetto al modello di Montgomery & Dietrich lo schema idrologico viene modificato per tener conto non solo del tasso di precipitazione critica, ma anche la durata del fenomeno.

Concettualmente, il suo schema fa riferimento ad un modello idrologico in cui il livello di falda in ogni punto del bacino è legato all'intensità della pioggia, all'area drenante a monte del punto stesso, alla pendenza locale del pendio e alle caratteristiche idrologiche del terreno.

In questo modello, inoltre, la coltre ha uno spessore finito.

- *Modello per la stabilità del pendio*

Per quanto riguarda il modello di stabilità del pendio l'ipotesi è, come detto, quella di pendio infinito (infinite slope) basato sulla legge di Mohr-Coulomb per cui la resistenza al taglio lungo la superficie di scorrimento è pari a:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$$

- $c'$  =coesione del suolo;
- $\sigma$  =sforzo normale totale;
- $u$ =pressione dell'acqua;
- $\varphi'$ =angolo di resistenza al taglio.

Per cui il fattore di sicurezza risulta pari a:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau}$$

È possibile anche trascurare la coesione trattandosi per lo più di terreni sabbiosi per i quali i valori sono modesti e comunque trascurarla implicherebbe essere a favore di sicurezza.

Questo approccio supera quello introdotto da Montgomery e Dietrich (1994) solitamente considerato di riferimento nella letteratura scientifica, che negava l'effetto dell'indice dei vuoti e del grado di saturazione al di sopra del livello di falda.

- *Modello idrologico*

Sebbene estremamente efficace nel determinare l'influenza della topografia sulla distribuzione spaziale delle frane SHALSTAB, secondo Rosso, non è in grado di cogliere l'influenza dell'alta variabilità degli eventi di pioggia sulla stabilità dei pendii.

Il modello SHALSTAB, come discusso al paragrafo ad esso dedicato, prevede la discretizzazione del dominio di studio in celle elementari e combina il modello classico dell'equilibrio limite per la valutazione della stabilità dei versanti con un modello idrologico; il risultato è una mappa di precipitazioni critiche che rendono il versante instabile.

Lo studio di Montgomery e Dietrich prevedeva inoltre il solo stato stazionario cioè il comportamento limite del flusso idrico a regime, indipendente dal tempo. Ma si è osservato che l'effetto del transitorio è rilevante a meno che il sistema non si saturi immediatamente. Per cui l'elemento innovativo del modello è nel calcolo della precipitazione, sia in termini di durata che di intensità, necessaria per innescare il fenomeno.

Per spiegare il fenomeno gli autori suddividono il versante in una serie di elementi delimitati da vertici giacenti nei punti di intersezione fra curve di livello adiacenti con le linee di massima pendenza. L'insieme di elementi consecutivi posti fra 2 linee di massima pendenza adiacenti formano tra tubi di flusso.

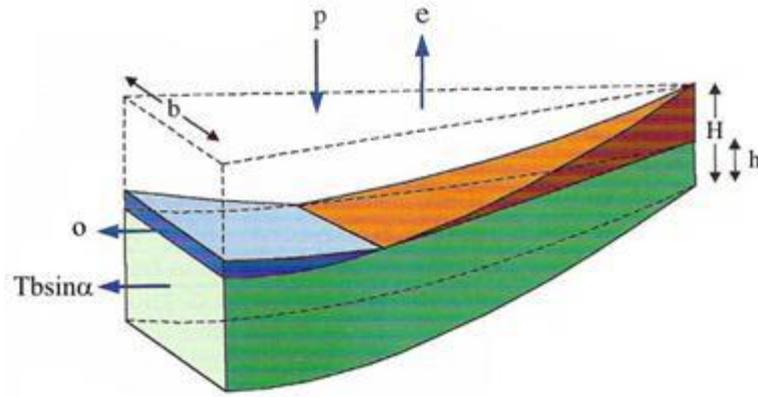


Figura 13 -Area di drenaggio elementare. (Rosso)

Indicando con  $p$  la pioggia netta (precipitazione decurtata dalle perdite per evapotraspirazione e per infiltrazione) e con  $a$  l'area contribuente (area di drenaggio cumulativa di tutti gli elementi che drenano nell'elemento considerato), sotto l'ipotesi di sforzi di volume nulli ( $e=\text{cost}$ ) e grado di saturazione al di sopra della falda costante ( $S_r=\text{cost}$ ), per il principio di conservazione della massa si ha:

$$ap - q = \frac{dS}{dt'} = a \cdot \frac{e}{1+e} (1 - S_r) \frac{dh}{dt'} \quad \text{per } h \leq z$$

e

$$ap - q - r = 0 \quad \text{per } h > z$$

Con:

- $t'$  = tempo dall'inizio della precipitazione;
- $S$  = acqua immagazzinata nell'elemento;
- $r$  = ruscellamento che si verifica quando il suolo è saturo ( $S_r = 1$ );
- $q$  = flusso uscente dalla porzione satura del terreno descritto dalla legge di Darcy:

$$q = (bh \cos \theta) \cdot K \tan \theta = bhK \sin \theta$$

In cui  $K$  è la conduttività del suolo saturo.

Combinando per sostituzioni le equazioni ed integrando si ottiene:

Per  $\frac{ap}{Tbsen\theta} > 1$  ( $p/p^* > 1$ ) si ha:

$$h = \begin{cases} \frac{p}{p^*} z \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{A_1} \frac{p^*}{z} t\right) \right] & \text{se } t \leq t^* \\ z & \text{se } t > t^* \end{cases}$$

e

$$t^* = -A_1 \frac{z}{p^*} \ln\left(1 - \frac{p^*}{p}\right)$$

Si può notare come il tempo caratteristico dipende da tre fattori:

- Fattore adimensionale del suolo  $A_t$ ;
- $z/p^*$  che tiene conto della geomorfologia e delle caratteristiche del suolo superficiale;
- $p/p^*$  che descrive il tasso di precipitazione rispetto al valore critico.

Si osserva che, per un dato versante con spessore del suolo, indice dei vuoti, grado di saturazione al di sopra della falda, trasmissività, area di drenaggio e tasso di precipitazione netta stabiliti, l'aumento del rapporto topografico  $a/b$  comporta un conseguente aumento della stabilità.

Ma il tasso di crescita  $h$  nel tempo è molto più alto per valori bassi di  $a/b$ . Da ciò ne deriva che elevati valori di  $a/b$  fanno sì che le precipitazioni facciano raggiungere rapidamente le condizioni di stabilità, mentre molto più tempo è necessario per aree elementari con bassi valori di  $a/b$ .

Introducendo l'indice dei vuoti  $\omega$  (relativo alla falda) ( $\omega = hz$ )

si ha:

$$\omega = \frac{p}{p^*} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{A_1} \xi\right) \right] \quad \text{per} \quad \frac{p}{p^*} \leq 1$$

e, per  $\frac{p}{p^*} > 1$ ,

$$\omega = \begin{cases} \frac{p}{p^*} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{A_1} \xi\right) \right] & \text{se } \xi \leq -A_1 \ln\left(1 - \frac{p^*}{p}\right) \\ 1 & \text{se } \xi > -A_1 \ln\left(1 - \frac{p^*}{p}\right) \end{cases}$$

$$\text{con } \xi = \left(\frac{p^*}{z}\right)t$$

Si può notare come l'effetto combinato del tasso di precipitazione e della durata sia importante ai fini della stabilità del versante.

Il modello sviluppato da Rosso et al. (2006) è inoltre in grado di descrivere l'effetto soglia che si ha quando il suolo raggiunge la piena saturazione ed ha inizio il ruscellamento superficiale.

L'approccio di Montgomery e Dietrich (1994), usato generalmente come metodo di riferimento, può quindi sovrastimare le condizioni di innesco dell'evento franoso, specialmente per eventi precipitativi di breve durata. Esse inoltre dipendono dalle condizioni di umidità iniziali e dall'indice topografico.

### **1.3.A.3 Modello Iverson (2000)**

Iverson (2000) analizza il processo di infiltrazione nel caso transitorio, considerando come dominio di calcolo un semispazio rappresentata da una porzione di materiale di profondità indefinita in cui la permeabilità sia costante con la profondità, ed individua due scale temporali caratteristiche del trasferimento della pressione dei pori e di conseguenza dei processi fisici che compromettono la stabilità dei versanti.

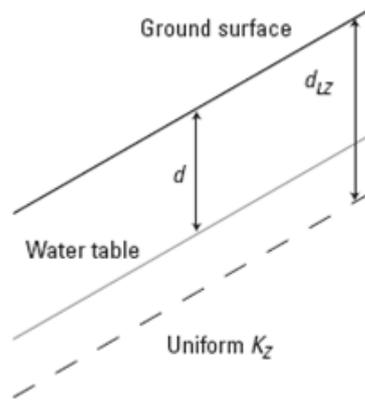


Figura 14-Dominio di calcolo: il materiale ha spessore indefinito e permeabilità costante con la profondità.

Nel suo lavoro Iverson descrive l'utilizzo dell'equazione completa di Richards, sulla quale apporta delle semplificazioni che comportano forme diverse a seconda dei tempi, nel lungo e nel breve termine.

A seconda delle due scale temporali individuate, egli utilizza differenti semplificazioni dell'equazione di Richards. Tale equazione descrive l'infiltrazione in un mezzo a saturazione variabile:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right)) \right] \quad (1)$$

Dove:

- $\psi$  è l'altezza piezometrica;
- $C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$  la capacità idrica;
- $z$  la coordinata lungo un asse perpendicolare al terreno;
- $K_z(\psi)$  la conducibilità nella direzione  $z$ .

Per suoli sufficientemente umidi da poter considerare  $K_z = K_{sat}$  e  $C(\psi) = C_0$  costanti, il termine dovuto alla gravità nella (1) può essere trascurato, dando luogo ad un'equazione di diffusione:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{K_{sat}}{C_0} \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (2)$$

Come condizioni iniziali, quindi stazionarie, Iverson (2000) suppone che vi sia moto uniforme nella falda dovuto ad un'infiltrazione costante  $(I_z)_{steady}$  che produce una

distribuzione lineare delle pressioni con pendenza  $\beta = \cos 2\alpha - (I_z / K_z)_{\text{steady}}$ ; la profondità della tavola d'acqua è  $dz$ .

È interessante notare come questa condizione iniziale coincida con il modulo idrologico a moto uniforme utilizzato nel modello SHALSTAB (Montgomery & Dietrich, 1994). La distribuzione delle pressioni è dunque, in condizioni stazionarie:

$$\psi(z, 0) = (z - d_z)\beta \quad (3)$$

Le condizioni stazionarie sono anche quelle che si ristabiliscono nel lungo termine, dopo che l'evento di pioggia è terminato, e che dipendono dalla topografia, dalla geologia e dal clima.

La scala temporale in questo caso è data dall'espressione  $t = A/D_0$ , in cui  $D_0$  è la massima diffusività idraulica del suolo in condizioni sature ed  $A$  è l'area contribuyente nel punto considerato. Il tempo  $A/D_0$  è quello minimo necessario perché si abbia una decisa variazione laterale nella trasmissione della pore pressure dall'area contribuyente  $A$  al punto  $P(x, y, z)$ .

Tempi maggiori di  $t = A/D_0$  sono necessari affinché si ristabiliscano le condizioni stazionarie successive all'evento meteo. Le condizioni di lungo termine, stazionarie, sono predisponenti ma non innescanti l'evento di frana.

Le condizioni di *breve termine*,  $T = Z_2/D_0$ , conseguenti ad un evento meteo intenso ma di breve durata, sono invece responsabili dei fenomeni di rottura nel versante a seguito di una trasmissione della pressione dei pori dalla superficie del suolo alla profondità  $Z$  durante e dopo l'evento di precipitazione. Comunemente questa scala temporale varia tra qualche minuto e qualche giorno, ed il processo dominante è il flusso verticale legato all'infiltrazione.

Le ipotesi che devono essere verificate per ottenere la soluzione di Iverson (2000) nel breve termine sono:

1) lo spessore del materiale mobilizzato ( $Z$ ) deve essere molto minore rispetto alla radice quadrata dell'area contribuyente  $A$ , quindi  $\varepsilon \ll 1$ ;

- 2) la durata  $T$  dell'evento innescante deve essere molto minore del tempo di risposta allo stazionario  $T \ll A/D_0$ .
- 3) la diffusività idraulica varia in modo trascurabile, quindi significa che i materiali analizzati sono sufficientemente umidi prima dell'inizio della precipitazione innescante.
- 4) la stabilità del pendio è calcolata attraverso il metodo del pendio infinito;
- 5) le forze resistenti dipendono dai parametri di Coulomb, angolo d'attrito interno  $\phi'$  e coesione  $c'$ .
- 6) è stata imposta la limitazione fisica per cui  $\psi$  non può eccedere quella che si raggiunge considerando la tavola d'acqua al piano campagna.

Nell'analisi a breve termine, Iverson distingue ulteriormente due condizioni: se il materiale è lontano dalle condizioni di saturazione, nell'equazione di Richards domina la parte convettiva e l'autore ricava le equazioni cinematiche che governano il modello di Green & Ampt (1911).

Se invece il materiale è saturo o quasi saturo, la componente diffusiva dell'equazione di Richards è quella predominante.

In particolare, per il comportamento nel transitorio di un materiale saturo, si individua una funzione di risposta, che, a partire da una condizione iniziale stazionaria, consente di determinare la distribuzione delle pressioni conseguente ad eventi meteorici di intensità variabile.

## Iverson 2000: descrizione modello

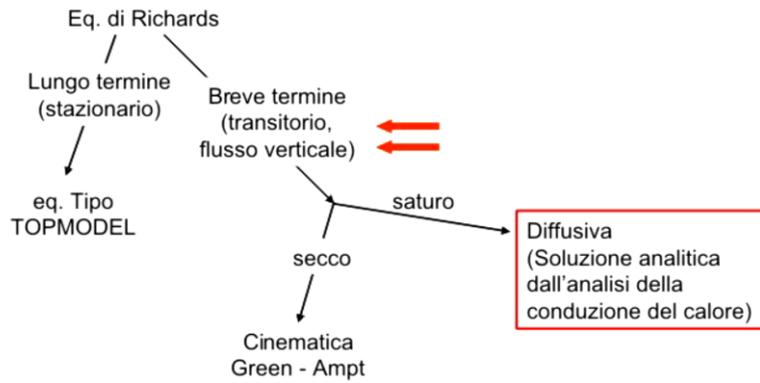


Figura 15-Rappresentazione schematica del lavoro di Iverson (2000). ("Contributo della modellistica idrologica all'analisi di suscettività alle frane `superficiali in argilla" Eros Leoni)

La stima si effettua attraverso un integrale di convoluzione, così come rappresentato nella Figura 16

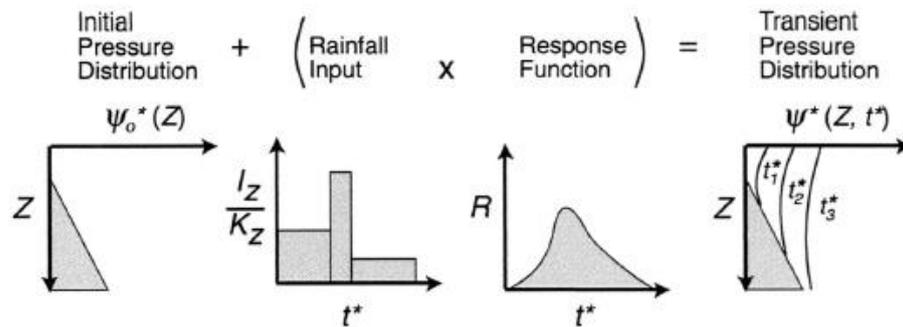


Figura 16- redistribuzione delle pressioni in un mezzo saturo a seguito di un evento di pioggia innescante partendo da una condizione stazionaria

Per ottenere la distribuzione nel tempo con la profondità della pressione dei pori, Iverson impone come condizione al contorno inferiore quella che, a grandi profondità, le variazioni transitorie di pressione si riducano a zero.

Il modello di Iverson è quindi un modello transitorio e, nel breve termine, suppone che il flusso sub-superficiale abbia direzione prevalentemente verticale. La condizione al contorno superiore, invece, non è altro che la legge di Darcy applicata alla superficie, tenendo conto sia dell'infiltrazione stazionaria ( $I_{steady}$ ), che dell'infiltrazione transitoria dovuta all'evento di pioggia considerato. Risulta che:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z}(\infty, t) = \beta, \quad \frac{\partial \psi}{\partial z}(0, t) = \begin{cases} -\frac{I_z}{K_z} + \beta & t \leq T \\ \beta & t > T \end{cases} \quad (4)$$

Da cui si ottiene:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z}(Z, t \leq T) = \beta \left(1 - d/Z\right) + \frac{I_z}{K_z} [R(t^*)] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z}(Z, t > T) = \beta \left(1 - d/Z\right) + \frac{I_z}{K_z} [R(t^*) - R(t^* - T^*)] \quad (6)$$

Dove:

$$t^* = \frac{t}{Z^2/D}$$

$$T^* = \frac{T}{Z^2/D}$$

$$R(t^*) = \sqrt{t^*/\pi} \exp(-1/t^*) - \operatorname{erfc}(1/\sqrt{t^*}) \quad (7)$$

- $R(t^*)$  è la risposta della PH che dipende solo dal tempo normalizzato (*Figura 16*), tale funzione proviene dalla soluzione della diffusione del calore;
- $\beta$  è una costante legata alla direzione del flusso sub-superficiale a lungo termine;
- $I_z$  corrisponde all'evento meteo innescante;
- $d$  è la profondità della tavola d'acqua misurata verticalmente verso il basso;
- $Z$  è la profondità a cui si misura la PH (misurata verticalmente verso il basso);
- $T$  è la durata dell'evento di precipitazione;
- $t$  è il tempo di analisi, ed infine
- $D = 4D_0 \cos^2 \delta$  è la diffusività effettiva del suolo.

Come si può notare da queste equazioni per ottenere la variazione di pressione dei pori alle differenti profondità  $Z$  e per tutti i tempi  $t^*$  basta conoscere la funzione di risposta  $R(t^*)$ , oltre alla distribuzione iniziale (stato stazionario) della pressione dei pori, all'intensità di precipitazione normalizzata  $I_z/K_z$  e alla durata di analisi  $T^*$ .

Il primo addendo delle Equazioni (5) e (6) rappresenta il profilo di pressione stazionaria, mentre il secondo la componente transitoria del modello.

### 1.3.A.4 TRIGRS (Baum et al. 2002)

TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Slope-stability, Baum et al. 2002), è un'ulteriore evoluzione dei modelli precedentemente descritti, che supera i limiti di molti modelli regionali, ovvero l'ipotesi di condizioni di moto stazionarie e falda parallela al piano di campagna.

Utilizza l'equazione di Richards per calcolare i carichi idraulici, e l'equazione del pendio indefinito per la valutazione della stabilità. Si avvale della formulazione di Iverson (2000), e ricostruisce l'andamento nel tempo alle diverse quote del fattore di sicurezza. Per la sua semplicità è stato usato anche per esaminare la relazione tra le caratteristiche pluviometriche e la suscettività a franare.

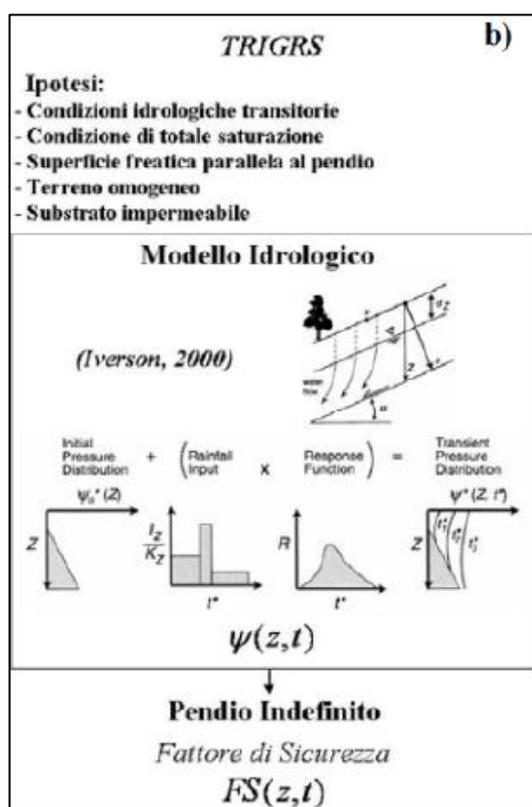


Figura 17-schema sintetico del modello TRIGRS da Sorbino et al., 2006

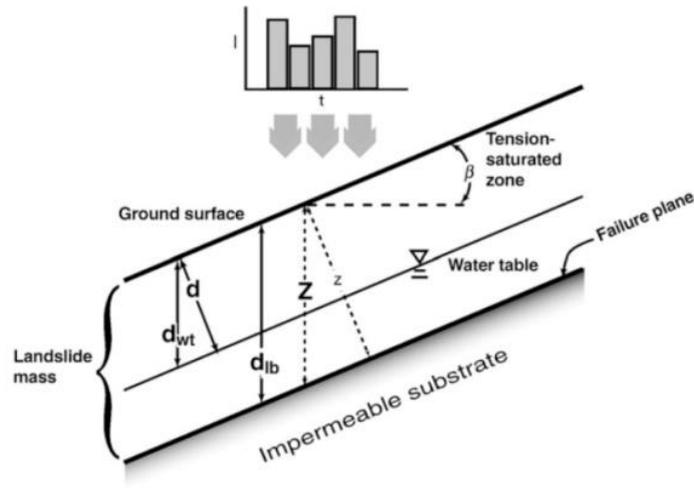


Figura 18-TRIGRS modello concettuale. Fonte: "Recommended procedure for validating landslide model 7th Framework Programme Safeland D2-8\_2011".

Il modello utilizza come parametri di input: intensità della precipitazione, pendenza, spessore della coltre, altezza dell'acqua iniziale, conducibilità idraulica verticale, diffusività idraulica, coesione, angolo di resistenza al taglio e peso di volume del suolo.

Questo permette di combinare modelli di infiltrazione, di flusso sub-superficiale e ruscellamento e di stabilità per valutare gli effetti di eventi meteorici critici su vaste aree.

Il modello di infiltrazione è basato sulla soluzione linearizzata di Iverson della equazione di Richards.

L'equazione che governa il flusso transitorio in un mezzo saturo o quasi saturo in cui il contenuto volumetrico d'acqua e il coefficiente di conducibilità idraulica sono costanti, deriva quindi dal modello di Iverson ma considerando un bedrock a profondità finita  $d_{LZ}$ :

$$\psi(Z, t) = [Z - d]\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_z} H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{1/2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{1/2}} \right] + \operatorname{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{1/2}} \right] \right\} - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_z} H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{1/2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{1/2}} \right] + \operatorname{ierfc} \left[ \frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{1/2}} \right] \right\}$$

→  $\psi$  è la pressure head;

- $t$  è il tempo;
- $Z$  è la coordinata verticale positiva verso il basso;  $Z=z\cos\alpha$ , dove  $z$  è la coordinata normale al versante ed  $\alpha$  è la pendenza.
- $DI=4D_0\cos^2\alpha$ , dove  $D_0=K_s/S_s$  è la diffusività idraulica satura,  $K_s$  è il coefficiente di conducibilità idraulica e  $S_s$  è il coefficiente di immagazzinamento specifico.
- $D$  è la profondità della tavola d'acqua stazionaria (misurata verticalmente);
- $\beta=\cos 2\alpha - (I_{ZLT}/K_s)$  è la pendenza della superficie di flusso stazionaria  $I_{ZLT}$ ;
- $I_{nz}$  è la superficie di flusso ad un dato intervallo di tempo;
- $N$  è il numero totale degli intervalli di calcolo (intervalli di tempo);
- $H(t - t_n)$  è l'Heaviside step function, dove  $t_n$  è il tempo nell' $n$ th intervallo di calcolo della sequenza di infiltrazione.

Vi è anche una successiva versione del modello TRIGRS 2.0(2008) che rappresenta il primo modello fisicamente basato che permette di calcolare l'infiltrazione anche in materiali non saturi.

Partendo dal modello idrologico di Iverson (2000), valido per un mezzo saturo o quasi saturo ed implementate le innovazioni proposte da TRIGRS 1.0, quindi la presenza di un bedrock a profondità finita, la coltre è riprodotta come sovrapposizione di due layers, uno inferiore, saturo, con una frangia capillare che si estende sopra alla tavola d'acqua, ed uno superiore, insaturo.

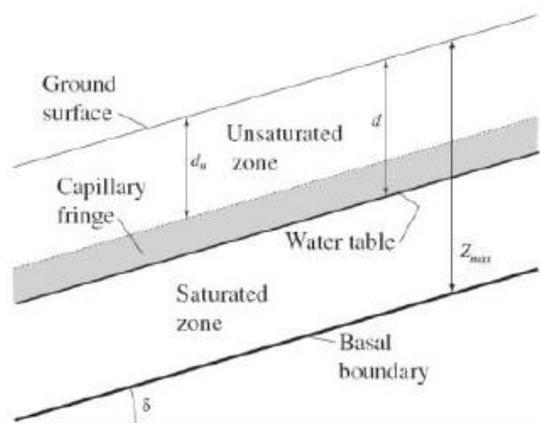


Figura 19-Dominio TRIGRS 2.0 Fonte: "Recommended procedure for validating landslide model 7th Framework Programme Safeland D2-8\_2011".

Il modello collega analiticamente la soluzione per l'infiltrazione verticale transitoria nell'insaturo con una soluzione per la propagazione di onde di pressione diffusiva in profondità nella zona satura.

La zona insatura assorbe parte dell'acqua che si infiltra attraverso la superficie del suolo a seguito di un evento di precipitazione; la restante parte la attraversa e si accumula alla sua base al di sopra della tavola d'acqua iniziale; la zona insatura esercita un'azione di filtro sulla propagazione del segnale di infiltrazione in profondità, smussando, attenuando e ritardando il fronte di infiltrazione stesso.

L'acqua che si infiltra attraverso la zona insatura crea una risalita della tavola d'acqua rispetto al suo livello iniziale; l'aumento di pressione dovuto all'incremento della tavola d'acqua crea un'onda di pressione diffusiva che si propaga verso il basso. Per coltri poco spesse, come nella maggior parte dei casi, le onde di pressione si propagano in profondità, al limite impermeabile, molto velocemente.

Una forma dell'equazione monodimensionale di Richards per spiegare la filtrazione verticale nell'insaturo è quella espressa da Freeze and Cherry, 1979, che, considerando le coordinate proposte da Iverson (2000) diventa:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[ K(\psi) \left( \frac{1}{\cos^2 \alpha} \frac{\partial \psi}{\partial Z} - 1 \right) \right]$$

Per linearizzare tale equazione, TRIGRS 2.0 usa il modello proposto da Gardner (1958) che descrive la dipendenza del coefficiente di conducibilità idraulica a saturazione e del contenuto volumetrico d'acqua dalla pressione dei pori.

La variazione della pressione dei pori nel tempo e con la profondità nella zona insatura è calcolata attraverso la:

$$\psi(Z, t) = \frac{\cos \delta}{\alpha_1} \ln \left[ \frac{K(Z, t)}{K_s} \right] + \psi_0$$

dove:

$\alpha_1 = \alpha \cos^2 \delta$  con  $\delta$  la pendenza del versante;

e  $K_s$  = coefficiente di conducibilità idraulica a saturazione, è ottenuto dall'espressione proposta da Gardner (1958):

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha \psi^*)$$

dove

$$\psi^* = \psi - \psi_0$$

La variazione di pressione dei pori con la profondità e il tempo si ottiene sostituendo  $K(Z, t)$  nell'equazione di  $\psi(Z, t)$ :

$$K(Z, t) = \sum_{n=1}^N H(t - t_n) \left\{ \begin{array}{l} I_{nZ} - [I_{nZ} - K_s \exp(\alpha_1 \psi_0)] \exp[-\alpha_1 (d_u - Z)] \\ -4(I_{nZ} - I_{ZLT}) \exp\left(\frac{\alpha_1 Z}{2}\right) \exp\left[-D_\psi \frac{(t - t_n)}{4}\right] \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin[\Lambda_m \alpha_1 (d_u - Z)] \sin(\Lambda_m \alpha_1 d_u)}{1 + \frac{\alpha_1 d_u}{2} + 2\Lambda_m^2 \alpha_1 d_u} \exp[-\Lambda_m^2 D_\psi (t - t_n)] \end{array} \right.$$

$$- \sum_{n=1}^N H(t - t_{n+1}) \left\{ \begin{array}{l} I_{nZ} - [I_{nZ} - K_s \exp(\alpha_1 \psi_0)] \exp[-\alpha_1 (d_u - Z)] \\ -4(I_{nZ} - I_{ZLT}) \exp\left(\frac{\alpha_1 Z}{2}\right) \exp\left[-D_\psi \frac{(t - t_{n+1})}{4}\right] \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin[\Lambda_m \alpha_1 (d_u - Z)] \sin(\Lambda_m \alpha_1 d_u)}{1 + \frac{\alpha_1 d_u}{2} + 2\Lambda_m^2 \alpha_1 d_u} \exp[-\Lambda_m^2 D_\psi (t - t_{n+1})] \end{array} \right.$$

Come detto in precedenza,

- $t$  è il tempo;
- $H(t - t_n)$  è l'Heaviside step function;
- $I_{nZ}$  è la superficie di flusso in un certo intervallo di tempo;
- $I_{ZLT}$  è la superficie di flusso stazionaria;
- $Z = z / \cos \delta$ ;
- $d_u$  è la profondità verticale del margine superiore della frangia capillare;
- $D_\psi = \frac{\alpha_1 K_0}{\theta_0 - \theta_r}$  è la diffusività idraulica del suolo proposta da Freeze & Cherry (1979);
- i valori di  $\Lambda_m$  sono le radici positive dell'equazione pseudoperiodica caratteristica  $\tan(\Lambda a_2 du) + 2\Lambda$  ottenuti attraverso i metodi proposti da Press et al. (1986).

La risalita della tavola d'acqua può avvenire quando l'acqua che si infiltra e raggiunge la tavola d'acqua eccede la quantità massima che può essere drenata per gravità al margine superiore della zona satura.

Le equazioni che governano la risalita della tavola d'acqua sono molto complesse, non-lineari e spesso non risolvibili analiticamente; tale problema è stato risolto usando metodi numerici (Freeze & Cherry, 1979; Huyakorn and Pinder, 1983).

In sostanza, per determinare la risalita della tavola d'acqua si confronta il flusso in eccesso (cioè quello non drenato per gravità) che si accumula in corrispondenza della tavola d'acqua iniziale (dove  $\psi = 0$ ) o al margine superiore della frangia capillare (dove  $\psi = -1/\alpha$ ) con il volume dei pori liberi direttamente sopra la tavola d'acqua o la base superiore della frangia capillare. Quindi si procede integrando il flusso in eccesso tra il tempo  $t = 0$  e qualsiasi tempo  $t$  di osservazione per ottenere il volume totale di acqua accumulatosi alla base della zona insatura. Il modello prevede anche una valutazione semplificata del flusso superficiale di runoff, qui non descritto perché di scarso interesse nel caso in esame.

### 1.3.A.5 SUSHI

Tra i modelli completi di tipo puntuale va ricordato il modello SUSHI (Saturated Unsaturated Simulation for Hillslope Instability, Capparelli, 2006), realizzato presso il Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria.

#### Requisiti del modello

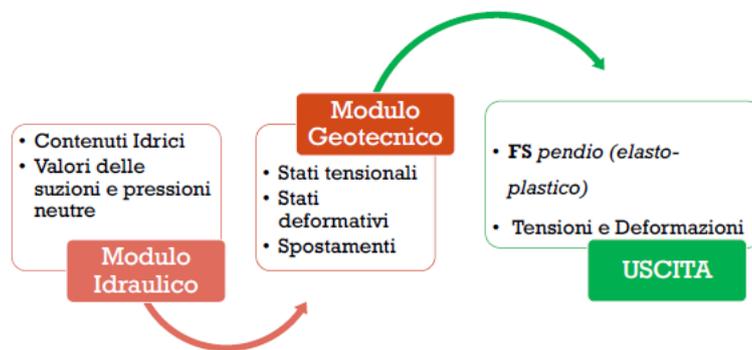
- capacità di simulare il flusso idrico sotterraneo nel caso di **totale e parziale saturazione**
- capacità di analizzare il fenomeno nel **transitorio**
- applicabilità al caso di **terreni fortemente eterogenei**
- applicabilità al caso di **dominio irregolare**
- applicabilità al caso di **condizioni al contorno** variabili nello spazio e nel tempo



Figura 20-Schema dei requisiti del modello SUSHI. (seminario: Sistemi e metodi per il preannuncio dei distacchi di versante. Versace)

Il modello SUSHI è un modello completo di versante e come tale si inseriscono in esso numerose componenti come condizioni specifiche del sito in analisi, le proprietà meccaniche del suolo, le componenti idrauliche e fisiche del suolo oltre che le condizioni di infiltrazione locale e il loro contributo alla resistenza del terreno.

Come detto i modelli completi di versante possono aiutare la comprensione dei meccanismi di innesco dato che riproducono il comportamento fisico dei processi coinvolti a scala di versante utilizzando tutte le possibili informazioni idrologiche, idrauliche e geotecniche dettagliate (Montgomery e Dietrich, 1994; Wu e Sidle, 1995; Rigon et al, 2006).



### General Framework

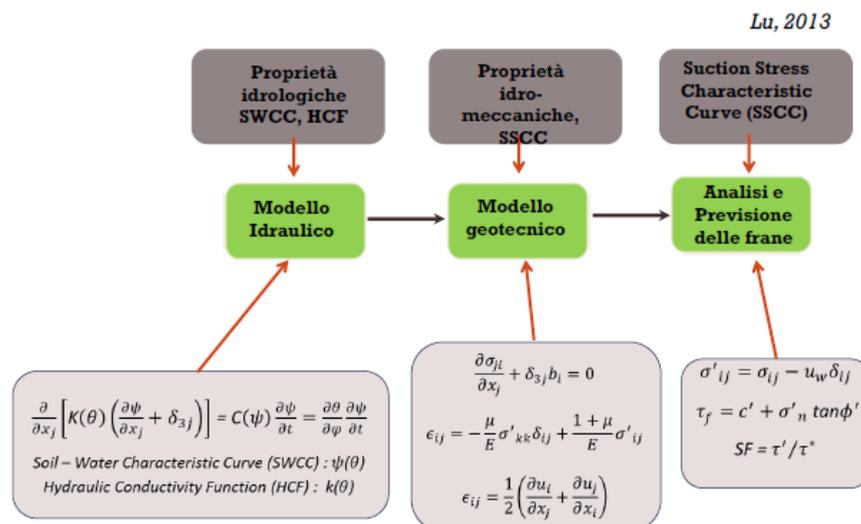


Figura 21- Schema semplificato delle componenti del modello. (seminario: Sistemi e metodi per il preannuncio dei distacchi di versante. Versace)

Il modello ha lo scopo di:

- Formulare una probabile interpretazione del meccanismo di innesco delle colate di fango, evidenziando i principali fattori innescanti l'instabilità;
- Studiare la dinamica dell'infiltrazione;
- Verificare la capacità del modello stesso di analizzare un caso reale caratterizzato da eterogeneità spaziale molto marcata.

Il modello in questione prevede due componenti una che analizza il meccanismo idraulico, HydroSUSHI, e una la componente geotecnica GeoSUSHI.

Il modello idraulico è utile per analizzare, come in altri modelli completi,) la circolazione di acqua dovuta all'infiltrazione in zone sature e insature in condizioni non stazionarie considerando la circolazione di acqua in un dominio bidimensionale definito da stratigrafie del terreno irregolari e con differenti caratteristiche idrogeologiche. Come si comprende la complessità del modello consiste nella possibilità di inserirvi all'interno numerose variabili. Anche in questo modello come in GEOtop viene considerata fondamentale l'influenza dell'evapotraspirazione sul bilancio idrico, della traspirazione effettiva e il ruolo della vegetazione sia in merito alla stabilità che al ciclo idrologico. L'intero processo è modellato tramite FDM (metodi alle differenze finite) che risolve le equazioni di Richards. Viene riportato di seguito un esempio di implementazione delle equazioni riferite ad un singolo nodo

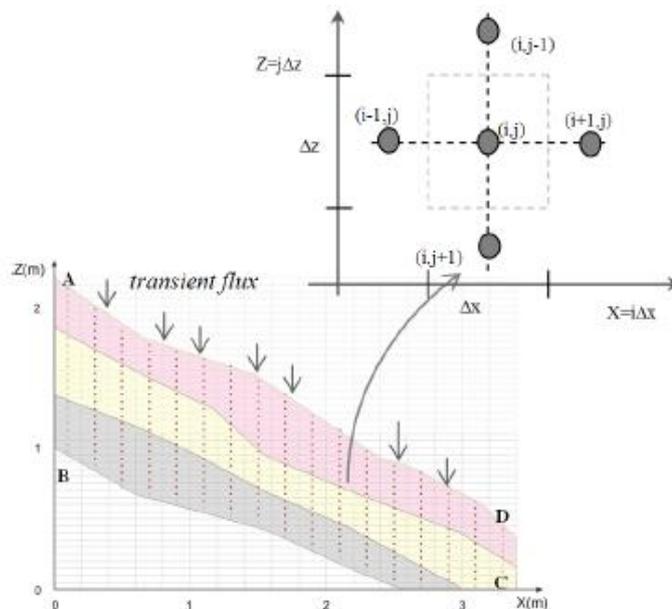


Figura 22-Rete nodale implementata per lo sviluppo di FDM. (G. Capparelli and P. Versace: Analysis of landslide triggering conditions in Sarno area)

La seconda componente, GeoSUSHI, riguarda la stabilità del pendio che prevede, al solito, l'approssimazione di pendio indefinito con utilizzo dell'equilibrio limite esteso ai terreni insaturi (Fredlund and Rahardjo 1993). Utilizza come parametri del terreno la coesione e l'angolo d'attrito ricavabili, dove possibile, da prove in situ e di laboratorio. Il metodo è applicabile a stratigrafie irregolari ed eterogenee.

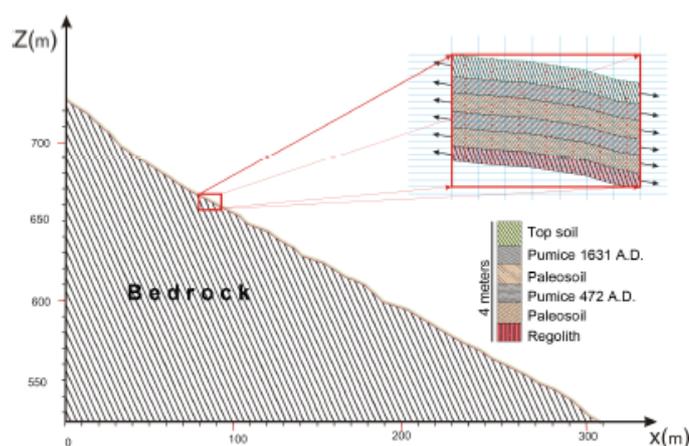


Figura 23-Esempio di caratterizzazione geometrica e stratigrafica del pendio. (G. Capparelli and P. Versace: Analysis of landslide triggering conditions in Sarno area)

L'analisi con SUSHI ha portato a comprendere l'ampia possibilità di avvicinarsi a un'interpretazione di evento franoso complesso tramite l'impiego di modelli fisici con grande accuratezza dei risultati. Ha permesso inoltre di simulare fenomeni indotti da precipitazioni in terreni con complesse stratigrafie e proprietà idrauliche anche senza l'inserimento di eccessive forzanti idrauliche con simulazioni numeriche, anche lunghe, ma tali da permettere una analisi e previsione degli eventi franosi.

### 1.3.A.6 GEOTop

GEOTop è un modello idrologico tridimensionale, fisicamente basato, spazialmente distribuito, alle differenze finite che esegue il bilancio energetico e di massa d'acqua. Questo modello si presenta come un sistema modellistico finalizzato all'individuazione delle zone suscettibili al franamento superficiale. Il sistema è costituito da un modello idrologico completo per la risoluzione delle equazioni di Richards, un GIS per la gestione dei processi d'input/output e un modulo per il calcolo del fattore di sicurezza basato sull'ipotesi di pendio indefinito.

GEOtop combina un modello idrologico tridimensionale, ed un modello geotecnico con il pendio indefinito. È un modello distribuito del ciclo idrologico ed è principalmente adatto alla modellazione dei bacini montani ed è associato quindi anche a un modello di calcolo per la determinazione della stabilità.

GEOtop modella il contenuto idrico dei terreni in 3D risolvendo numericamente l'equazione di Richards. Il fattore di sicurezza è stimato con un approccio probabilistico, assegnando una distribuzione di probabilità ai parametri che descrivono le caratteristiche del suolo.

Differentemente dai modelli di flusso sotterraneo usati ad esempio SHALSTAB o quelli derivati dagli studi di Sidle and Wu, che ipotizzano un flusso parallelo al pendio e considerano la distribuzione di pressioni interstiziali esclusivamente idrostatiche, GEOtop considera anche i processi transitori di redistribuzione di tali pressioni indotte nel terreno a seguito dell'infiltrazione nel suolo. Ciò ha un riscontro sul fattore di sicurezza che varia nel tempo a seconda delle condizioni di umidità del terreno. In realtà è stato evidenziato che i modelli precedenti fossero tutti rivolti all'identificazione delle zone soggette a dissesto piuttosto che alla determinazione degli eventi critici e dello studio della loro dinamica e, la validità di questi modelli, supportata da indagini sperimentali soprattutto per alcuni eventi in Italia, ha portato ad individuare una connessione tra i flussi sub superficiali in condizioni quasi stazionarie a la determinazione delle zone instabili.

I versanti e i pendii subiscono frequenti modifiche a causa di continui movimenti delle porzioni di suolo. GEOtop-SF lavora su una griglia di celle; ogni cella rappresenta la superficie di una colonna di terreno sottostante suddivisa in strati. Tale colonna è costruita con lo scopo di riprodurre la topografia, la stratigrafia e la variabilità verticale delle proprietà del suolo. Lo spessore e il numero di strati sono definiti dall'utente: nonostante il fatto che essi coincidano con la sequenza orizzontale fissata per GEOtop, non vengono imposti a priori né uno spessore, né una direzione preferenziale di scivolamento.

Anche la vegetazione ha un ruolo importante nella modellazione.

Uno strato superficiale permette di considerare gli apparati radicali della vegetazione e il loro contributo alla coesione del suolo. Questi due fattori agiscono in maniera

opposta in quanto mentre il primo apporta un contributo a favore della stabilità, il secondo agisce a sfavore di essa. Inoltre GEOtop-SF permette di considerare la variabilità orizzontale del tipo di suolo, delle sue proprietà e della copertura vegetale.

In merito al collegamento tra fenomeno franoso e una poco attenta gestione del patrimonio forestale ci sono alcuni studi che hanno messo in evidenza come la copertura vegetale sia una garanzia per la sicurezza.

Nel caso di presenza di copertura vegetale, il modello usa la formulazione di stabilità del pendio infinito come:

$$F = \frac{[2(c'+\Delta c)/\gamma_w Z \sin 2\alpha] + [(L - M)(\tan \phi' / \tan \alpha)]}{L}$$

dove M è l'altezza verticale del piano della falda sopra il piano di slittamento espressa come frazione di spessore di suolo.

L è un parametro espresso in funzione del peso del suolo e degli alberi:

$$L = \frac{q_0}{\gamma_w Z} + \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} (M) + \frac{\gamma_m}{\gamma_w} (1 - M)$$

Analisi geotecniche e geofisiche in sito possono fornire importanti informazioni sulla morfologia del substrato, sulla litologia e stratigrafia. Analisi geotecniche di laboratorio su campioni prelevati in sito permettono una accurata caratterizzazione del suolo e dunque una simulazione più affidabile del comportamento del terreno.

L'approccio probabilistico al calcolo del fattore di sicurezza è motivato dall'incertezza sui parametri aventi un ruolo determinante nei processi di innesco. Un approccio di tipo deterministico produrrebbe una soglia di innesco poco affidabile poiché calcolata assegnando ai parametri valori singoli che non tengono conto della loro grande variabilità spaziale. Pertanto ogni parametro viene considerato come variabile aleatoria cui sono associati una media e una varianza stimati dai dati disponibili.

Quindi i file in input nel programma sono:

- I parametri geotecnici

- La durata della simulazione idrologica;
- La geologia del suolo;
- Il volume dei vuoti del suolo per ogni cella del bacino;
- Le pendenze del bacino ricavate dal DEM;
- Il contenuto di umidità finale del bacino;
- La coesione indotta dalla copertura vegetale;
- Peso della copertura vegetale;
- Contenuto di d'acqua nel suolo nella zona satura, insatura e superficiale.

Il programma utilizza i dati di output temporale di GEOTOP e legge il contenuto d'acqua nelle tre zone di ogni cella (satura, insatura e superficiale), e calcola il peso specifico del suolo. In seguito controlla la stabilità rispettivamente con il metodo del pendio infinito (anche in presenza di vegetazione) e con l'innescò delle colate detritiche.

Tramite il modello GEOTOP si simula il bilancio idrologico nel bacino interessato dall'analisi e si generano infine una serie di output riguardanti il contenuto d'acqua in superficie; il contenuto d'acqua nel suolo (identificando sia un volume saturo che uno insaturo); i flussi relativi tra i vari comparti, modellando anche l'evaporazione e la traspirazione ad ogni cella. Poi il modello *SF* utilizza questi dati in input insieme con la caratterizzazione geologica e geotecnica del suolo ed esegue una verifica della stabilità ad ogni passo temporale e per ogni cella costituente il bacino.

Di seguito si riporta una pagina riepilogativa dei modelli descritti sopra.



**VANTAGGI:**

- modello semplice

**SVANTAGGI:**

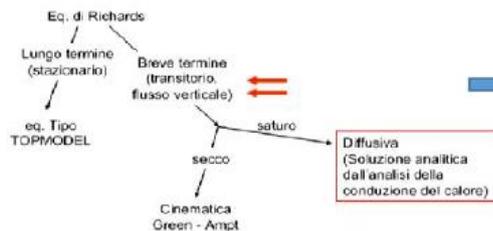
- non considera il transitorio

**Modello Rosso**

**VANTAGGI:**

- Tiene conto del tasso di precipitazione critica e della durata dell'evento
- Considera rilevante l'effetto del transitorio

**Iverson 2000: descrizione modello**

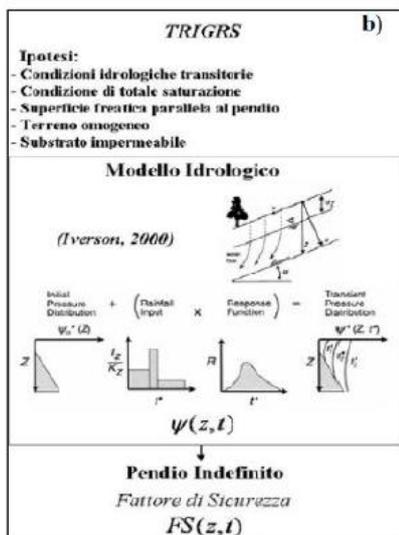


**VANTAGGI:**

- Fondamentale la variabile tempo (stazionario nel breve termine e transitorio nel lungo termine)

**SVANTAGGI:**

- Maggior numero di variabili e condizioni



**VANTAGGI:**

- Supera l'ipotesi di moto stazionario e di falda parallela al p.c.
- Semplice come modello
- Combina modello di infiltrazione, flusso sub-superficiale e ruscellamento con la stabilità di versante

**SVANTAGGI:**

- Maggior numero di variabili e condizioni

**GEOTop**

**VANTAGGI:**

- Modello idrologico tridimensionale e modello geotecnico del pendio indefinito
- Approccio probabilistico del FS
- Permette di considerare la variabilità del tipo di suolo, delle sue proprietà e della copertura vegetale

**SVANTAGGI:**

- Complesso per la numerosità dei parametri in input

**SUSHI**

**Requisiti del modello**

- capacità di simulare il flusso idrico sotterraneo nel caso di totale e parziale saturazione
- capacità di analizzare il fenomeno nel transitorio
- applicabilità al caso di terreni fortemente eterogenei
- applicabilità al caso di dominio irregolare
- applicabilità al caso di condizioni al contorno variabili nello spazio e nel tempo



**VANTAGGI:**

- Gestisce due componenti (una geotecnica e una idraulica)
- Capacità di analizzare anche un fenomeno franoso complesso
- Permette di considerare la variabilità del tipo di suolo, delle sue proprietà e della copertura vegetale

**SVANTAGGI:**

- Complesso per la numerosità dei parametri in input

## **B. Modelli meccanici per l'analisi numerica a scala di versante: differenze finite ed elementi finiti**

Per lo svolgimento delle analisi progettuali è necessario far riferimento a modelli geotecnici e idrologici di sottosuolo e a leggi di comprovata validità, tramite l'impiego di metodi e procedimenti di calcolo adeguati alla complessità del sistema. I fenomeni naturali e le attività umane generano forze, variabili nel tempo, su strutture semplici o complesse. La costruzione di un modello che rappresenti la realtà è di fondamentale importanza. Al modello devono essere associate tutte le caratteristiche con le quali esso possa diventare una rappresentazione semplificata della realtà ma soprattutto realistica. Quindi a qualsiasi tipo di struttura, che sia simulata con un modello, sono applicati carichi anche dinamici che comportano un'ulteriore variabile che è quella tempo. La struttura ha una sua resistenza allo spostamento cosa che implica il considerare forze che sono funzioni dello spostamento stesso e della velocità.

Di conseguenza, le equazioni che governano il moto del sistema sono generalmente equazioni differenziali alle derivate parziali (generalmente non-lineari), ovvero PDEs (Partial Differential Equations) che sono eccessivamente difficili da risolvere dal punto di vista matematico.

Per rendere il problema più semplice da svolgere matematicamente si introducono delle ipotesi su un modello più semplice e semplificato capace comunque di fornire delle soluzioni sufficientemente approssimate e risultati soddisfacenti dal punto di vista ingegneristico (sicurezza e costi). Il legame tra il sistema reale e la soluzione matematica è fornito quindi dal modello matematico del sistema idealizzato, che include tutte le ipotesi ritenute rilevanti per il sistema reale.

I primi tipi di questi modelli hanno preso forma negli anni '70 e si sono poi evoluti nel tempo avvicinandosi sempre di più a modelli complessi che potessero rispecchiare la realtà, in gradi di rappresentare, con un'adeguata precisione, la geometria di un sistema tenendo conto del loro comportamento meccanico (tenso-deformativo). I primi modelli elaboravano su singole celle a cui erano applicate le equazioni di bilancio di massa con tempistiche anche lunghe di elaborazioni per poi arrivare a modelli capaci di lavorare su un numero elevato di celle e svolgere calcoli in tempi relativamente brevi

È possibile classificare i metodi numerici in due grandi gruppi: i metodi al continuo ed i metodi discontinui.

### **1.3.B.1 Metodi al continuo (FDM, FEM)**

Nella meccanica del continuo il problema si svolge discretizzando il sistema in semplici elementi, unità elementari come triangoli, quadrilateri e/o tetraedri in contatto fra di loro tramite nodi.

Un metodo del continuo considera il dominio un unicum con le stesse caratteristiche in tutte le direzioni per quanto riguarda la resistenza e la deformabilità. Differentemente un metodo del discontinuo tiene conto delle discontinuità naturali del materiale, definendo anche alle loro proprietà (giacitura, spaziatura, apertura ecc.)

#### 1.3.B.1.1 FDM

FDM sigla che sta ad indicare “Finite Difference Method” e cioè “Metodo delle differenze finite”, metodo che si basa sull’approssimazione diretta delle equazioni differenziali parziali (PDEs) ottenuta sostituendo alle derivate parziali delle differenze definite sul dominio del problema (Jing, 2003). Si tratta quindi di approssimare un continuo in una serie di punti discreti. Si giunge alla soluzione del sistema imponendo condizioni iniziali e al contorno.

Esso approssima le derivate prime presenti nell’equazione differenziale alle derivate parziali come quoziente di differenze: la differenza tra i valori delle variabili nei nodi adiacenti, sia nello spazio che nel tempo, diviso l’intervallo tra questi nodi.

$$\frac{df}{dx} = \frac{f_2 - f_1}{\Delta x}$$

FDM usa un approccio implicito, ciò denota una dipendenza marcata dalla variabile temporale. Le variabili del problema dipendono dal tempo, tra cui gli spostamenti e nelle equazioni di equilibrio stesse vi è l’aggiunta di velocità associate allo smorzamento e di accelerazioni alla massa.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F\}$$

Quindi, assunto uno step temporale e presa una variabile come costante in ciascun intervallo temporale, per prima cosa si usano le equazioni del moto per derivare le nuove velocità e spostamenti da tensioni e forze, e poi successivamente, usando le equazioni costitutive, si derivano le nuove tensioni e forze per le velocità e spostamenti già ottenuti.



Figura 24-schema operativo del metodo alle differenze finite.

Nella letteratura sono numerosi i testi che descrivono nel dettaglio questo metodo da cui ricavare ulteriori approfondimenti sul metodo. Il FDM utilizza generalmente griglie regolari come mostra la Figura 25

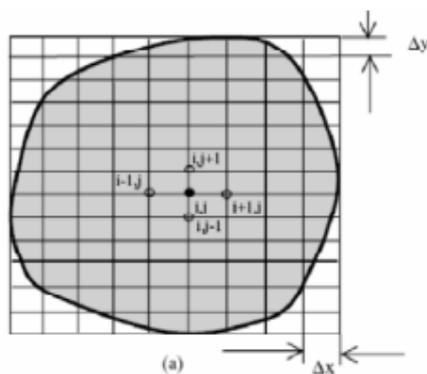


Figura 25- Griglia FDM

Nel caso di uno schema FDM a più nodi le equazioni risultanti nei nodi della griglia  $(i, j)$  saranno espresse come combinazione dei valori della funzione nei nodi adiacenti. Applicando il teorema di Navier al punto generico  $(i, j)$  si ottiene:

$$u_x^{i,j} = a_1 \cdot u_x^{i-1,j} + a_2 \cdot u_x^{i,j-1} + a_3 \cdot u_x^{i,j+1} + a_4 \cdot u_x^{i+1,j} + a_5 \cdot u_x^{i+1,j+1} + a_6 \cdot F_x^{i,j}$$

$$u_y^{i,j} = b_1 \cdot u_y^{i-1,j} + b_2 \cdot u_y^{i,j-1} + b_3 \cdot u_y^{i,j+1} + b_4 \cdot u_y^{i+1,j} + b_5 \cdot u_y^{i+1,j+1} + b_6 \cdot F_y^{i,j}$$

Dove:

- $a_k$  e  $b_k$  ( $k=1, 2, \dots$ ) sono funzione degli intervalli;
- $\Delta_x$  e  $\Delta_y$  della griglia e delle proprietà elastiche del solido;
- $F_x^{i,j}$  e  $F_y^{i,j}$ , sono le forze in direzione x e y applicate nel punto (i, j).

L'insieme di tali equazioni valutate in tutti i punti della mesh produrrà un sistema la cui soluzione può essere ottenuta per mezzo di metodi diretti o iterativi.

Il concetto di base quindi su cui si fonda il Metodo delle Differenze Finite (FDM) è la discretizzazione diretta delle PDEs che governano il problema mediante la sostituzione delle derivate parziali con differenze definite sul contorno dei punti della griglia. In particolare per approssimare le PDEs nell'intorno dei punti campionati non si utilizzano funzioni di interpolazione (come invece accade nel FEM e nel BEM), poiché la configurazione della mesh adottata è tale da generare valori della funzione obiettivo nei punti rappresentativi con intervalli tanto piccoli da rendere gli errori così introdotti non significativi. Per questo motivo il metodo FDM è la tecnica più diretta ed intuitiva per la soluzione delle PDEs (Jing, 2003).

Essendo basato su una griglia regolare, il FDM risulta generalmente poco adatto alla modellazione di problemi complessi di meccanica delle terre e delle rocce, in quanto fatica a tenere conto di condizioni al contorno particolari e della non omogeneità del materiale.

Da un altro punto di vista il FDM è un modello concettualmente e matematicamente più semplice del FEM, ed è anche più facile da tradurre in codice numerico ma il FEM, permette una griglia più flessibile, che può approssimare di più le eterogeneità ed anisotropie anche dell'acquifero e dei suoi limiti.

### 1.3.B.1.2 FEM

L'acronimo FEM sta ad indicare "Finite Element Method" ovvero "Metodo degli Elementi Finiti".

Il Metodo degli Elementi Finiti, proposto per la prima volta da Clough nel 1960, è uno dei procedimenti numerici più popolari nelle scienze ingegneristiche. Il concetto di base su cui si fonda è la schematizzazione di una struttura continua come un insieme di regioni di volume finito e forma semplice, che non si compenetrano, connesse tra loro in un numero finito di punti detti nodi.

Si tratta di una tecnica numerica che richiede la discretizzazione ovvero la suddivisione del dominio del problema in sottodomini (elementi) di forma semplice e regolare (triangoli, quadrati, tetraedri, ...), caratterizzati da un numero fissato di nodi ed ha lo scopo di cercare soluzioni approssimate di problemi meccanici complessi attraverso la risoluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali le quali vengono ridotte ad un sistema di semplici equazioni algebriche. Le equazioni differenziali in questione sono generalmente caratterizzate da un dominio di forma complessa, o variabile; le soluzioni di tali equazioni differenziali non sono omogenee sul dominio o addirittura mancano di regolarità, esse si conseguono imponendo le condizioni iniziali e quelle al contorno.

Si ipotizza inoltre che gli spostamenti di un punto interno ad un elemento siano funzioni degli spostamenti nodali tramite opportune funzioni del punto dette funzioni di spostamento. Il problema elastico del continuo considerato, la cui esatta formulazione conduce a sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali definiti da opportune condizioni al contorno, viene così discretizzato e ricondotto in via approssimata alla soluzione di un sistema di equazioni lineari (Cesari, 2002).

Il FEM è oggi il metodo numerico maggiormente impiegato nell'ingegneria per la sua flessibilità nel trattare l'eterogeneità e la non linearità dei materiali e la complessità delle condizioni al contorno (Cesari, 2002). A causa della discretizzazione interna, l'efficienza del FEM e del FDM diminuisce all'aumentare del numero dei gradi di libertà che è in genere proporzionale a quello dei nodi (Jing, 2003).

Tale metodo è utilizzato nel software di stabilità dei pendii all'equilibrio limite SLIDE/2D della ROCSCIENCE, nel modulo specifico groundwater, utilizzato per analizzare il problema della filtrazione nel caso in esame (poi spiegato nel capitolo in Appendice).

Per compiere un'analisi FEM sono necessari tre passaggi fondamentali:

→ **La discretizzazione del dominio:** dopo aver individuato la geometria del modello e la sua estensione si suddivide il dominio in un numero finito di elementi tra loro contigui, di forma regolare (triangoli, quadrilateri, ...), definiti da un numero fissato di nodi (Figura 26) chiamata mesh.

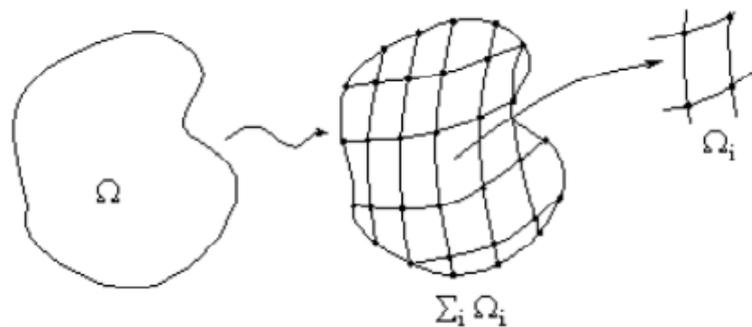


Figura 26- Divisione del dominio in sottodomini FEM

→ **Scelta della variabile primaria:** usualmente si sceglie come variabile lo spostamento ipotizzandola quindi come funzione incognita e  $u_i$  può essere approssimata per ciascun elemento mediante una funzione nodale  $u_{ji}$  che, dovendo soddisfare le PDEs, assume la forma:

$$u_i^e = \sum_{j=1}^M N_{ij} \cdot u_i^j$$

i termini  $N_{ij}$  sono chiamate funzioni forma (o funzioni di interpolazione) ed  $M$  è il numero degli elementi. In questo modo è possibile legare gli spostamenti generici all'interno di un elemento a quelli nodali. Le funzioni di forma rappresentano il polinomio che approssima il valore esatto degli spostamenti e quindi determinano la convergenza del metodo. Si scrivono quindi prima le equazioni per ogni singolo elemento e poi queste si combinano nella forma globale.

→ **L'assemblaggio e la soluzione dell'equazione matriciale globale:** usando le funzioni forma, le PDEs del problema sono sostituite da un sistema di equazioni algebriche che assumono la seguente forma:

$$\sum_{i=1}^N [K_{ij}^e] \cdot \{u_i^e\} = \sum_{i=1}^N (f_i^e) \quad \text{oppure} \quad [K] \cdot \{u\} = \{F\}$$

Dove:

$[K_{ij}^e]$  è la matrice di rigidezza a bande e simmetrica;

$u_i^e$  è il vettore dei valori nodali della variabile incognita, ad esempio lo spostamento;

$\{f_i^e\}$  è il vettore che contiene le forze interne all'elemento, che tiene conto delle condizioni iniziali e di quelle al contorno.

Da questo assemblaggio di equazioni si giunge alla soluzione ottenendo quindi gli spostamenti ai nodi e derivando tensioni e deformazioni. La vasta diffusione del FEM, confermata dall'ampia disponibilità di software di calcolo in commercio, è in gran parte legata alla sua adattabilità nel tener conto della disomogeneità e anisotropia dei materiali, di complesse condizioni al contorno e di problemi dinamici.

La precisione ottenuta dipende principalmente dalla dimensione dell'intervallo di suddivisione utilizzato per la mesh: la riduzione che si ottiene sull'errore compiuto è proporzionale alla distanza reciproca tra i nodi della griglia, in quanto più ravvicinati sono i nodi migliore è la significatività dei risultati. Per questo motivo, per geometrie complesse si ricorre generalmente a mesh raffittite con passo non costante, che aumenta nelle zone di maggiore interesse (Cesari, 2002).

Lo svantaggio principale di questa tecnica numerica rimane la scarsa capacità di rappresentare il comportamento tenso-deformativo di sistemi soggetti a rottura in quanto, essendo un metodo al continuo, non ammette la separazione reciproca tra gli elementi infinitesimi.

## 2 CASI CONCRETI E SCELTA DELL'APPROCCIO: UNA PROBLEMATICA SPECIFICA

### 2.1 FENOMENI RELATIVI AD UN CASO DI DISTACCHI MULTIPLI: SARNO 5 MAGGIO 1998

Il 5 e il 6 maggio 1998 alcuni comuni delle province di Salerno, Avellino e Caserta vennero colpiti da numerose colate rapide di fango, causate da piogge persistenti che da giorni stavano interessando l'Appennino campano, ed in particolare la zona del Pizzo d'Alvano.

Dall'analisi dei dati (le misure di pioggia registrate dal pluviometro di Lauro, che per la sua vicinanza è da considerarsi tra i più rappresentativi) si osserva che nelle 48 ore tra il 4 e 5 maggio, ovvero immediatamente prima e durante l'evento franoso, si misurarono 173 mm di pioggia.

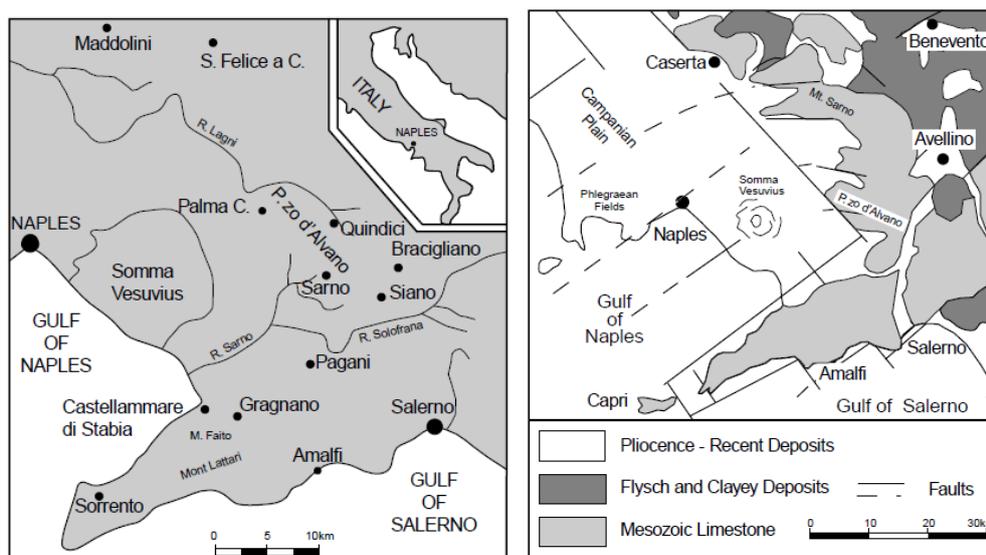


Figura 27-Localizzazione geografica e mappa semplificata della geologia. (Guadagno, Del Prete)

Più nel dettaglio l'analisi oraria rivela che nelle prime ore del 4 maggio si ebbero piogge deboli e che, dopo una pausa di 11 ore, le precipitazioni ripresero ininterrottamente fino alle prime ore del mattino del giorno 6. Nei sei giorni precedenti, dal 28 aprile al 3 maggio, il pluviometro aveva registrato una cumulata di 61,4 mm.

Pertanto si trattò di piogge non particolarmente intense ma persistenti, dato che si protrassero per nove giorni consecutivi.



*Figura 28-Sarno. Panoramica relativa all'evento. (seminario: Sistemi e metodi per il preannuncio dei distacchi di versante. Versace)*

In poche ore, dalle 14:00 del giorno 5 alle prime ore del 6 maggio, più di 2 milioni di metri cubi di materiale si riversarono sui centri abitati nel territorio di Sarno, Siano e Bracigliano in provincia di Salerno, Quindici in provincia di Avellino e San Felice a Cancellò in provincia di Caserta.

In quei giorni, nell'arco di circa 18 ore dalle 14 del giorno 5 alle 6 del giorno 6 si ebbero oltre 140 movimenti franosi che originarono circa 40 colate di fango. Le case distrutte furono 178 e oltre 450 quelle danneggiate. Complessivamente persero la vita 159 persone, la frazione Episcopio (Sarno) fu l'area maggiormente colpita. Molte di queste persone rimasero intrappolate nelle proprie case, schiacciate o soffocate dal

fango e dai detriti. Altri tentarono la fuga per strada e vennero raggiunti dalle colate e travolti.

Le prime avvisaglie dell'incombente tragedia si ebbero sul versante Nord-Est del Pizzo d'Alvano, nella zona di Quindici, dove nel primo pomeriggio, si staccò una frana che arrivò a sfiorare le case.

Nelle ore successive diverse colate di fango e detriti raggiunsero il centro cittadino e le zone più a valle, invadendo le strade, devastando case ed edifici. Contemporaneamente, dal versante opposto si staccarono altre colate che raggiunsero Siano, Bracigliano e, soprattutto, Sarno. Intorno alle ore 20 altre frane investirono le frazioni San Vito ed Episcopio.

I fenomeni franosi che si sono verificati durante questo evento hanno caratteristiche che li rendono unici in Italia e rari nel mondo. Si tratta infatti di frane complesse che coinvolgono coltri piroclastiche.

Tali coltri, che nelle aree in questione possono raggiungere i 6 metri di spessore, sono costituite da alternanze di ceneri e pomici, derivanti dalle principali fasi eruttive del sistema vulcanico Somma-Vesuvio, e che rappresentano la parte più fine e leggera dei prodotti da caduta.

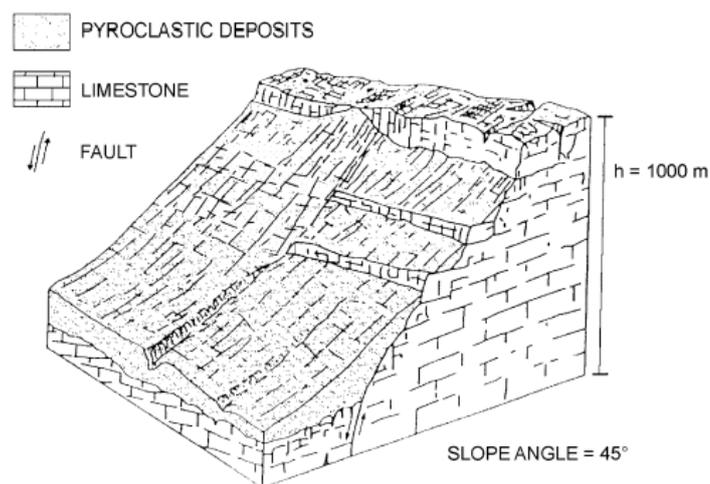


Figura 29- Rappresentazione geologica che mostra lo spessore variabile dei depositi piroclastici sui rilievi calcarei a gradini. (Guadagno et al.)

A seguito di tali precipitazioni, i materiali piroclastici della coltre, localmente saturi di acqua, cominciarono a scivolare verso valle, trascinando con sé altro materiale e incanalandosi negli impluvi. Le colate così alimentate acquistarono massa, passando da poche decine ad alcune centinaia di migliaia di metri cubi di volume, e, a causa delle elevate pendenze, raggiunsero velocità dell'ordine di 15-20 m/s, acquisendo così una forza distruttrice in grado di demolire completamente gli edifici.

## **2.2 EVIDENZA EMPIRICA: SARNO 1998 E CASI CONCLAMATI IN AMBITO INTERNAZIONALE**

Le cause che condizionano l'instabilità dei versanti vengono raggruppate in quattro sezioni:

- **cause intrinseche** legate alle caratteristiche litologiche, meccaniche, strutturali, tessiturali, di alterazione, stratigrafiche, al contrasto di competenza e permeabilità;
- **cause fisiche** riconducibili alle caratteristiche e alla distribuzione spaziotemporale delle precipitazioni, alla fusione rapida di neve o ghiaccio, al regime termometrico all'abbassamento/innalzamento del livello idrico esterno, ai terremoti, ecc.;
- **cause geomorfologiche** legate all'azione erosiva dei torrenti al piede del versante e del moto ondoso alla base della falesia, sollevamento tettonico, ecc.;
- **cause antropiche** quando l'azione dell'uomo ha comportato una modifica delle condizioni di equilibrio dei pendii (scavi, disboscamenti, attività agricole e pratiche colturali, ecc.).

Spesso l'instabilità di un versante è dovuta all'interazione di più cause concomitanti.

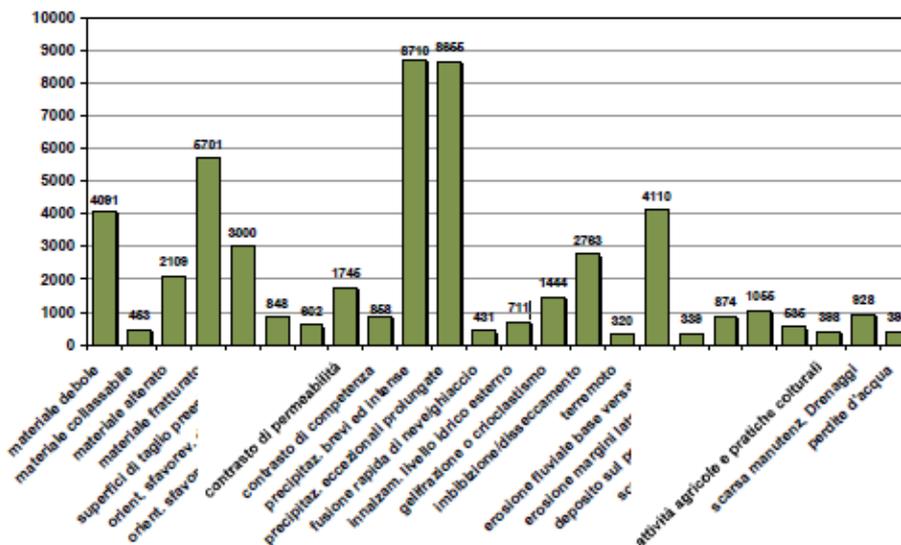


Figura 30-Cause predisponenti e innescanti dei fenomeni franosi.  
Rapporto\_Dissesto\_Idrogeologico\_ISPRA\_287\_2018.

Le precipitazioni risultano quindi il più importante fattore di innesco dei fenomeni franosi, come universalmente riconosciuto dalla letteratura tecnico-scientifica.

I fenomeni rapidi e superficiali, quali ad esempio i *soil slip* e i *debris flow*, che interessano soprattutto i terreni di copertura con una permeabilità medio-alta, si innescano principalmente in occasione di eventi pluviometrici brevi ed intensi come descritto nel paragrafo precedente dedicato.

Per quanto riguarda le cause antropiche, i fattori predisponenti più significativi e ricorrenti per la genesi dei fenomeni franosi sono gli scavi al piede del pendio e più in generale gli scavi per la realizzazione di strade di montagna e forestali, che rappresentano delle vere e proprie discontinuità di versante.

Le colate di fango avvenute in Campania (in particolare nell'area di Sarno) hanno avuto innesco sui versanti montani caratterizzati dalla presenza di discontinuità della copertura del suolo, in un ambiente geologico già di per sé naturalmente fragile, le attività di uso del suolo e le modifiche antropiche hanno prodotto effetti predisponenti

all'inscospetto di eventi di frana. Tali interruzioni della continuità pedologica derivano, nella maggior parte dei casi, dalla realizzazione di strade e/o sentieri.

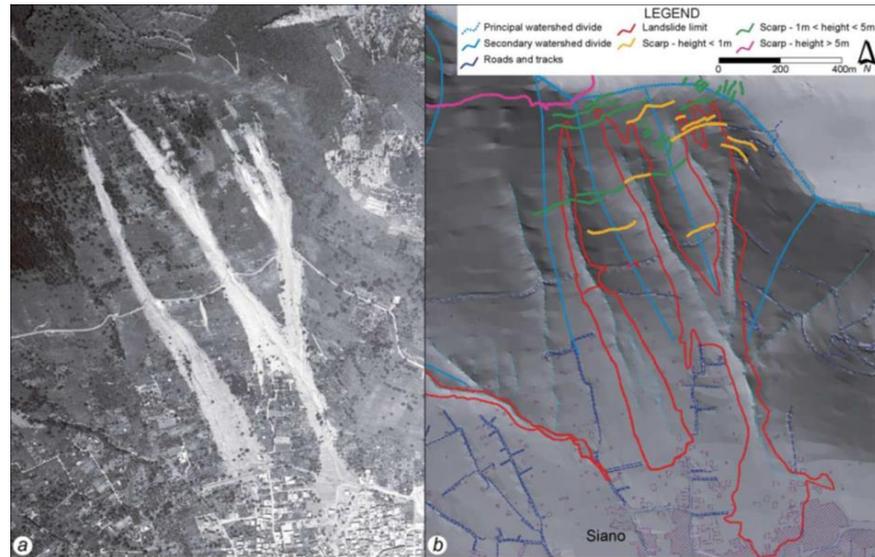


Figura 31- (a) Foto aerea verticale degli eventi d Siano (published by licence no. 2347-02/December/2002 of Regione Campania). (b) Mappa morfologica di Siano che mostra la presenza di scarpate e tracciati.

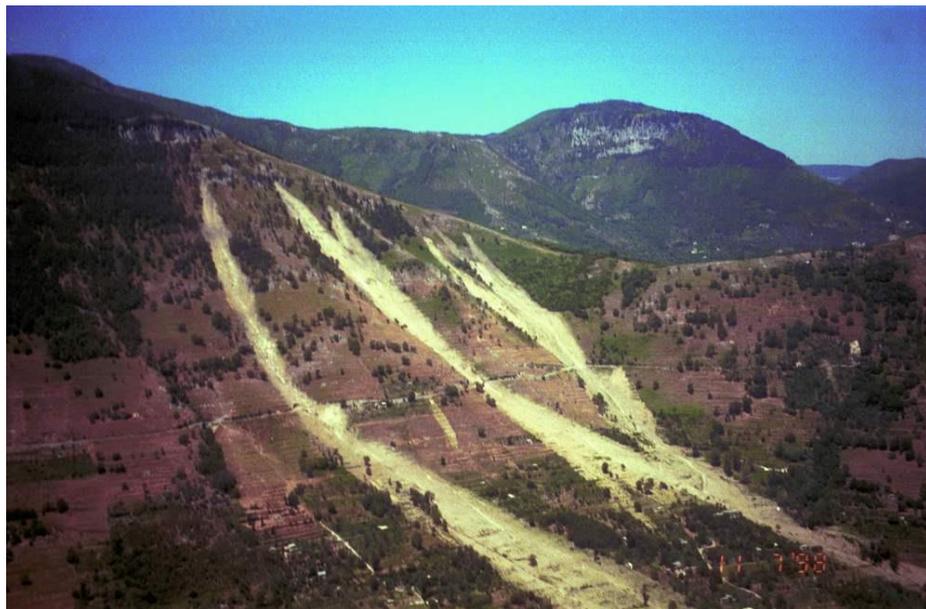


Figura 32-Traccia stradale che interrompe la continuità del versante. (da Cascini-Guida).

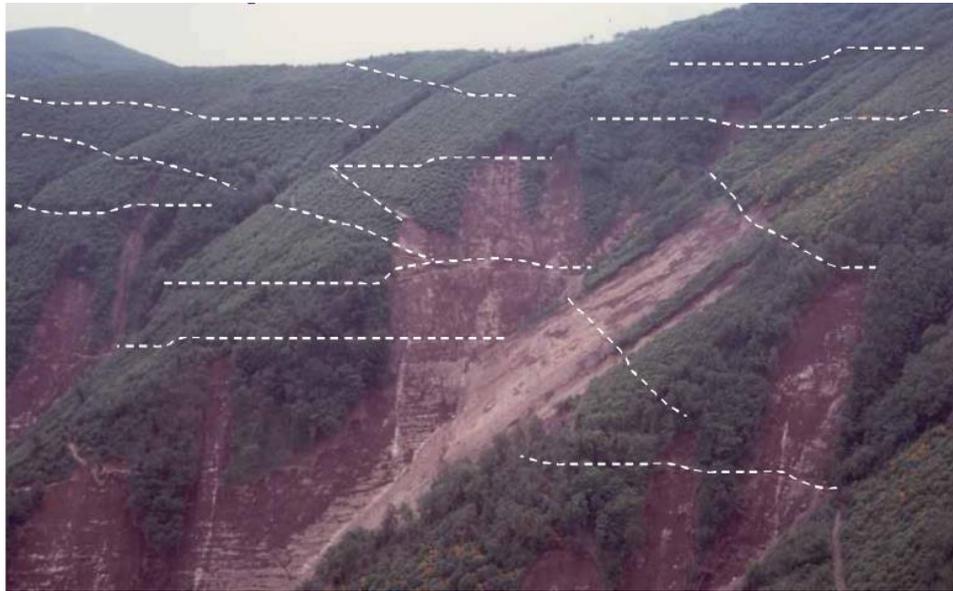


Figura 33-Dettaglio del versante su cui sono intercettati sentieri montani-D. Calcaterra, G. Nocera

Negli ultimi vent'anni in tale area si è sviluppata una densa rete di percorsi di risalita sui pendii e sentieri per facilitare l'accesso dei veicoli alle piantagioni e alle colture dislocate sulla collina, anche a seguito della meccanizzazione delle pratiche forestali.

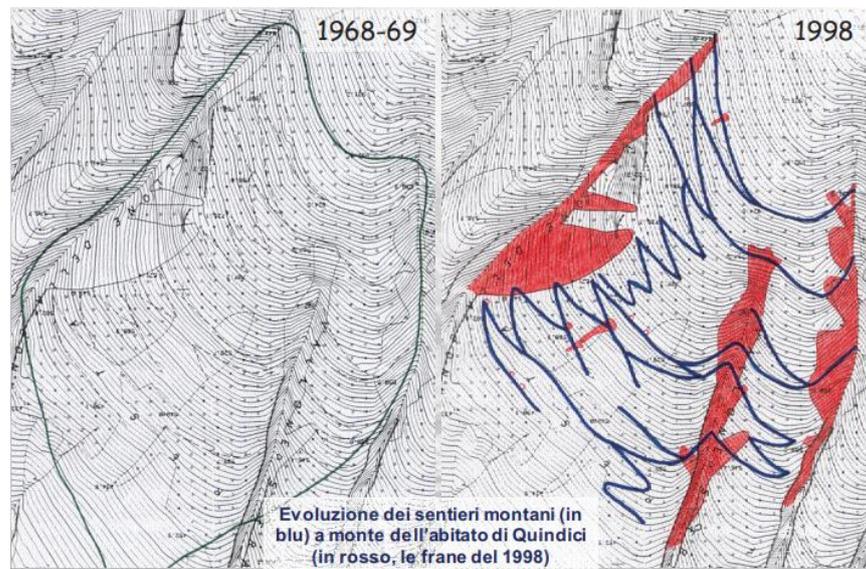


Figura 34-Evoluzione dei sentieri negli ultimi vent'anni (Quindici)-D. Calcaterra, G. Nocera

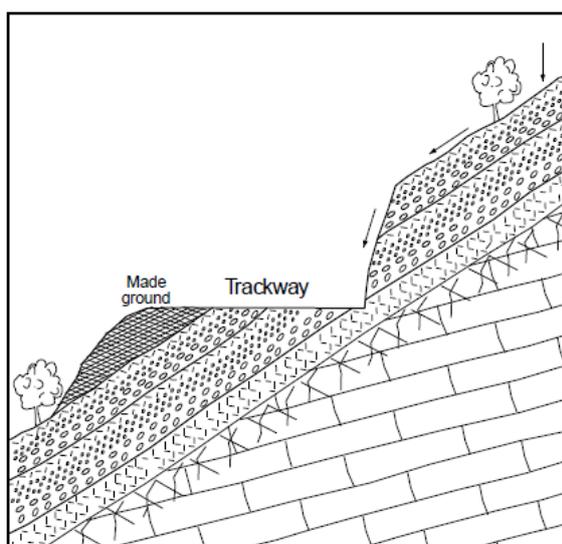


Figura 35- 1 a e 1 b viste del versante, su cui si evidenziano i tagli effettuati per la costruzione di strade e sentieri. (DVD Presidio Territoriale)

I sentieri di montagna svolgono un ruolo chiave nel verificarsi di frane in depositi poco profondi che interessano la circolazione superficiale e sub-superficiale delle acque e ciò è essenzialmente dovuto alle variazioni locali che hanno comportato nella topografia e nella conduttività idraulica del suolo. La maggior parte dei casi significativi che si sono verificati sono scivolamenti in cui è stata evidenziata la

presenza di tagli e interruzioni dell'andamento naturale del versante, che ha prodotto una modifica delle condizioni di equilibrio limite e la continuità del “pendio indefinito”.

Inoltre sebbene questi percorsi siano stati scavati principalmente nel rivestimento piroclastico, in alcune zone hanno comportato scavi anche nel substrato roccioso comportando una conseguente modifica del percorso delle acque che, in alcuni casi, sono convogliate lateralmente aumentando i fenomeni erosivi e i volumi di deflusso dell'acqua.



*Figura 36- Sezione schematica che mostra i depositi che potrebbero essere esposti quando viene effettuato un tracciato praticando un taglio attraverso la copertura piroclastica e il materiale scavato che spinge verso il basso. (Guadagno, Del Prete)*

A tale riguardo, si può fare cenno anche ad alcuni rilievi effettuati dai geologi dell'ANPA (Vittori et al, 2000) nell'area di Cervinara subito dopo l'evento del 15 dicembre 1999, con i quali è stata osservata, per almeno due fenomeni di colata rapida di fango e detrito, una corrispondenza tra la zona di innesco e i tagli stradali.



*Figura 37-Scivolamento traslativo evolvente a colata innescatosi in corrispondenza di un tornante di una strada forestale, Cervinara (AV) 15/12/1999. APAT "Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti"*

In particolare la strada forestale osservabile in Figura 37, priva di adeguate opere di sostegno e di regimazione delle acque, ha costituito una sede preferenziale per il convogliamento e l'infiltrazione delle acque superficiali, contribuendo in modo significativo all'instabilità del versante. In più punti, lungo la stessa, erano state rilevate fratture di trazione lunghe diverse decine di metri che indicavano condizioni di instabilità di ampi settori del versante.



*Figura 38-Colata rapida di fango, Cervinara (AV). Il pendio è tagliato in più punti da una strada forestale.  
APAT "Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti"*

Lo strato di pomici, presente nella maggior parte del territorio, funziona come un drenaggio naturale per la coltre e protegge gli strati più profondi dall'infiltrazione delle acque meteoriche. In alcuni casi tali tracciati sono stati realizzati senza compattazione e opere di drenaggio con rimozione di vegetazione e copertura del suolo portando lo strato superficiale a contatto diretto con l'atmosfera. I tagli hanno indotto cambiamenti sia nella circolazione delle acque superficiali che sotterranee.

Queste strade, con gradiente di circa il 3-4%, concentrano il deflusso lungo i lati e lo convogliano in specifici punti, come zone di curvatura o sezioni, che presentano pendenze vicino allo zero. La circolazione sotterranea risente invece dell'esposizione degli strati pomicei a causa del taglio, che ha facilitato e permesso l'aumento dell'infiltrazione di acqua all'interno del sistema.

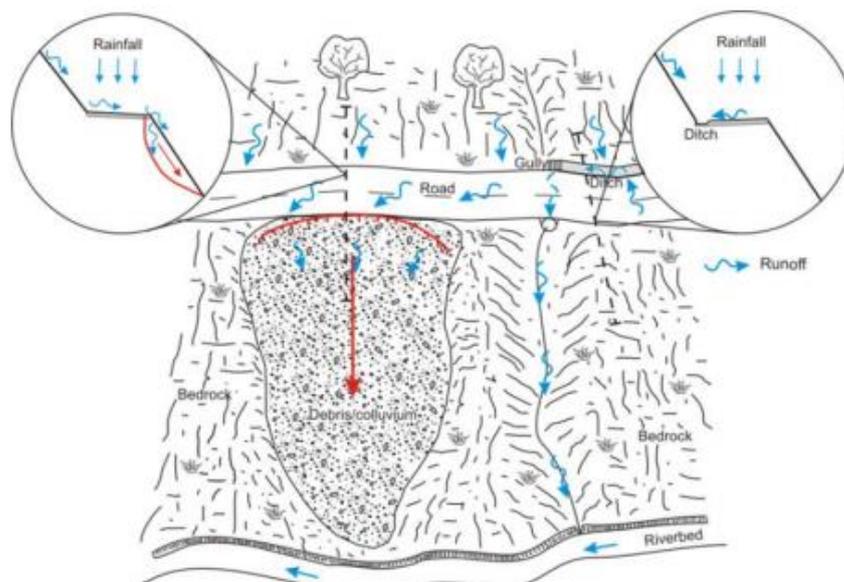


Figura 39-Schematizzazione dei possibili meccanismi d'innesco di un movimento franoso lungo una strada (da D'AMATO AVANZI et alii, 2013c).

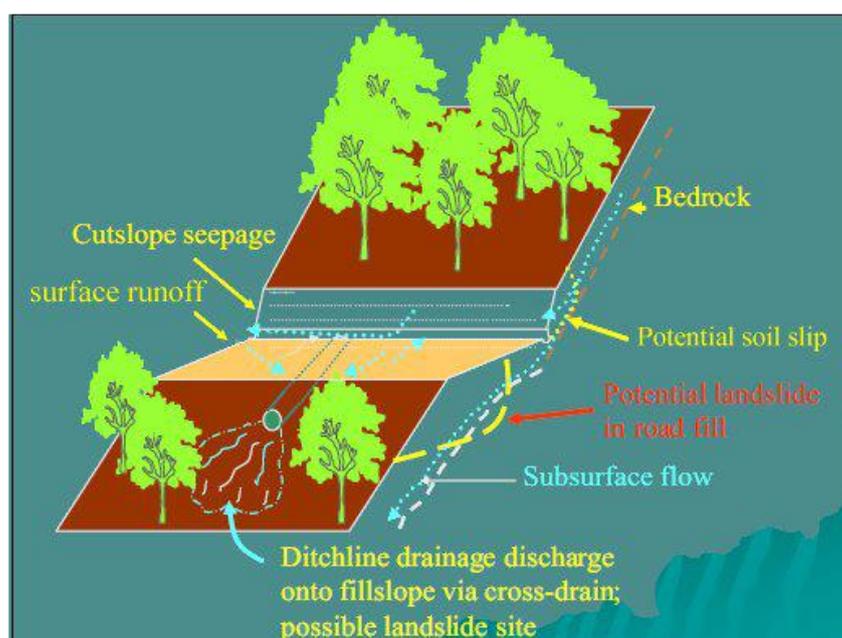


Figura 40-Schematizzazione delle instabilità del pendio che possono generarsi dall'interazione di un taglio stradale con l'andamento delle acque superficiali e sub-superficiali (da SIDLE & OCHIAI, 2006, modificato).

In effetti durante eventi pluviometrici intensi, nella copertura a monte o a valle dei tagli stradali si possono generare elevate pressioni neutre che inducono una diminuzione della resistenza al taglio e di conseguenza la rottura del pendio (Anderson, 1983; Larens & Parks, 1997).

L'accumulo di pressioni interstiziali è legato spesso alla cattiva regimazione delle acque, che deriva dall'assente o inadeguato dimensionamento dei sistemi di drenaggio delle acque superficiali e sub-superficiali (Sidle & Ochiai, 2006; D'Amato Avanzi et

all, 2013c). A monte del taglio stradale, l'instabilità del pendio può derivare dalla mancanza del supporto laterale del versante e dall'esistenza di strutture di contenimento, quali muri in cemento armato senza opportuni dreni, che impediscono un corretto drenaggio delle acque superficiali e sub-superficiali (SIDLE & OCHIAI, 2006). A valle del taglio stradale l'instabilità può invece essere causata dalla concentrazione del flusso superficiale e dall'incremento del processo di erosione sotterranea operato dall'azione delle acque.

In letteratura sono presenti numeri studi sull'argomento e sulla percentuale di probabilità di aumento dell'innescato frana nel caso di discontinuità per mano dell'uomo.

Di Crescenzo e Santo [2005], ad esempio, attestano che il 44% delle frane verificatesi, sono attestabili a tagli e piste artificiali, che si trovano ad una distanza inferiore a 10 m dalla zona investita dall'evento, nella maggior parte dei casi.

Guadagno et al. [2005] riconoscono invece, nello studio condotto su recenti case histories, che il 49% dei fallimenti analizzati si verificano a monte dei tagli artificiali e 12% a valle e che gli eventi di scorrimento traslativo, e instabilità iniziali del processo di frana, sono essenzialmente legati alla presenza di scarpate naturali e di tagli antropici. Studi statistici relativi alle condizioni morfologiche delle zone di distacco effettuati da Guadagno F.M. et al. (2003b, 2005) per l'ampio gruppo di debris avalanche (176) verificatesi nell'area hanno infatti evidenziato che oltre il 60% degli scorrimenti iniziali si è innescato a monte o a valle di tagli antropici, secondo i meccanismi illustrati in Figura 41 mentre la restante parte degli eventi è legata alla instabilità di masse al bordo di scarpate naturali.

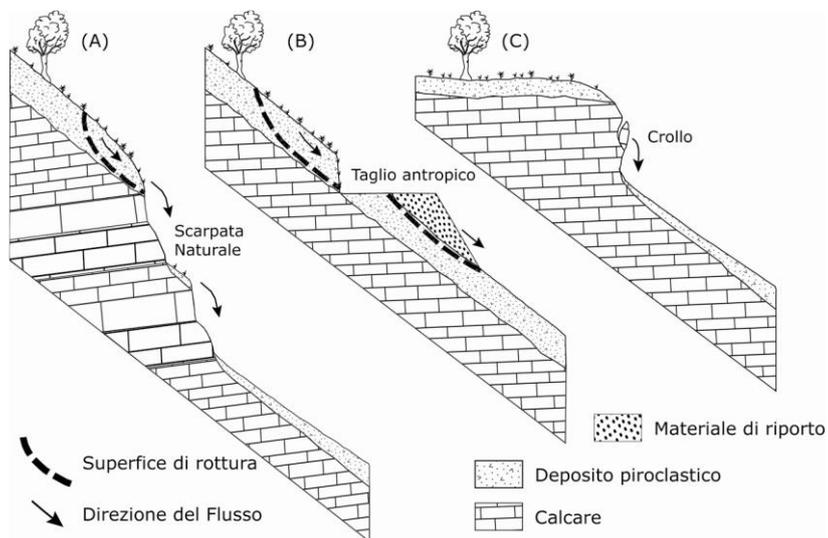
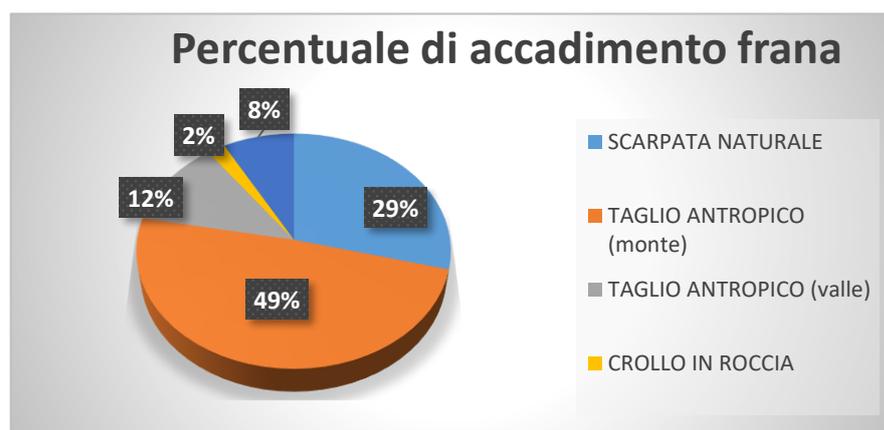


Figura 41-Sezioni schematiche lungo un versante ricoperto da piroclastiti: A) Meccanismo d'innesco in corrispondenza di una scarpata naturale; B) Meccanismi d'innesco in corrispondenza di un taglio antropico; C) Meccanismo d'innesco in seguito a crollo (da Guadagno F.M., Revellino P., 2005)

Recurrence of the morphological settings recognised in the failure areas					
Morphological conditions of initial failures	Location				
	Sarno (57)*	Quindici (88)*	Siano (11)*	Bracigliano (20)*	Total (176)*
Above natural scarps	21 (37%)	17 (20%)	8 (73%)	5 (25%)	51 (29%)
Below natural scarps	2 (3%)	0 (0%)	1 (9%)	0 (0%)	3 (2%)
Above man-made cut	18 (31%)	57 (65%)	0 (0%)	11 (55%)	86 (49%)
Involving fills	8 (14%)	11 (12%)	2 (18%)	0 (0%)	21 (12%)
Without morphological control	8 (14%)	3 (3%)	0 (0%)	4 (20%)	15 (8%)

Figura 42-Percentuale di accadimento frana secondo gli studi di Guadagno.



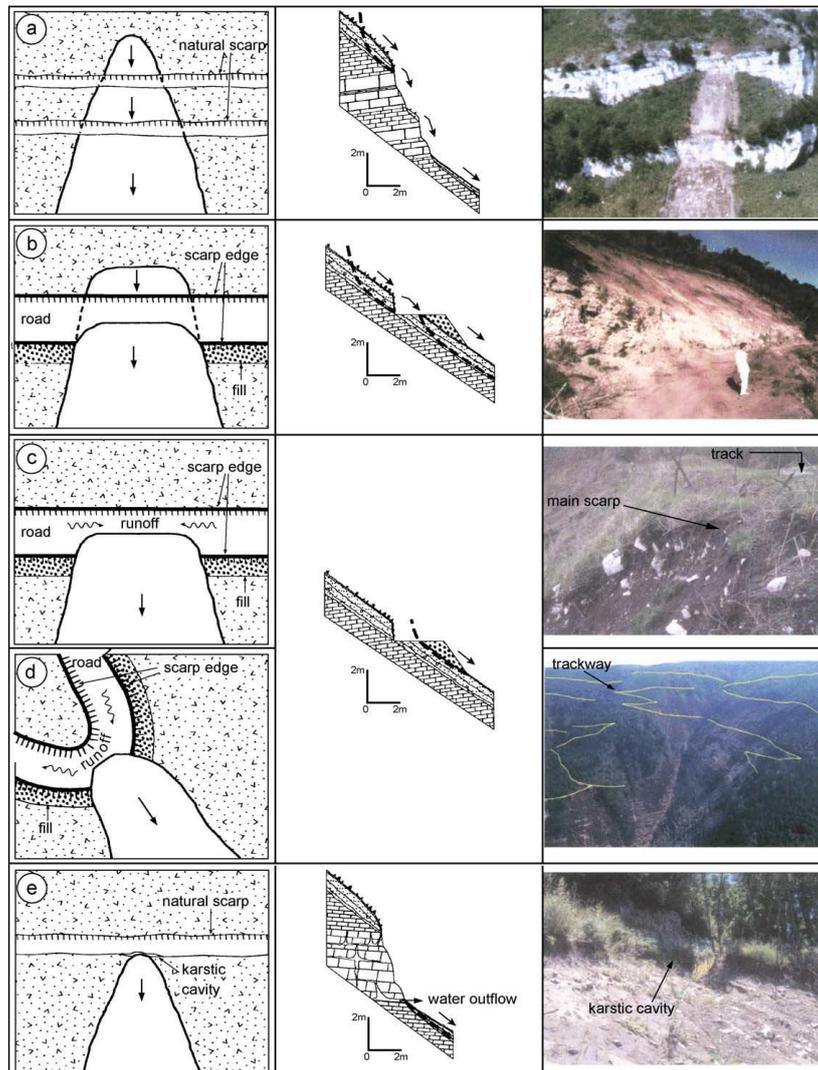


Figura 43-Quattro diverse tipologie geomorfologiche di versante e meccanismo di innesco (da F.M. Guadagno et al. / *Geomorphology* 66 (2005)).

Il ruolo delle discontinuità è sottolineato anche da Crosta e Dal Negro (2003), sulla base di analisi che modellano il regime transitorio delle acque sotterranee durante l'evento di pioggia critica del 4-5 maggio 1998.

Tutti i contributi sopra elencati provenienti dalla letteratura forniscono indicazioni utili sull'argomento, ma non sono del tutto esaustivi sui rapporti che intercorrono tra la presenza di tracciati e l'occorrenza delle frane, trascurando degli aspetti rilevanti come la circolazione di acqua superficiale e il ruolo della stratigrafia locale.

Guadagno et alii (2001, 2003), sulla base di dettagliati rilievi nell'area di innesco della colata rapida sopra descritta, hanno effettuato alcune simulazioni numeriche utilizzando il codice di calcolo alle differenze finite FLAC. In particolare, su alcune sezioni caratteristiche del versante, è stato schematizzato un modello litologico con cinque livelli piroclastici in appoggio sul substrato calcareo e adottato un modello a pendio infinito con un'inclinazione di 45°. Le analisi effettuate mostrano gli effetti indotti sulla stabilità del pendio da uno o più tagli stradali che incidono le coperture piroclastiche per il loro intero spessore

In particolare gli studi di Cascini et al. (2008) hanno riconosciuto il 16 % su 133 frane analizzate nella zona di Quindici correlato alla presenza di tracce di montagna. Tali condizioni lungo le curve dei pendii hanno portato a un aumento delle rotture sia nelle zone adiacenti che verso monte e valle della discontinuità con un conseguente allargamento laterale delle aree instabili.

Gli aspetti tralasciati negli studi di letteratura precedenti sono invece affrontati da Cascini, con una modellazione preliminare del primo stadio di rottura all'interno dell'area della frana, considerando un approccio semplificato accoppiato ad un modello d'infiltrazione, studiando anche le condizioni di terreno insaturo attraverso l'integrazione numerica dell'equazione Richards' (Richards 1931) e analizzando la fase di rottura attraverso sia il metodo dell'equilibrio limite che di sforzo-deformazione con il criterio di Mohr-Coulomb esteso a condizioni insature (Fredlund et al., 1978).

Lungo i versanti, l'acqua piovana ha generato deflusso superficiale, condizioni di ristagni e processi di erosione che spesso hanno prodotto ruscelli e burroni, come è stato riportato anche per i casi ben documentati di Thailandia [Ziegler et al., 2004], l'Australia [Croke e Mockler, 2001] e Malesia [Sidle et al., 2004].

Gli studi di Ziegler et al. si concentrano nelle zone del nord della Thailandia, nel villaggio del Pang Khum, in cui si è rivelato, negli ultimi decenni, uno sviluppo di percorsi stradali e forestali connesso all'aumento delle pratiche agricole; percorsi realizzati allo scopo di raggiungere le colture. Queste sezioni stradali furono realizzate semplicemente scavando nel terreno senza nessun tipo di compattazione, manutenzione e sistemi di convogliamento delle acque tanto è che sono state proprio queste ed essere zona di accumulo di sedimenti che, conseguentemente a periodi di

pioggia, venivano trasportati come in un flusso verso valle, contribuendo notevolmente al ruscellamento superficiale.



*Figura 44-Esempi di realizzazione di strade in Thailandia (Pang Khum).*

Stessa identica condizione di strade che fungono da canali di trasporto di materiali e sedimenti, viene rilevata negli studi di Croke e Mockler, che conducono una ricerca su un campione di strade non asfaltate in Australia, nella zona del bacino del Cuttagee Creek (a sud di Bermagui, sulla costa del NSW). Gli studi in questo caso sono condotti con l'obiettivo generale di proteggere la qualità dell'acqua nei bacini imbriferi. La probabilità e l'entità di qualsiasi impatto sulla qualità dell'acqua dipendono non solo sull'erosione ma anche dal grado di connettività o collegamento tra fonti di sedimenti e acque riceventi. L'inquinamento delle acque si verificherà solo se i sedimenti e i nutrienti vengono consegnati direttamente alla rete di drenaggio e questo dipende in larga misura dalle caratteristiche del percorso di consegna. Questo studio ha permesso di esaminare 224 punti di drenaggio e ha rilevato un collegamento tra la presenza di una strada e la corrente verificatasi. Si sono messi quindi in evidenza i cambiamenti nella densità di drenaggio causati principalmente dalla presenza di strade e tracciati

non asfaltati, privi di protezioni e sistemi per le acque, sottolineando la necessità di una pianificazione della rete stradale in base alle caratteristiche di drenaggio dell'area.

Nel caso della Malesia è stato rilevato invece come un uso diffuso del territorio montuoso per la realizzazione di strade non protette, necessarie al raggiungimento di miniere e terreni agricoli, abbia portato cambiamenti nell'idrologia stradale con aumento dell'erosione e del trasporto superficiale di acqua. Sono stati effettuati degli studi considerando anche l'influenza della vegetazione ed in particolare si è esaminato il flusso su un particolare sezione stradale sulla quale cresceva una comune felce. I risultati preliminari hanno suggerito che la crescita della felce sulla strada gioca un ruolo ecologico potenzialmente importante nel recupero della strada stessa con riduzione del deflusso, mitigazione dei processi idraulici e di erosione superficiale, diminuendo i flussi potenziali e il tasso di esportazione dei sedimenti.



*Figura 45-Sezione stradale. Malesia*

Viene evidenziata la necessità di un rimboschimento nelle aree con superficie gravemente erosa, in modo che la vegetazione funga da copertura durante le precipitazioni, eliminando in parte anche il problema del trasporto di detriti.

Questa ultima scorsa di articoli di letteratura ci permette di avere in mente che determinati fenomeni anche se lontani geograficamente da noi possono essere molto vicini per affinità di accadimento e non fanno altro che sottolineare la correlazione tra la presenza tagli stradali e il trasporto di materiali e detriti, il che comporterebbe

convogliamento delle acque superficiali verso le zone laterali e un aumento del deflusso superficiale, che nel caso specifico di Sarno ha provocato, unitamente alla pioggia dei giorni precedenti, un vero e proprio mare di colate di fango, acqua mista a detriti.

## 3 CASO STUDIO: SARNO 1998 MODELLAZIONE SU SCHEMA SEMPLICE DI VERSANTE

---

### 3.1 DATI DISPONIBILI

Fino ai catastrofici eventi che hanno colpito la regione Campania nel 1998 e 1999, gli studi su questo particolare tipo di frana risultavano carenti, mancando una conoscenza approfondita sugli aspetti geologici, geomorfologici, geotecnici e idrologici sia a scala di versante che su vasta area in termini soprattutto di pericolosità e di rischio idrogeologico.

A partire da questo avvenimento, la comunità scientifica nazionale e internazionale ha impiegato molte risorse per dare una risposta alle richieste dagli organi competenti sulla salvaguardia della pubblica e privata incolumità sia in termini di pianificazione territoriale che di protezione civile. La risposta si è concretizzata nelle attività di Emergenza Idrogeologica del 1998 (Cascini, 2005) e poi nel supporto alle Autorità di Bacino nella predisposizione dei Piani Straordinari e dei Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico ai sensi della Legge Quadro sulla Difesa del Suolo n.183/89.

Si è in sostanza elaborata una nuova politica di gestione del rischio idrogeologico, con una particolare attenzione alla previsione e alla prevenzione.

Per fare ciò si sono organizzati, coordinati e attuati dei Piani di emergenza e sono stati attuati importanti provvedimenti legislativi, a partire dal DL 180/98 (Decreto Sarno), mutato con legge del 3 agosto 1998, n. 267, e dal DL 279/2000 (Decreto Soverato) e poi ulteriormente convertito con legge dell'11 dicembre 2000, n. 365. Di particolare rilievo è l'esperienza maturata a Sarno e in altri siti comunali campani travolti proprio dai tragici eventi del maggio 1998, dove vige un Piano Interprovinciale di emergenza – rischio colate di fango.

Il modello di intervento adottato a Sarno segue lo schema proposto da Versace (1985), e comprende, così come schematizzato come segue:

- l'articolazione del piano in più fasi (presidio, allerta, preallarme, allarme), nelle quali si inseriscono le risorse di protezione civile, e si creano le premesse

operative per adottare, ove necessario, tempestivi provvedimenti tesi a garantire l'incolumità della popolazione. Tali provvedimenti comprendono: interventi di somma urgenza per mitigare l'effetto prodotto dall'eventi (disposti a Sarno dalla figura dell'Ingegnere delegato) e misure di salvaguardia volte a ridurre, fino ad annullarla, la presenza di persone nelle aree a rischio;

- una rete di monitoraggio che consente di acquisire in tempo reale varie informazioni e dati per comprendere meglio il sito su cui si interviene (dati meteorologici, idrologici, geotecnici, ecc.);
- un archivio di modelli che, utilizzando i dati ottenuti dalle attività di monitoraggio, è in grado di fornire valutazioni sulla pericolosità dell'evento;
- una rete di osservatori, il Presidio Territoriale, con funzione sia di delineare, gli scenari di evento e gli scenari di rischio nella fase antecedente all'evento, sia, di osservare, durante l'evento stesso, la sua evoluzione annunciando con l'opportuna tempestività l'insorgere di presumibili criticità (frane, fenomeni alluvionali) che potrebbero compromettere l'incolumità degli individui.

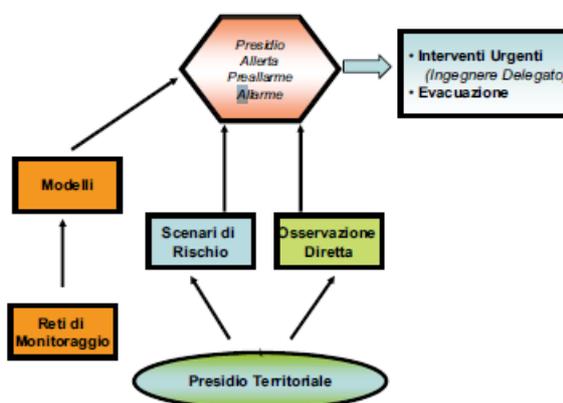


Figura 46-Modello di intervento di protezione civile.

Nell'ambito del completamento delle attività svolte il Presidio territoriale sono previste azioni allo scopo di monitorare e raccogliere i primi rilievi dello stato del dissesto delle aree colpite, motivo per il quale è stata anche prevista una sistematica raccolta, sistematizzazione, archiviazione e informatizzazione multimediale di tutta la

documentazione prodotta dall'Unità Operativa 2.38, dal 5 maggio '98 al 30 ottobre '98, e dal Presidio Territoriale dall'agosto '98 al dicembre 2000.

Il lavoro di archiviazione è diviso per settori come illustrato nello schema che segue:

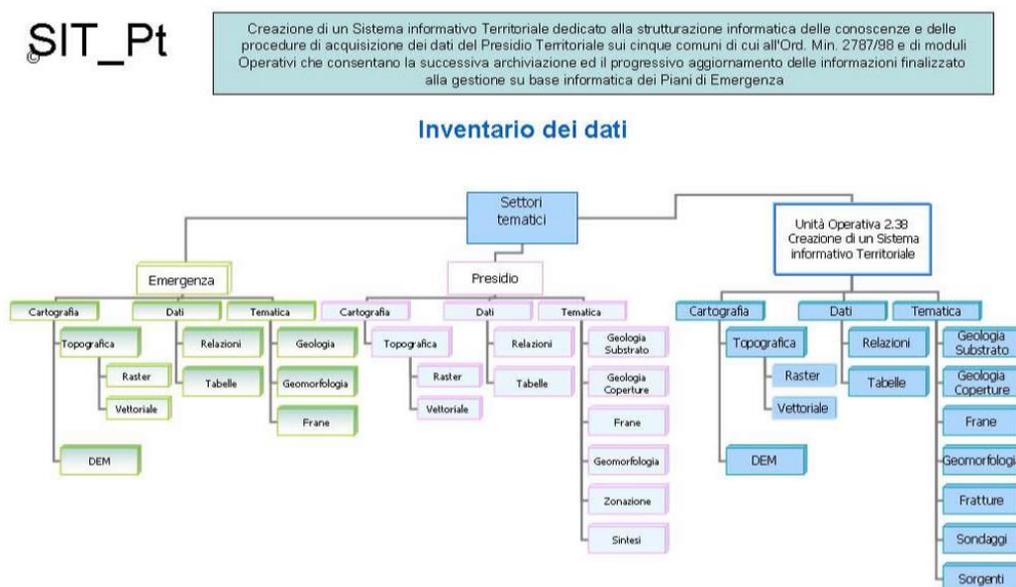


Figura 47-Mappa concettuale del SIT

È programmato e sviluppato secondo le seguenti fasi:

- **Raccolta della documentazione:** ricerca di tutti i documenti prodotti.
- **Sistematizzazione:** restauro dei documenti danneggiati, riorganizzazione e suddivisione secondo la seguente tabella:

Elaborati ufficiali	Elaborati storici	Materiale di supporto	Documenti Vari
Documenti prodotti e consegnati ufficialmente alle Autorità Competenti	Documenti non consegnati ufficialmente, ma che hanno contribuito alla creazione degli elaborati ufficiali	Tutta la documentazione utilizzata per l'espletamento delle varie attività (basi cartografiche, appunti di lavoro, foto, aerofoto)	Documenti di protocollo, sopralluoghi, corrispondenza, stampa, ecc.

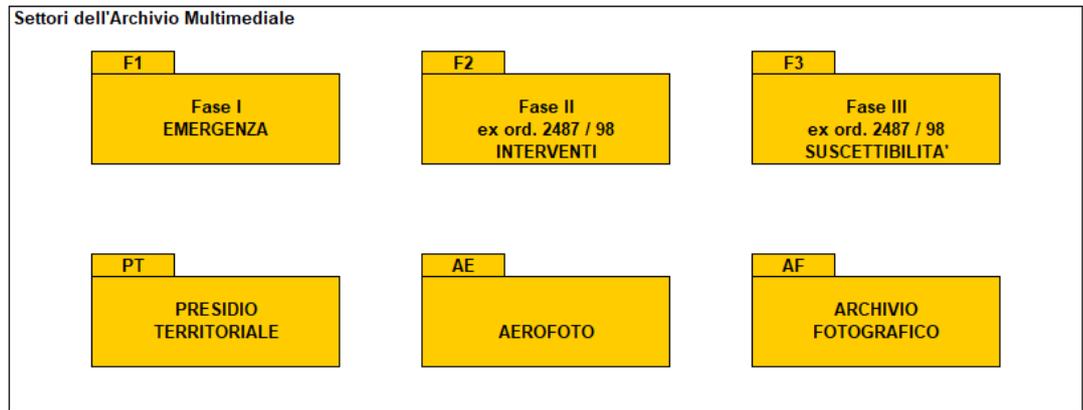
- **Archiviazione tradizionale:** collocazione dei documenti cartacei in un ambiente controllato, appositamente allestito.

- **Archiviazione multimediale:** trasformazione dei documenti cartacei in *file* e creazione di un'interfaccia multimediale di esplorazione per la gestione e/o la consultazione di tutti i documenti, dalle relazioni alle carte tematiche in formato A0.
- **Creazione di un supporto DVD o CD per la consultazione:** masterizzazione dei CD o DVD contenenti tutto l'Archivio Multimediale.

L'Archivio Multimediale quindi è costituito da tutta una serie di documenti: relazioni a colori complete di figure e fotografie, allegati fotografici a colori, carte tematiche a colori in tutti i formati, aerofoto fornite dal Dipartimento della Protezione Civile, album fotografici e filmati. Tutti i documenti sono stati scansionati e restituiti come file in formato .pdf in modo da ottenere una buona resa grafica, in fase di stampa, verosimile a quella documenti originali. I file sono stati raggruppati in cartelle a seconda del settore di appartenenza. E per ogni settore sono presenti più cartelle che raggruppano i file in sotto settori.

I settori principali in cui è suddiviso l'archivio sono:

- Settore **F1** – contenente la cartografia prodotta dall'Unità Operativa 2.38 nella Fase di Emergenza (Fase I), immediatamente dopo gli eventi del 5 e 6 maggio 1998.
- Settore **F2** – contenente le relazioni e la cartografia relativa alla Fase degli Interventi (Fase II).
- Settore **F3** – contenente le relazioni e la cartografia relativa alla Fase di individuazione delle zone suscettibili di fenomeni di colata rapida (Fase III).
- Settore **PT** – contenente le relazioni, gli allegati fotografici e la cartografia tematica prodotta dai tecnici del Presidio Territoriale.
- Settore **AE** – contenente l'elenco delle aerofoto fornite dal Dipartimento della Protezione Civile, il piano di volo e i file visibili di alcune aerofoto in formato A0.
- Settore **AF** – contenente un archivio fotografico suddiviso in album fotografici.



*Figura 48- Home page dell'Archivio Multimediale.*

Il materiale sotto forma di DVD ci è stato messo a disposizione dal Prof. Dr. Domenico Guida, geologo e docente dell'Università degli Studi di Salerno che nella veste di Responsabile del Coordinamento del Presidio territoriale (settore geologia) insieme al Prof. Leonardo Cascini, Ing. Giuseppe Sorbino, Ing. Nicola Nocera e Dr. Giuseppe Romanzi e un gruppo di Tecnici di Presidio si sono occupati di tutte le attività di Protocollo che prevedeva l'esecuzione di rilievi di natura osservazionale e strumentale degli elementi geologici, geomorfologici, idrogeologici, idraulici e geotecnici, ritenuti maggiormente significativi.

Il coordinamento tecnico e scientifico è assicurato dal Professore Pasquale Versace.

Si riportano di seguito, a titolo di esempio, i contenuti di parte dei settori dell'Archivio Multimediale.

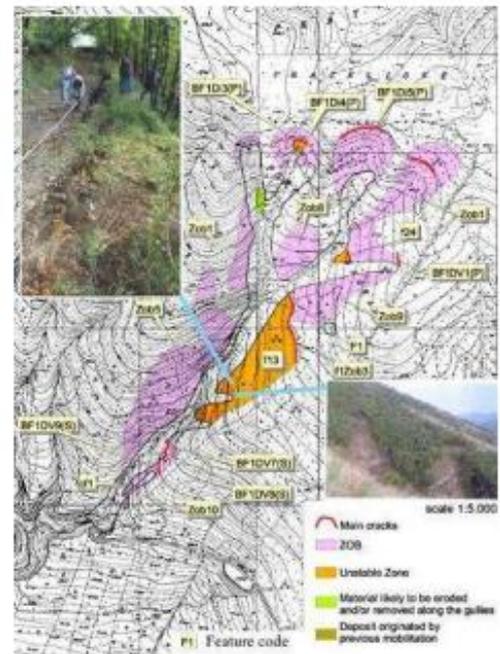
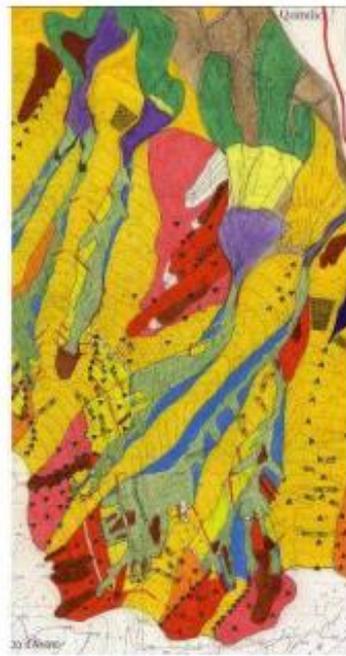


Figura 49-Esempio di carta geologica (Quindici) e Carta con indicatori di instabilità potenziale (Sarno).

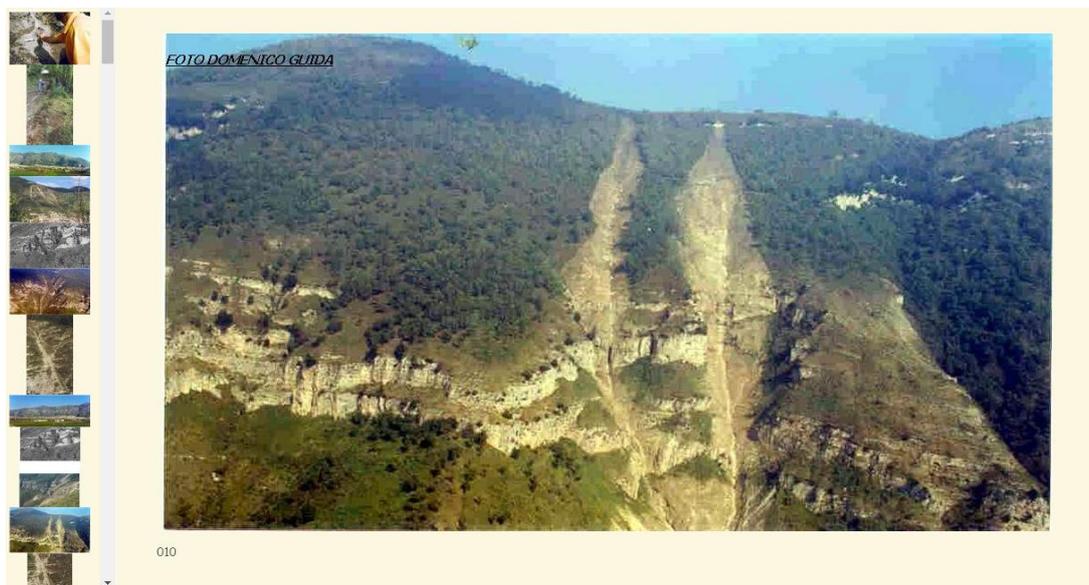


Figura 50- Esempio di documentazione fotografica. (foto Guida D.)

Ulteriori informazioni sulle caratteristiche geomorfologiche, geologiche e idrauliche del territorio che si sta analizzando sono fornite da stralci di articoli presenti nella letteratura di riferimento, in parte analizzata nel capitolo precedente del presente lavoro. Le informazioni ricavate da questi sono stati utili per effettuare la modellazione software con opportune semplificazioni e ipotesi.

Sono stati selezionati, tra i tanti, alcuni articoli redati dal Prof. Guadagno, attuale docente presso l'Università del Sannio, che trattano ampiamente l'instabilità e i fattori

di innesco dei movimenti di massa dell'area campana e più nello specifico egli ha effettuato ricerche mirate alla definizione dei parametri ambientali e idrogeologici che hanno innescato tali fenomeni franosi, rivolgendo un particolare interesse alla correlazione esistente tra la presenza di tagli stradali e l'instabilità delle coltri piroclastiche in Campania.

Oltre a queste ricerche, in letteratura sono presenti numerosi approfondimenti sulla formazione geologica del gruppo montuoso di Pizzo d'Alvano, con descrizione della distribuzione, delle caratteristiche e della dinamica delle colate.

Per quanto riguarda la geomorfologia emerge che il massiccio risulta costituito, per uno spessore di circa cento metri, da dolomia e/o marna che in seguito ad eruzioni esplosive sono state completamente ricoperte da materiale piroclastico con spessori che possono arrivare fino a 6-7 metri (Bilotta et al., 2005). Quindi questa area risulta caratterizzata da un'alternanza di pomice e ceneri vulcaniche alla cui base è presente spesso uno strato cineritico leggermente argillificato.

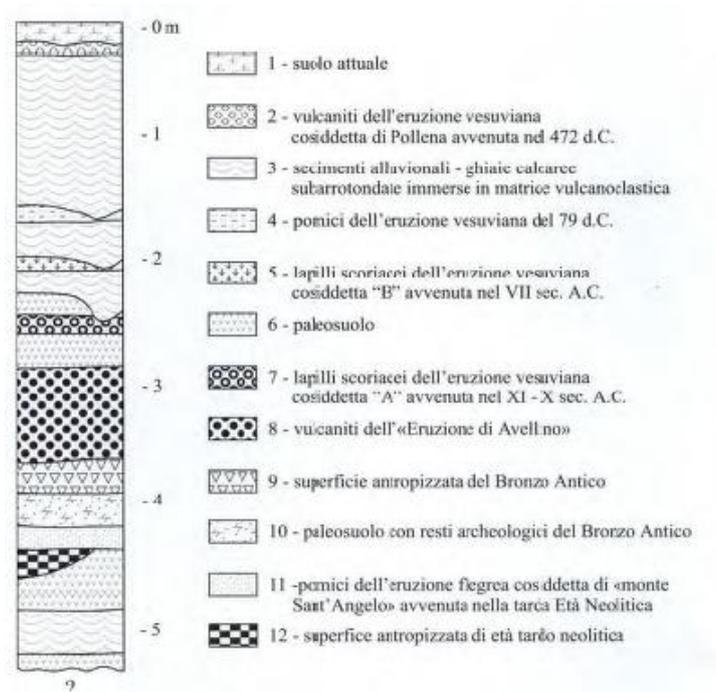


Figura 51-Successione stratigrafica schematica ricostruita negli scavi archeologici di Sarno (loc.Foce).  
Branaccio (2000)

Come già citato i dati di riferimento per la modellazione sono ricavati principalmente dalle casistiche riportate negli articoli di pubblicazione del Prof. Guadagno, più nello

specifico si è tenuto conto del seguente profilo stratigrafico a cui sono associate le rispettive caratteristiche meccaniche.

Tabella 2- Profilo schematico delle coltri piroclastiche e proprietà geotecniche.

Key geotechnical parameters of a typical pyroclastic sequence

Thickness range (cm)	Horizons	Specific gravity G <sub>s</sub>	Dry unit weight γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Water content W <sub>n</sub> (%)	Degree of saturation S (%)	Clay fraction CF (%)	Percent size finer than <60 μm	Liquid limit W <sub>L</sub> (%)	Plasticity index PI (%)	Organic matter O.M. (%)
0-30	A	2.69-2.74	8.25-11.15	20.6-40.3	25.5-70.4	4-9	30-35	35.6-63.2	8.5-13.5	6.6-15.4
25-80	Bw1	2.70-2.75	6.88-9.03	40.4-58.1	40.4-77.5	9-16	30-37	54		6.6-11.2
0-80	Bw2	2.65-2.69	8.70-9.49	36.3-50.4	47.1-82.0	0-12	9-38	49.8-57.1	11.1-15.1	7.3-8.1
0-100	C1	2.46-2.51	-	24.8-33.2	-	-	4-8	-	-	3.1-3.9
0-20	C2	2.51	-	31.0	-	-	4-8	-	-	3.1-3.6
0-20	Ab	2.65	6.7	51.8	46.4	-	-	-	-	10.0
0-20	Bwb1	2.67	6.6	67	62.4	16	54	75.7	16.8	8.5
0-45	Bwb2	2.68	8	64.8	74.0	14	54	62.2	15.1	7.6
0-250	Bt	2.71-2.77	6.57-8.74	64.4-86.7	55.6-94.9	15-31	54-68	55.2-93.0	15.5-19.8	7.6-11.8
	Bedrock									

Soils are named following the soil taxonomy (Soil Survey Staff, 1975; 1992) as in Fig. 1a (from Revellino et al., 2004).

Sono ricavati dalla letteratura anche i fattori ritenuti più significativi per l'innesco del movimento franoso sono:

- Pendenza, si è osservato su un campione di n. frane che gli inneschi si sono verificati con acclività compresa nell'intervallo 30° e 50° (i valori più frequenti tra 35° e 45°);

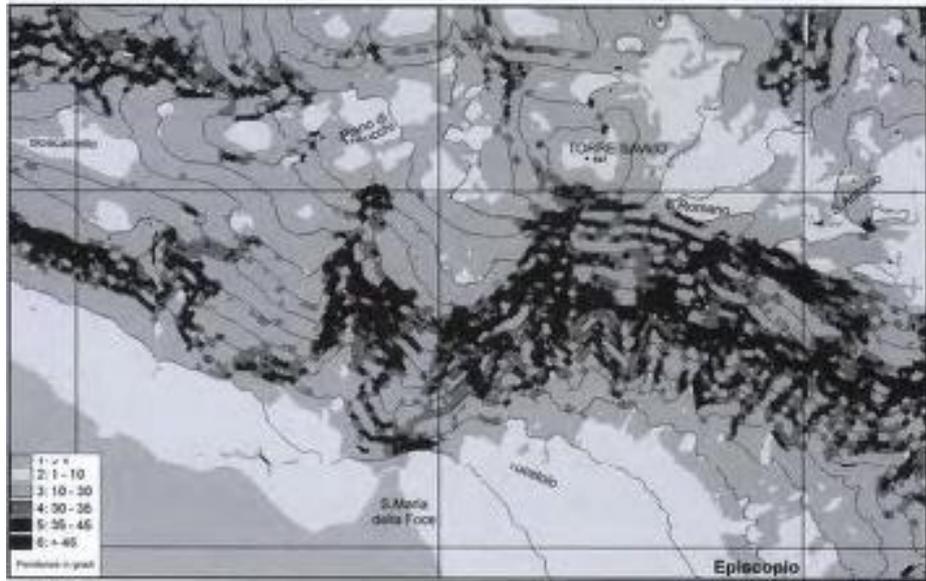


Figura 52- Carta delle pendenze del settore sarnese del gruppo del Pizzo d'Alvano. Brancaccio (2000)

- Spessore della coltre piroclastica, che presenta spessori molto variabili da 0,5 a 4 m;

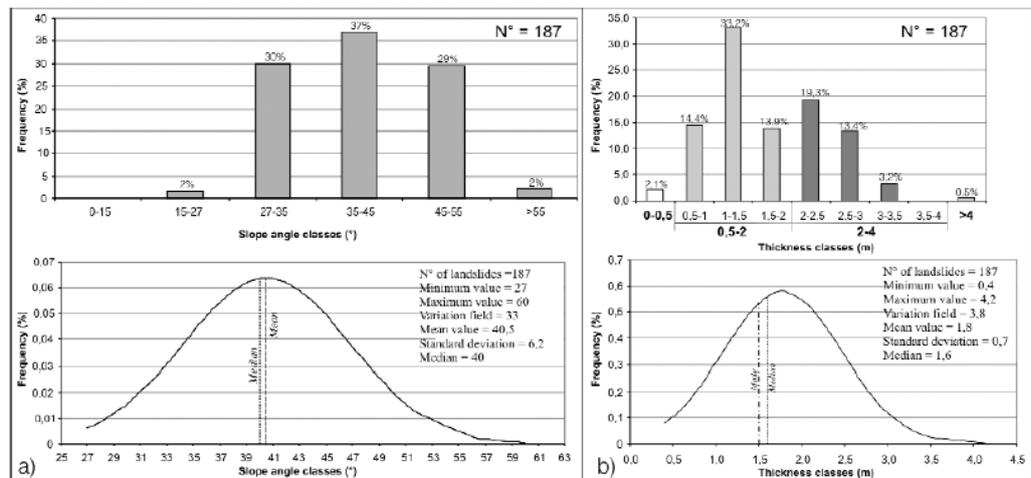


Figura 53-Frequenza di distribuzione dei valori di acclività (a) e degli spessori della copertura piroclastica (b) delle frane. Di Crescenzo et al. (2008)

- Uso del suolo, fattore non particolarmente significativo dato che si è rilevato che gli inneschi sono avvenuti sia in presenza di vegetazione ad “alto fusto” che “basso fusto”, in aree disboscate o semplicemente prive di vegetazione;
- Frane pregresse, di cui si è analizzato il periodo di ritorno risultando di pochi decenni;
- Sentieri e tagli stradali, le aree sorgenti per più del 45% sono ubicate in corrispondenza di tagli o tracciati.

## **3.2 OBIETTIVI DELLA MODELLAZIONE**

L'area presa in esame è quella di Sarno, comune italiano della provincia di Salerno in Campania, centro principale dell'Agro Nocerino Sarnese, collocato nella parte settentrionale della provincia, e noto per il gravissimo fenomeno franoso, composto da colate rapide di fango, che interessò la metà del territorio il 5 maggio 1998.

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di mettere alla luce, con l'aiuto di un modello semplificato della realtà, la connessione che intercorre tra i processi idrologici e quelli geotecnici e, nello specifico, un particolare interesse si è rivolto, per le sue particolari caratteristiche di accadimento, all'evento di Sarno del 1998 che è risultato particolarmente rilevante.

Più nel dettaglio ci si è interessati alla presenza di particolari tagli stradali che da, casi rilevati e studi effettuati sull'area, sono risultati tra i fattori innescanti di maggior rilievo dell'instabilità di versante.

## **3.3 IMPLEMENTAZIONE DI SOFTWARE OPERATIVI**

Quello che si è fatto è uno schema semplificato di un versante tipo, in definite condizioni idrologiche e geotecniche attraverso l'impiego di due software, nel particolare l'applicativo alle differenze finite MODFLOW 2005, per un primo approccio al caso studio, e successivamente, a causa di problemi di instabilità legati alle caratteristiche geometriche del modello, si è passati, ad analizzare il problema della filtrazione in condizioni stazionarie, con il software Slide/2D del pacchetto ROCSCIENCE.

Per approfondimenti sul tipo di codice di calcolo e condizioni al contorno, adottate nell'implementazione dei modelli attraverso i due software utilizzati nel presente lavoro, ci si riporta a quanto presente in Appendice.

### **A. Modellazione del caso studio tramite MODFLOW**

MODFLOW consente lo studio e la simulazione della filtrazione attraverso un'area di studio tridimensionale formata da celle alle quali è possibile attribuire diverse caratteristiche, ad esempio permeabilità del terreno differenti.

Partendo dal modello illustrato da Guadagno riportato in Figura 54 si è cercato di realizzare un modello tridimensionale con le stesse caratteristiche meccaniche e idrauliche (Tabella 3- Parametri meccanici e idraulici assunti nel modello. Guadagno et al. (2002) Tabella 3).

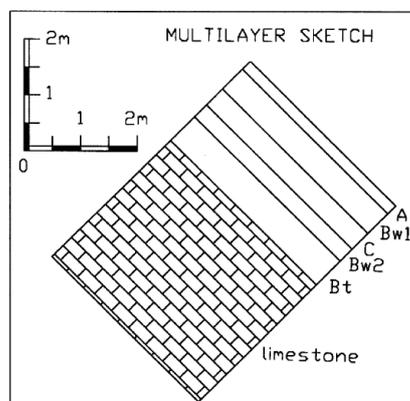


Figura 54-Sezione trasversale del pendio in esame. Guadagno et al. (2002).

Tabella 3- Parametri meccanici e idraulici assunti nel modello. Guadagno et al. (2002)

	Den (kg/m <sup>3</sup> )	E (Pa)	K (Pa)	G (Pa)	$\nu$	c (Pa)	$\phi$ (°)	$k_1$ (m/s)	$k_2$ (m/s)
Limestone	2500	1.00E+10	3.92E+09	4.35E+09	0.15	4.00E+07	0	1.00E-06	1.00E-06
Bt	1400	1.00E+08	4.44E+07	4.00E+07	0.25	2.00E+04	21	1.00E-11	1.00E-11
Bw2	1300	7.00E+07	3.11E+07	2.80E+07	0.25	8.00E+03	27	1.00E-11	1.00E-05
C	900	8.40E+07	4.31E+07	3.11E+07	0.35	0.00E+00	48	1.00E-04	1.00E-04
Bw1	1200	6.00E+07	3.33E+07	2.14E+07	0.40	5.00E+03	25	1.00E-11	1.00E-05
A	1100	2.50E+07	1.39E+07	8.93E+06	0.40	5.00E+03	20	1.00E-11	1.00E-11

Per effettuare la modellazione si è pensato ad un modello di sezione trasversale, che in molti casi, può essere un buon approccio a un problema di modellazione. Un modello di sezione trasversale in genere dispone di molte meno celle rispetto a un modello tridimensionale equivalente, può essere eseguito e calibrato molto più rapidamente, anche se alla fine si utilizzerà un modello tridimensionale.

Si modella un pendio monocline con inclinazione pari a 45°, costituito da 6 strati, il primo strato rappresenta la superficie del terreno vegetato mentre lo strato inferiore il bedrock, tra i due vi sono diverse unità geologiche. La conducibilità idraulica varia tra le unità, lo strato superiore sarà quello con permeabilità più elevata ( $k=1e^{-2}$  m/s) essendo strato vegetato mentre la più bassa permeabilità corrisponde allo strato più rigido di bedrock ( $k=1e^{-6}$ m/s).

Modelmuse attraverso la schermata principale permette di creare una descrizione per il modello che si sta realizzando e successivamente riporta l'utente alla finestra di

dialogo della griglia iniziale in cui specifichiamo un modello di 20 colonne, 1 riga e 6 livelli uno per ogni strato.

Dopo aver creato la griglia è necessario dare al modello, appena creato, la pendenza scelta, o importando l'immagine di sfondo per aiutarci a modificare le elevazioni degli strati, oppure inserendo per punti le loro coordinate. Le quote possono essere specificare con l'impiego di oggetti, nello specifico un oggetto "linea retta" su cui specificare le elevazioni.

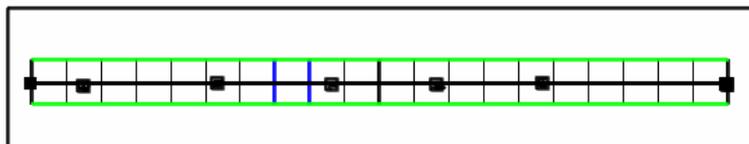


Figura 55- Oggetto nella vista superiore. Punti e retta per associare i valori in elevazione. MODFLOW2005

Ciò è possibile solo nella vista superiore. Si associa quindi ad ogni vertice un valore diverso di elevazione interpolando lungo la linea retta con il comando "EditVertex". Passando per la scheda "Data Sets" espandendo la finestra "Required | Layer Definition" è possibile inserire la formula matematica per l'elevazione dell'unità interessata. Questo passaggio viene effettuato per tutti gli strati geologici di cui è costituito il versante.

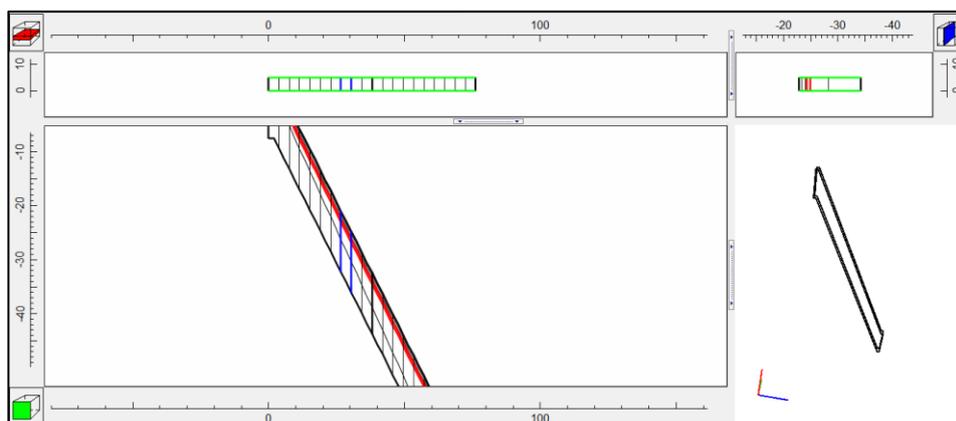


Figura 56-Schema di versante con pendenza 45°. MODFLOW2005

Questo modello utilizza i pacchetti CHD che permettono di inserire un carico costante, che nello specifico è stato inserito a monte e a valle, e RCH di ricarica che permette di inserire come condizione al contorno un flusso specificato che in questo modello è

applicata alle celle superiori. La ricarica può essere specificata solo con un oggetto poligono o rettangolo sulla vista superiore assegnando una velocità di ricarica

Per riuscire a comprendere il funzionamento del software e poter comprendere se la modellazione è efficace si è effettuata una semplificazione sulla conducibilità idraulica facendola variare, non più per ogni strato ma solo su due valori un unico valore che comprende i primi 5 con  $k_s=1e-4$  m/s e un altro per il bedrock assegnando  $k_s=1e-11$ .

Definiremo questi valori utilizzando dei parametri. Si seleziona in "Modello | Pacchetti e programmi MODFLOW ..." e nel riquadro del pacchetto LPF, si modifica il numero di parametri HK in 2ed infine si sono impostati i due parametri rispettivamente su  $1E-3$  e  $1E-11$ .

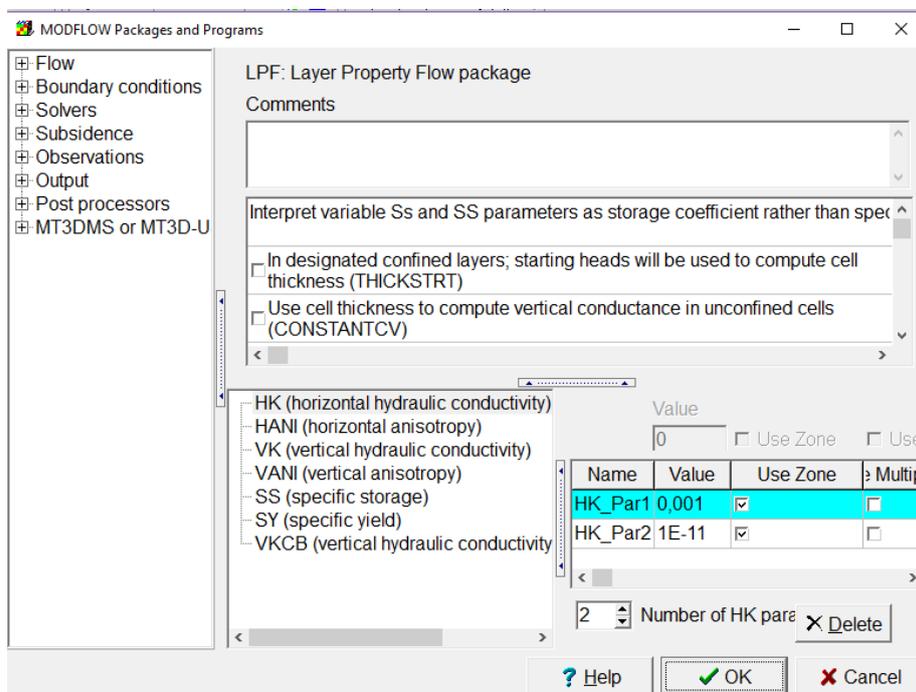


Figura 57- Schermata dei parametri di conducibilità idraulica. MODFLOW2005.

Per assegnare i due parametri si disegna un rettangolo o un poligono all'interno del modello sulla vista superiore del modello a cui si associa per tutti i layers HK\_Par1\_Zone mentre per l'ultimo layer HK\_Par2\_Zone.

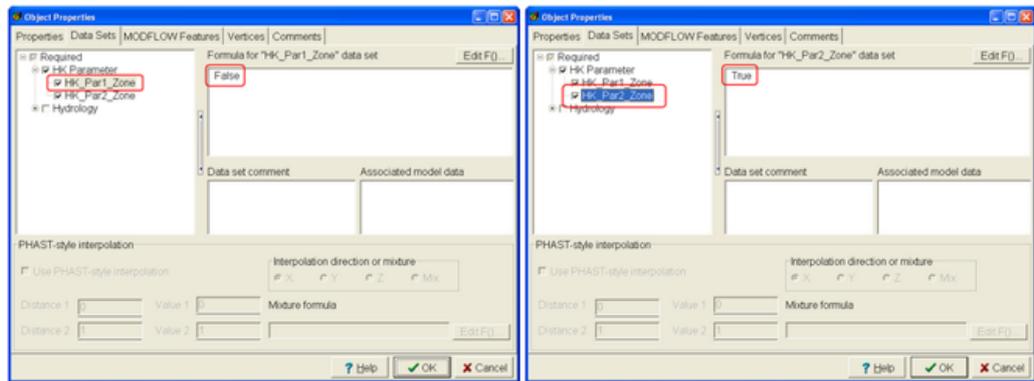


Figura 58-Schermata per l'assegnazione dei parametri. MODFLOW2005

Nel momento in cui si procede nell'esecuzione del modello e si tentano di importare i risultati il software non riesce a procedere normalmente mostrando a video la possibilità di avere un file di listato in uscita.

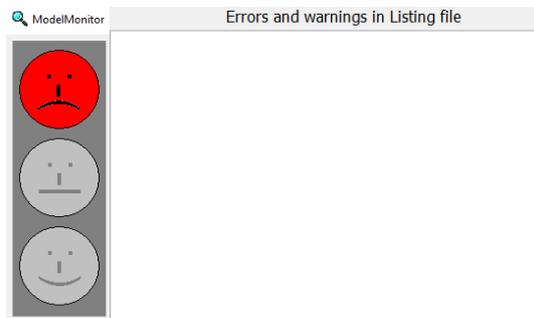


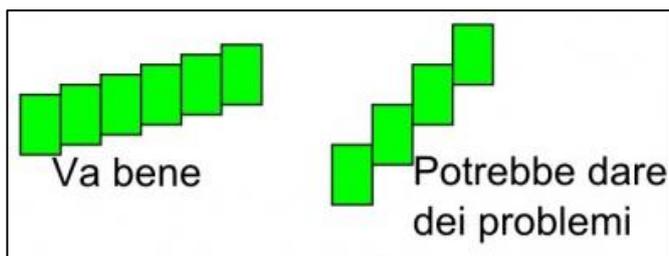
Figura 59-chermata di visualizzazione errore.MODFLOW2005

Non avendo nemmeno un file in uscita non è possibile verificare i risultati. Si è provato ad apportare modifiche al modello con ulteriori semplificazioni ma risulta sempre instabile sul risultato finale.

La motivazione che sta dietro un errore di modellazione per quanto riguarda questo tipo di software è da attribuire o al fatto che ModelMuse potrebbe non supportare tutte le opzioni disponibili attribuite al modello. Per utilizzare opzioni non supportate, l'utente dovrebbe creare file di input aggiuntivi o modificare manualmente i file di input creati da ModelMuse.

Inoltre è stato riscontrato un problema di convergenza legato ai modelli con scalini o elevate pendenze attribuite ai layer in quanto le celle della griglia Modflow sono parallelepipedi con la base sempre orizzontale. Il piano inclinato quindi risulta una "scaletta" che sale gradualmente dal punto più basso al punto più alto. Questo inficia

sul risultato della modellazione in questione perché lo spessore delle celle diventa molto piccolo.



*Figura 60-Layer inclinato nel caso di elevate pendenze .MODFLOW2005*

Dato il tipo di modello e la sua geometria si è passati alla modellazione con un altro software agli elementi finiti del pacchetto Rocscience, Slide2D utilizzato principalmente per risolvere problemi geotecnici e idraulici e più stabile per elevate pendenze.

## **B. Modellazione del caso studio tramite Slide 2D**

La modellazione è stata realizzata utilizzando gli elementi finiti con l'impiego del software Slide 2D (Rocscience), le cui caratteristiche di codice di calcolo e implementazione sono riportate in Appendice. Le caratteristiche meccaniche e idrauliche del modello di versante, come già accennato nel paragrafo precedente e in particolare in Figura 54 e Tabella 3, sono riprese da articoli di bibliografia redatti da Guadagno et al. per avere un punto di partenza basato su dati già validati.

Questa modellazione parte con l'intento di voler simulare, in un primo momento, il comportamento di singoli depositi piroclastici specifici per l'area di Sarno, in distinte condizioni al contorno, e poter analizzare le caratteristiche meccaniche e idrauliche nel caso stazionario. Si è realizzato un modello agli elementi finiti che permettesse di effettuare in modo distinto l'analisi di stabilità e quella di filtrazione, con la possibilità di procedere per livelli di complessità crescente del modello, aggiungendo ad esempio la condizione di presenza di discontinuità di versante e di intensità di ricarica. L'intento è stato quello di avere un modello simile a quello di un pendio indefinito, con una geometria semplice e facile da manovrare, e ciò è stato possibile grazie al fatto che l'area presa in esame ha profili morfologici e stratigrafici abbastanza semplici con modesti spessori della coltre superficiale.

Essendo un modello agli elementi finiti si è proceduto con i seguenti steps:

- Definizione della geometria e estensione del modello;
- Discretizzazione e scelta della mesh;
- Applicazione delle condizioni al contorno;
- Definizione delle caratteristiche geotecniche e idrauliche;
- Computazione e analisi dei risultati in merito alla stabilità e alla filtrazione.

A partire dal caso dei cinque strati di deposito presente in letteratura si è semplificato il modello per poterlo analizzare in ogni sua parte. La prima semplificazione effettuata è l'aver tolto lo strato vegetato superficiale che, come lo strato più profondo di bedrock calcareo non interviene e non modifica l'analisi dal punto di vista della filtrazione.

Le caratteristiche degli strati presenti nei modelli, che sono stati analizzati, sono riassunte nella tabella seguente:

*Tabella 4-Riepilogo delle caratteristiche geotecniche e idrauliche dei depositi.*

Strato	Spessore [cm]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	c[kPa]	$\phi$ [°]	k[m <sup>3</sup> /s]
A1 terreno vegetato	20	11	5	20	1e <sup>-2</sup>
A2 cenere piroclastica	100	12	5	25	1e <sup>-3</sup>
A3 pomice	30	9	0	48	1e <sup>-4</sup>
A4 ignimbrite	150	14	20	21	1e <sup>-5</sup>
B roccia carbonatica	600	25	4e <sup>3</sup>	0	1e <sup>-6</sup>

Quelli evidenziati in azzurro sono gli strati di coltre che sono considerati nella prima parte della modellazione.

Il primo modello presenta una geometria di singolo strato con pendenza pari a 45°. Si è proceduto in seguito per sovrapposizione di elementi (diversa geometria e inserimento di condizioni idrauliche al contorno) e aggiunta di ulteriori livelli stratigrafici. La pendenza è stata scelta nel range compreso tra i 38° e 45° preso in considerazione negli articoli di cui si è fatto già cenno nella ricerca bibliografica, oltre che dai rilievi presenti nei DVD descritti al paragrafo “*Dati disponibili*”.

### 3.3.B.1 Singolo strato di terreno

Il singolo strato ha le seguenti caratteristiche geometriche:

- Spessore totale di 2,8m pari;
- Pendenza pari a 45°;
- Estensione L=100m, scelta in modo tale che il problema non sia fortemente dipendente dalle condizioni al contorno di monte e di valle;
- Permeabilità variabile come mostrato nella Tabella 4-Riepilogo delle caratteristiche geotecniche e idrauliche dei depositi. a seconda della tipologia del deposito analizzato.

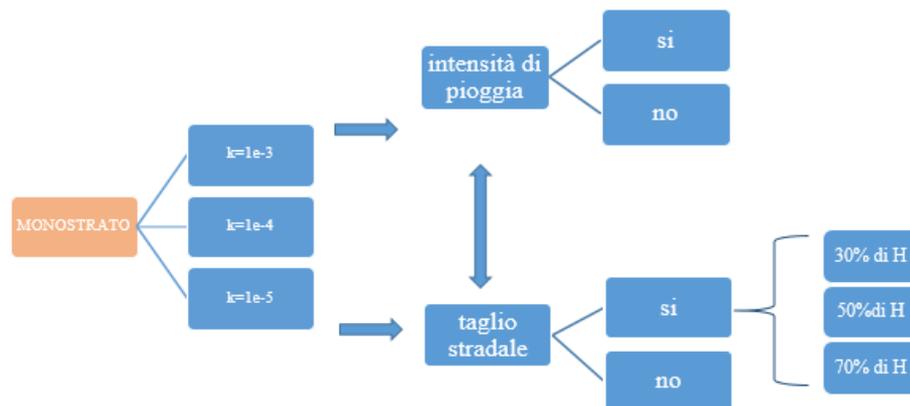


Figura 61-Schema riassuntivo delle casistiche per il monostrato.

Dopo la definizione della geometria si è passati alla scelta della mesh con elementi triangolari a 6 nodi, in modo da avere una buona discretizzazione, una sufficiente densità di elementi e nodi anche nella fase successiva di presenza di taglio lungo il versante.

Per le condizioni al contorno di tipo idraulico esse sono state scelte a seconda delle casistiche:

1. Sul contorno superiore: nel caso di superficie libera si è scelto di inserire "Unknown Boundary Condition" che impone  $P = 0$  o  $Q = 0$ , non essendo note le condizioni a priori e, nel caso di infiltrazione verticale (intensità di ricarica), inserendo l'opzione *Vertical Infiltration (q)* applicata all'intero segmento

superficiale, è una condizione che non si applica ai singoli nodi ma solo ai segmenti di linea.

2. A monte: viene inserita una “*Normal Infiltration (q)*” proporzionale alla permeabilità e al gradiente idraulico ( $q = k \cdot i \cdot A$ );

3. A valle: non essendo note le condizioni si pone “*Unknown Boundary Condition*” in modo che il software ricerchi la soluzione adattandosi al modello.

Il primo caso che si è analizzato è un modello che presenta le caratteristiche riportate nello schema che segue:

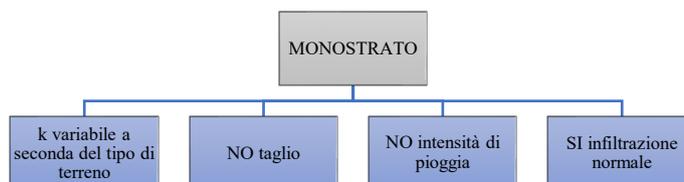


Figura 62- Caratteristiche per il primo caso di monostrato.

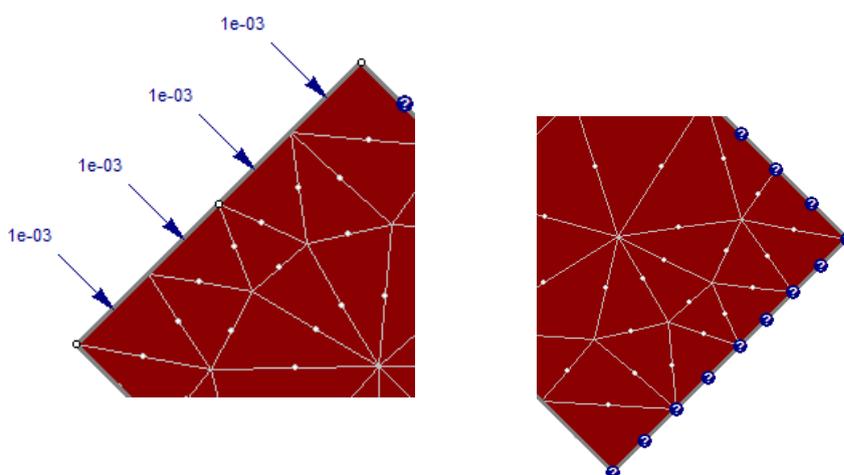


Figura 63- Condizioni al contorno di monte e di valle.

Simulando un'infiltrazione normale su tutto lo strato, pari alla permeabilità dello strato  $1e^{-3}$ m/s, si osserva che il versante si satura completamente andando in pressione comportandosi similmente a una condotta in pressione. La superficie piezometrica si dispone sul bordo superficiale e segue la pendenza del modello (Figura 64).

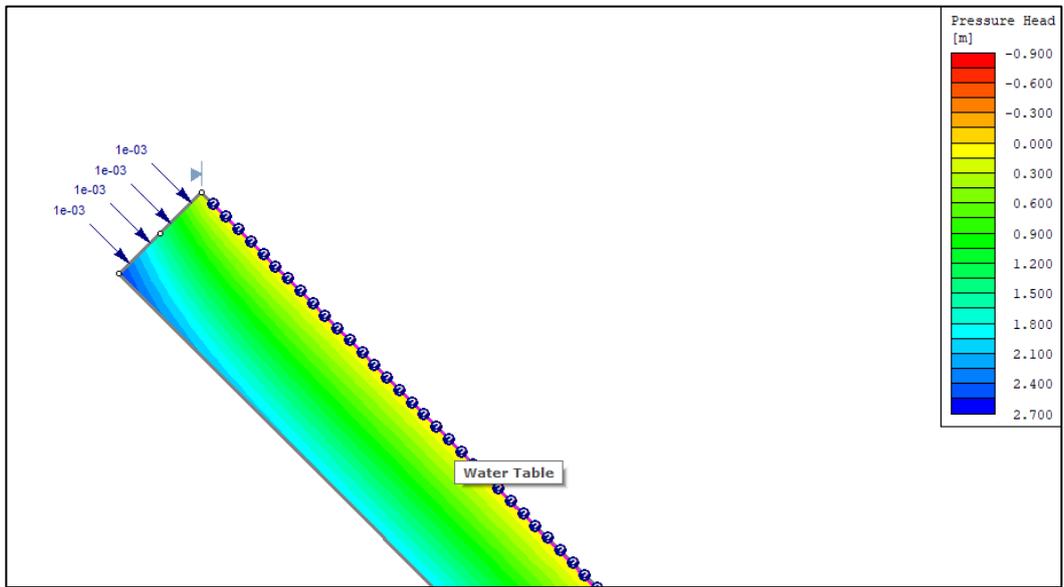


Figura 64- Andamento della superficie piezometrica nel caso di infiltrazione su tutto lo strato (strato A2)

Con le medesime condizioni al contorno in superficie e a monte, ma questa volta inserendo un'infiltrazione normale per solo metà dello strato, dal punto di vista idraulico, si nota che il suolo parte dalla condizione di non completa saturazione e, che la superficie piezometrica inizialmente legata alla condizione di flusso in ingresso, risale poi verso la superficie portando il versante alla condizione di saturazione come mostra la figura che segue (la linea in magenta rappresenta la superficie piezometrica).

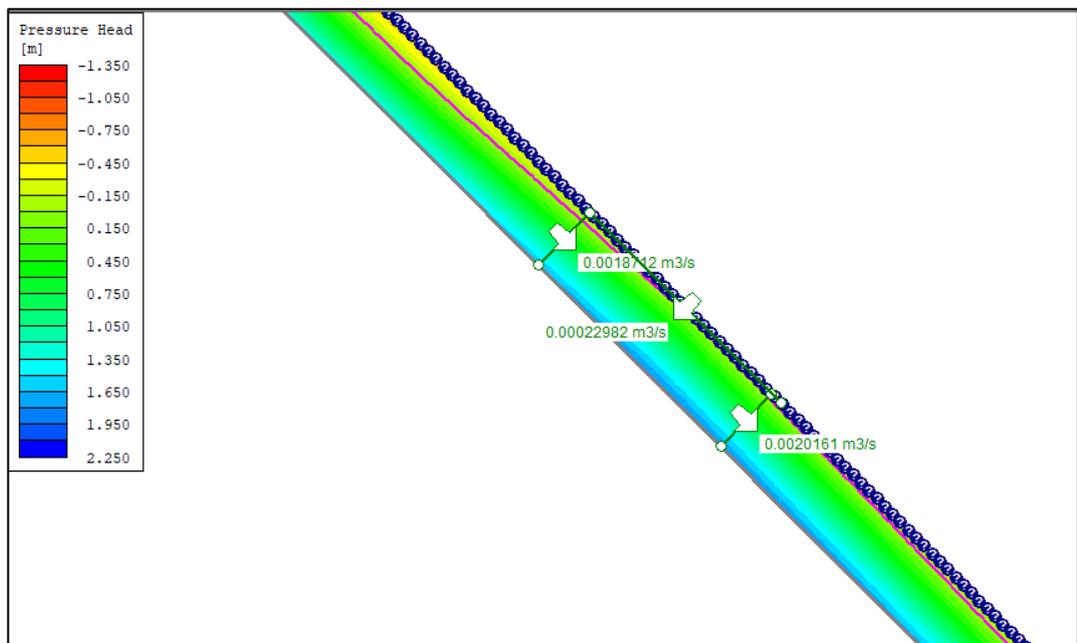


Figura 65-Andamento della superficie piezometrica e portate in due sezioni del modello. (strato A2)

Variando poi la permeabilità del terreno e, anche l'infiltrazione entrante nello strato di terreno, scelta come detto, proporzionale alla permeabilità, si mostra di seguito come si modifica l'andamento della superficie piezometrica.

Le due figure che seguono mostrano come, diminuendo la permeabilità, il pendio si satura fin dalla condizione di monte, per cui la superficie piezometrica si riporta in superficie. Sono riportate a titolo di chiarimento anche le portate in due sezioni consecutive, utili a verificare il bilancio delle portate in ingresso e in uscita dal modello.

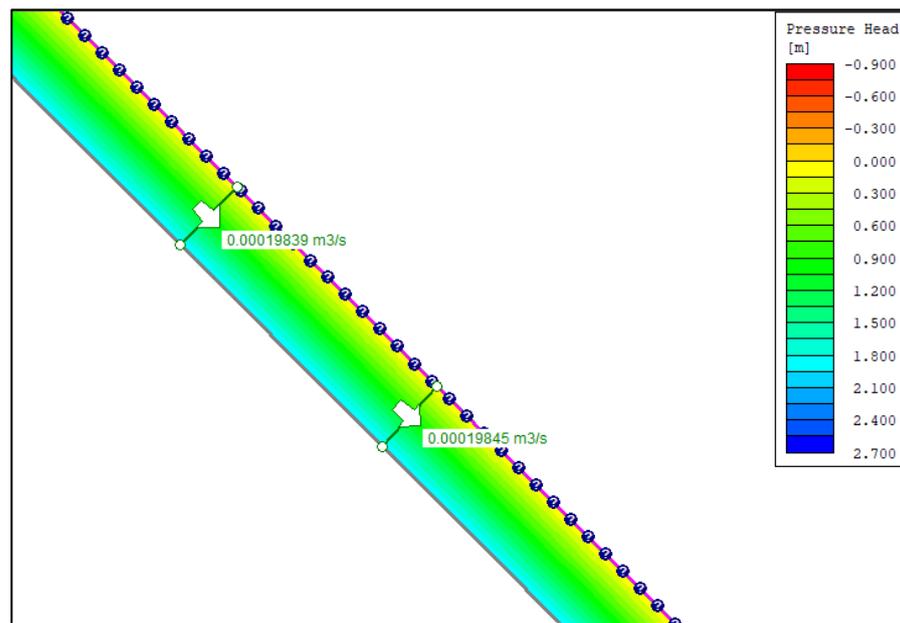


Figura 66-Individuazione della superficie piezometrica e relative portate. (strato A3)

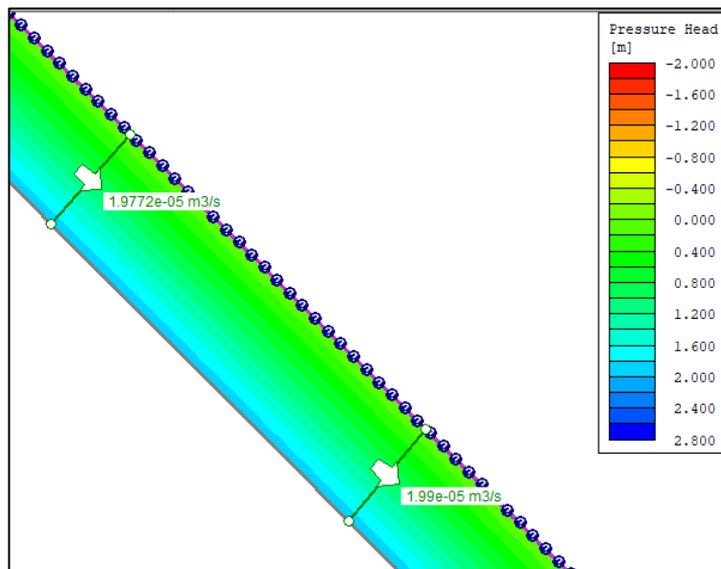


Figura 67-individuazione della superficie piezometrica e relative portate. (strato A4)

Si sottolinea che l'aver inserito una condizione di "Seepage Face" o "Unknown Boundary Condition" per il bordo superiore del modello nel caso di pendio asciutto o con sola infiltrazione normale e in corrispondenza del taglio, qualora presente nei modelli che seguono, indica che quella sezione non può avere una pressione maggiore di zero. Ciò significa che ogni volta che la falda acquifera sale al livello di quel punto, l'acqua può fuoriuscire dal modello in quel punto.

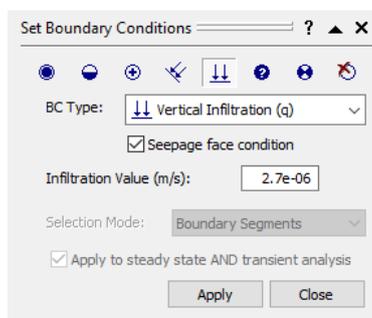


Figura 68- Schermata per le condizioni al contorno seepage.

Viene specificato ciò per giustificare anche il bilancio delle portate perché nel momento in cui la falda tocca il bordo esterno del modello è come se ci fosse fuoriuscita che poi si infiltrerà come un carico in quel punto.

Il Software Slide del pacchetto Rocscience. permette di effettuare l'analisi di stabilità con diversi metodi. Simultaneamente alle verifiche effettuate in termini di portate e di

filtrazione, per ciascun modello, è stata analizzata anche la stabilità di versante del pendio in 2 diverse condizioni:

1. pendio completamente asciutto;
2. pendio con infiltrazione normale e intensità di ricarica.

Per le verifiche di stabilità dei pendii naturali, caratterizzati in generale da stratigrafie complesse, presenza di falda e superficie topografica variabile si ricorre al Metodo delle strisce (o dei conci). Si tratta di un metodo all'equilibrio limite per il quale si definisce dapprima una superficie di scivolamento e se ne determina poi il fattore di sicurezza. Il processo è iterativo, ossia si ripete per tutte le potenziali superfici di scorrimento, al termine del quale si ricava infine la superficie critica per il versante in esame. Essendo un metodo all'equilibrio limite ipotizza per il terreno un comportamento rigido-perfettamente plastico e si immagina cioè che il terreno non si deformi fino al raggiungimento della condizione di rottura e che proprio a questa condizione la resistenza al taglio si mantenga costante e indipendente dalle deformazioni accumulate. Tutti i metodi che rientrano in questa categoria inoltre considerano il problema piano, cioè ipotizzano la superficie di scorrimento come cilindrica e con direttrici ortogonali al piano considerato.

Segue che secondo il Metodo delle strisce il corpo in frana, ossia la porzione di terreno delimitata dalla superficie di scivolamento e da quella topografica, viene suddiviso in un numero  $n$  di blocchi. Andando ad isolare un singolo concio, su di esso agiranno forze legate all'interazione tra i blocchi confinanti, forze legate all'interazione del blocco con la superficie sottostante e la forza peso dell'elemento stesso. Ne consegue che per la risoluzione del problema il numero delle incognite risulta superiore a quello delle equazioni di equilibrio, di conseguenza il problema risulta indeterminato. Per cui si può procedere secondo due approcci differenti, utilizzando: metodi rigorosi o alternativamente metodi semplificati.

I metodi rigorosi risolvono il problema avvalendosi di tutte e tre le equazioni della statica, le quali quindi devono risultare soddisfatte contemporaneamente ed introducono delle equazioni ausiliari che generalmente riguardano le caratteristiche delle forze inter striscia.

I metodi semplificati invece, assumono trascurabili le forze che i conci adiacenti si scambiano all'interfaccia. Generalmente queste semplificazioni portano ad avere un numero di equazioni superiore al numero delle incognite per cui usualmente si avvalgono solo di due equazioni di equilibrio, trascurando la terza che però spesso può risultare non soddisfatta.

Descrizioni e cenni dei vari metodi sono riportati nella sezione relativa all'utilizzo del software in “ stessa schermata.

Condizioni per la verifica di stabilità” presente nell'Appendice.

Come già detto secondo tali metodi la superficie di scorrimento critica è determinata per tentativi. Nell'ipotesi in cui questa sia circolare la sua determinazione si riconduce alla ricerca della posizione del centro e del raggio della circonferenza. Il procedimento consiste nel determinare il fattore di sicurezza, fissato un centro e fatto variare il raggio per ognuna delle circonferenze considerate. Tra tutti i fattori di sicurezza associati al fascio di circonferenza con stesso centro si registra il valore di raggio corrispondente ad FS minimo. Ripetendo la procedura per diversi centri, questi vengono disposti ai nodi di un reticolo a maglia rettangolare o quadrata (il passo della maglia è un input che va inserito nel programma) ottenendo così un piano quotato le cui linee di livello descrivono la superficie.

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva dei parametri adottati per ogni singolo deposito della coltre e il relativo fattore di sicurezza determinato con il metodo GLE di Morgenstern & Price per ciascuno di essi. Tra i metodi di analisi proposti si è deciso di scegliere proprio il metodo di Morgenstern & Price (1965) poiché, oltre ad essere uno dei metodi più diffusi, soddisfa tutte le condizioni di equilibrio ed è applicabile a qualsiasi forma di superficie di scorrimento. È considerato un metodo molto accurato.

*Tabella 5- FS nel caso di pendio completamente asciutto.(senza taglio).*

Tipo di deposito	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	c[kPa]	$\phi$ [°]	k[m <sup>3</sup> /s]	FS
A2	12	5	25	1e <sup>-3</sup>	0,77
A3	9	0	48	1e <sup>-4</sup>	1,11
A4	14	20	21	1e <sup>-5</sup>	1,41

Per quanto concerne i valori accettabili del fattore di sicurezza, la Normativa Italiana (D.M. LL.PP. 11/03/88) prescrive che se la conoscenza delle condizioni stratigrafiche e geotecniche è buona, e le conseguenze di una eventuale rottura non sono

particolarmente drammatiche, qualora non si fosse verificata ancora nessuna frana, si può adottare un coefficiente di sicurezza compreso tra 1,3 e 1,4 variabile in relazione al metodo di calcolo impiegato, mentre per le verifiche di stabilità “a posteriori”, ovvero dopo che si è manifestata la frana (come nel caso in esame), potranno essere adottati coefficienti di sicurezza minimi compresi tra 1,2 e 1,3.

Si è notato che i fattori di sicurezza minimi globali sono sotto il valore di sicurezza di normativa eccetto che per lo strato A4 di ignimbrite (valore in verde) che presenta un valore di coesione più elevato rispetto agli altri due e il solo strato A3 con angolo di resistenza al taglio maggiore della pendenza del versante raggiunge un valore unitario (in arancione).

Al modello più semplice di singolo strato è stata poi inserita un'intensità di ricarica verticale come a simulare un quantitativo di precipitazione. Per la determinazione delle portate infiltrate si è tenuto in conto della durata necessaria per raggiungere la condizione di stazionarietà. La simulazione avviene considerando quindi uno “stazionario equivalente”.

Tenuto conto che il tempo necessario per raggiungere tale condizione è:

$$t = \frac{s}{v}$$

In cui:

- $s$  è l'estensione del modello;
- $v = k i$  velocità con la quale si raggiunge la condizione di stazionarietà al variare della permeabilità e supponendo il gradiente idraulico come unitario;

Il valore di intensità di ricarica è stato determinato considerando un'altezza di precipitazione media in un giorno pari a 250 mm. Si è quindi simulato il processo di per sé non stazionario in condizioni stazionarie e, dopo aver stimato il tempo necessario affinché il flusso percorra il versante modellato (per l'intera estensione o fino alla discontinuità da taglio), l'intensità equivalente è stata calcolata come quel valore che moltiplicato per il tempo di percorrenza restituisca un'altezza di precipitazione che si vuole considerare

I valori di 250 mm e 500 mm di altezza di pioggia inseriti nella modellazione sono stati estrapolati tenendo in conto due eventi eccezionali verificatesi in Campania:

- Il 25 ottobre 1954 l'area attorno a Salerno fu interessata da violenti nubifragi che rilasciarono circa 500 mm di pioggia in circa 24 ore;
- I circa 200 mm caduti nei giorni precedenti all'evento del 5 maggio 1998 nell'area di Sarno.

Nel caso di versante privo di discontinuità (senza taglio) non si conosce a priori la sezione più critica per la stabilità, e per impiegare una condizione di “stazionario equivalente” consideriamo per intera l'estensione del modello ( $s=100$  m) con tempi più lunghi e intensità di ricarica minore. Nella tabella che segue sono espressi i valori assunti per ciascun modello al variare della permeabilità del deposito.

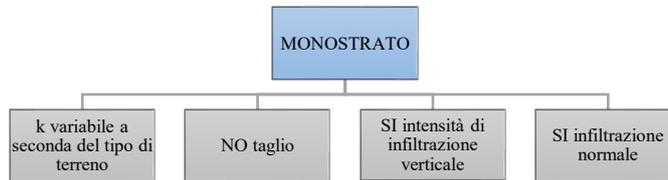
*Tabella 6- Valori di intensità di ricarica con  $s=100$ m privo di discontinuità.*

k [m/s]	t [s]	i [m/s]
$1e^{-3}$	$1e^5$	$2,5e^{-6}$
$1e^{-4}$	$1e^6$	$2,5e^{-7}$
$1e^{-5}$	$1e^7$	$2,5e^{-8}$

Differentemente nei casi in cui vi è presenza di taglio, essendo questa la zona individuata come la più critica, soprattutto dal punto di vista della stabilità di versante, la simulazione avviene sempre considerando uno “stazionario equivalente”, per quella sola sezione, con intensità media calcolata come l'altezza di precipitazione pari a 250mm di pioggia in un solo giorno ma con estensione pari a 50 m per cui le intensità di ricarica saranno maggiori per tempi più brevi (Tabella 7).

*Tabella 7-Valori di intensità di ricarica con  $s=50$ m con discontinuità.*

k [m/s]	t [s]	i [m/s]
$1e^{-3}$	$5e^4$	$5e^{-6}$
$1e^{-4}$	$5e^5$	$5e^{-7}$
$1e^{-5}$	$5e^6$	$5e^{-8}$



Le modellazioni senza taglio sono state effettuate con l'intensità di ricarica minore poiché, come si può osservare dalle immagini che seguono, il versante va in pressione per il valore di intensità superiore. La modellazione perde quindi di significato perché sarebbe come simulare 500 mm di altezza di precipitazione su una lunghezza di 50 m e già il versante con solo stato con permeabilità  $1e^{-3}m/s$  si satura a questa condizione. Per l'intensità di precipitazione minore e estensione 100 m la superficie piezometrica segue invece un andamento parallelo al pendio istaurandosi così un moto uniforme.

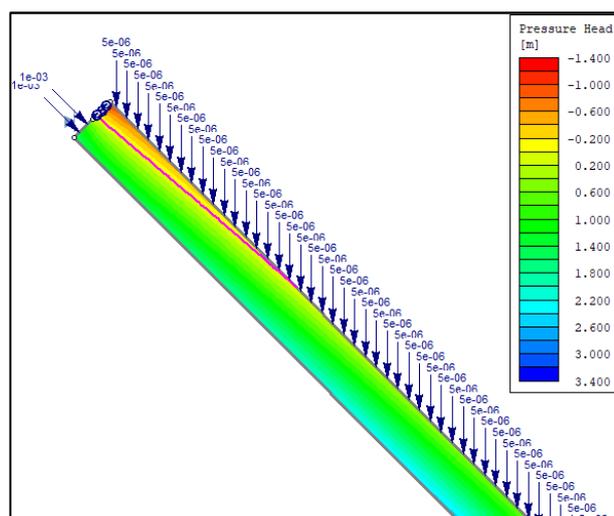
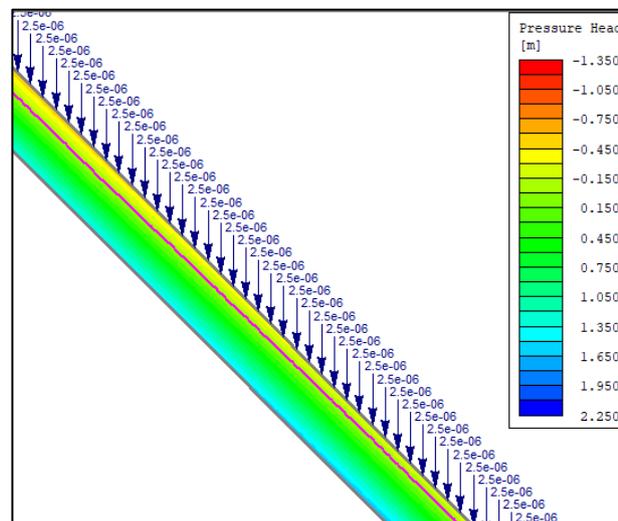


Figura 69- Andamento della superficie piezometrica per un deposito (strato A2)

Il fattore di sicurezza minimo globale è pari a 0,51, con una superficie di scorrimento che interessa un'ampia parte collocata principalmente verso valle, con un'area totale di 100,44 m<sup>2</sup>.

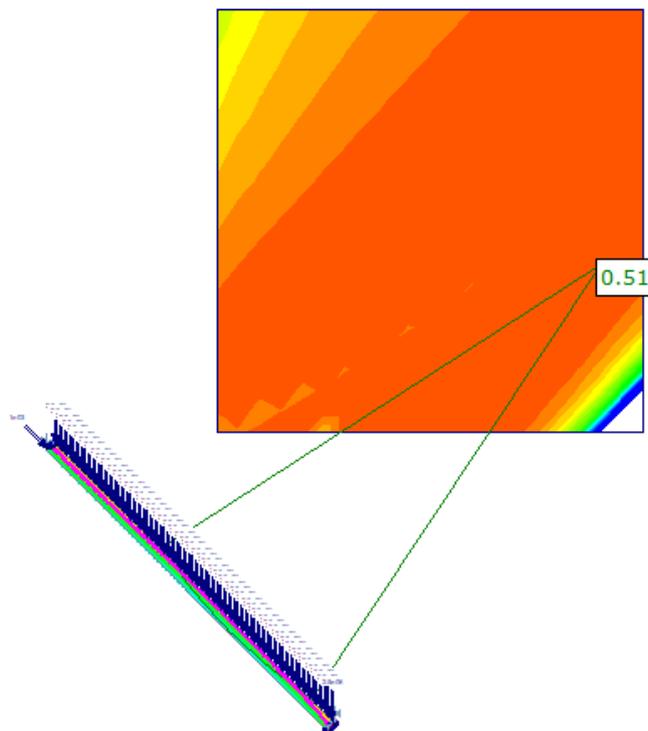


Figura 70-Valore di FS e relativa superficie di scivolamento. (strato A2)

Variando la permeabilità e quindi il tipo di suolo si nota un leggero sollevamento della superficie piezometrica.

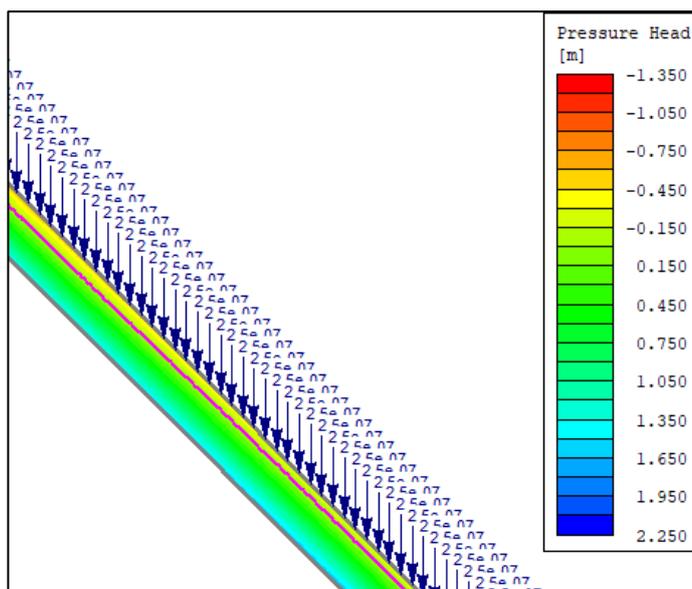


Figura 71- Andamento della superficie piezometrica per un deposito (strato A3)

Il fattore di sicurezza decresce rispetto al caso precedente che ha permeabilità maggiore e la superficie di scivolamento è sempre collocata a valle con un'area pari a 98,97 m<sup>2</sup>.

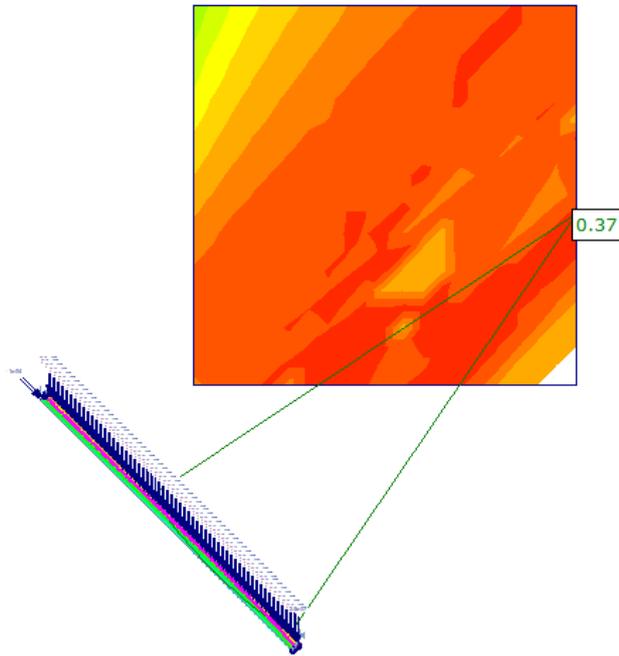


Figura 72-Valore di FS e relativa superficie di scivolamento (strato A3)

A parità di intensità di ricarica, con  $k=1e-5$  m/s, la superficie piezometrica non raggiunge il piano campagna ma resta sempre parallela al pendio con moto uniforme.

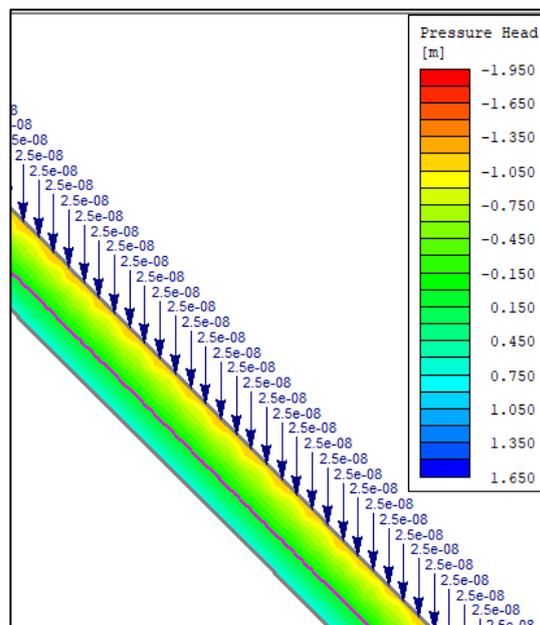


Figura 73-Andamento della superficie piezometrica (strato A4)

Il fattore di sicurezza in questo caso supera il valore di normativa, è pari a 1,35. Questo è il valore di fattore di sicurezza minimo associato ad una superficie di scivolamento che è individuata questa volta a monte del versante. La stabilità è legata alle caratteristiche di resistenza del deposito che presenta una buona coesione anche se l'angolo di resistenza al taglio è inferiore alla pendenza.

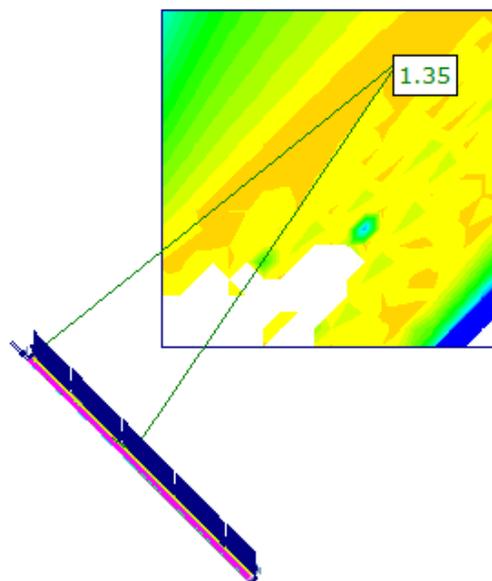


Figura 74-Valore di FS e relative superfici di scivolamento al variare dell'intensità di precipitazione.  $k=1e-5m/s$

Si riportano di seguito la Tabella 8 relativa alla determinazione del FS minimo globale nel caso di presenza di intensità di ricarica e infiltrazione (condizione di bagnato) e, una relativa al confronto con la condizione di asciutto ( Tabella 9).

Tabella 8-FS nel caso di pendio con infiltrazione e intensità di ricarica.(senza taglio).

Tipo di deposito	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	c[kPa]	$\phi$ [°]	k[m <sup>3</sup> /s]	FS
A2	12	5	25	1e <sup>-3</sup>	0.51
A3	9	0	48	1e <sup>-4</sup>	0.37
A4	14	20	21	1e <sup>-5</sup>	1.35

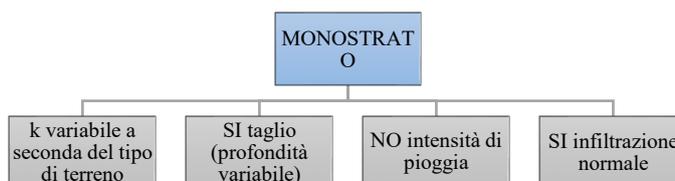
Tabella 9- FS nel caso di pendio privo di taglio nella condizione di asciutto e bagnato.

FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>
0,77	0,51
1,11	0,37
1,41	1,35

Il fattore di sicurezza minimo decresce con l'inserimento dell'intensità di ricarica che simula una infiltrazione sulla superficie, aggravando le condizioni di stabilità. Il deposito che rimane su un valore del fattore di sicurezza superiore al valore di normativa è A4 sia nel caso di pendio asciutto che in presenza di infiltrazione verticale.

Differentemente il deposito A3 con minore coesione, rispetto agli altri tipi di terreno, ma un angolo di resistenza al taglio superiore a  $45^\circ$  risente di più della presenza della precipitazione, infatti il fattore di sicurezza passa da un valore unitario a uno nettamente inferiore, mentre il deposito A2, con angolo di resistenza al taglio paragonabile a quello del deposito A4, presenta instabilità sia nel caso di asciutto che di presenza di precipitazione avendo anche bassa coesione.

Si è passati poi all'inserimento, nella geometria del modello di singolo deposito di terreno, di una sezione a profondità crescente, per simulare la presenza di un taglio stradale e osservare come esso modifichi la filtrazione e la stabilità del pendio.



Sono riportate di seguito immagini relative alle condizioni al contorno e alla geometria del modello, modificato rispetto al caso precedente privo della discontinuità di versante.

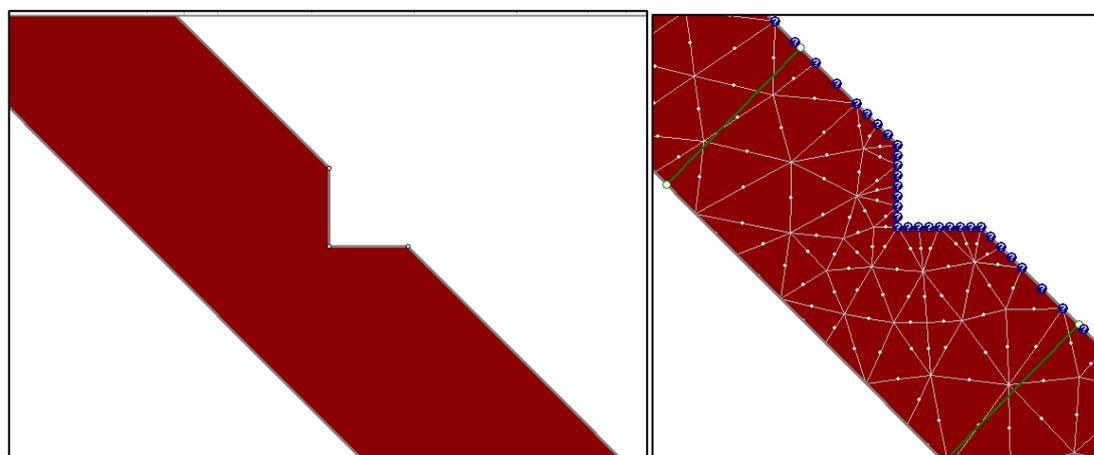


Figura 75- Modello con presenza di taglio e condizioni al contorno.

Prescindendo dalle condizioni al contorno di monte e di valle, la simulazione mostra come il pendio sia parzialmente saturo e la superficie piezometrica presenti un andamento parallelo al pendio fino a quando, raggiunta la discontinuità per la presenza del taglio, interseca questo lungo la sua verticale. Verso valle ritorna nella condizione parallela al versante.

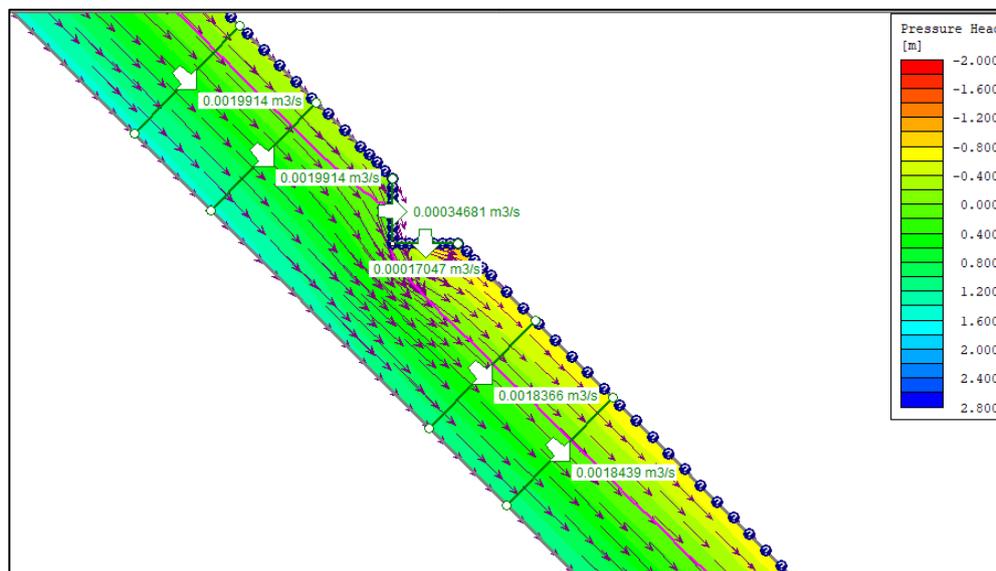


Figura 76- Rappresentazione della superficie piezometrica in corrispondenza del taglio e relative portate (strato A2)

È possibile visualizzare i vettori di flusso, osservare una fuoriuscita in corrispondenza del taglio, ed effettuare un bilancio delle portate con l'utilizzo di sezioni di scarico "discharge section", poste due a monte e due a valle del taglio con distanza di 2m l'una dall'altra, ed una in corrispondenza della sezione di taglio, per avere la possibilità di visualizzare le portate in ingresso e in uscita dalla sezione.

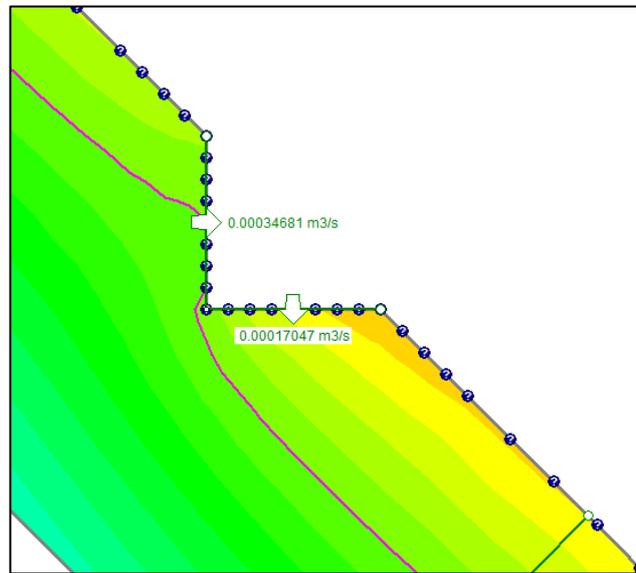


Figura 77- Dettaglio dell'andamento della superficie piezometrica in corrispondenza del taglio(strato A2)

Sempre sulla scia dei modelli precedenti si è modificata la permeabilità e la portata infiltrata a monte del modello, come detto anch'essa funzione della permeabilità. Per il modello con permeabilità pari a  $1e^{-4}$  m/s la superficie piezometrica risale leggermente e intercetta il taglio nel quarto nodo dall'alto a partire dalla superficie, quindi si innalza leggermente rispetto al caso con permeabilità più elevata.

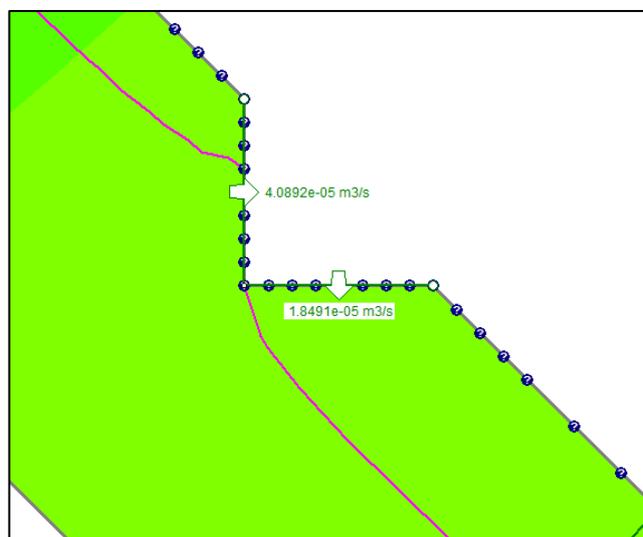


Figura 78- Individuazione della superficie piezometrica. (strato A3)

Diminuendo ulteriormente la permeabilità del terreno la piezometrica intercetta il taglio più in alto rispetto al caso precedente. Quindi minore è la permeabilità, più la superficie piezometrica si solleva.

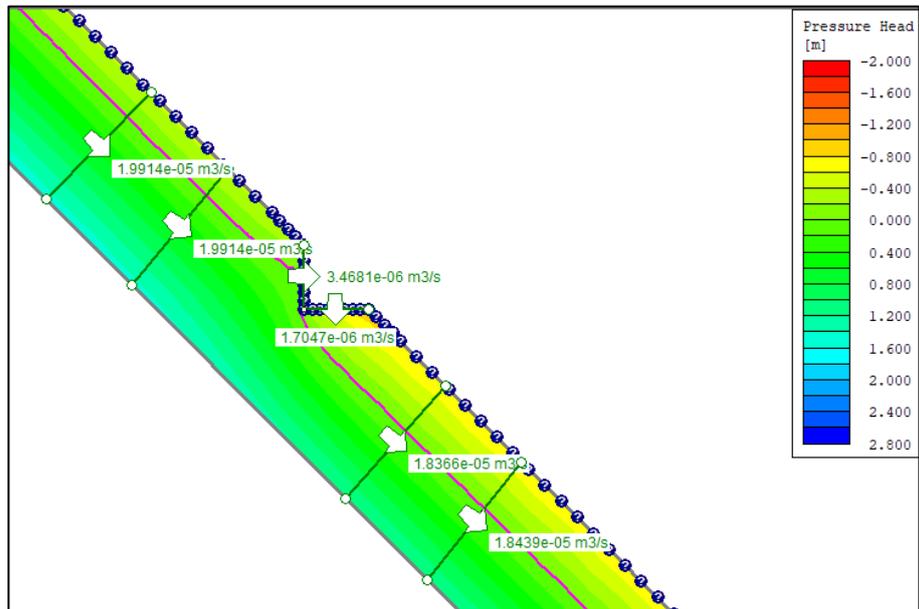


Figura 79-Andamento della falda.(strato A4)

Si è aumentata ulteriormente la profondità del taglio per osservare le variazioni del processo di filtrazione.

Anche variando la profondità e la permeabilità del suolo si nota che l'andamento della superficie piezometrica è pressoché il medesimo, si colloca parallela al pendio per poi intersecare il taglio. Variano ovviamente le portate in ingresso e in uscita proporzionali all'infiltrazione normale in ingresso.

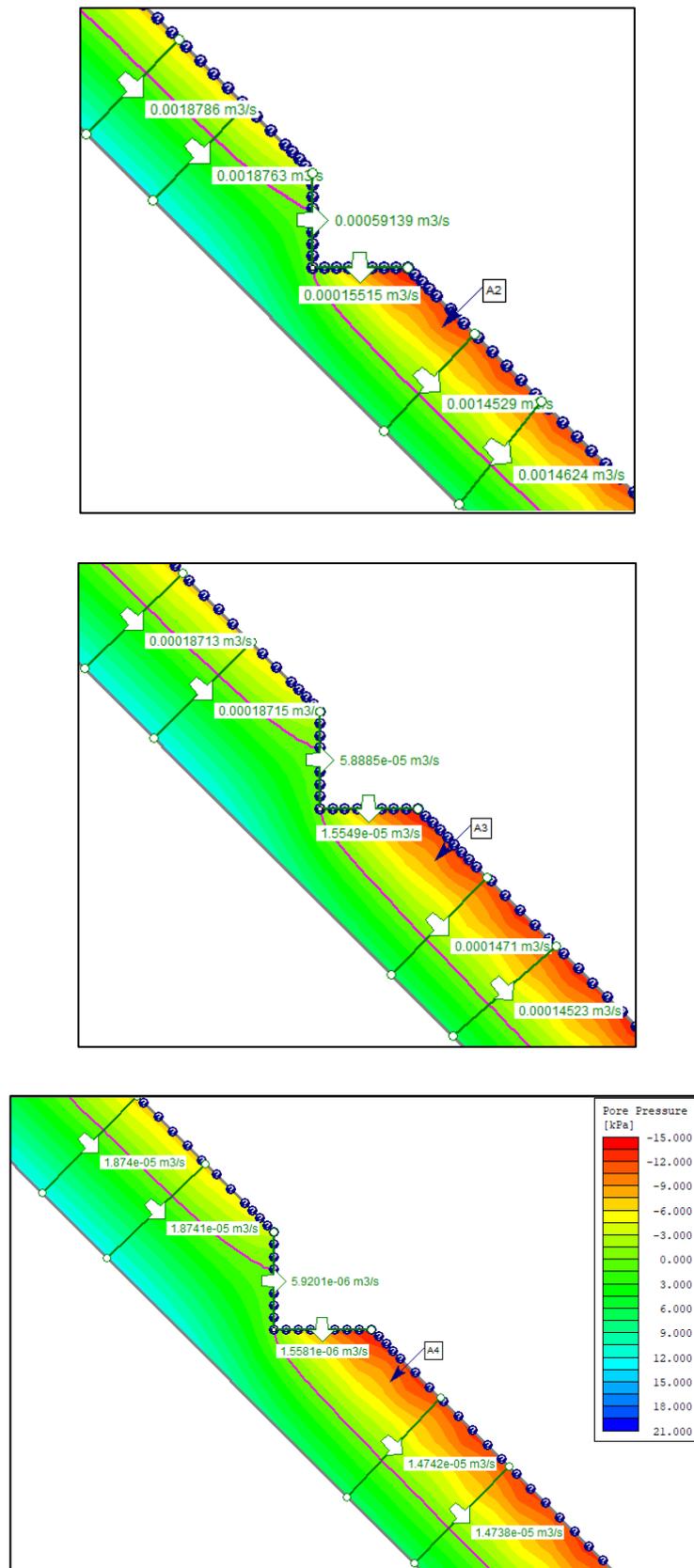


Figura 80- Andamento della superficie piezometrica per i tre tipi di deposito A2,A3 e A4.(taglio 50% dell'altezza totale)

Riducendo ancora di più lo spessore del deposito in corrispondenza del taglio, quindi aumentando la profondità della discontinuità (70% di H) Slide, nei due casi di

permeabilità inferiore al valore  $1e-3\text{m/s}$ , non è in grado di giungere alla risoluzione anche aumentano il numero di iterazioni e modificando il valore di tolleranza. Ciò è dovuto probabilmente al fatto che il deposito perde le sue caratteristiche di resistenza, del resto lo spessore diventa molto ridotto. Si nota ciò già nel caso con permeabilità pari a  $1e-3\text{ m/s}$ :

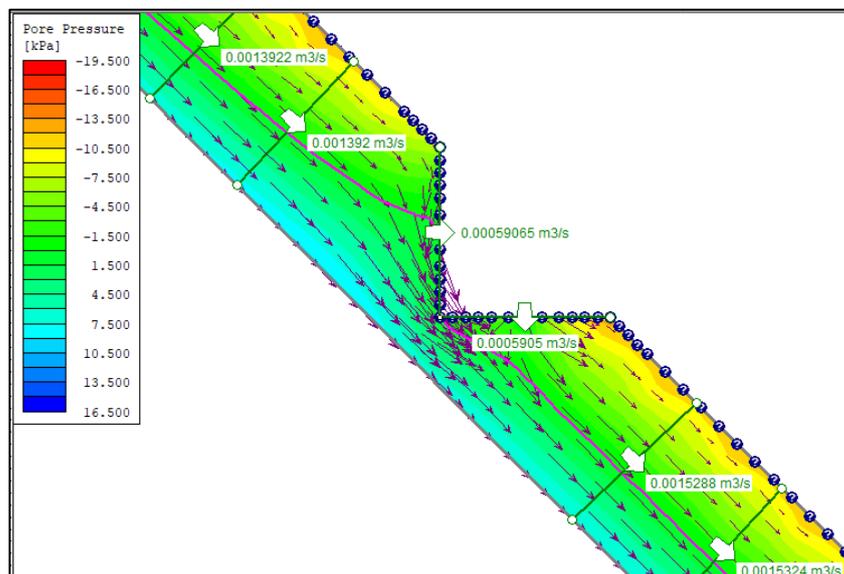


Figura 81-Immagine relativa al caso con permeabilità  $1e-3\text{m/s}$ .

Se si considera il modello con presenza di taglio nella condizione asciutta, Slide determina i seguenti valori di fattore di sicurezza minimo, al variare della profondità della sezione e del tipo di suolo, ricordando sempre che siamo nel caso di monostrato:

Tabella 10-FS nel caso di monostrato con presenza di taglio a profondità variabile completamente asciutto.

	<b>30% del taglio</b>	<b>50% del taglio</b>	<b>70%del taglio</b>
Tipo di deposito	<b>FS<sub>dry</sub></b>	<b>FS<sub>dry</sub></b>	<b>FS<sub>dry</sub></b>
A2	0,78	0,73	0,72
A3	0,60	0,58	0,56
A4	1,41	1,30	1,29

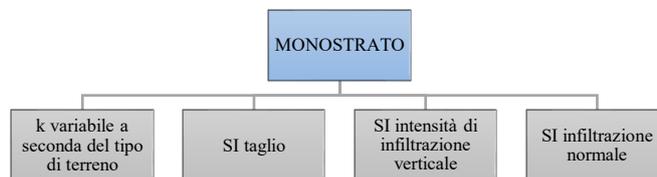
Si nota una diminuzione di FS all'aumentare della sezione di taglio, ciò ad indicare che la presenza del taglio accresce l'instabilità del versante ed inoltre ampliare la profondità del taglio comporta una riduzione della sezione resistente del versante in esame, anche se nel caso del terreno di tipo A4 si rientra sempre nei valori di normativa superiori a 1,2. La superficie di scorrimento si colloca nella zona a monte del taglio investendo anche la sua verticale.

È stata poi aggiunta nuovamente al modello un'intensità di ricarica superficiale, come introdotta in precedenza, al variare della permeabilità, per simulare un'infiltrazione verticale, pari a:

Tabella 11-Valori di intensità di precipitazione in presenza di taglio.

Tipo di deposito	k [m/s]	t [s]	i [m/s]
A2	$1e^{-3}$	$5e^4$	$5e^{-6}$
A3	$1e^{-4}$	$5e^5$	$5e^{-7}$
A4	$1e^{-5}$	$5e^6$	$5e^{-8}$

per osservare come questa modifichi il bilancio delle portate, l'andamento della superficie piezometrica e la verifica di stabilità con annessa individuazione della superficie di scorrimento critica.



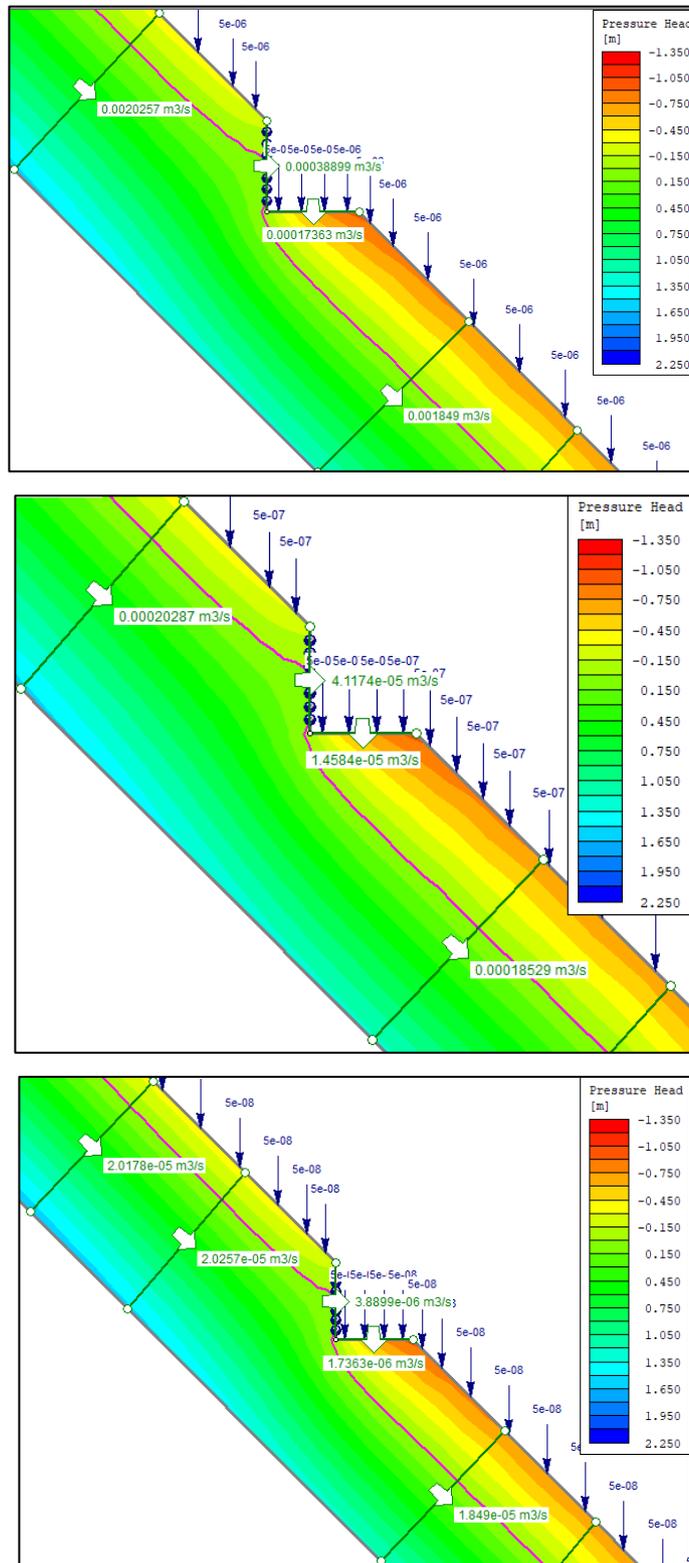


Figura 82- Andamento della superficie piezometrica per un deposito A2, A3, A4 con intensità variabile

È possibile osservare che nel caso di deposito A2 la superficie di scivolamento critica interessa tutta la parte a monte della verticale del taglio, per A3 invece investe gran parte del pendio comprendendo tutto il taglio mentre per A4 solo una porzione a monte che però non interagisce con il taglio ed è l'unico FS che risulta superiore a 1.2.

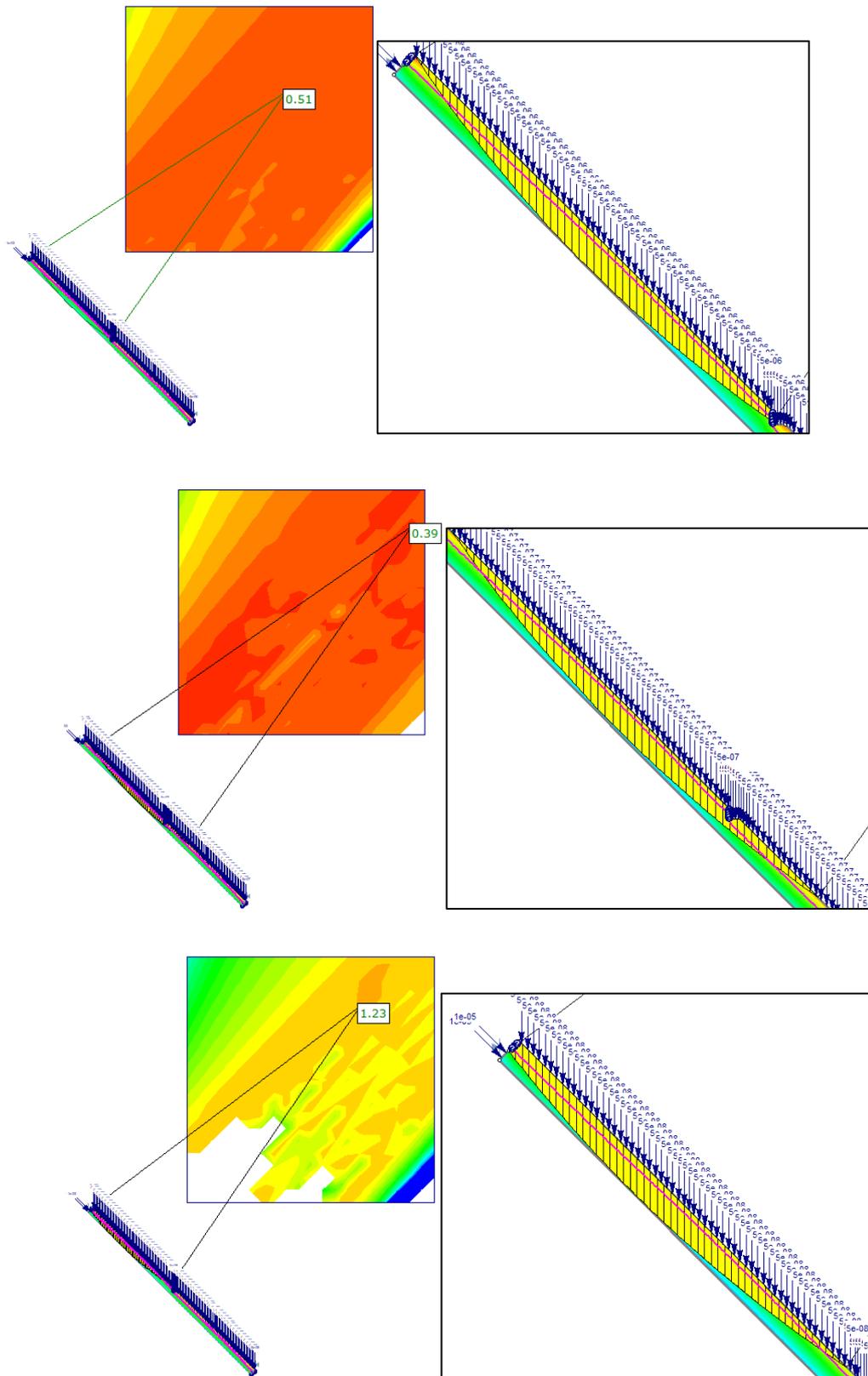


Figura 83-Valori di FS e relative superfici di scivolamento al variare dell'intensità di precipitazione e del tipo di deposito. (A2, A3 e A4)

Aumentando ulteriormente la sezione di realizzazione del taglio si è notato (dalle figure che seguono) che:

considerando la condizione di transitorio equivalente, ovvero l'aver tenuto in conto il tempo necessario per il raggiungimento di tale condizione e

- La superficie piezometrica interseca la sezione verticale del taglio e si sposta solo il punto di intersezione che si solleva influenzata dalla diminuzione di permeabilità;
- Il fattore di stabilità minimo globale continua ad essere inferiore a 1,2 per le prime due tipologie di deposito mentre per A4, che ha maggiore coesione, supera, anche se lievemente, il valore di normativa;
- La superficie di scivolamento critico si estende nella maggior parte dei casi fino alla verticale del taglio.

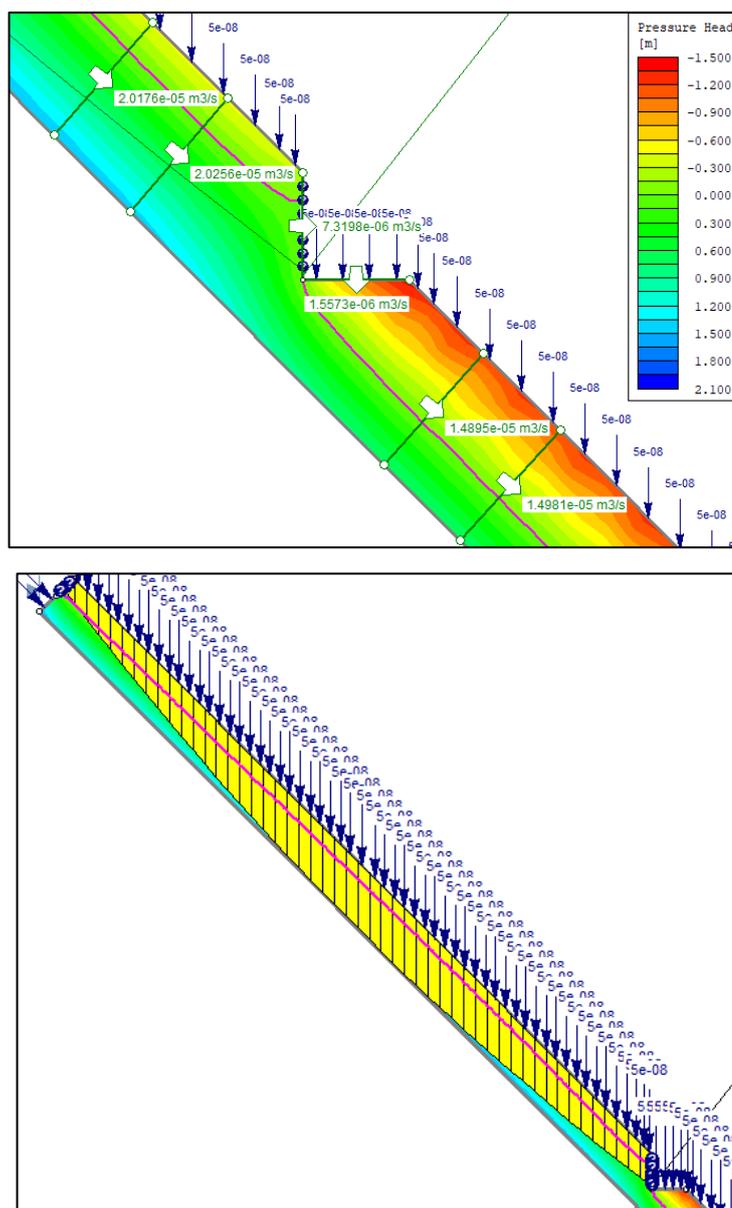


Figura 84-Andamento della superficie piezometrica per un deposito A4 e relativa superficie di scivolamento. (taglio al 50% di H)

I valori del fattore di sicurezza associato alle superfici di instabilità, al variare della profondità della sezione, sono riassunti nella Tabella 12.

Tabella 12- FS nel caso di presenza di taglio a profondità variabile con pendio con infiltrazione e intensità di ricarica.

	<b>30% del taglio</b>	<b>50% del taglio</b>
Tipo di deposito	<b>FS<sub>wet</sub></b>	<b>FS<sub>wet</sub></b>
A2	0,51	0,49
A3	0,39	0,43
A4	1,23	0,65

Ciò a sottolineare come la presenza di una precipitazione superficiale influisca sulla stabilità di versante, oltre al fatto che, una profondità della sezione di taglio maggiore riduca la resistenza del deposito in quella sezione stessa inducendo ulteriormente l'instabilità.

Per confronto ulteriore sono riportati i valori del fattore di sicurezza nella condizione di pendio asciutto o con intensità di ricarica superficiale, sempre al variare della profondità della sezione.

*Tabella 13-FS nel caso di presenza di taglio nella condizione asciutto e bagnato al variare della profondità della sezione.*

Tipo di deposito	30% del taglio		50% del taglio	
	FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>	FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>
A2	0,78	0,51	0,73	0,49
A3	0,60	0,39	0,58	0,43
A4	1,41	1,23	1,30	0,65

Inoltre è possibile in termini di FS confrontare anche i valori in assenza e presenza di taglio nella condizione di asciutto e bagnato.

*Tabella 14-FS nel caso senza e con il taglio nella condizione asciutto e bagnato al variare della profondità della sezione.*

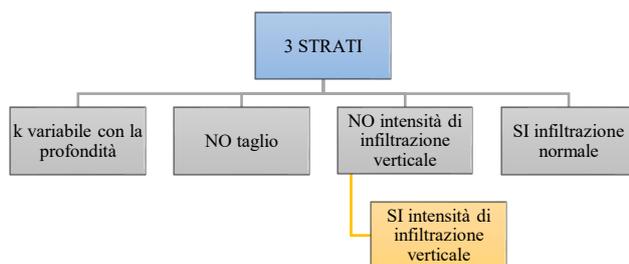
Tipo di deposito	Senza taglio		30% del taglio		50% del taglio	
	FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>	FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>	FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>
A2	0,77	0,51	0,78	0,51	0,73	0,49
A3	1,11	0,37	0,60	0,39	0,58	0,43
A4	1,41	1,35	1,41	1,23	1,30	0,65

Si osserva che il fattore di sicurezza diminuisce, non solo passando dalla condizione di pendio completamente asciutto a quella con presenza di intensità di pioggia, ma si riduce anche per presenza del taglio, e all'aumentare della sezione di discontinuità, che rappresenta un elemento che predispone l'instabilità. Dal punto di vista dell'analisi della filtrazione la presenza del taglio fa da richiamo alla superficie piezometrica.

### **3.3.B.2 Tre strati di terreno**

Dopo aver messo alla luce alcuni aspetti riguardo la filtrazione e la stabilità per un versante monostrato, facendo variare la tipologia di deposito e quindi le relative

caratteristiche geotecniche e idrauliche, si è passati ad assemblare i tre strati, con le stesse caratteristiche espresse precedentemente, in un unico modello.



Il modello è stato realizzato sempre tenendo conto di uno “stazionario equivalente” per il quale si è determinato che il tempo per raggiungere lo stato stazionario è dettato dalla permeabilità dello strato più profondo con permeabilità minore.

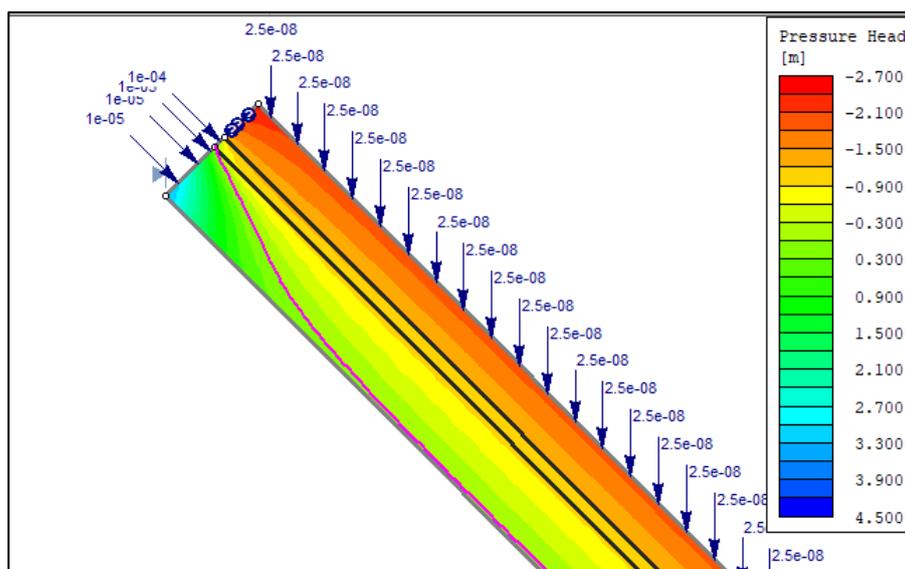
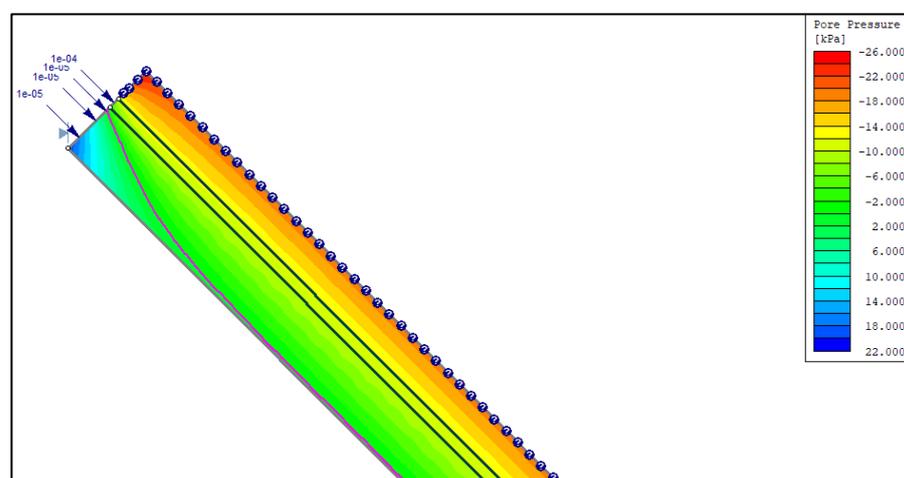


Figura 85- Caso senza e con infiltrazione verticale. Caso 3 strati.

Per la verifica di stabilità si è effettuato un confronto per il caso di pendio completamente asciutto e bagnato, per sottolineare ulteriormente quanto un'intensità di ricarica, in queste condizioni, influenzi la valutazione del fattore di sicurezza e l'individuazione della superficie critica di scivolamento.

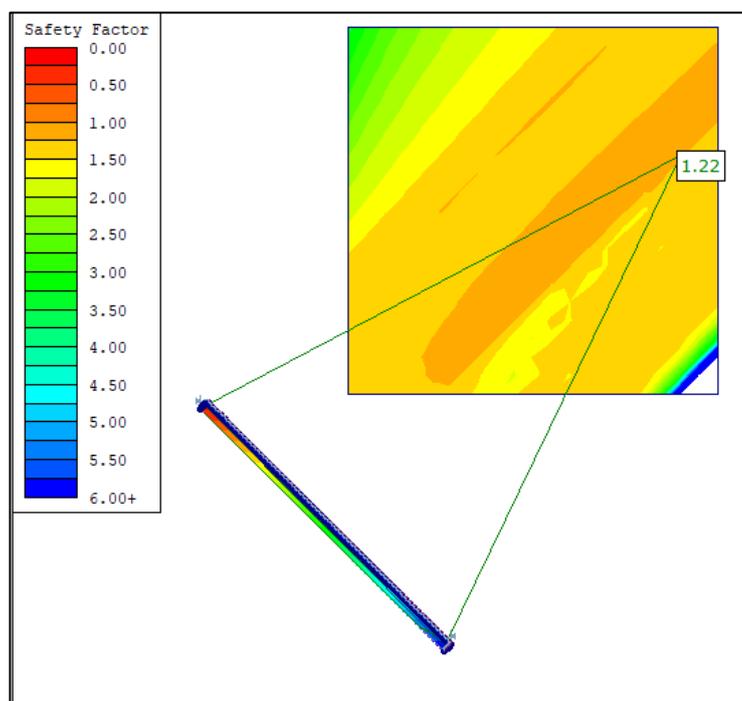


Figura 86-FS nel caso di pendio asciutto e individuazione della superficie critica di scivolamento.

Si osserva che nel caso di pendio privo di intensità di ricarica superficiale questo è stabile, il fattore di sicurezza è superiore, anche se di poco, al valore di normativa 1,2 e la superficie di scivolamento associata a FS interessa l'intero pendio.

I valori di FS sono riassunti nella Tabella 15.

Tabella 15- Valore di FS nel caso di pendio asciutto/ bagnato senza taglio.

FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>
1,22	1,20

Supponendo che sia stato realizzato uno scavo che interessi solo il primo strato di deposito, considerando che possa essere una pista o un sentiero percorribile a piedi o, da una mulattiera essendo ampia 1.4 m, si ripropone l'analisi con e senza presenza di intensità di pioggia, sempre nell'ipotesi di parziale saturazione dei depositi.

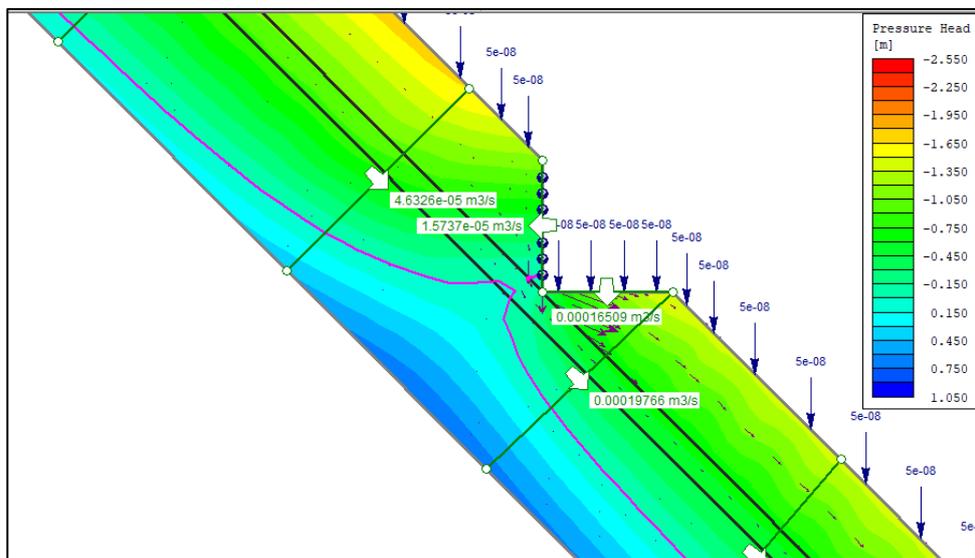
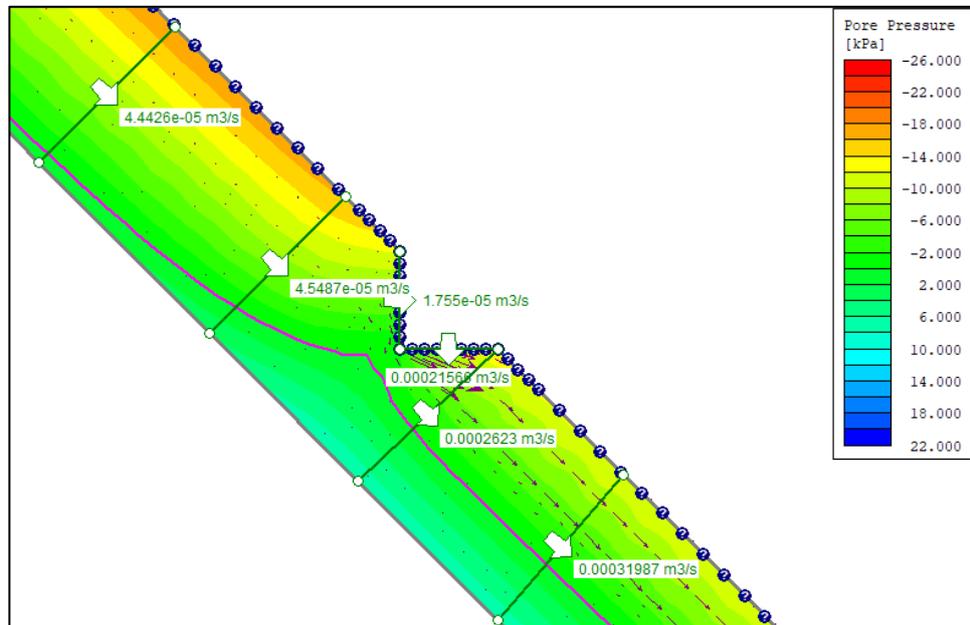
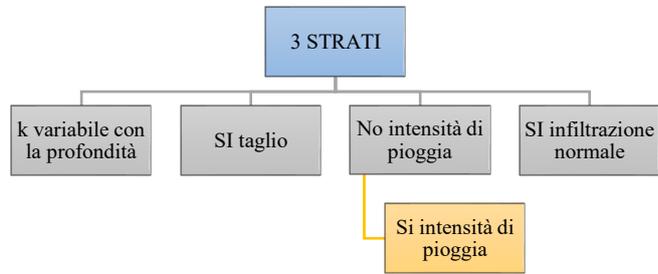


Figura 87-Andamento della superficie piezometrica e relativi vettori di flusso nei casi senza e con precipitazione. (taglio primo strato)

Vi è un sollevamento della superficie piezometrica in corrispondenza del taglio, un richiamo, dovuto a un aumento delle pressioni in basso particolarmente accentuato nel caso di intensità di ricarica superficiale.

Aumentando la profondità del taglio e supponendo che esso interessi anche il secondo strato di cinerite, pensando alla possibilità di realizzare una strada di circa 1.8 m, si nota dalle immagini che seguono che la superficie piezometrica subisce un richiamo in corrispondenza della sezione di taglio ed è influenzata dalla bassa permeabilità del deposito A4.

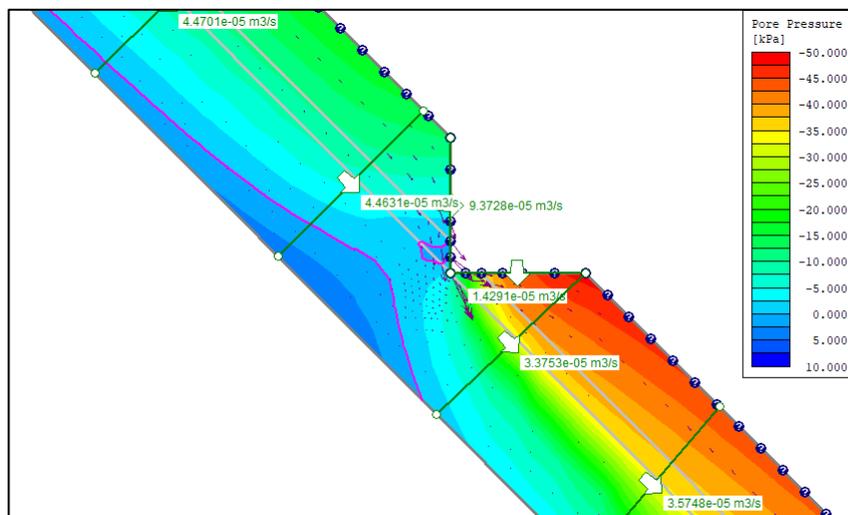


Figura 88-Caso in presenza di taglio al secondo strato senza intensità di pioggia.

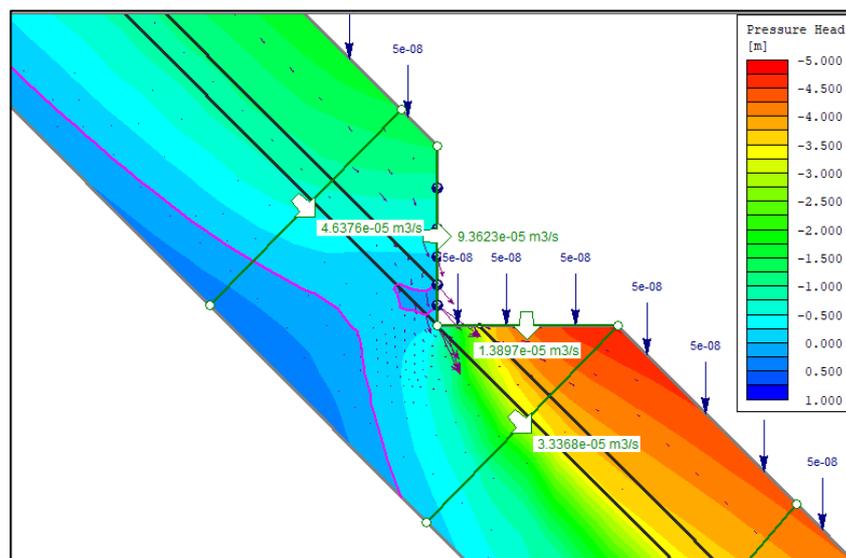


Figura 89-Caso in presenza di taglio al secondo strato con intensità di pioggia.

Per quanto riguarda la valutazione del coefficiente di sicurezza nel caso di versante asciutto e bagnato sono portati di seguito i valori relativi alla presenza di taglio.

Tabella 16-Valore di FS nel caso di pendio asciutto/ bagnato con taglio a profondità variabile.

Taglio	FS <sub>dry</sub>	FS <sub>wet</sub>
--------	-------------------	-------------------

1 strato	1,20	1,19
2 strati	1,19	1,18

Si nota che il FS oltre a diminuire, anche se lievemente, nel caso di aumento della profondità della sezione stradale, decresce anche nel passaggio da condizione completamente asciutta e bagnata, restando al limite o sotto il valore di normativa, ciò a confermare che il taglio rappresenta una zona critica per la stabilità e che ad aggravare la condizione vi sia la presenza dell'intensità di ricarica superficiale.

## CONCLUSIONI

---

Gli eventi che hanno interessato l'area di Sarno, hanno suscitato notevole interesse da parte della comunità scientifica che si è adoperata in ricerche sul campo, raccolta di dati e riorganizzazione della gestione dell'emergenza che si è trasformata in pianificazione territoriale e interventi di protezione civile.

Partendo da considerazioni effettuate dopo una disamina del materiale riguardante la ricostruzione degli eventi franosi del maggio '98 è stato possibile proporre, con l'impiego degli elementi finiti, un modello attendibile che, con livelli diversi di complessità permettesse di individuare le cause predisponenti, i fattori di innesco possibili, che hanno interessato le coltri piroclastiche campane dell'area di Sarno.

Sono state eseguite verifiche sia dal punto di vista della filtrazione che della stabilità per due diverse condizioni di versante, nel caso di completamente asciutto e nel caso di presenza di intensità di precipitazione. Da queste due condizioni si è passati ad un ulteriore livello di dettaglio inserendo la presenza di una sezione di discontinuità nel versante e osservando le variazioni del fattore di sicurezza e della stabilità.

Le verifiche di stabilità sono state eseguite con il metodo all'equilibrio limite di Morgenster&Price.

L'analisi dei flussi sotterranei ha permesso di individuare come la superficie piezometrica subisca l'influenza delle caratteristiche idrauliche del suolo, in particolare della permeabilità. Nel caso di singolo strato di deposito, al variare delle caratteristiche meccaniche, il versante presenta un maggiore livello di saturazione nei casi a bassa permeabilità (caso strato A4) a parità di condizioni al contorno.

Le simulazioni sono state effettuate nella condizione di stazionario equivalente, ovvero si è simulato il processo di per sé non stazionario in condizioni stazionarie, attraverso un'intensità di ricarica "equivalente". Valutato il tempo necessario affinché il flusso percorra il versante modellato (tutto o fino al taglio), l'intensità equivalente è stata calcolata come quel valore che moltiplicato per il tempo di percorrenza restituisca l'altezza di precipitazione che si è voluta considerare.

Ciò ha evidenziato l'istaurarsi di un moto uniforme nel caso privo di discontinuità con superficie piezometrica parallela al versante, e un richiamo della superficie stessa in presenza di taglio lungo la sua sezione verticale.

Inoltre constatato che il taglio rappresenta un elemento di richiamo per la superficie piezometrica, aumentando ulteriormente la profondità della sua sezione, si sono osservati maggiori flussi in uscita dalla sezione.

Le analisi di stabilità all'equilibrio limite hanno permesso, in base a quanto prescritto da normativa, di valutare il valore numerico del fattore di sicurezza e di individuare le possibili aree di instabilità specialmente nei casi di simulazioni effettuate in presenza di taglio stradale.

Si è evidenziata una diminuzione del fattore di sicurezza globale nel passaggio dalla condizione di pendio completamente asciutto a pendio con inserimento di intensità di ricarica. I valori inferiori a 1,2 per il caso asciutto trovano giustificazione nelle caratteristiche meccaniche dei depositi.

Anche nel passaggio alla condizione con taglio, elemento che predispone all'instabilità, si è individuato un valore minore del fattore di sicurezza rispetto al caso continuo, ed inoltre la superficie di scivolamento critica associata è individuata in corrispondenza della sezione di taglio o a monte di essa interessando comunque la verticale della sezione, individuando queste come aree del versante maggiormente predisposte al fenomeno franoso.

In presenza di materiali come la pomice dello strato A3, privo di coesione ma con elevato angolo di resistenza al taglio si è individuata una brusca variazione del fattore di stabilità in presenza di intensità di ricarica superficiale confrontata con la condizione di asciutto. Il fattore di sicurezza passa da 1,11 per un versante continuo asciutto a 0,37 per pendio bagnato.

Un'ulteriore sviluppo del presente lavoro potrebbe richiedere di effettuare un'analisi anche in condizioni non stazionarie, invece che con il modello "stazionario equivalente" che è stato intrapreso.

Il presente lavoro ha permesso di mettere ulteriormente in evidenza, avendone conferma in parte anche dalla modellazione, come la pratica e realizzazione di alcune opere da parte dell'uomo, senza coscienza della modifica che si arreca alla natura, unite alla distruzione della vegetazione per sostituzione con colture più redditizie, la mancanza di manutenzione dei versanti con tagli per la realizzazione di percorsi carrabili, la mancanza di manutenzione e pulizia dei canali di drenaggio e della rete idrografica, problematiche che erano state messe alla luce anche in periodi precedenti all'evento, e tutte queste "concause antropiche" abbiano fatto scivolare su un cuscinetto di acqua lo strato di materiale piroclastico dalle montagne a valle, rendendo possibile la formazione di quella colata di fango distruttrice che ha travolto interi paesi durante l'evento di Sarno del 1998.

L'aver trattato questo argomento ha permesso di riflettere come un problema, quale il rischio idrogeologico, in Campania e in Italia, sia così diffuso e attuale che bisognerebbe dagli errori del passato far nascere giuste convinzioni e motivazioni per non ripetere le stesse esperienze e negligenze, occorrerebbe agire e pensare diversamente attuando un percorso di messa in sicurezza del territorio affinché possano, almeno in parte, non verificarsi questi eventi.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Baum R.L, Savage W.Z. & Godt J.W. (2002), TRIGRS – A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability Analysis. USGS. Open file Report 02-424.
- [2] Brancaccio L., Cinque A., Russo F., Sgambati D. - Le frane del 5 - 6 maggio 1998 sul gruppo montuoso Pizzo d' Alvano (Campania): osservazioni geomorfologiche sulla loro distribuzione e sulla dinamica delle connesse colate. - Quaderni di geologia applicata.
- [3] Bilotta E., Cascini L., Foresta V., Sorbino G., 2005. Geotechnical characterisation of pyroclastic soils involved in huge flowslides. Geotechnical and geological engineering, Springer eds, 23: 365-402.
- [4] Capparelli G., Versace P., Analysis of landslide triggering conditions in the Sarno area using a physically based model (2014).
- [5] Cascini, L.; Cuomo, S.; and Pastor, M., "The role played by mountain tracks on rainfall-induced shallow landslides: a case study" (2008). International Congress on Environmental Modelling and Software. 206.
- [6] Cascini L. Cuomo S. Pastor M., Inception of debris avalanches: remarks on geomechanical modelling.
- [7] Cesari F. – Introduzione al Metodo degli Elementi Finiti – Pitagora Editrice, Bologna, 2002.
- [8] Croke J. and Monckler S., Gully initiation and road to stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia, Earth Surf. Process. Landforms 26, 205–217 (2001).
- [9] Del Prete, M., Guadagno, F.M., Hawkins, A.B., 1998. Preliminary report on the landslide of 5 May 1998, Campania, southern Italy. Bull. Eng. Geol. Environ. 57, 41– 50.
- [10] Di Crescenzo G., De Falco M., Iervolino V.M., Rinaldi S., Santangelo N. e Santo A., Proposal of a new semiquantitative methodology for flowslides triggering susceptibility assessment in the carbonate slope contexts of Campania (southern Italy), Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1 (2008).
- [11] Formetta G., Capparelli G., Rigon R, Vercace P. Modellazione di fenomeni franosi superficiali indotti da pioggia lungo l'autostrada Salerno-Reggio Calabria-

- Aspetti idrologici e idraulici per il controllo dei fenomeni franosi IDRA2014, 177-188.
- [12] Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.: Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley&Sons, 1993.
- [13] Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S., 1994, Predicting the permeability function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 3, 533-546.
- [14] Fredlund, D. G. (2000). "The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering." Can. Geotech. J. 37: 963–986.
- [15] Groundwater Module in Slide 2D finite element program for groundwater analysis- Verification Manual © 2017 Rocscience Inc.
- [16] Guadagno FM, Forte R, Revellino P, Fiorillo F, Focareta M (2003a). Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: the role of morphological slope discontinuities and the development of failure. Geomorphology (in press).
- [17] Guadagno, F.M., Martino, S., Scarascia Mugnozza, G., 2003. Influence of man-made cut on the stability of pyroclastic covers (Campania-Southern Italy): a numerical modelling approach. Environ. Geol. 43, 371–384.
- [18] Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G., 2000, MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User guide to modularization concepts and the ground-water flow process, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92.
- [19] Iverson, R.M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research, 36: 1897-1910.
- [20] Jing L. – A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering – International Journal of Rock & Mining Sciences, vol. 40, pag. 283-353, 2003
- [21] Mancini M., Rosso R. & Rulli M.C., Soglie pluviali di frana superficiale, Il servizio di piena 101-108.
- [22] Modflow-2005 release note  
[http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW-2005\\_v1.11.00/release.txt](http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW-2005_v1.11.00/release.txt)
- [23] Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. 1994. A physically based model topographic control on shallow landsliding. Water Resources Researches 30: 1153-1171.

- [24] Negishi J.N. et al., Ecological roles of roadside fern (*Dicranopteris curranii*) on logging road recovery in Peninsular Malaysia: Preliminary results *Forest Ecology and Management* 224 (2006) 176–186
- [25] Revellino, P., Hungr, O., Guadagno, F.M., Evans, S.G., 2004. Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania Region, Italy. *Environ. Geol.* 45, 295– 311.
- [26] Revellino, P., Hungr, O., Guadagno, Criteri morfologici e modellazione dinamica nella valutazione della suscettibilità da frana lungo versanti carbonatici dell'Appennino Campano. *Giornale di Geologia Applicata* 3 (2006) 159-166, doi: 10.1474/GGA.2006-03.0-21.0114
- [27] Rigon R., Bertoldi G., Over M.T. Geotop: a distributed hydrological model with coupled water and energy budgets, 32-388, 2006.
- [28] Rocscience Inc., 2015, Slide 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes, *Slope Stability Verification Manual Part 2*.
- [29] Rosso R. A physically based model for the hydrological control on shallow landsliding. *Water Resources Researches*, vol.42, 2006.
- [30] Simoni S., Zanotti F., Rigon R, Squarzoni C., Approccio probabilistico alla determinazione dell'innescio di frane superficiali con un modello accoppiato idro-geotecnico: GEOTOP-SF –IDRA 2006.
- [31] Slide 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes *Slope Stability-Verification Manual* © 2016 Rocscience Inc.
- [32] Sorbino G., Sica C., Cascini L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models, *Nat. Hazards*, 53,313-332,2010
- [33] Tiso C., Bertoldi, G. Rigon R., Il modello GEOTop-SF per la determinazione dell'innescio di fenomeni di franamento e di colata- *Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004-RIVA/TRIENT*, 231-240.
- [34] Van Genuchten, M. Th., 1980, A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.
- [35] Versace P., Caruso A., Cassetti M., Capparelli G. -Il presidio territoriale e la gestione dell'emergenza a Sarno -Quaderni del CAMIlab.
- [36] Vittori E., Fumanti F., Ligato D., Trigila A. (2000) *Relazione Tecnica relativa ai sopralluoghi nell'area colpita dalla crisi idrogeologica dei giorni 15-16 dicembre 1999 nella Valle Caudina, Comuni di Cervinara e S. Martino Valle Caudina (AV)*.

- [37] Wu, W. and Sidle, R. C.: A distributed slope stability model for steep forested basin, *Water Resour. Res.*, 31, 2097–2110, 1995.
- [38] Ziegler A.D. et al., Toward understanding the cumulative impacts of roads in upland agricultural watersheds of northern Thailand- *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104 (2004) 145–158

# APPENDICE

## MODFLOW (MODEL MUSE)

MODFLOW è sviluppato da USGS e ha come interfaccia utente grafica ModelMuse, nello specifico è un codice di calcolo che utilizza un modello alle differenze finite e permette di simulare la dinamica delle acque sotterranee.

ModelMuse consente all'utente, tramite la rappresentazione nelle viste superficiali, frontale e laterale del dominio di punti, linee e/o poligoni, di comporre l'input nello spazio del modello. È possibile dare a queste entità delle formulazioni che definiscono la loro estensione nel piano, consentendo agli oggetti di essere tridimensionali. Viene visualizzata e rappresentata una griglia tridimensionale con maglia regolare e irregolare con la possibilità di poter attribuire ad ogni cella delle caratteristiche differenti tali da permettere una maggiore fedeltà della realtà.

Inoltre, dà la possibilità di inserire e sovrapporre alla griglia di calcolo delle immagini raster (ad esempio una base cartografica) per avere una più realistica visione spaziale dell'area investigata.

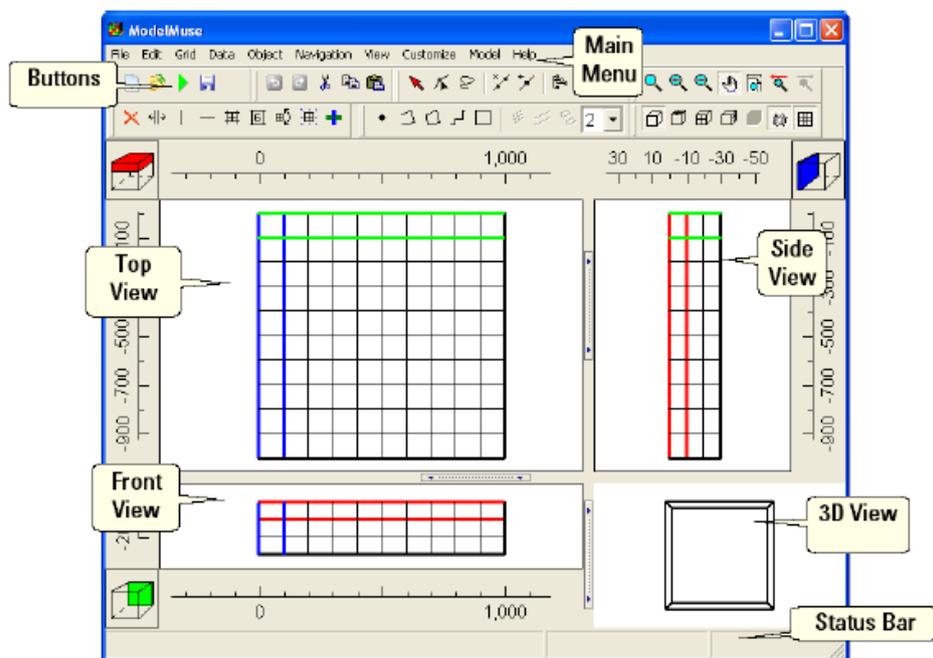


Figura 90-Schermata principale- MODFLOW2005 (ModelMuse)

## Il codice e la griglia di calcolo

Il codice di calcolo MODFLOW simula il flusso dell'acqua attraverso un mezzo poroso utilizzando il metodo delle differenze finite.

L'equazione differenziale di diffusione che regola il processo è la seguente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

In cui i parametri sono:

- $x, y, z$  le direzioni principali;
- $t$  la variabile tempo [T];
- $h$  il carico idraulico [L];
- $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ , le permeabilità lungo le direzioni principali [L T<sup>-1</sup>];
- $W$  il termine di flusso che tiene conto dell'eventuale pompaggio e della ricarica (o altre sorgenti) [T<sup>-1</sup>];
- $S_s$  il coefficiente di immagazzinamento specifico [L<sup>-1</sup>].

Definita una generica differenza finita  $\Delta x$  (dimensione della singola cella), l'equazione del flusso che attraversa l'interfaccia tra una cella e l'altra diventa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left( k_x \frac{(h_3 - h_2)}{\Delta x} + k_x \frac{(h_2 - h_1)}{\Delta x} \right)$$

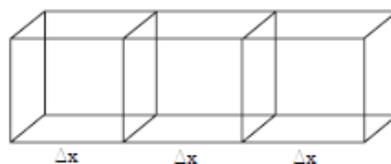


Figura 91-Equazione del moto attraverso le singole celle

Il metodo alle differenze finite è connesso strettamente all'equazione di continuità, che esprime la conservazione della massa: la somma dei flussi entranti e uscenti da ogni cella è uguale alla variazione di volume immagazzinato o rilasciato nell'unità di tempo.

L'insieme delle celle realizza la griglia proprio su cui il software effettua i calcoli e non è altro che un insieme di righe e di colonne; le dimensioni di questi elementi vengono definiti dall'utente in interfaccia mentre l'altra dimensione lo spessore ad esempio degli strati di un terreno sono definite specificando la quota del "top" e del "bottom" di ogni cella.

Il sistema per la risoluzione delle equazioni, una volta specificata la geometria del dominio e definite le condizioni al contorno e le condizioni iniziali., viene risolto per ogni cella per via iterativa.

Per permettere la risoluzione in MODFLOW per via iterativa, i calcoli vengono effettuati per ogni blocco nel centro del nodo e per permettere anche una maggiore precisione è possibile infittire i nodi nelle aree a cui siamo maggiormente interessati, in relazione al tipo di geometria che si presenta.

### **Le condizioni al contorno**

Le principali opzioni per le condizioni al contorno che si possono utilizzare nel codice MODFLOW sono:

- *Constant head (condizione di Dirichlet)*: fissa a priori il carico idraulico; in genere le *constant head cells* corrispondono al contatto con corpi idrici a superfici libere (fiumi e laghi).
- *No-flow (condizione di Neumann)*: fissa la derivata del carico quindi un flusso che attraversa la superficie di bordo
- *General head (condizione mista di Cauchy)*: simula la presenza di un serbatoio di capacità infinita ad una distanza prefissata dai confini del modello. Lo scambio d'acqua tra modello e serbatoio avviene tramite un ipotetico condotto a permeabilità nota (pari a quella della cella). La portata che entra o esce dalla cella dipende dalla differenza di carico idraulico e dalla cosiddetta conduttanza. Il flusso entrante o uscente è definito dalla seguente relazione:

$$Q = C (h_f - h_s)$$

In cui:

- $h_f$  è il carico idraulico nella cella [L];
  - $h_s$  è il carico idraulico simulato dal modello [L];
  - $C$  è la conduttanza della cella [ $L^2 T^{-1}$ ].
- *River* (condizione mista di *Cauchy*): simula l'azione dei fiumi e la loro interazione con la falda sia come elementi drenanti che alimentanti. Le equazioni utilizzate sono le stesse delle *general head cells*, con l'aggiunta però dei parametri che rappresentano lo spessore e la conducibilità idraulica dei sedimenti che costituiscono il letto del fiume.
  - *Drain* (condizione mista di *Cauchy*): simula la presenza di un dreno che asporta acqua dal modello; è simile alla condizione “*River*” con la differenza che non può mai alimentare la falda. L'acqua viene rimossa dal modello solo quando il carico idraulico è maggiore della quota del dreno.

MODFLOW presenta una struttura a moduli formata da “*packages*” ciascuno dei quali tratta un diverso aspetto idrologico, dando la possibilità di inserire in maniera semplice i dati per la simulazione. Nel *Global package* sono inseriti i dati che descrivono la simulazione nel suo complesso ovvero:

- il tipo di simulazione: a regime stazionario (0) o a regime transitorio (1);
- l'identificazione del tipo di cella: attiva, interna al modello (1); inattiva esterna al modello (-1), di contorno (0);
- la determinazione della lunghezza dei passi temporali di calcolo (*Stress Periods*), un metodo alle differenze finite si sa è fortemente influenzato dal timestep;
- e le condizioni iniziali.

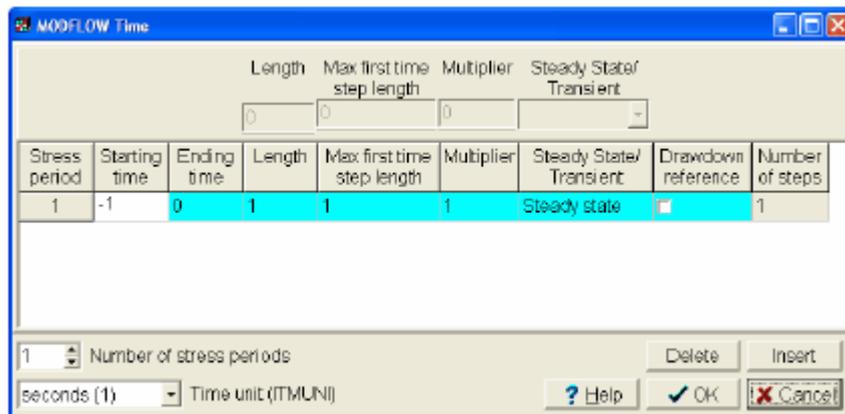


Figura 92-Finestra per la definizione dello stress period. MODFLOW2005

Ci sono tante altre opzioni che permettono di raffinare il modello in base al tipo di problema che si deve modellare.

All'interno del *Layer properties flow package (lpf)*, ad esempio, sono inserite le informazioni generali (griglia e dati idrologici) del modello. L'opzione *Well (wel) package* invece governa la schematizzazione dei pozzi all'interno del modello. *Recharge (rch) package* è un'opzione che viene inserita nel caso di ricarica della falda dovuta alla pioggia ed all'infiltrazione superficiale. L'*Evapotranspiration (evt) package* considera il fenomeno dell'evapotraspirazione delle piante e l'evaporazione diretta dell'acqua mentre il *River (riv) package* permette di considerare le interazioni falda-acque superficiali. Il modello viene calibrato e sottoposto ad analisi di validazione.

Una maggiore specifica sulle diverse opzioni e funzioni del software sono presenti nel manuale “*ModelMuse—A Graphical User Interface for MODFLOW–2005 and PHAST*” di Richard B. Winston.

## **SLIDE (ROCSCIENCE)**

SLIDE (ROCSCIENCE, 2015) è un programma 2D per le verifiche di stabilità dei pendii, all'equilibrio limite, per valutare il fattore di sicurezza o la probabilità di rottura, di superfici di rottura circolari o non circolari in terreno o pendii rocciosi. Le due dimensioni su cui lavora sono contenute in un piano verticale.

SLIDE, comprende anche l'analisi agli elementi finiti per modellare le filtrazioni sotterranee sia per condizioni di tipo stazionario che transitorie. Il programma permette di svolgere le simulazioni su due cartelle principali, una relativa all'analisi di stabilità vera e propria, attraverso la quale è anche inserita la geometria del modello (*Slope Stability*), ed un'altra relativa alla gestione e l'inserimento delle condizioni idrauliche necessarie per l'analisi di filtrazione (*Groundwater*).

L'analisi dei moti di filtrazione è completamente disgiunta dall'applicazione di analisi di stabilità dei versanti infatti anche a video vengono mostrate all'utente in due schermate separate in modo da poter gestire separatamente il problema cui si è interessati e quindi è possibile eseguire l'analisi delle filtrazioni senza necessariamente eseguire una analisi di stabilità.

### **Il codice di calcolo e la mesh**

È possibile scegliere di effettuare l'analisi in stazionario, analisi transitoria o sia stato stazionario che transitorio. Per l'analisi in condizioni stazionarie, bisogna impostare il metodo di calcolo agli elementi finiti *steady state*; mentre per l'analisi in transitorio, bisogna selezionare l'opzione di calcolo in transitorio nelle impostazioni avanzate specificando il numero di *stages* e il periodo temporale per ognuno di essi.

Nel caso si esegua anche l'analisi di stabilità i confini del modello sono definiti prima e poi utilizzati anche per l'analisi dei flussi; i confini del modello possono essere definiti e modificati solo quando la modalità di analisi è impostata sul modulo di stabilità.

La geometria viene definita all'inizio importando le coordinate o dando le coordinate direttamente del contorno del modello e al suo interno le stratigrafie che schematizzano i diversi tipi di terreno.

Essendo un'analisi agli elementi finiti è necessario, dopo aver definito il contorno, creare una mesh che può essere automaticamente generata dal software discretizzando il dominio di calcolo interno ai confini del modello, oppure può essere scelta dall'utente in base alla tipologia di geometria e all'accuratezza di calcolo che si vuole ottenere. È possibile variare il numero degli elementi finiti e la tipologia di elementi (triangolari a 3 o 6 nodi o quadrilateri a 4 o 8 nodi) ed inoltre è possibile aumentare il grado di infittimento della mesh o diminuirlo in una determinata area del dominio a seconda di dove si vuole più o meno dettaglio di informazioni.

### **I materiali e le proprietà del mezzo**

Nell'interfaccia corrispondente all'analisi di stabilità è possibile definire le caratteristiche dei materiali per ognuno dei diversi strati del modello. Ad essi viene richiesto di attribuire le proprietà meccaniche (il peso specifico, la coesione e l'angolo di resistenza al taglio), mentre per la corrispettiva analisi delle filtrazioni è richiesta la definizione delle proprietà idrauliche dei materiali a seconda se si sia scelta un'analisi stazionaria o transitoria. Per l'analisi di filtrazione si può definire il valore di permeabilità  $K_s$  (conducibilità idraulica) in condizioni di terreno saturo per ogni strato del modello e sono anche disponibili diversi modelli per definire la permeabilità nei mezzi porosi insaturi. Per ogni materiale è sempre specificata la permeabilità  $K_s$  per terreno saturo.

Può essere considerata anche un'anisotropia nella permeabilità in cui la permeabilità varia con la direzione. In questo caso va specificato un fattore  $K_2/K_1$  che permettono la definizione della permeabilità relativa nelle due direzioni ortogonali e dove  $K_1$  equivale alla permeabilità  $K_s$  in condizioni di terreno saturo ed inoltre viene richiesto di specificare l'angolo che individua la direzione della permeabilità stessa.

Per la zona insatura il software dispone di modelli di funzioni di permeabilità espressa in funzione della matrice di suzione ad esempio modelli di: Brooks e Corey (1964), Fredlund e Xing (1994), Gardner (1956), e Van Genuchten (1980) oppure vi è la possibilità da parte dell'utente di definirli o importarli nel software.

Con il modello *Semplice*, viene considerata automaticamente dal programma una funzione di permeabilità in condizioni insature in base alla permeabilità saturo  $K_s$  che è stata assegnata e al tipo di terreno selezionato. Per il modello *Semplice*, è possibile

scegliere uno dei seguenti tipi di terreno: *Generale, Sabbia, Limo, Argilla, Medio impasto*.

Per il tipo di modello *Generale* la permeabilità per l'insaturo viene ridotta di un ordine di grandezza nel range di valori della matrice di suzione e resta costante per i valori più alti di suzione. Per i tipi di terreno specifici (sabbia, limo e argilla) le curve medie sono state individuate dai valori tipici di letteratura.

## Le condizioni al contorno

Successivamente alla creazione del modello è necessario definire le condizioni al contorno del modello impostando ancora una volta, a seconda di un'analisi stazionaria o transitoria, le condizioni al contorno adeguate.

Quando viene generata la mesh le condizioni al contorno sono applicate in modo automatizzato dal software: incognite ( $Unknown P = 0$  o  $Q = 0$ ) lungo la parte superiore o inclinata (pendii o argini) e lungo i confini sinistro, destro e inferiore del perimetro esterno la condizione impermeabile (Zero Nodal Flow).

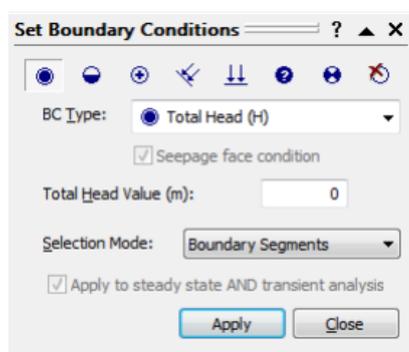


Figura 93-Box delle condizioni al contorno.

Le condizioni che possono essere applicate ai nodi, ai vertici o ai segmenti interni o esterni e sono: l'altezza della superficie freatica, livello idrico nel fiume o nella falda (*Total head* [L]) ed è un'opzione specializzata per definire le condizioni al contorno del Carico Totale che variano linearmente lungo un confine, la pressione (*Pressure head* [L]), il flusso (*Nodal Flow Rate* [L<sup>3</sup>/T]), l'infiltrazione (*Normal o vertical infiltration*, [L/T] applicabile solo lungo la *seepage face* e non ai singoli nodi). Bisogna avere in mente che quando si assegna una condizione di "*Seepage Face*" o "*Unknown*

*Boundary Condition* " per un nodo o un segmento, in quella sezione non si può avere una pressione maggiore di zero.

L'infiltrazione può essere indicata in direzione verticale, o normale ai confini (ad esempio precipitazioni sul versante). Si evidenzia che le dimensioni del parametro infiltrazione sono [L/T]. Questo perché l'infiltrazione rappresenta un volume di fluido, in entrata (o in uscita), per unità di area.

Dopo aver calcolato i flussi è possibile visualizzare i risultati delle analisi, selezionando l'opzione *Interpret*. I risultati in termini di carichi idraulici, pressioni, velocità (orizzontale, verticale e totale), gradiente idraulico (orizzontale, verticale e totale) e permeabilità (orizzontale e verticale) sono visualizzabili ed esportabili sotto forma di output grafici, immagini o tabelle.

Se i risultati del modello di filtrazione sono soddisfacenti, allora si può cambiare la modalità di analisi e procedere con l'analisi di stabilità.

I risultati di analisi di stabilità e di filtrazione possono essere visualizzati anche contemporaneamente sulla stessa schermata.

### **Condizioni per la verifica di stabilità**

Per quanto riguarda la verifica di stabilità di un pendio essa viene effettuata con l'ausilio del metodo all'equilibrio limite globale. Il metodo all'equilibrio limite consiste proprio nello studiare il corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di qualsiasi forma; da questo equilibrio si determinano le tensioni da taglio che vanno confrontate con la resistenza disponibile, valutata tramite il criterio di rottura di Coulomb. La formula per il calcolo del coefficiente di sicurezza può essere espresso come segue:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau}$$

Il metodo è implementato all'interno del software Slide 2D che permette di individuare, conoscendo la resistenza al taglio del terreno, un coefficiente di sicurezza in maniera automatizzata. Unitamente alla determinazione di un fattore di sicurezza viene individuata la superficie di scivolamento critica ovvero la superficie

appartenente al pendio che risulta più critica per lo scivolamento. È necessario ricordare inoltre che l'analisi mediante tale software non è perfetta di affrontare la tridimensionalità del problema, infatti viene utilizzato un metodo semplificato.

L'algoritmo di calcolo utilizzato impiega diversi modelli dell'equilibrio limite, come Bishop (1955), Fellenius, Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1973) sono tutti riconducibili al "General equilibrium method (GLE)" di Fredlund et al. (1981). Facendo cenno ai metodi principalmente utilizzati, la differenza consiste nella risoluzione delle equazioni. I metodi di Fellenius e Bishop considerano come equazione di equilibrio quella a rotazione (più precisa nel caso si ha a che fare con una superficie di scivolamento approssimabile ad una circolare) e tipicamente trascurano quella a traslazione orizzontale. Risolvono (n+1) equazione in (n+1) incognite. Il metodo di Janbu invece facendo riferimento all'equilibrio delle forze è adatto a qualsiasi tipo di superficie di scivolamento e risolve 2n equazioni in 2n incognite. Morgenstern & Price è un metodo molto accurato che a differenza degli altri metodi risolve anche l'equazione del momento per superfici di forma qualsiasi; risolve 3n equazioni in 3n incognite. Un altro metodo implementato nel pacchetto software è Sarma, metodo anch'esso accurato e soddisfa tutte le equazioni di equilibrio sempre per qualsiasi forma di superficie di scivolamento ma ha come ipotesi la determinazione del fattore di sicurezza tramite l'accelerazione di ogni singolo concio con un processo iterativo svolgendo sempre 3n equazioni in 3n incognite.

Sono metodi che adoperano il metodo dei concio, dividendo il corpo rigido in concio, e risolvendo

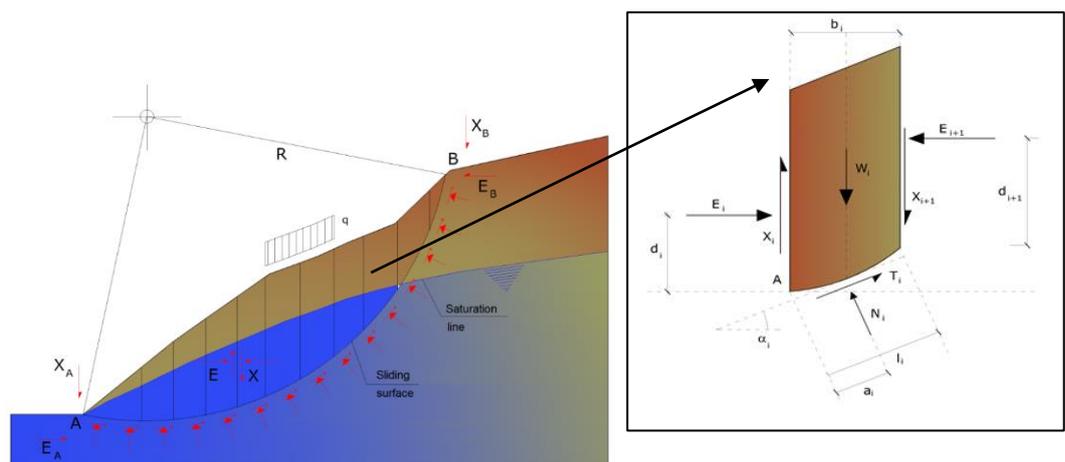


Figura 94-Metodo dei concio. Esempio

La differenza tra questi modelli consiste quindi nelle semplificazioni e assunzioni fatte per avere una riduzione del numero di incognite del problema, anche se si è dimostrato da studi comparativi che i valori dei fattori di sicurezza calcolati generalmente differiscono di circa il 10%.

La determinazione del fattore di sicurezza può essere utile per valutare le condizioni di instabilità:

- Un valore inferiore a 1 rappresenta una condizione di instabilità;
- Valori superiori a 1 indicano condizioni a favore della stabilità.