

# IL RUOLO DELLO STATO INIZIALE DEL TERRENO NELL'INNESCO DELLE COLATE DI FANGO

Marialaura Tartaglia

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - Università degli Studi di Napoli Federico II*  
[marialaura.tartaglia@unina.it](mailto:marialaura.tartaglia@unina.it)

Marianna Pirone

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - Università degli Studi di Napoli Federico II*  
[marianna.pirone@unina.it](mailto:marianna.pirone@unina.it)

Gianfranco Urciuoli

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - Università degli Studi di Napoli Federico II*  
[gianurci@unina.it](mailto:gianurci@unina.it)

## Sommario

Numerosi studi svolti sull'innescò delle colate di fango nei terreni piroclastici non saturi hanno messo in evidenza il ruolo dello stato di umidità iniziale del terreno prima dell'evento di pioggia innescante. Le grandezze (contenuto di acqua e suzione) che consentirebbero di definire lo stato iniziale non vengono usualmente misurate, ma possono essere ragionevolmente riprodotte in funzione delle piogge che precedono l'evento critico, indipendentemente dalla condizione ipotizzata alla partenza del calcolo. Ciò è vero se l'intervallo di tempo sul quale è svolta l'analisi è sufficientemente lungo da consentire il raggiungimento della condizione idraulica di equilibrio con le condizioni al contorno imposte, seppur variabili nel tempo.

Lo studio è basato su un'analisi a ritroso della frana di Pozzano, frazione di Castellammare di Stabia (Na), avvenuta il 10/01/97, svolta con un approccio disaccoppiato e con l'ausilio dei codici di calcolo SEEP/W e SLOPE/W, che consentono di investigare rispettivamente la risposta idraulica del pendio al variare delle condizioni idrauliche al contorno e la stabilità globale del pendio stesso. Nota la stratigrafia della sezione, le caratteristiche idrauliche e meccaniche dei terreni in esame (ottenute da una campagna di indagine condotta sul territorio dei Monti Lattari), sono stati eseguiti due gruppi di analisi per modellare la risposta del pendio soggetto a piogge di diversa durata e a diverse condizioni di partenza del calcolo. Le serie di pioggia applicate sono state registrate alla vicina stazione pluviometrica di Castellammare di Stabia e culminano con l'evento critico che innescò la frana. Dall'analisi dei risultati si evince che lo stato di equilibrio idraulico nel pendio viene raggiunto nell'arco di pochi mesi precedenti l'evento. Questo risultato consente di determinare l'intervallo temporale a cui estendere lo studio per ricavare lo stato del sottosuolo.

## 1. Introduzione

La previsione dell'innescò di frane meteo indotte sui versanti piroclastici della Campania è attualmente affidata a sistemi di early warning basati su soglie empiriche definite in termini di intensità e durata della precipitazione. Tuttavia, le conseguenze di un evento di pioggia critico dipendono anche dalle condizioni idrauliche nel sottosuolo che regnano prima dell'evento critico (Pirone et al, 2015a) che definiscono lo stato iniziale (S.I.) nel sottosuolo. Inoltre, il fenomeno è influenzato anche dalle proprietà idrauliche dei terreni in condizione di parziale saturazione. Trascurare questi fattori e considerare solo le caratteristiche della precipitazione che caratterizza l'evento critico (o innescante) comporta la definizione di soglie imprecise che provocano mancati e falsi allarmi.

In mancanza di misure in sito idonee a caratterizzare lo S.I., esso può essere riprodotto attraverso la

modellazione numerica a patto che le caratteristiche idrauliche e meccaniche dei terreni coinvolti siano correttamente definite. Lo scopo del presente lavoro è investigare qual è l'intervallo di tempo antecedente la frana da considerare nell'analisi per riprodurre lo S.I..

L'analisi è stata condotta con i codici innanzi detti, in particolare è stato riprodotto l'evento franoso avvenuto il 10/01/97 a Pozzano, località del comune di Castellammare di Stabia. L'area interessata dalla frana, situata sui Monti Lattari, è vicina al campo sperimentale realizzato da questo gruppo di ricerca sul Monte Faito, nel comune di Castellammare di Stabia (40 km a sud-est di Napoli). Grazie a misure di suzione e contenuto d'acqua volumetrico misurate a varie profondità nel sito del Monte Faito e a risultati di prove di laboratorio condotte su campioni indisturbati (Dias, 2019), è stato possibile caratterizzare il comportamento meccanico e idraulico dei terreni di copertura. Note le caratteristiche idrauliche e fisico-meccaniche dei terreni coinvolti e conoscendo la topografia e la stratigrafia della sezione d'interesse, è stato implementato un modello che ha permesso di riprodurre l'evento franoso di Pozzano.

In questa nota è riportata la risposta del modello numerico a partire da vari tempi di inizio del calcolo fino all'evento critico, mettendo in evidenza come l'acqua immagazzinata dal terreno (storage) sia un utile indicatore dell'evoluzione del fenomeno.

## 2. Inquadramento geologico dell'area di studio e caratterizzazione geotecnica

Pozzano, luogo in cui si è verificata la frana del 10/01/97, dista 2 km dal campo sperimentale del Monte Faito. Entrambi i siti sono situati nel complesso geologico dei Monti Lattari e sono costituiti da coperture piroclastiche deposte su un bedrock di calcari fratturati, formati dal Triassico fino al Cretaceo superiore, e da rocce dolomitiche. I terreni sciolti di copertura sono costituiti da prodotti piroclastici (cenere e pomici), che generalmente si trovano in regime di parziale saturazione. Essi si sono generati durante l'eruzione Pliniana del 79 d.C. del Vesuvio.

Grazie ad una campagna d'indagine, consistente in sondaggi e soprattutto pozzetti stratigrafici, condotta dopo l'evento critico e successivamente nel 2016, anno in cui fu realizzato il campo sperimentale del Monte Faito, furono ricostruite la geometria della sezione di massima pendenza nell'area d'innescò della frana di Pozzano del 10/01/97 e la sequenza stratigrafica (Forte et al, 2019), come riportato in Figura 1.

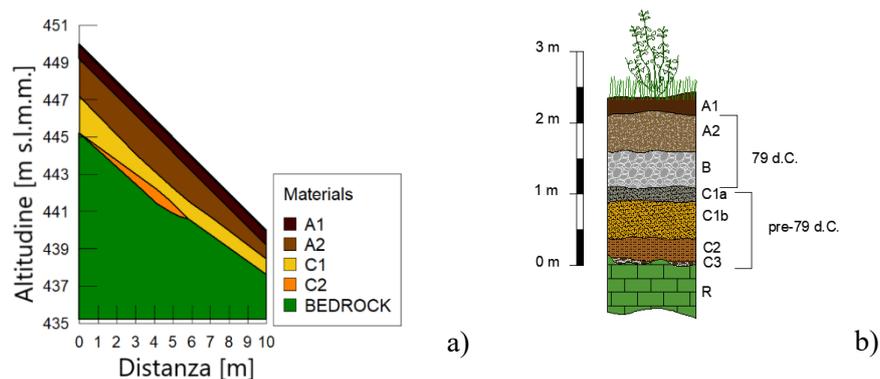


Fig 1. Sezioni stratigrafiche: a) area d'innescò dell'evento franoso di Pozzano del 10/01/97; b) colonna stratigrafica del versante (Forte et al, 2019).

Nella sequenza stratigrafica sono compresi i seguenti litotipi: A1 suolo e terreno vegetale consistente in una cinerite bruno-marrone con abbondanti pomici rimaneggiate e presenza di apparati e frustoli vegetali; A2 depositi da caduta dell'eruzione del 79 d.C. consistenti in cineriti e pomici spigolose con dimensioni da pochi mm a pochi cm; B pomici dell'eruzione del 79 d.C.; C1 deposito da caduta di un'eruzione flegrea del pre-79 d.C., composto da sabbie limose giallastre, tale strato può essere suddiviso in C1a e C1b in base al colore; C2 deposito principale da caduta di un'antica eruzione flegrea del pre-79 d.C., consistente in una cenere bruno-rossastra (sabbia limosa), con rare minute

pomici alterate e con grado di argillificazione significativo; R bedrock costituito da calcare fratturato e carsificato.

Al fine di investigare le proprietà fisiche e idro-meccaniche dei diversi strati di terreno, nel 2016 furono prelevati diversi campioni indisturbati dal sito di prova, sottoposti a prove di laboratorio. In Tabella 1 sono riportati i parametri fisico-meccanici ricavati.

Tabella 1. Parametri fisico-meccanici

Terreno	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'_{cvc}$ (°)	$c'$ (kPa)
A1	16.2	38.4	0
A2	14.8	38.4	0
C1	15.54	35.4	0
C2	18.81	35	5

Legenda:  $\gamma$ : peso dell'unità di volume;  $\phi'_{cvc}$ : angolo di attrito allo stato critico;  $c'$ : coesione drenata

Per la caratterizzazione idraulica dei terreni, sono state utilizzate le misure in sito eseguite nel campo sperimentale del Monte Faito, ove furono installate alla stessa profondità coppie di strumenti per misurare contestualmente la suzione (tensiometri) e il contenuto d'acqua (sonde TDR). Applicando il modello di Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) ai punti sperimentali ottenuti dall'accoppiamento delle misure, sono state ricavate le curve di ritenzione per tutti i litotipi rilevati. Note quest'ultime, tramite la funzione di Mualem-Van Genuchten, sono state determinate le curve di conducibilità idraulica riportate in Figura 2 insieme alle curve di ritenzione acqua-terreno.

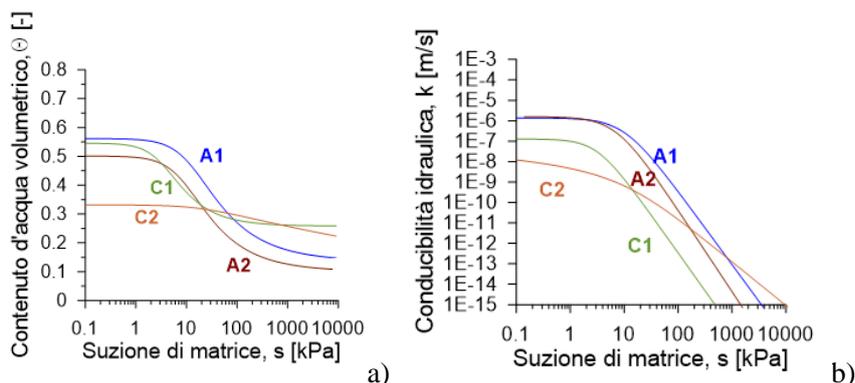


Fig.2. Caratteristiche idrauliche dei terreni A1, A2, C1 e C2: a) curve di ritenzione acqua-terreno; b) curve di conducibilità idraulica.

### 3. Modellazione numerica

È stato implementato il modello numerico che riproduce la frana avvenuta a Pozzano il 10/01/97. Sono state svolte analisi disaccoppiate: la risposta idraulica del pendio è stata ottenuta implementando il modello nel software agli elementi finiti SEEP/W, mentre le analisi di stabilità sono state effettuate utilizzando il software all'equilibrio limite SLOPE/W.

Per investigare l'effetto della pioggia antecedente, sono state condotte analisi di diversa durata (gruppo A). Partendo da una condizione stazionaria, con una distribuzione idrostatica delle pressioni neutre nel pendio, caratterizzata da un valore di suzione di 45 kPa al bordo superiore, si è valutata la risposta del pendio alle piogge antecedenti l'evento critico per intervalli di tempo di 2, 3, 4 e 16 mesi (Tabella 2); queste sequenze sono state registrate alla vicina stazione pluviometrica di Castellammare di Stabia. È stata applicata al p.c. la pioggia netta, determinata sottraendo alla pioggia registrata dal pluviometro l'aliquota di evapotraspirazione, calcolata tramite la formula di Penman-Monteith (Figura 4a).

Per poter investigare l'effetto della condizione di partenza del calcolo, partendo da diversi valori della suzione a p.c. nella condizione stazionaria (gruppo di analisi B), si è valutata la risposta del pendio alla

sequenza di piogge che precede di 4 mesi l'evento critico (Tabella 3).

Tabella 2. Analisi effettuate per investigare l'effetto della durata della pioggia (gruppo A)

Condizione iniziale al p.c. s (kPa)	Pioggia netta applicata		
	dal	al	durata
45	10-nov-96	10-gen-97	2 mesi
	11-ott-96		3 mesi
	10-set-96		4 mesi
	10-set-95		16 mesi

Tabella 3. Analisi effettuate per investigare l'effetto della condizione iniziale (gruppo B)

Condizione iniziale al p.c. s (kPa)	Pioggia netta applicata		
	dal	al	durata
20	10-set-96	10-gen-97	4 mesi
45			
75			
120			

Legenda: s: suzione di matrice

Le analisi sono state condotte modellando i bordi laterali, sia nella fase stazionaria che transitoria, ed il bordo inferiore, nella sola fase transitoria, come superfici impermeabili. Se durante il calcolo vengono determinate pressioni neutre positive sui bordi, il codice assegna automaticamente ai bordi pressione nulla consentendo il calcolo di un flusso d'acqua diverso da zero uscente dai bordi.

#### 4. Risultati

In Figura 3 si riportano i fattori di sicurezza nel tempo sia per le analisi del gruppo A (a meno dell'analisi di 16 mesi), sia per le analisi del gruppo B. Per le analisi del gruppo A, si può notare come solo il caso di durata 4 mesi riesca a riprodurre l'evento franoso con un valore di FS=0.98 nel giorno dell'innesco, mentre le analisi di durata 3 e 2 mesi restituiscono FS=1.039 e FS=1.041 in corrispondenza dell'evento critico. In particolare i risultati delle analisi del gruppo B mostrano che anche partendo da diversi valori di suzione al p.c., la sequenza di pioggia relativa al periodo dal 10-set-96 al 10-gen-97 è sufficiente a raggiungere una condizione stazionaria in equilibrio con le condizioni idrauliche al contorno.

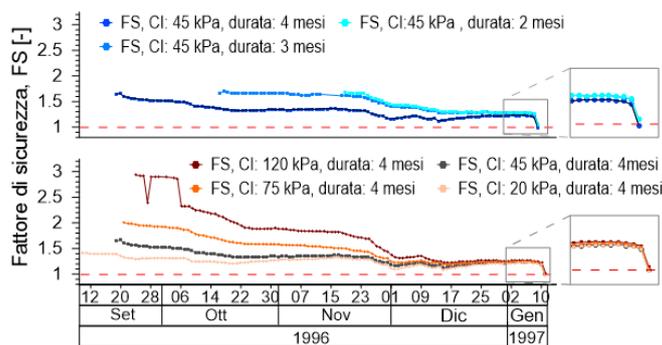


Fig.3. Fattori di sicurezza nel tempo (FS): a) analisi di durata 4,3 e 2 mesi (gruppo A); b) analisi con diverso stato iniziale (S.I.) e durata 4 mesi (gruppo B).

La risposta del pendio è stata investigata anche in termini di pressione neutra e di contenuto d'acqua volumetrico. In particolare per ogni strato di terreno sono stati diagrammati i valori delle due grandezze nel tempo in determinati punti di controllo, situati nella mezzeria di ciascuno strato e passanti per una verticale ubicata al centro del pendio.

Per le analisi del gruppo A, si riportano i risultati in termini di suzione e di contenuto d'acqua volumetrico nei punti di controllo A1, A2, C1 e C2 in Figura 4. Si nota come per gli strati più profondi la risposta idraulica alle piogge sia ritardata. Inoltre, per i primi strati della coltre (A1 e A2), l'effetto della condizione all'atto della partenza del calcolo è annullato, anche al termine dell'analisi di durata 2 mesi, mentre per gli strati più profondi (C1 e C2) l'effetto della condizione di partenza è annullato intorno a dicembre 1996 solo per le analisi di durata pari a 4 e a 16 mesi, per le quali si hanno risultati praticamente coincidenti. La quantità d'acqua accumulata nell'intera coltre di terreno sciolto nel tempo (*storage*) è riportata in Figura 4f. Si nota che per le analisi di durata 4 e 16 mesi, i valori dello *storage* sono praticamente coincidenti raggiungendo un picco di 1260 mm a dicembre 1996, che viene superato solo nel giorno della frana. Le analisi di durata 2 e 3 mesi al contrario, non raggiungono mai tale valore di *storage* se non in corrispondenza dell'evento critico, per cui l'effetto della condizione di partenza non è annullato e la frana non è riprodotta.

Lo *storage* è quindi un indicatore utile a caratterizzare l'evoluzione del fenomeno: affinché l'effetto della condizione di partenza sia cancellata, è necessario osservare lo *storage* dell'intera coltre e controllare che abbia raggiunto un valore indipendente dalla condizione di partenza e dal tempo di analisi.

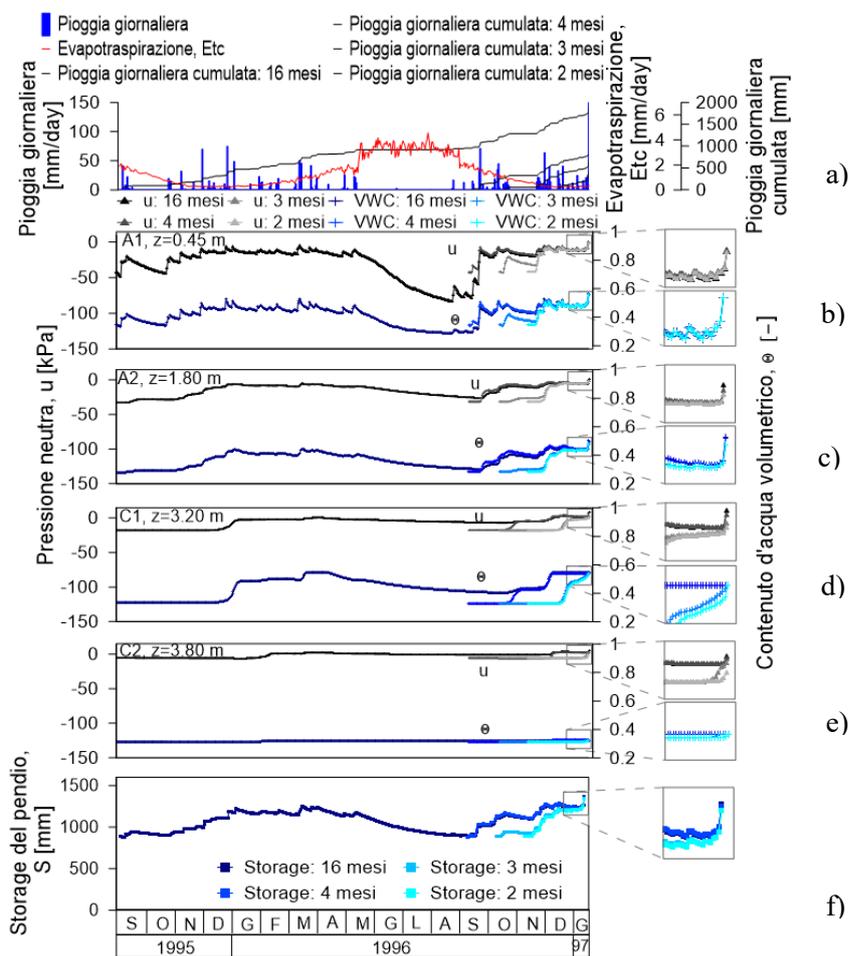


Fig.4. Risultati delle analisi del gruppo A: a) pioggia ed evapotraspirazione applicati a p.c.; b), c), d), e) valori di  $u$  (pressione neutra) e  $\theta$  (contenuto d'acqua) nei punti di controllo rispettivamente di A1, A2, C1 e C2; f) storage del pendio.

Per il gruppo B di analisi si riportano i valori di pressione neutra e contenuto d'acqua volumetrico nel tempo e nei punti di controllo A1, A2, C1 e C2 (Figura 5). Analogamente al gruppo A di analisi, la risposta alla pioggia degli strati più profondi è ritardata, ma l'effetto della condizione iniziale è annullato in tutta la coltre intorno al 04/01/97. Anche i valori dello *storage* in corrispondenza di tale data sono praticamente coincidenti, il che comporta che la serie di pioggia applicata consente di

annullare l'effetto della condizione di partenza e di replicare correttamente l'evento franoso.

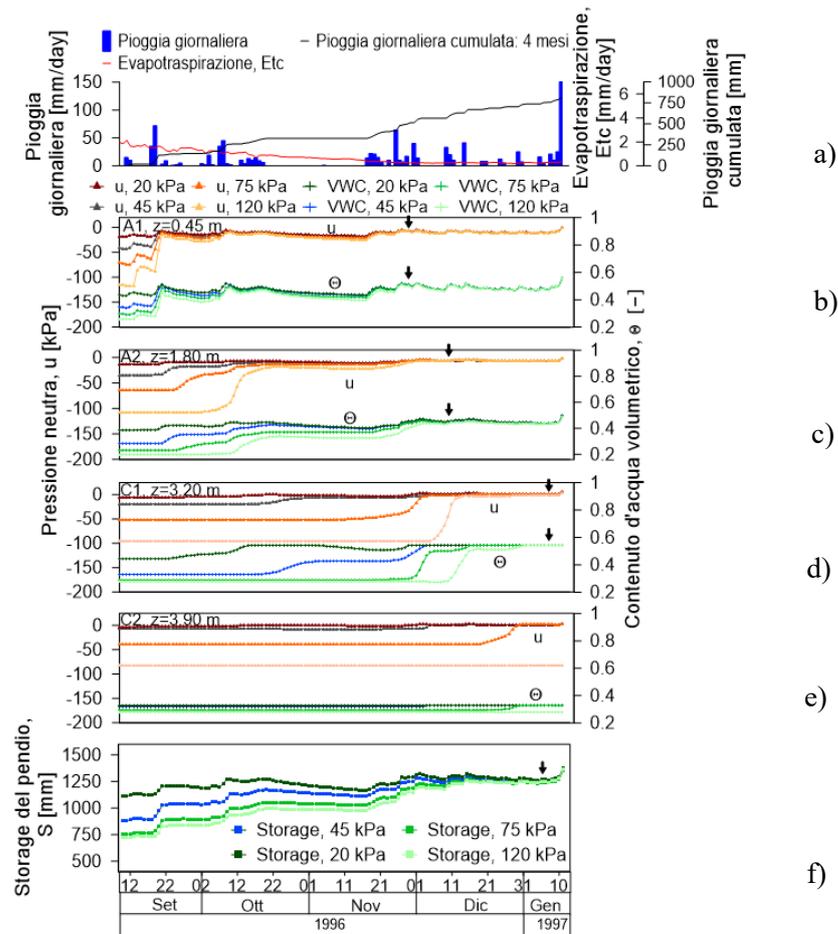


Fig.5. Risultati delle analisi del gruppo B: a) pioggia ed evapotraspirazione applicati a p.c.; b), c), d), e) valori di  $u$  e  $\theta$  nei punti di controllo rispettivamente di A1, A2, C1 e C2; f) storage del pendio.

## 5. Conclusioni

Lo stato idraulico corrente del sottosuolo è riproducibile con analisi di infiltrazione di durata sufficiente a raggiungere una condizione equilibrata con le condizioni al contorno seppur variabili nel tempo. Per determinare l'intervallo di tempo minimo a cui estendere l'analisi è necessario controllare la quantità di acqua immagazzinata nella coltre di terreno sciolto (*storage*) che è un chiaro indicatore dell'evoluzione del fenomeno.

## Bibliografia

- Dias S. (2019), The effect of vegetation on slope stability of shallow pyroclastic soil cover. PhD Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy.
- Forte G., Pirone M., Santo A., Nicotera M.V., Urciuoli G. (2019). "Triggering and predisposing factors for flow-like landslides in pyroclastic soils: the case study of the Lattari Mts. (southern Italy)". *Engineering Geology*, 257.
- Pirone M., Papa R., Nicotera M.V., Urciuoli G., (2015a). "In situ monitoring of the groundwater field in an unsaturated pyroclastic slope for slope stability evaluation". *Landslides*, 12 (2): 259-276.
- Van Genuchten M. T., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 892-898.