

IL RUOLO DELLA STRATIGRAFIA SUPERFICIALE NELLE ANALISI NUMERICHE DI STABILITÀ DI FRANE IN TERRENI PIROCLASTICI

Luca Crescenzo

Università degli Studi di Salerno

lcrescenzo@unisa.it

Michele Calvello

Università degli Studi di Salerno

mcalvello@unisa.it

Sommario

La modellazione numerica della fase di innesco di colate detritiche pluvio-indotte in coltri di terreno di origine vulcanica è particolarmente complessa a causa delle caratteristiche meccaniche ed idrauliche dei materiali coinvolti. In questo studio vengono analizzate le condizioni di stabilità e il regime delle acque sotterranee che si instaurano, in condizioni transitorie, all'interno di un pendio molto acclive in cui la stratigrafia superficiale e le caratteristiche geotecniche dei terreni sono ben caratterizzate. In particolare, vengono qui illustrate una serie di analisi agli elementi finiti di tipo accoppiato, che applicano le precipitazioni misurate come condizioni idrauliche al contorno per un intervallo temporale di 1 mese fino al momento del registrato innesco del fenomeno considerato, finalizzate a quantificare la rilevanza della caratterizzazione meccanica e idraulica degli strati di terreno più superficiali per la risposta tenso-deformativa del pendio.

1. Introduzione

Una vasta area nei dintorni del complesso Somma-Vesuvio è caratterizzata da coperture di origine piroclastica. Tali coltri si trovano usualmente in condizioni parzialmente sature con valori di suzione di matrice che tipicamente assicurano la loro stabilità anche su pendii notevolmente acclivi e che però a seguito di eventi pluviometrici particolarmente intensi possono dare origine a fenomeni franosi che evolvono in colata, con conseguenze spesso catastrofiche (Cascini et al., 2015). La modellazione della fase d'innesco di questi fenomeni è complessa (e.g., Cascini et al., 2013) ed è fortemente condizionata sia dell'interazione suolo-atmosfera (e.g., Tagarelli and Cotecchia, 2020) sia delle caratteristiche idrauliche dei terreni coinvolti, quali la permeabilità idraulica e il grado di saturazione in condizioni di parziale saturazione. In questo studio si farà riferimento ad una colata detritica che si è innescata nel periodo invernale come scorrimento superficiale in un pendio molto acclive caratterizzato da una stratigrafica complessa, ma ben caratterizzata, a seguito di diversi giorni di precipitazioni particolarmente intense.

2. Caso di studio

Il fenomeno franoso oggetto di studio ha interessato una porzione di versante con acclività media tra 38° e 40°, lunga circa 30 m e larga altrettanto, con un dislivello di circa 24 m tra la zona del coronamento e una paratia che delimita il versante a valle (*Fig 1*). Il volume complessivo di terreno mobilitato risulta pari a circa 1700 m³ e la superficie di scorrimento, compresa all'interno di strati di terreno di origine piroclastica, si attesta intorno ai 2 m di profondità rispetto al piano campagna. A seguito dell'innesco, il fenomeno franoso si è propagato verso valle impattando un edificio residenziale, con velocità tale da demolire delle tompanature e invadere un piano dell'edificio.

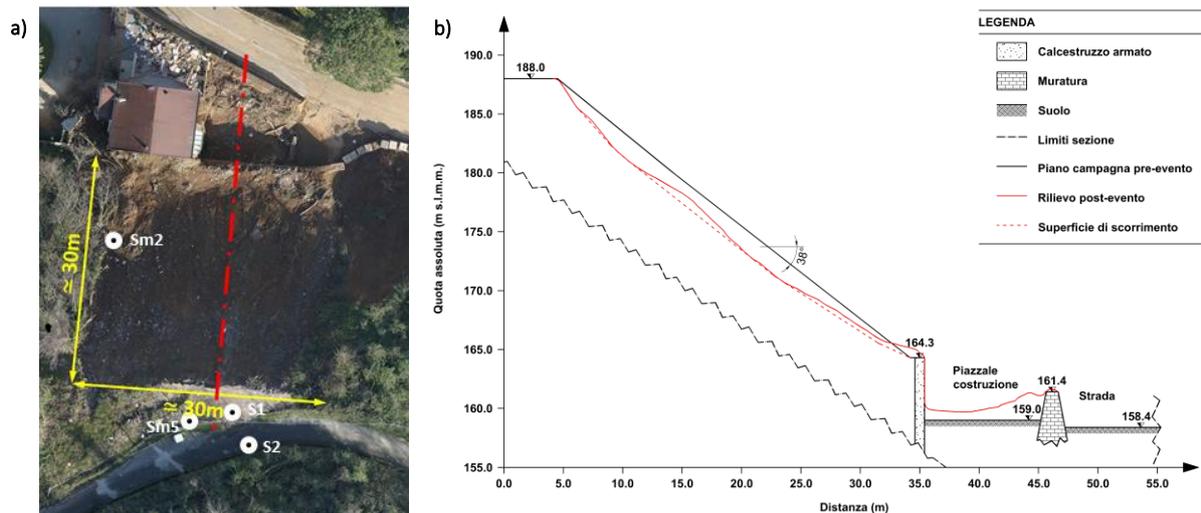


Fig 1. Geometria del fenomeno franoso oggetto di analisi: a) pianta con sezione di riferimento in rosso; b) sezione topografica con rilievo post-evento

L'analisi pluviometrica è stata condotta utilizzando le misure registrate da una stazione della rete di monitoraggio del centro funzionale regionale di protezione civile che si trova vicina al sito oggetto di studio. La Fig 2 mostra l'andamento negli anni delle altezze di precipitazione cumulate per i 19 anni idrologici antecedenti l'evento. Si può notare come per l'anno idrologico in cui è avvenuto l'evento (Anno idrologico 20), la cumulata fino al giorno dell'inscasso del fenomeno franoso mostra il valore più alto mai registrato nell'intero arco temporale esaminato. Considerando le precipitazioni antecedenti più prossime all'evento, dai 10 minuti fino alle 72 ore (3 giorni), i dati mostrano che l'evento pluviometrico è caratterizzato da valori sensibilmente inferiori rispetto alle medie dei massimi annuali per quanto riguarda le altezze di precipitazione fino a 48 ore, mentre per la durata di 72 ore assume un valore decisamente superiore alla media dei massimi, valore che è stato superato solo quattro volte in 20 anni.

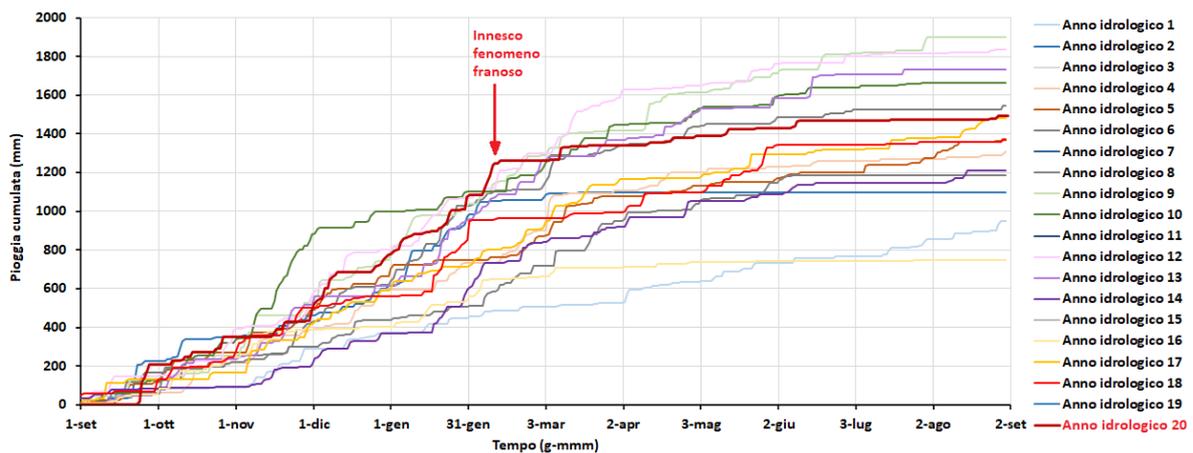


Fig 2. Precipitazione cumulata per gli anni idrologici nel periodo di riferimento

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni coinvolti nell'evento franoso oggetto d'interesse sono state condotte una serie di prove di caratterizzazione fisica, meccanica e idraulica a diverse profondità su campioni prelevati in corrispondenza delle verticali indicate in Fig 1.

3. Modello numerico

Allo scopo di esaminare il moto di filtrazione che si instaura all'interno del pendio per effetto

dell'applicazione delle piogge come condizione idraulica al contorno sulla superficie topografica, e conseguentemente valutare le condizioni di stabilità nel pendio, sono state condotte delle analisi accoppiate mediante il software commerciale agli elementi finiti Plaxis2D (Bentley systems). Il modello numerico è composto da 4754 elementi di 15 nodi e 38713 nodi. La Fig 3 mostra i dettagli del dominio di calcolo con le rispettive condizioni iniziali e al contorno applicate. Dalla Fig 3 si osserva che:

- Il contorno a monte e a valle sono stati considerati impermeabili e sono stati impediti gli spostamenti orizzontali durante tutta l'analisi numerica;
- Come condizioni iniziali è stato considerato un piano di falda crescente linearmente con la profondità, al fine di inizializzare il dominio;
- Come condizioni al contorno è stato considerato permeabile il bordo inferiore mentre sul bordo superiore è stata applicata, nel tempo, una portata media giornaliera, utilizzando le misure di pioggia registrate dal pluviometro senza considerare eventuali effetti evapotraspirativi.

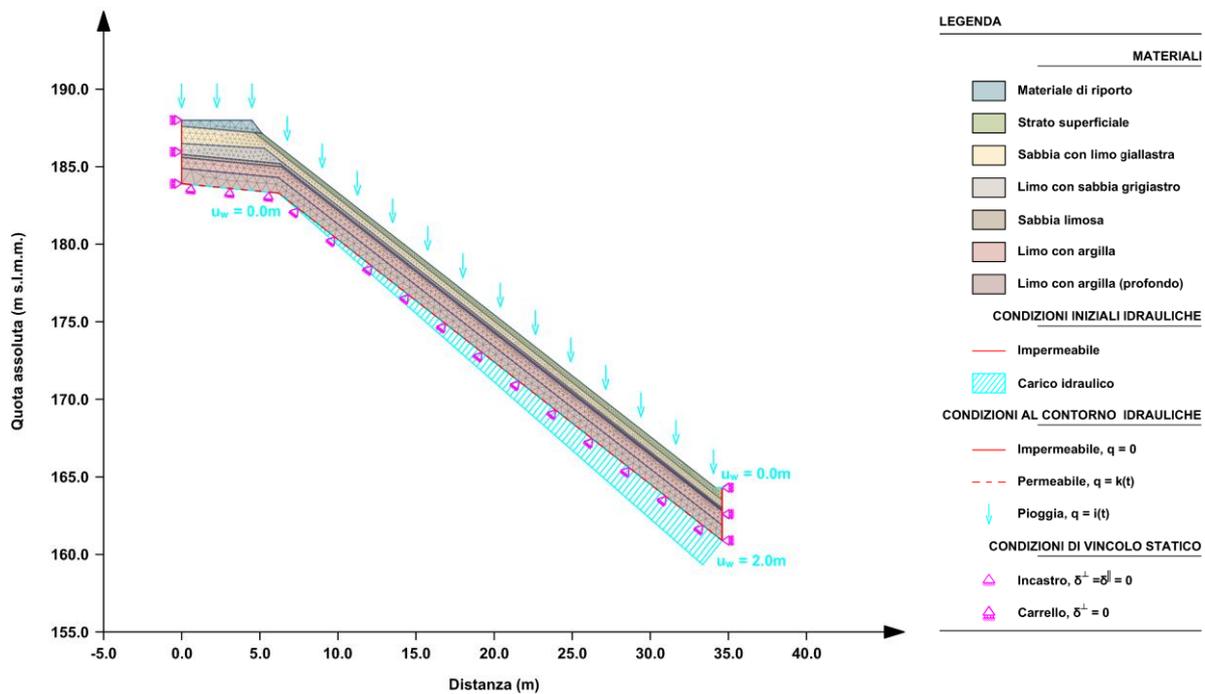


Fig 3. Dominio dell'analisi numerica con indicazione di condizioni iniziali, al contorno e mesh di calcolo

Il moto di filtrazione è calcolato risolvendo numericamente, in condizioni transitorie, l'equazione differenziale nota come equazione di Richards, considerando la dipendenza dalla suzione sia del contenuto d'acqua volumetrico sia del coefficiente di conducibilità idraulica. A questo ultimo fine, in questo studio sono state utilizzate le seguenti relazioni della Soil Water Characteristic Curve (SWCC) e dalla curva di conducibilità idraulica, note come funzioni di van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (g_a h)^{g_n}]^{g_m}}$$

$$k_{rel}(S) = (S_{eff})^{g_l} \left\{ 1 - \left[1 - S_{eff}^{\left(\frac{g_n}{g_n-1}\right)} \right]^{\left(\frac{g_n-1}{g_n}\right)} \right\}^2 \quad \text{con} \quad S_{eff} = \frac{S - S_r}{S_s - S_r}$$

Dove: θ_r è il contenuto di acqua residuo, θ_s è il contenuto di acqua saturo, S_r è il grado di saturazione residuo, S_s il grado di saturazione saturo, S_{eff} è il grado di saturazione effettivo, k_{rel} è il coefficiente di conducibilità idraulica relativa (inteso come rapporto tra il coefficiente di conducibilità idraulica corrente e quello in condizioni sature), g_a , g_n , g_m e g_l sono i parametri di adattamento della curva dove $g_m = 1 - 1/g_n$ (ipotesi di Mualem).

Le caratteristiche geotecniche dei materiali coinvolti (Tab 1) sono state ricavate da prove di laboratorio, mentre i parametri di van Genuchten sono stati ottenuti sulla base della granulometria dei materiali.

Tab 1. Proprietà geotecniche dei materiali coinvolti nella sezione di riferimento dove: γ_{unsat} è il peso dell'unità di volume al di sopra del piano di falda, γ_{sat} è il peso dell'unità di volume al di sotto del piano di falda, $e_{iniziale}$ è l'indice dei vuoti iniziale, c' è la coesione efficace, ϕ' è l'angolo di attrito interno, S_{res} è il grado di saturazione residuo, S_{sat} è il grado di saturazione in condizioni sature, g_n , g_a , g_l sono i parametri di van Genuchten, k_{sat} è la permeabilità satura.

Proprietà	Limo con argilla (profonda)	Limo con argilla	Sabbia limosa	Limo con sabbia grigiastro	Sabbia con limo giallastra	Strato superficiale	Materiale di riporto
γ_{unsat} (kN/m ³)	14.1	14.1	14.1	12.6	12.8	12.8	16.5
γ_{sat} (kN/m ³)	15.4	15.4	15.4	14.0	14.3	14.3	17.6
$e_{iniziale}$ (-)	1.9	1.9	1.9	3.0	2.7	2.7	1.3
c' (kN/m ²)	12.0	4.0	10.0	10.0	10.0	20.0	5.0
ϕ' (°)	31.3	34.5	35.0	28.0	28.0	28.0	37.4
S_{res} (-)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
S_{sat} (-)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
g_n (-)	2.8	2.8	2.9	3.0	2.9	1.3	2.7
g_a (1/m)	0.2	0.2	0.4	0.6	0.45	1.0	0.35
g_l (-)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k_{sat} (m/g)	1.0E-03	1.0E-03	4.0E-01	3.0E-02	2.0E-01	3.5E+00	3.0E-01

Allo scopo di quantificare il contributo della presenza dello strato superficiale sia in termini di moto di filtrazione sia di analisi di stabilità, sono state considerate tre condizioni stratigrafiche, riportate in Fig 4. In particolare, il Caso 0 è rappresentato da una caratterizzazione estremamente dettagliata delle condizioni stratigrafiche rilevate in sito, mentre il secondo caso (Caso 1) fa riferimento ad una sequenza stratigrafica semplificata dove gli strati superficiali sono stati inglobati in un unico cluster di caratteristiche geotecniche omogenee. Infine, per il Caso 2 è stata considerata una stratificazione semplificata con la sola presenza di uno strato superficiale vegetato.

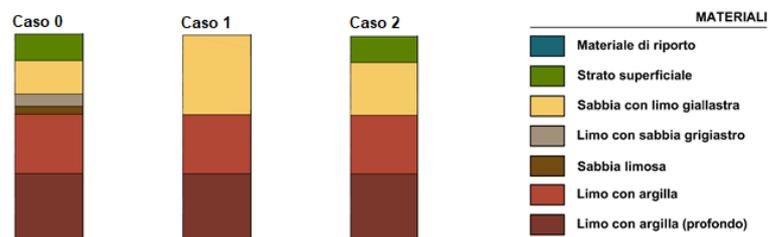


Fig 4. Condizioni stratigrafiche esaminate: Caso 0 in condizione di una dettagliata caratterizzazione stratigrafica; Caso 1 in assenza degli strati superficiali, Caso 2 condizione intermedia.

4. Risultati

L'effetto delle piogge sul pendio in esame è stato analizzato in funzione dell'andamento del fattore di sicurezza e delle pressioni interstiziali nel tempo. Per quanto riguarda il fattore di sicurezza, esso è stato ricavato mediante la procedura nota come phi-c reduction, per cui i risultati fanno riferimento al

volume di terreno che produce il fattore di sicurezza globale minimo per il pendio esaminato. I risultati relativi all'andamento delle pressioni interstiziali sono stati analizzati considerando diversi punti all'interno del dominio, ma di seguito si farà riferimento a due soli punti lungo una verticale in corrispondenza dell'ascissa 24.6 m, rispettivamente posti alla base dello strato di limo con sabbia (in riferimento al Caso 0) e alla base dello strato superficiale (in riferimento al Caso 0 e al Caso 2).

La Fig 5a mostra come il fattore di sicurezza del pendio tende a variare nel tempo in funzione della pioggia applicata per tutti e tre i casi esaminati mostrando una riduzione delle condizioni di stabilità in tre particolari momenti dell'analisi dovuta alla presenza di 3 picchi nell'andamento delle pressioni interstiziali, a loro volta conseguenza di tre periodi di pioggia intensa (Fig 5b). Dal confronto tra le stratigrafie esaminate, Il Caso 0 e il Caso 2 sono sostanzialmente simili in termini di condizioni di stabilità raggiungendo condizioni critiche al 31-esimo giorno di analisi in corrispondenza del quale le pressioni interstiziali dei punti monitorati coincidono. Con riferimento al Caso 1, invece, gli andamenti del fattore di sicurezza e delle pressioni interstiziali registrate sono molto più sensibili alle condizioni al contorno imposte. Infatti il pendio risulta già in condizioni critiche al 21-esimo giorno di analisi dove le pressioni interstiziali raggiungono il valore massimo possibile in entrambi i punti monitorati. I risultati indicano che la semplificazione della stratigrafia nella parte a profondità intermedia gioca un ruolo molto poco significativo, mentre la presenza dello strato superficiale assume una importanza fondamentale per la corretta simulazione dell'innesco del fenomeno franoso in esame.

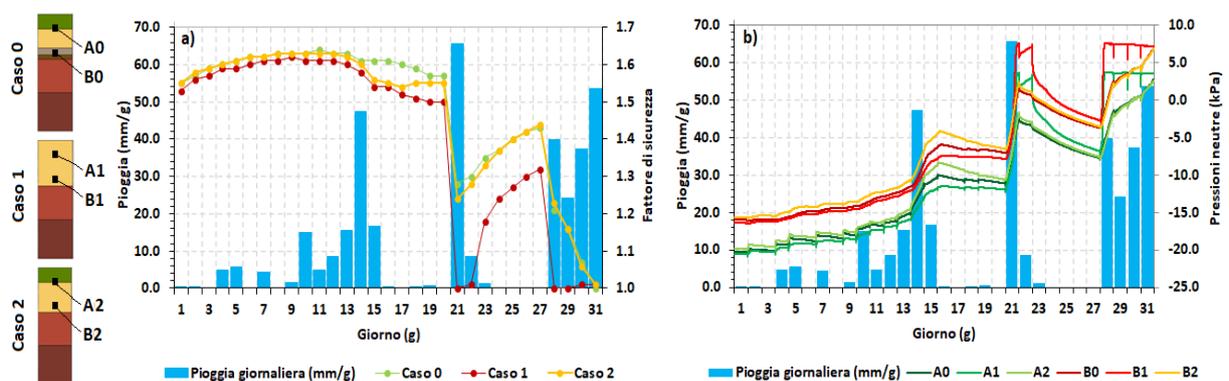


Fig 5. Andamento del fattore di sicurezza del pendio (a) e delle pressioni interstiziali (b) nel tempo con riferimento ai tre casi esaminati

Per tale ragione, partendo dal Caso 2 sono stati considerati altri tre casi in cui sono stati fatte variare solo le caratteristiche idrauliche dello strato superficiale (Fig 6). In questo caso la risposta del pendio all'applicazione delle condizioni al contorno è estremamente diversa in funzione dei parametri adottati per le SWCC (Fig 7). In particolare, nel Caso 2b e Caso 2c la condizione di sicurezza del pendio varia in maniera trascurabile nel periodo esaminato, nonostante l'applicazione delle condizioni al contorno di pioggia e in contrasto con l'evidenza sperimentale che ha portato al collasso di una massa di terreno sul versante.

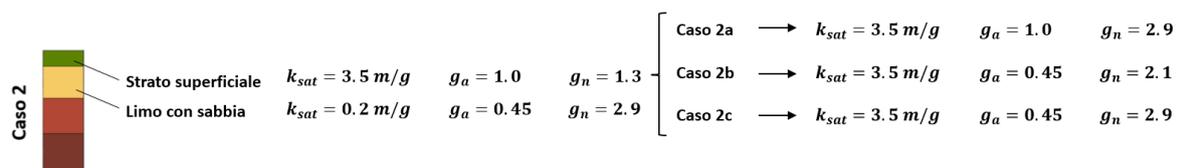


Fig 6. Variazione dei parametri fisici dello strato superficiale vegetato a partire dal Caso 2: aumento del parametro g_n (Caso 2a); riduzione del parametro g_a (Caso 2b); combinazione dei due casi precedenti (Caso 2c).

Questo è dovuto al valore di ingresso d'aria adottato in queste due condizioni ($g_a=0.45$), circa doppio rispetto al caso base ($g_a=1.0$). Per il Caso 2a, solo il parametro g_n è stato fatto variare rispetto al Caso

2, riducendolo di circa il 30% (da 2.9 a 2.1). In questo caso, i risultati mostrano, come atteso, una certa sensibilità del coefficiente di sicurezza alla precipitazione imposta, anche se i suoi valori assoluti sono decisamente maggiori della simulazione di base (Caso 0) e il pendio risulta ancora sufficientemente stabile alla fine della simulazione (fattore di sicurezza di poco inferiore a 1.3). È da notare, infine, che il Caso 1 e il Caso 2c si diversificano, in termini idraulici, solo per il valore della permeabilità satura assunta per lo strato superficiale, ma il regime delle pressioni interstiziali nei due casi è estremamente diverso (Fig 7b). Questo è dovuto alla maggiore capacità dello strato superficiale di drenare la portata di pioggia in ingresso aggiunta alla minore capacità di infiltrazione verso gli strati più profondi per effetto del parametro g_a . Per cui lo strato superficiale si comporta come “un’interfaccia drenante” tra gli strati più profondi del pendio e l’atmosfera riducendo la portata che riesce ad infiltrarsi negli strati più profondi. Tutto ciò, aggiungendosi ai migliori parametri meccanici dello strato superficiale, porta a condizioni di stabilità estremamente diverse e tali che il fattore di sicurezza non risenta dell’applicazione delle condizioni di pioggia al contorno (Fig 7a).

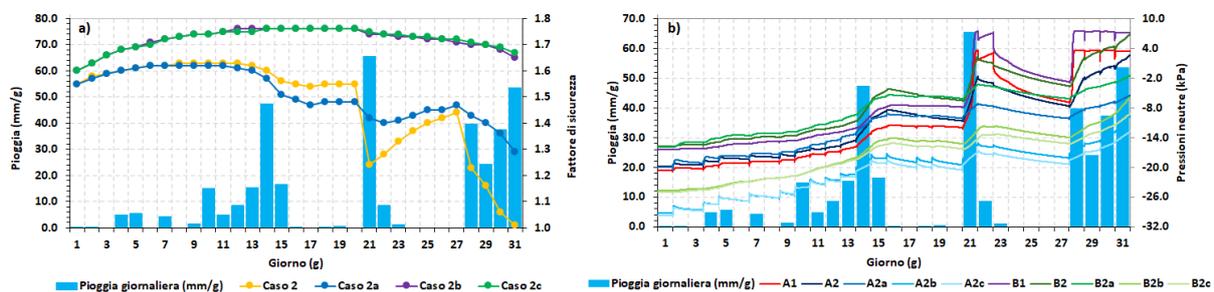


Fig 7. Andamento del fattore di sicurezza del pendio(a) e delle pressioni interstiziali (b) per la sequenza stratigrafica Caso 2 al variare delle caratteristiche idrauliche dello strato superficiale.

5. Conclusioni

In questo studio è stata modellata, utilizzando un approccio agli elementi finiti di tipo accoppiato, la fase di innesco di una colata detritica in materiale piroclastico, mobilitata in un pendio molto acclive per effetto di precipitazioni particolarmente intense. Le analisi effettuate, di tipo parametrico a partire da una simulazione numerica coerente con le evidenze in sito, evidenziano l’importanza della adeguata definizione delle caratteristiche di permeabilità e saturazione degli strati superficiali i quali, trovandosi quasi sempre in condizioni di parziale saturazione, influenzano notevolmente il regime transitorio delle pressioni interstiziali che si instaurano per effetto della precipitazione imposta come condizione idraulica a contorno. È importante sottolineare che esula dagli obiettivi di questo studio l’analisi dell’interazione terreno-atmosfera, la quale può assumere, specie per simulazioni di lunga durata, un ruolo non trascurabile ai fini della modellazione in condizioni transitorie dei fenomeni franosi pluvio-indotti.

Bibliografia

- Cascini L., Cuomo S., Pastor M. (2013). “Inception of debris avalanches: remarks on geomechanical modelling”, *Landslides*, 10(6), 701-711.
- Cascini L., Sorbino G., Cuomo S., Ferlisi S. (2014). “Seasonal effects of rainfall on the shallow pyroclastic deposits of the Campania region (southern Italy)”, *Landslides*, 11(5), 779-792.
- Tagarelli V., Cotecchia F. (2020). “The effects of slope initialization on the numerical model predictions of the slope-vegetation-atmosphere interaction”, *Geosciences*, 10(2), 85.
- Van Genuchten M. T. (1980). “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.