

CONDUCIBILITÀ IDRAULICA E PRESSIONI INTERSTIZIALI IN UNA COLATA IN ARGILLE VARICOLORI

Jacopo De Rosa, Caterina Di Maio, Roberto Vassallo
Università degli Studi della Basilicata
e-mail referente: jacopo.derosa@unibas.it

Sommario

Conducibilità idraulica e pressioni interstiziali sono state valutate nella formazione stabile, nel corpo di frana e nella fascia di scorrimento della colata di Costa della Gaveta (Potenza). Le prove di permeabilità in sito sono state eseguite sia con procedure *standard* che con procedure innovative, mediante un permeametro progettato ad *hoc* per misure locali. I risultati mostrano che la conducibilità idraulica della fascia di scorrimento è molto maggiore di quella del corpo di frana, a sua volta maggiore di quella della formazione stabile. Le pressioni dell'acqua, monitorate mediante piezometri Casagrande e celle elettriche a corda vibrante, esibiscono una risposta alle piogge più rapida lungo la fascia di scorrimento rispetto a quella del corpo di frana e della formazione stabile. Le pressioni interstiziali lungo la fascia di scorrimento risultano correlate alle velocità di spostamento basale. Le analisi numeriche eseguite con il codice MODFLOW 3D forniscono risultati coerenti con le osservazioni sperimentali, mostrando infatti che la presenza di una fascia di scorrimento a maggiore permeabilità determina da una parte un significativo effetto di drenaggio complessivo e dall'altra una maggiore risposta alle piogge che si ripercuote significativamente sul coefficiente di sicurezza FS valutato con i metodi dell'equilibrio limite globale.

1. Introduzione

La colata di Costa della Gaveta si sviluppa ad Est della città di Potenza nella formazione delle Argille Varicolori dell'Appennino Meridionale. La colata si muove con velocità medie annue che vanno da pochi mm/anno nella zona dell'accumulo ad alcuni cm/anno nella zona di testa. Nel periodo di osservazione, le velocità medie annue sono risultate praticamente costanti, con variazioni stagionali. Di Maio et al. (2020) e Vassallo et al. (2015, 2016) hanno mostrato che l'andamento nel tempo degli spostamenti è chiaramente influenzato dalle piogge, pur essendo la superficie di scorrimento profonda fino a circa 40 m e pur essendo i terreni caratterizzati da una notevole frazione argillosa (*c.f.* > 40%). Di Maio et al. (2020, 2021) per giustificare l'influenza delle piogge in questo tipo di frana hanno ipotizzato che la fascia di scorrimento della frana potesse costituire una via preferenziale di propagazione dell'acqua e/o delle sue pressioni. Allo scopo di verificare tale ipotesi, è stata realizzata una campagna di indagini con la realizzazione di fori di controllo dei flussi di acqua e ioni e con l'installazione di piezometri all'interno del corpo di frana, della fascia di scorrimento e della formazione stabile. All'interno dei fori sono state eseguite prove di permeabilità, sia con procedure *standard* che mediante procedure non convenzionali, ideate per il caso di studio. Per analizzare i principali aspetti dell'influenza della conducibilità idraulica della fascia di scorrimento sulla distribuzione delle pressioni dell'acqua interstiziale nel versante e sulla loro risposta alla pioggia, è stata eseguita una modellazione numerica 3D mediante il codice alle differenze finite MODFLOW-2005.

2. Conducibilità idraulica in sito e in laboratorio

La conducibilità idraulica dei terreni di Costa della Gaveta è stata determinata mediante prove di sito eseguite nel corpo di frana, nella formazione stabile e in corrispondenza della superficie di scorrimento. Nell'Ottobre del 2015 nella zona di testa della frana è stato realizzato un campo prove di 11 pozzi (K_i) sostenuti da tubazioni di rivestimento sfinestrate con profondità maggiori di quelle della superficie di scorrimento. A Gennaio del 2019 è stato realizzato un nuovo pozzo (K9D) nella zona del canale di frana. Nei pozzi sono state eseguite numerose prove utilizzando due diverse procedure. La

prima (*slug test*) consiste nell'imporre un gradiente idraulico abbassando il pelo libero dell'acqua all'interno del pozzo e monitorandone la risalita. Il secondo tipo di prova è stato eseguito negli stessi pozzi grazie ad un permeametro realizzato presso Laboratorio di Geotecnica dell'Università della Basilicata, progettato per stime locali, con continuità lungo le pareti dei pozzi. Si tratta di una cella sostenuta da una serie di aste cave che scorre a tenuta lungo le pareti del pozzo. La procedura di prova consiste nell'abbassare il pelo libero dell'acqua nel foro fino a profondità maggiori di quelle della superficie di scorrimento e nel valutare, a varie profondità, le portate affluenti all'interno della cella. La prova viene generalmente ripetuta almeno due o tre volte ad ogni profondità. I dati sperimentali mostrano afflussi di acqua concentrati all'interno di fasce (con spessore di 0,5-1 m) localizzate in prossimità della superficie di scorrimento (Figura 1a). Sono state anche eseguite prove di permeabilità con procedure *standard* nei piezometri Casagrande installati all'interno del corpo di frana, nella formazione stabile e in corrispondenza della superficie di scorrimento. Per la determinazione della conducibilità idraulica, i dati sperimentali ottenuti mediante le due procedure di prova sono stati interpretati con il codice di calcolo SEEP/W 2D in condizioni assialsimmetriche e con il metodo di Hvorslev (1951).

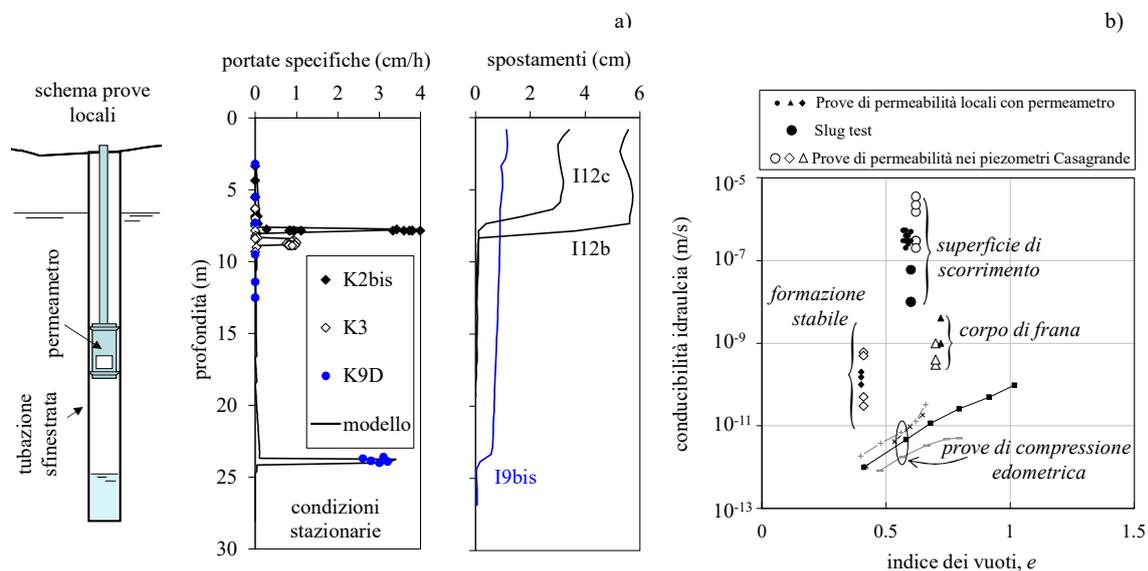


Fig 1. Schema di prova, velocità di filtrazione lungo le pareti dei pozzi e spostamenti cumulati negli inclinometri ubicati in loro prossimità (a); conducibilità idraulica k nelle tre diverse zone del sottosuolo ottenuta mediante prove in sito e confronto con i risultati di prove di laboratorio (b) (Di Maio et al., 2021).

La Figura 1b, che riporta i valori di conducibilità idraulica ottenuti mediante le diverse procedure nelle tre zone del modello geotecnico di sottosuolo, mostra chiaramente come la fascia di scorrimento sia molto più permeabile, di alcuni ordini di grandezza, rispetto alle altre zone. In particolare, le prove in sito forniscono valori di k nell'intervallo $10^{-7} \text{ m/s} < k_{sz} < 10^{-5} \text{ m/s}$ in corrispondenza della fascia di scorrimento, $10^{-10} \text{ m/s} < k_{lb} < 10^{-9} \text{ m/s}$ nel corpo di frana, $10^{-11} \text{ m/s} < k_{sf} < 10^{-10} \text{ m/s}$ nella formazione stabile. Per confronto, la figura riporta anche la conducibilità idraulica ottenuta interpretando le curve di consolidazione di alcune prove di compressione edometrica eseguite sia su provini indisturbati che ricostituiti. Come previsto, i valori di k determinati sull'elemento di volume sono molto minori di quelli determinati su grandi volumi in sito.

3. Pressioni dell'acqua interstiziale

3.1 Misure sperimentali

Le pressioni interstiziali del versante vengono monitorate da circa 15 anni mediante piezometri

Casagrande e celle elettriche a corda vibrante installati all'interno del corpo di frana e nella formazione stabile. Recentemente, nuovi piezometri Casagrande sono stati installati in corrispondenza della superficie di scorrimento. La Figura 2 mostra l'evoluzione temporale delle pressioni interstiziali, riportata in termini di profondità del pelo libero dal piano campagna, registrata dai piezometri installati nel corpo di frana e nella formazione stabile. Si può osservare come, in tali zone, le variazioni stagionali delle pressioni siano trascurabili.

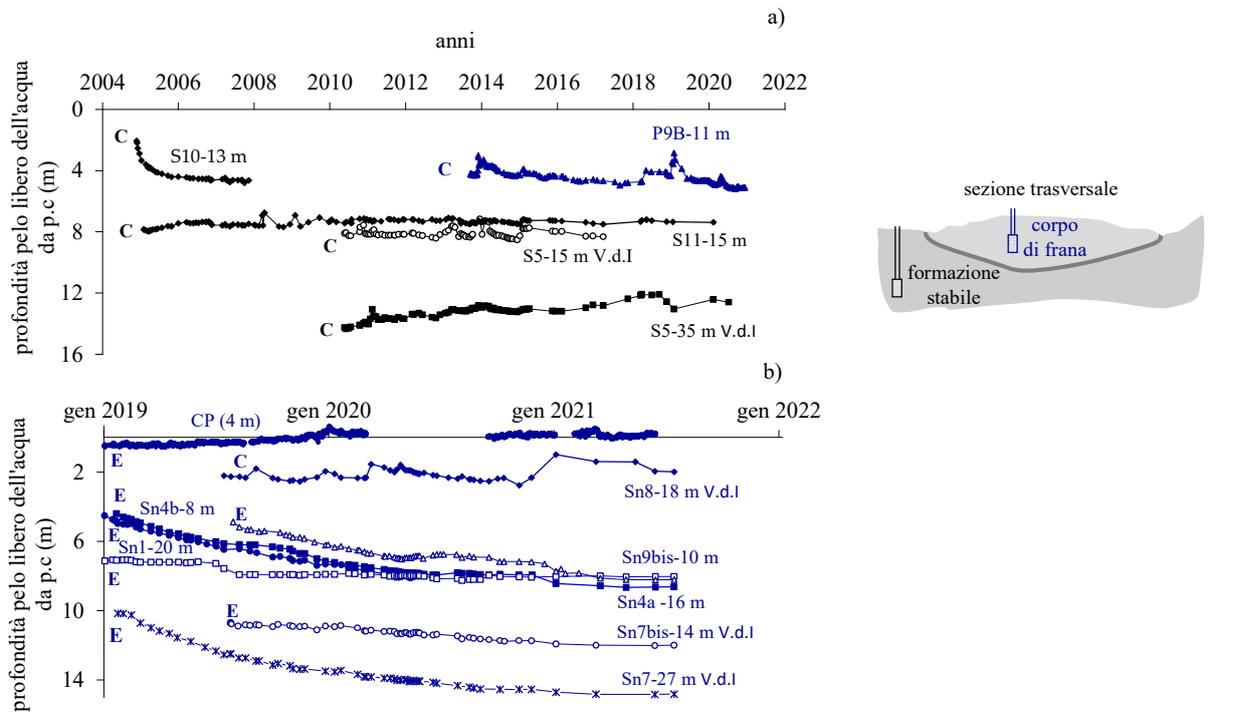


Fig. 2. Pressioni dell'acqua: piezometri Casagrande (C) e celle elettriche (E) nel corpo di frana (curve blu) e nella formazione stabile (curve nere) dal 2004 (a); negli ultimi 3 anni (b) (ridisegnato da Di Maio et al., 2021).

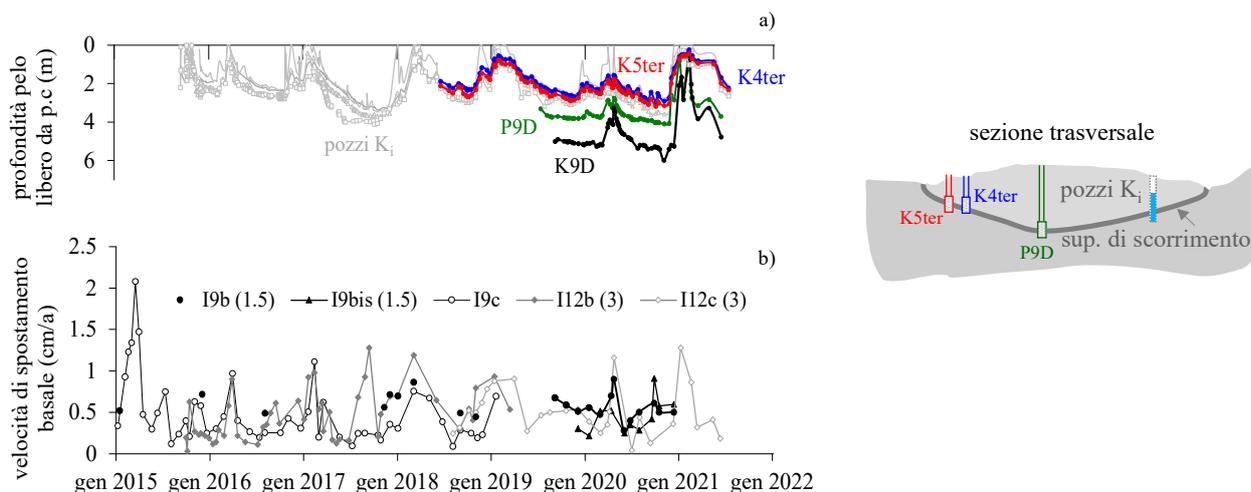


Fig. 3. Pressioni dell'acqua determinate in corrispondenza della fascia di scorrimento mediante piezometri Casagrande e pozzi K_i (a); velocità di spostamento basale (ridisegnato da Di Maio et al., 2021).

Non mostrano variazioni stagionali anche le celle elettriche a corda vibrante, CP e Sn4b, installate a circa 4 m e 8 m di profondità dal p.c., rispettivamente nella zona di testa e nella zona di accumulo della frana (Figura 2b). Al contrario, i piezometri Casagrande installati nella fascia di scorrimento (K4ter, K5ter a 8 m di profondità nella zona di testa della frana e P9D a 25 m nella zona del canale di frana) mostrano significative variazioni stagionali (Figura 3a). Variazioni simili sono state osservate nei pozzi K_i del campo prove e nel pozzo K9D realizzato nel canale di frana. La Figura 3b riporta per alcune verticali inclinometriche l'andamento temporale delle velocità di spostamento basale. In particolare sono riportate le velocità registrate nell'inclinometro I9b e, per rendere confrontabili le serie, le velocità di I9b e I9bis divise per 1,5 e quelle di I12b e I12c divise per 3. Si può osservare che le velocità di scorrimento sono in fase tra loro e con le serie sperimentali delle pressioni interstiziali misurate in corrispondenza della superficie di scorrimento.

3.2 Modellazione con MODFLOW 3D

Al fine di valutare come la distribuzione della conducibilità idraulica influenzi le pressioni interstiziali sulla superficie di scorrimento, è stato costruito un modello 3D con il software alle differenze finite MODFLOW-2005. Il modello è diverso da quello adottato da Vassallo et al. (2015) per la fascia di scorrimento, caratterizzata da una conducibilità idraulica diversa da quella del corpo di frana. Per queste analisi è stato attribuito alla fascia di scorrimento uno spessore di 2 m. Il dominio di calcolo si estende da una sezione trasversale passante per il piezometro S11 fino al fiume Basento (Figura 4). Il terreno è stato considerato saturo fino al p.c. La condizione idraulica al contorno sul piano χ passante per il piezometro S11 è pari a $H = 770$ m. Lungo tutte le verticali passanti per il Fiume Basento è stato assegnato il valore $H = 630$ m, pari al livello dell'acqua in corrispondenza dell'intersezione del fiume con la sezione AA'. La condizione di flusso nullo è stata assegnata sui contorni laterali β e δ . Stessa condizione è stata assegnata anche sul piano orizzontale ϵ . Sul piano campagna sono state assegnate diverse condizioni al contorno. Per le analisi stazionarie sono state considerate due condizioni: $u = 0$ (corrispondente alla condizione di pioggia continua con intensità maggiore della conducibilità idraulica), e $u = -40$ kPa (corrispondente alla suzione media valutata nel periodo estivo nei tensiometri installati nella zona di testa della frana). Sono state condotte numerose analisi utilizzando diverse distribuzioni della conducibilità idraulica, assunta isotropa. In particolare sono stati considerati i seguenti casi: caso a: k_l (corpo di frana) = k_{sz} (fascia di scorrimento) = k_{sf} (formazione stabile) = 10^{-9} m/s; caso b: $k_l = 10^{-9}$ m/s, $k_{sz} = 10^{-7}$ m/s, $k_{sf} = 10^{-10}$ m/s; caso c: $k_l = 10^{-9}$ m/s, $k_{sz} = 10^{-10}$ m/s, $k_{sf} = 10^{-9}$ m/s; caso d: $k_l = 10^{-7}$ m/s, $k_{sz} = 10^{-7}$ m/s, $k_{sf} = 10^{-10}$ m/s. Tra i casi analizzati, il caso b considera i valori medi sperimentali di k e pertanto rappresenta il caso più realistico. La Figura 4 riporta, per la condizione al contorno di $u = 0$ sul piano campagna, le differenze di altezza piezometrica $\Delta u/\gamma_w$ lungo la superficie di scorrimento della sezione AA' dei casi b, c e d rispetto al caso a di terreno omogeneo. Si può osservare che la presenza di una superficie di scorrimento più permeabile (caso b) provoca un importante effetto drenante con una significativa riduzione delle pressioni interstiziali (fino a 4 m). Sono state condotte anche analisi transitorie partendo dalla condizione stazionaria relativa a $u = 0$ sul piano campagna e applicando successivamente la serie storica di pioggia. Sulla base dei dati ottenuti in laboratorio, è stato considerato un coefficiente di compressibilità $m_v = 10^{-5}$ kPa $^{-1}$ per il corpo di frana e per la fascia di scorrimento, e $m_v = 10^{-6}$ kPa $^{-1}$ per la formazione stabile. La Figura 5 riporta, per alcuni punti della superficie di scorrimento in corrispondenza della zona di testa della frana, l'evoluzione temporale del carico idraulico ottenuta dall'analisi numerica e dalle misure in situ. Si può osservare come le curve ottenute numericamente interpretano molto bene i dati sperimentali soltanto nel caso di fascia di scorrimento più permeabile (caso b).

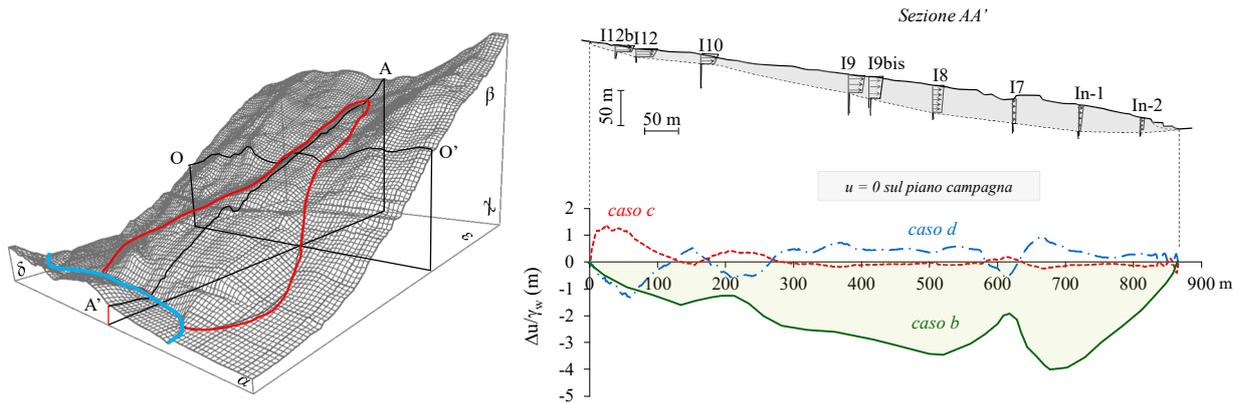


Fig. 4. Dominio di calcolo e differenza di altezza piezometrica $\Delta u/\gamma_w$ lungo la superficie di scorrimento della sezione AA' dei casi b, c e d rispetto al caso a di terreno omogeneo (ridisegnato da Di Maio et al., 2021).

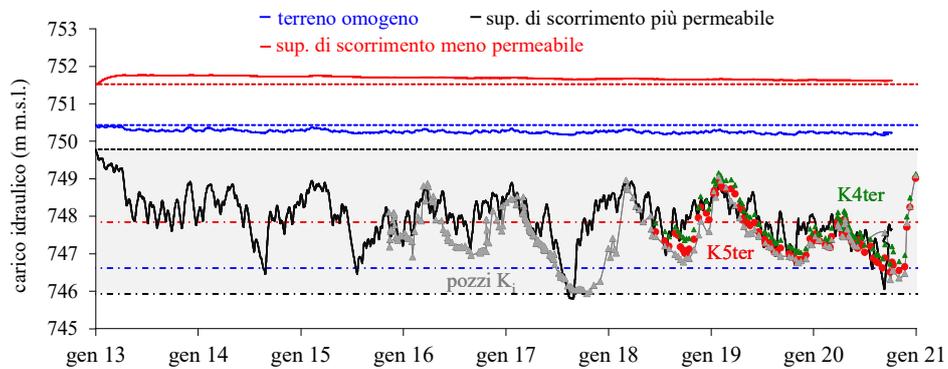


Fig. 5. Evoluzione temporale del carico idraulico in corrispondenza della superficie di scorrimento: risultati sperimentali e di calcolo (ridisegnato da Di Maio et al., 2021).

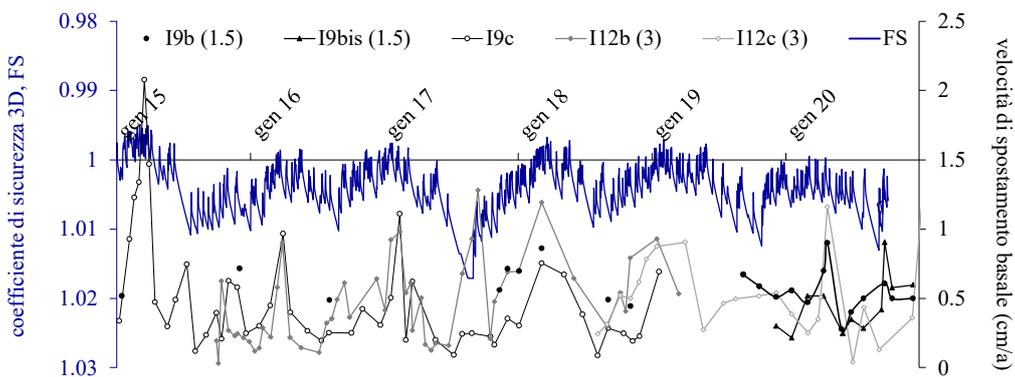


Fig. 6. Coefficiente di sicurezza FS-3D all'equilibrio limite in condizioni transitorie per il caso b, assumendo $\phi' = 11^\circ$ e confronto con le velocità di spostamento basale (ridisegnato da Di Maio et al., 2021).

4. Coefficiente di sicurezza 3D all'equilibrio limite globale

Per valutare l'influenza globale sulle condizioni di stabilità del versante delle distribuzioni di pressioni interstiziali lungo la superficie di scorrimento, è stato calcolato il coefficiente di sicurezza 3D all'equilibrio limite globale con il metodo delle colonne verticali (Hovland, 1977; Ahmed et al., 2012), sia in condizioni stazionarie che transitorie (Di Maio et al., 2021). Per le condizioni transitorie è stata utilizzata una soluzione in forma chiusa proposta per la stessa frana da Vassallo et al. (2015). La Figura 6 riporta i risultati ottenuti per il caso *b* di superficie di scorrimento più permeabile e per $\phi' = 11^\circ$. Quest'ultimo è l'angolo di attrito per cui FS diventa leggermente superiore a 1 nei periodi di velocità di spostamento minima, tendente a zero. Si può osservare una variazione stagionale di FS in fase con quella della velocità di spostamento basale.

Conclusioni

Questo lavoro riporta i risultati delle misure in situ di conducibilità idraulica e di pressioni interstiziali all'interno del corpo di frana, nella formazione stabile e in corrispondenza della fascia di scorrimento di una colata in Argille Varicolori. Le prove di permeabilità in sito sono state eseguite sia con procedure *standard* che con procedure innovative. I risultati della sperimentazione mostrano che la fascia di scorrimento risulta caratterizzata da una conducibilità idraulica molto maggiore rispetto a quelle delle altre zone del sottosuolo. I risultati del monitoraggio delle pressioni dell'acqua mostrano che queste ultime, in corrispondenza della superficie di scorrimento nella zona di testa della frana (~10 m), sono significativamente e rapidamente influenzate dalle piogge. Al contrario non si osservano variazioni stagionali significative nei piezometri installati nel corpo di frana e nella formazione stabile anche a profondità di pochi metri dal p.c.

I risultati della modellazione 3D con il codice FD MODFLOW mostrano che la maggiore permeabilità della fascia di scorrimento rispetto a frana e formazione produce un duplice effetto: a) drenaggio generalizzato con un importante abbassamento della pressione interstiziale media sulla superficie di scorrimento, b) risposta significativa e rapida alle piogge fino a circa 10 m di profondità. La significatività della risposta globale delle pressioni interstiziali alle piogge è stata analizzata tramite il coefficiente di sicurezza 3D, che esibisce una variazione stagionale in fase con quella della velocità di spostamento basale.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata dal PRIN2015 e dal Programma MIUR PON R&I 2014-2020 (progetto MITIGO, ARS01_00964).

Bibliografia

- Ahmed, A., Uga, K., Yang, Q., 2012. Assessment of 3D Slope Stability Analysis Methods Based on 3D Simplified Janbu and Hovland Methods. *Int. J. Geomech.*, 12(2): 81-89.
- Di Maio, C., De Rosa, J., Vassallo, R., 2021. Pore water pressures and hydraulic conductivity in the slip zone of a clayey earthflow: experimentation and modelling. *Engineering Geology*, 292, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106263>.
- Di Maio, C., De Rosa, J., Vassallo, R., Coviello, R., Macchia, G., 2020. Hydraulic conductivity and pore water pressures in a clayey earthflow: Experimental data. *Geosciences*, 10, 102.
- Hovland, H. J., 1977. Three-dimensional slope stability analysis method. *J. Geotech. Eng. Div.*, 103(9), 971-986.
- Hvorslev, M.J., 1951. Time lag and soil permeability in ground-water observations. *Waterways experimental station. Corps of Engineers, US Army. Vicksburg, Mississippi. Bulletin*, 36, 50 pp. 1-50.
- Vassallo, R., Doglioni, A., Grimaldi, G.M., Di Maio, C., Simeoni, V., 2016. Relationships between rain and displacements of an active earth flow: a data driven approach by EPRMOGA. *Nat. Haz.*, 81, 1467-1482.
- Vassallo, R., Grimaldi, G.M., Di Maio, C., 2015. Pore water pressures induced by historical rain series in a clayey landslide: 3D modeling. *Landslides*, 12, 731-744.