

PREVISIONE DELL'INNESCO DI COLATE RAPIDE SULLA BASE DEL CONTENUTO D'ACQUA

Marialaura Tartaglia

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – Università degli Studi di Napoli Federico II
marialaura.tartaglia@unina.it

Marianna Pirone

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – Università degli Studi di Napoli Federico II
marianna.pirone@unina.it

Gianfranco Urciuoli

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – Università degli Studi di Napoli Federico II
gianurci@unina.it

Sommario

I sistemi di *early warning* per la previsione delle colate rapide sono attualmente basati su soglie empiriche definite in termini di intensità e durata della pioggia, riconosciuta come il fattore innescante. Tuttavia la risposta idraulica del pendio non dipende solo dalle caratteristiche della precipitazione, ma anche dalle condizioni idrauliche nel sottosuolo prima dell'evento critico e da fattori geomorfologici locali.

Lo scopo del presente lavoro consiste nello stabilire una soglia di contenuto d'acqua nel sottosuolo, (water storage, WS) oltre la quale il pendio si trova in condizioni che predispongono l'innescamento di possibili colate rapide. Le simulazioni numeriche volte a riprodurre la frana avvenuta a Pozzano il 10/01/1997 mediante un modello idromeccanico disaccoppiato hanno permesso di identificare il valore di contenuto d'acqua che predisponde l'innescamento nel contesto geologico e geotecnico dei Monti Lattari in Regione Campania.

1. Introduzione

Per prevedere l'innescamento di colate rapide sui versanti della Campania, sono stati sviluppati sistemi di *early warning* basati su soglie empiriche definite in termini di intensità e durata della precipitazione. Tuttavia, l'innescamento di tali fenomeni non dipende solo dalle caratteristiche della pioggia ma anche dalle condizioni idrauliche nel sottosuolo prima dell'evento critico e dai fattori geomorfologici locali, come irregolarità stratigrafiche o topografiche. Trascurando questi aspetti, le soglie empiriche di intensità e durata delle precipitazioni soffrono di mancati e falsi allarmi.

A tal proposito, una procedura per interpretare e predire l'innescamento di colate rapide in terreni non saturi è stata sviluppata da Rianna et al. (2014). Gli Autori hanno caratterizzato la risposta idraulica in termini di contenuto d'acqua di un campione di piroclastiti non sature, collocato in un lisimetro ed esposto a condizioni meteoriche naturali. In particolare, controllando il peso del campione di terreno durante la sperimentazione, gli Autori hanno identificato due soglie del volume d'acqua accumulato nel campione, WS, definito come la quantità d'acqua accumulata nei meati di una colonna unitaria di terreno. La prima soglia è il valore minimo attinto nel periodo estivo (DWS, dry water storage) quando il contenuto d'acqua è ridotto dall'evapotraspirazione. La seconda soglia è attinta nel periodo umido e segna l'inizio del deflusso di acqua dal bordo inferiore (WWS, wet water storage).

Una volta raggiunto WWS, il contenuto d'acqua può ancora aumentare: un'intensa precipitazione può consentire il raggiungimento del massimo livello di contenuto d'acqua del campione (WS_{max}) se essa è tale da compensare la portata smaltita attraverso il bordo inferiore e fornire un surplus.

Obiettivo di questo lavoro è estendere la determinazione delle soglie WS ai pendii naturali, in particolare, stabilire una soglia di WS oltre la quale il pendio è in condizioni di incipiente pericolo nei confronti dell'innescò di colate rapide di fango. Lo studio è stato condotto in riferimento alla sezione d'innescò della frana di Pozzano del 10/01/1997 (Monti Lattari). L'area che fu interessata dalla frana, risulta prossima al campo sperimentale realizzato nel 2016 sul Monte Faito, nel comune di Castellammare di Stabia (Na) dal gruppo di ricerca di Ingegneria Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università Federico II di Napoli. Pertanto è stato possibile caratterizzare il comportamento idro-meccanico dei terreni di copertura coinvolti dalla frana di Pozzano riferendosi a quelli del sito sperimentale (Forte et al. 2019; Dias et al. 2021a,b).

È stata analizzata la risposta idro-meccanica del pendio ad una disponibilità di acqua infinita al p.c. (A), alle piogge antecedenti la frana avvenuta il 10/01/1997 (B) e alle piogge registrate nel 1980 (C) che all'epoca non innescarono fenomeni franosi. I risultati delle analisi numeriche sono stati utilizzati per provare come WS sia un efficace indicatore della risposta idromeccanica del pendio alla pioggia, e, quindi, un precursore dell'innescò di colate rapide.

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

L'area di studio dei Monti Lattari è localizzata (15-30 km) nei pressi dei complessi vulcanici del Somma Vesuvio e dei Campi Flegrei, che ne hanno determinato la geologia locale. I terreni sciolti di copertura poggiano su calcare fratturato e sono costituiti da prodotti piroclastici (cenere e pomici) appartenenti all'eruzione Pliniana del 79 d.C. del Vesuvio.

La geometria della sezione di massima pendenza nell'area d'innescò della frana di Pozzano del 10/01/1997 e la sequenza stratigrafica (Forte et al., 2019) (Figura 1) furono ricostruite grazie ad una campagna d'indagine consistente in sondaggi e pozzetti stratigrafici, condotta dopo l'evento critico.

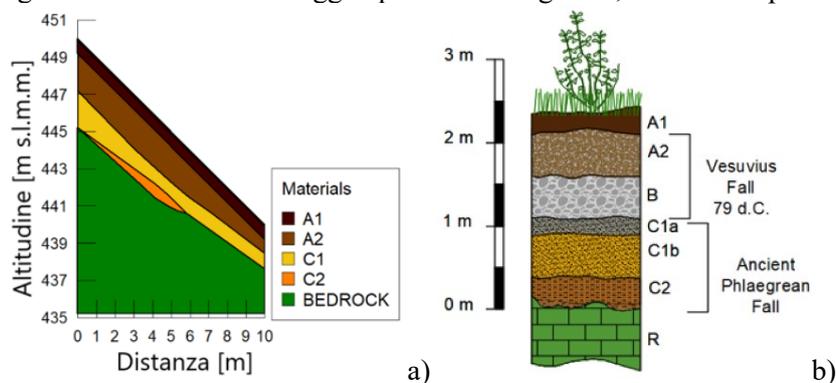


Fig.1 Sezioni stratigrafiche: a) area d'innescò dell'evento franoso di Pozzano del 10/01/1997; b) colonna stratigrafica del versante (Forte et al., 2019).

La sequenza stratigrafica comprende 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, furono prelevati durante la campagna d'indagini del 1998 e successivamente del 2016, diversi campioni indisturbati, che furono sottoposti a prove di laboratorio. In Tabella 1 sono riportati i parametri fisico-meccanici ricavati.

Tabella 1. Parametri fisico-meccanici

Terreno	γ (kN/m ³)	ϕ'_{evc} (°)	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: γ : peso dell'unità di volume; ϕ'_{evc} : angolo di attrito allo stato critico; c' : coesione drenata

La caratterizzazione idraulica dei terreni è stata ottenuta a partire dalle misure in sito eseguite nel campo sperimentale del Monte Faito, ove furono installate alla stessa profondità tensiometri e sonde TDR per misurare contestualmente la suzione e il contenuto d'acqua. In particolare, le curve di ritenzione acqua-terreno per tutti i litotipi sono state ricavate applicando il modello di Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) ai punti sperimentali ottenuti dall'accoppiamento delle misure di suzione e contenuto d'acqua. Note queste ultime, tramite la funzione di Mualem-Van Genuchten, sono state determinate le curve di conducibilità idraulica riportate in Figura 2.

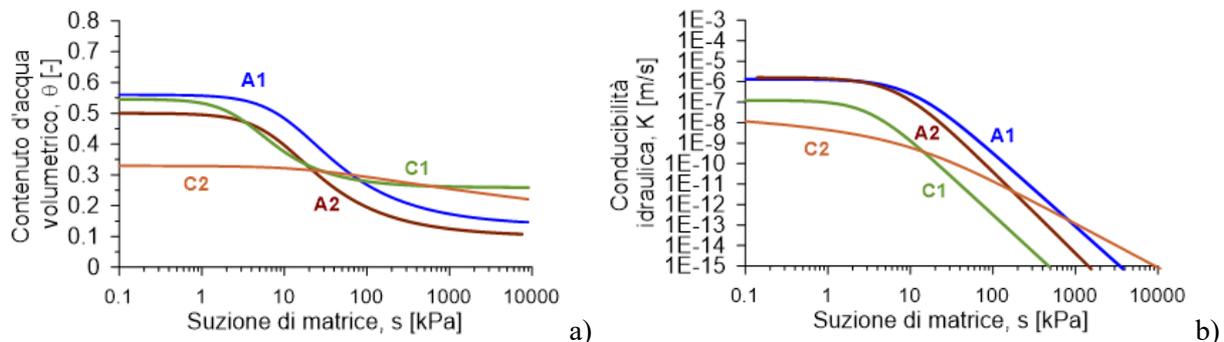


Fig.2. Caratteristiche idrauliche dei terreni A1, A2, C1 e C2: a) curve di ritenzione acqua-terreno; b) curve di conducibilità idraulica.

3. Modellazione numerica

Le analisi numeriche sono state svolte utilizzando un modello numerico disaccoppiato: la risposta idraulica del pendio è stata ottenuta mediante il software agli elementi finiti SEEP/W, mentre le analisi di stabilità mediante il metodo all'equilibrio limite implementato in SLOPE/W. Di seguito sono descritti i tre gruppi di analisi numeriche eseguite: A, B e C.

Per investigare le condizioni idrauliche più severe che possono instaurarsi nel pendio ed il minimo tempo necessario per raggiungerle è stato applicato a partire da sei diverse condizioni iniziali (CI) (Tabella 2), un film d'acqua a p.c. ($u = 0$ kPa), che conferisce al pendio una disponibilità d'acqua infinita (gruppo A).

Per riprodurre lo stato idraulico agente nel sottosuolo all'atto dell'innescò della frana del 10/1/97, sono state svolte analisi di durata 16 e 4 mesi (gruppo di analisi B) a partire da una suzione nel pendio pari a 45 kPa al p.c. (valore compatibile con i valori di suzione misurati nel bacino dei Monti Lattari ad inizio settembre). In particolare sono state applicate le piogge 16 e 4 mesi prima dell'evento critico registrate dalla vicina stazione pluviometrica di Castellammare di Stabia (Tabella 2).

Infine, per poter valutare la risposta del pendio in termini di contenuto d'acqua ad una differente distribuzione di pioggia che al tempo non innescò fenomeni franosi, sono state svolte analisi di durata 4 e 3 mesi (gruppo di analisi C). Pertanto, a partire dalla stessa condizione stazionaria del gruppo di analisi B, è stata applicata a p.c. la pioggia netta registrata dal 10/09/1979 al 10/01/1980 (Tabella 2).

In tutte le analisi 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.

Tabella 2. *Analisi effettuate (gruppo A, B, C).*

Gruppo di analisi	Condizione iniziale (CI) al p.c. s [kPa]	Pioggia		Durata (TA)
		dal	al	
A	4	Film d'acqua (u=0 kPa)		
	10			
	20			
	45			
	75			
	120			
B	45	10-set-95	10-gen-97	16 mesi
		10-set-96		4 mesi
C	45	10-set-79	10-gen-80	4 mesi
		10-ott-79		3 mesi

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. Tuttavia, se, durante il calcolo, vengono calcolate pressioni neutre positive lungo i bordi, il codice assegna automaticamente pressione nulla consentendo il calcolo di un flusso d'acqua diverso da zero uscente dai bordi.

4. Risultati

Si definisce WS la quantità d'acqua accumulata nei meati di una colonna unitaria di terreno di spessore pari alla coltre piroclastica poggiante sul bedrock, determinata come:

$$WS = \sum_i \theta_{w,i} \cdot A_i / L \quad (1)$$

dove $\theta_{w,i}$ è il contenuto d'acqua volumetrico medio dell'i-esimo strato calcolata dal modello, A_i è l'area dell'i-esimo strato lungo la sezione longitudinale investigata e L è la lunghezza del pendio.

Di seguito saranno discussi i valori di WS determinati nel tempo per i tre gruppi di analisi e i valori di FS calcolati in corrispondenza del gruppo di analisi B e C.

I risultati del gruppo di analisi A (Figura 3) mostrano che grazie all'elevata conducibilità idraulica e al modesto spessore dei terreni di copertura, sia il tempo di propagazione del fronte umido che il tempo necessario per raggiungere il massimo valore di WS_{max} (=1450 mm) sono brevi in presenza di una disponibilità infinita di acqua a p.c.. Partendo da una CI umida (s=4 kPa) fino ad arrivare ad una CI secca (s=120 kPa), il tempo minimo (T_{min}) necessario per raggiungere la condizione di equilibrio idraulico con le condizioni al bordo aumenta seppur non linearmente (Tabella 3). Nel caso in cui a p.c. si abbia una CI caratterizzata da una suzione di 45 kPa al p.c., per raggiungere il WS_{max} , occorre un incremento di WS (ΔWS_{max}) di 500 mm. Questo valore è tipicamente la pioggia che cade in autunno nell'arco di tre mesi nel bacino dei Monti Lattari. Pertanto, l'avanzamento del fronte umido che determina la saturazione della coltre è un fenomeno regolato dalla quantità di pioggia caduta e dall'intervallo di tempo necessario per accumulare la quantità di pioggia richiesta per raggiungere l'equilibrio idraulico nel pendio.

Indipendentemente dalla CI, l'infinita disponibilità di acqua a p.c. consente di raggiungere il massimo valore di WS nel pendio che si attinge in corrispondenza della completa saturazione dei meati ($WS_{max} = WS_{sat} = 1450$ mm). Nella realtà, a causa di bolle d'aria che restano intrappolate nei meati del terreno, anche in caso di eventi meteorici intensi, il massimo valore di WS non viene mai raggiunto, ma risulta essere pari a $\alpha \cdot WS_{sat}$, con $\alpha < 1$.

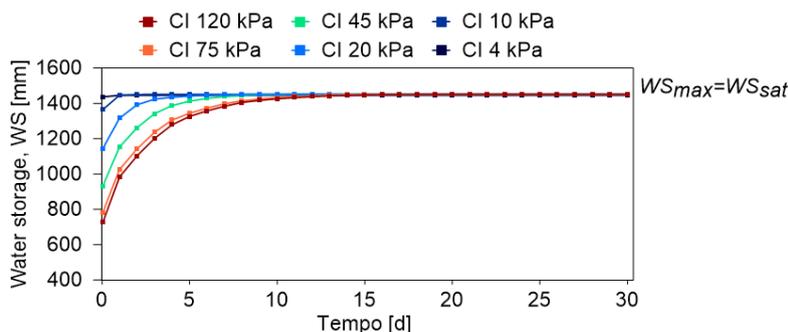


Fig.3. Risultati delle analisi del gruppo A: andamento di WS nel tempo al variare della CI in presenza di una disponibilità di acqua infinita al p.c..

Tabella 3. Tempi minimo e massimo incremento di WS per attingere la completa saturazione del pendio.

Condizione iniziale (CI) al p.c.	Tempo minimo per attingere il massimo WS	Massimo incremento di WS
s [kPa]	T_{min} [giorni]	ΔWS_{max} [mm]
4	1	9
10	3	86
20	9	307
45	12	519
75	17	669
120	26	725

I risultati del gruppo di analisi B (Figura 4a), mostrano che nel periodo estivo WS raggiunge il valore minimo di 890 mm (DWS), mentre nel periodo umido WS oscilla intorno ad un valore stabile di 1170 mm (WWS) che viene superato in caso di eventi meteorici intensi e/o duraturi. In particolare in corrispondenza di WWS, l'acqua inizia a drenare dal bordo inferiore. Nel giorno in cui si innescò la frana, WS raggiunge il valore critico di 1350 mm ($\alpha \cdot WS_{sat}$). Questi risultati sono supportati dall'andamento del coefficiente di sicurezza (FS) nel tempo (Figura 4b) infatti si attinge un valore di $FS=0.98$ in corrispondenza dell'evento critico del 10/01/1997. Inoltre, si osserva come i risultati ottenuti su 4 mesi siano coincidenti con quelli ottenuti su 16 mesi pertanto, in questo caso, 4 mesi di pioggia risultano essere sufficienti a cancellare l'effetto della condizione iniziale.

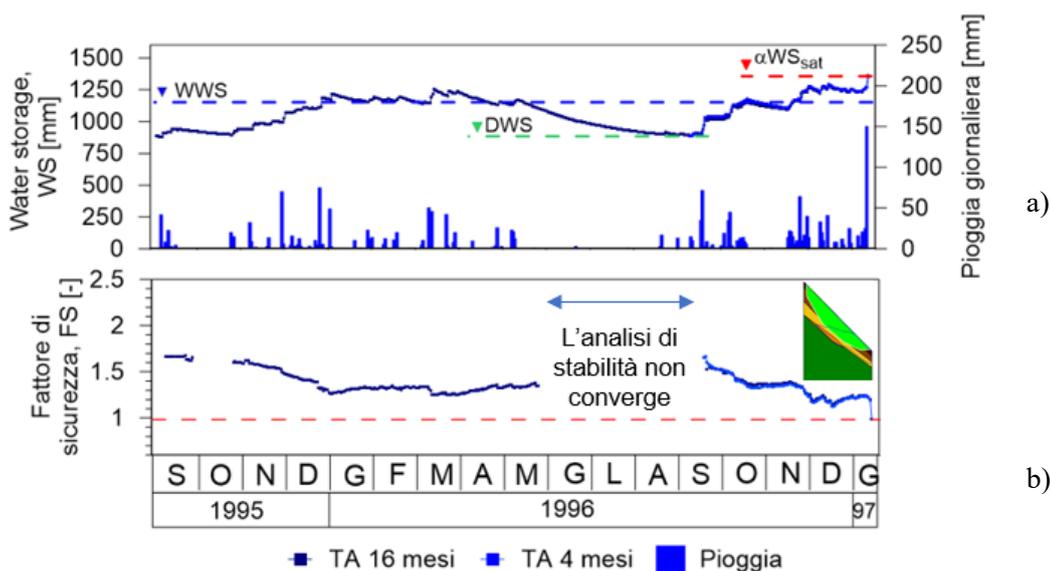


Fig.4. Risultati delle analisi del gruppo B: a) fattore di sicurezza (FS) nel tempo; b) andamento del WS nel tempo al variare del tempo di analisi.

Nel caso in cui al p.c. è applicata una diversa distribuzione di pioggia (analisi del gruppo C), i risultati delle analisi mostrano che sebbene nel periodo umido venga attinto il valore stabile di WWS pari a circa 1170 mm, WS non raggiunge mai il valore critico di 1350 mm ($\alpha \cdot WS_{sat}$) in quanto nel periodo umido del 1980 non si verificarono intensi eventi meteorici (Figura 5a). Le analisi di stabilità confermano questi risultati in quanto i valori di FS nel tempo sono sempre maggiori dell'unità (Figura 5b). In questo caso si osserva come 3 mesi di pioggia risultano essere sufficienti a cancellare l'effetto della condizione iniziale.

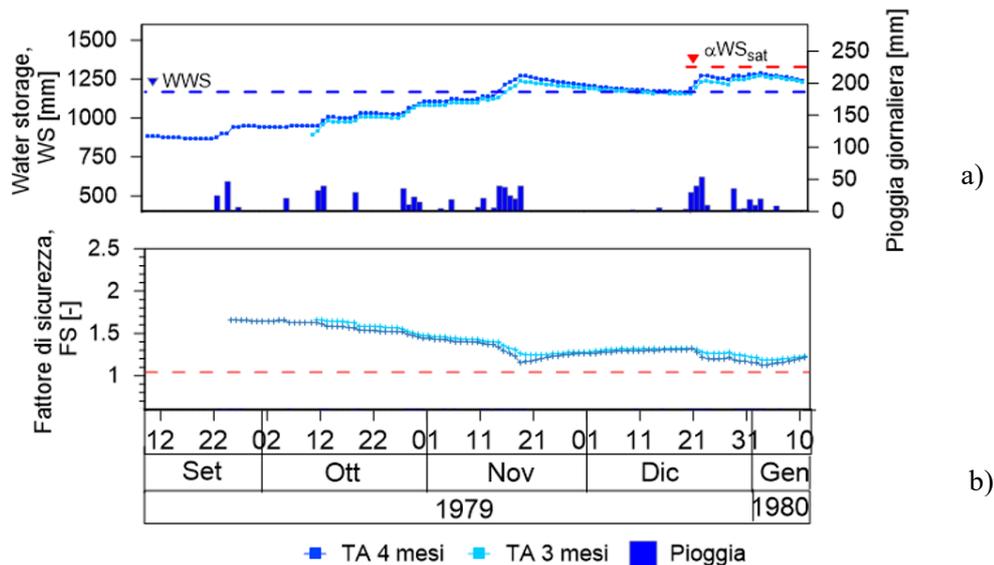


Fig.5. Risultati delle analisi del gruppo C: a) fattore di sicurezza (FS) nel tempo; b) andamento di WS nel tempo al variare del tempo di analisi.

5. Conclusioni

Il contenuto d'acqua nel pendio (WS) può essere assunto come parametro per prevedere l'innesco di colate rapide di fango in quanto è un utile indicatore dello stato idraulico nel sottosuolo. In particolare in inverno raggiunge un valore stabile (WWS), risultato dell'equilibrio idraulico tra la pioggia infiltrata ed il deflusso dal bordo inferiore. La soglia WWS può essere assunta come fattore predisponente per l'innesco di colate rapide in quanto viene superata solo in seguito a un'intensa pioggia che provoca un'infiltrazione tale da innalzare il valore di WS al valore critico ($\alpha \cdot WS_{sat}$).

Con questa premessa, WWS può essere utilizzato nei sistemi di allerta precoce fisicamente basati in modo più efficiente e affidabile rispetto a variabili locali come la suzione o il contenuto d'acqua.

Bibliografia

- Dias AS, Pirone M, Nicotera MV, Urciuoli G (2021a). "Hydraulic hysteresis of natural pyroclastic soils in partially saturated conditions: experimental investigation and modelling", *Acta Geotechnica* <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01273-y>
- Dias AS, Pirone M, Valerio M, Urciuoli G (2021b). "Geomechanics for Energy and the Environment Hydraulic characterization of an unsaturated vegetated soil: The role of plant roots and hydraulic hysteresis", *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100235>
- Forte G, Pirone M, Santo A, Nicotera MV, 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, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.014>
- Van Genuchten MT (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898