



MODELLAZIONE NUMERICA IDRO-MECCANICA DEL VERSANTE DI MISCANO

Ali Tawalo

Scuola Superiore Meridionale

ali.tawalo-ssm@unina.it

Gaetano Falcone, Anna D'Onofrio, Marianna Pirone, Gianfranco Urciuoli

DICEA – Università degli studi di Napoli Federico II

gaetano.falcone@unina.it, anna.donofrio@unina.it, marianna.pirone@unina.it,

gianfranco.urciuoli@unina.it

Sommario

La previsione degli spostamenti indotti dall'infiltrazione delle piogge in un pendio, prima di un eventuale collasso, è fondamentale al fine di valutare le prestazioni delle infrastrutture potenzialmente coinvolte sia in una condizione di esercizio sia di stato limite ultimo. In questo contributo è presentata la modellazione numerica del comportamento idro-meccanico di un versante appartenente al caso studio della Valle del Miscano (BN). A tale scopo è stato utilizzato il codice agli elementi finiti PLAXIS 2D adottando due leggi costitutive: il modello lineare elastico-perfettamente-plastico (Mohr-Coulomb, MC) e il modello Hardening Soil with small strain stiffness (HSsmall). L'obiettivo del lavoro è stato quello di valutare la prestazione di questi due modelli costitutivi nella previsione del comportamento idro-meccanico del pendio. I parametri di MC e HSsmall sono stati determinati attraverso la simulazione dei dati di monitoraggio in sito registrati durante l'anno 1993, in termini di spostamenti orizzontali cumulati al piano campagna (u_x) e di pressioni interstiziali. Il modello HSsmall fornisce un andamento nel tempo degli spostamenti più realistico rispetto alla previsione ottenuta con il modello MC. I valori di u_x a circa metà anno e a fine anno sono sottostimati, rispettivamente, del 2% e del 21% con il modello HSsmall mentre il modello MC fornisce una sovrastima, rispettivamente, del 42% e di circa il 33%.

1. Introduzione

Prevedere accuratamente gli spostamenti di coltri di terreno in frana lungo superfici di scorrimento pregresse, è cruciale per valutare in modo affidabile le prestazioni delle strutture presenti lungo il versante. Esistono numerosi studi che correlano il fattore di sicurezza del pendio ad alcune grandezze predisponenti il collasso (Elia et al., 2017), quali ad esempio: le piogge pregresse e le proprietà idro-meccaniche dei terreni (Urciuoli et al., 2016; di Lernia et al., 2022), la presenza di eventuali eterogeneità della distribuzione di tali proprietà nel sottosuolo (Cotecchia et al., 2015) e il tipo di vegetazione (Pedone et al., 2021). Ad oggi pochi lavori investigano con approcci analitici o numerici gli spostamenti cumulati osservati durante la riattivazione ciclica del corpo di frana. Ad esempio, Urciuoli (2002) propose un modello per il calcolo degli spostamenti e delle deformazioni in un pendio indefinito causati dall'innalzamento della falda freatica considerando un legame costitutivo elasto-plastico. Secondo tale modello lo stato tensionale iniziale ha un effetto importante sul profilo degli spostamenti orizzontali che precede il collasso. Elia et al. (2020) studiarono l'effetto della variazione della pressione interstiziale

sulla stabilità di un pendio adottando un modello costitutivo ad incrudimento cinematico (Rouainia & Wood, 2015), capace di simulare il degrado della struttura del terreno indotto dalle oscillazioni cicliche della falda. È opportuno notare che gli studi sopra citati presentano delle approssimazioni come, ad esempio, l'assunzione di geometrie di pendio semplificate oppure il trascurare l'effetto della evapotraspirazione nella simulazione delle oscillazioni di falda.

In questo contesto, la nota discute gli spostamenti di un versante della Valle del Miscano (BN) indotti dall'infiltrazione delle piogge e determinati mediante simulazioni numeriche. I dati di pioggia, evapotraspirazione, pressione interstiziale e spostamenti orizzontali superficiali cumulativi annuali, raccolti in sito durante il 1993 (Picarelli et al., 1999), sono stati utilizzati per la calibrazione del modello numerico. Le simulazioni numeriche sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo PLAXIS 2D (Brinkgreve et al., 2022). In particolare, sono state utilizzate due leggi costitutive: un modello elastico lineare-perfettamente plastico, Mohr-Coulomb (MC), e un modello costitutivo isteretico elasto-plastico a incrudimento isotropo (Benz, 2006; Benz et al., 2009; Schanz et al., 1999), denominato HSsmall. L'obiettivo principale di questo studio è stato fornire una valutazione preliminare delle prestazioni del modello HSsmall rispetto al modello MC nelle simulazioni numeriche di un problema di stabilità dei pendii in cui è investigata l'interazione pendio-atmosfera.

2. Caso di studio

Il versante oggetto di studio è ubicato nel bacino del torrente Miscano nel comune di Benevento. La frana, studiata da Picarelli et al. (1999) e mostrata in Fig. 1, che ha interessato il versante

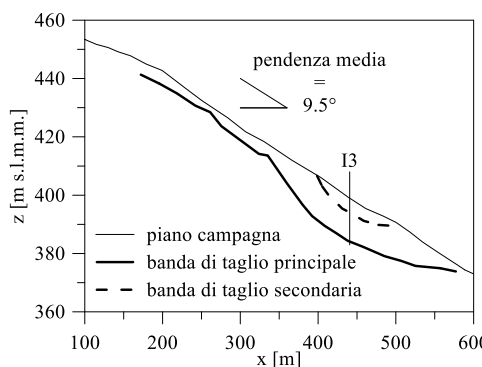


Fig. 1. Sezione longitudinale del versante (modificata dopo Picarelli et al., 1999).

in esame può essere classificata come una frana estremamente lenta. L'angolo di inclinazione del pendio è di 9.5° . Il pendio in frana ha una lunghezza di circa 1 km. Il pendio è costituito da argilliti fortemente fessurate e scagliese di alta plasticità con inglobati blocchi o frammenti isolati di calcare. L'angolo di attrito, ϕ' , delle argilliti varia tra 18° e 23° con coesione, c' , che localmente può variare tra 10 e 60 kPa in funzione del grado di sovraconsolidazione. L'angolo di attrito residuo ottenuto eseguendo prove di taglio diretto varia tra 5° e 8° , invece, quello mobilizzato, ottenuto tramite *back-analysis* all'equilibrio limite, è di circa 13° (Picarelli et al., 1999).

La frana è stata monitorata per diversi anni. Piezometri, inclinometri e pluviometri sono stati utilizzati rispettivamente per monitorare il regime delle acque sotterranee, gli spostamenti orizzontali e i dati di pioggia. Le indagini e le misurazioni in sito hanno permesso di distinguere tre zone principali: il corpo principale di frana composto da terreno dislocato e rimaneggiato dagli spostamenti, la superficie di scivolamento e il terreno intatto. Inoltre, le misure degli spostamenti orizzontali più recenti hanno rivelato la presenza di una seconda superficie di scivolamento più superficiale (Fig. 1). Picarelli e coautori (1999) hanno osservato che i livelli piezometrici misurati nel corpo di frana sono rapidamente e sensibilmente influenzati dalla pioggia mentre nel terreno intatto sottostante si osservano fluttuazioni minori del livello piezometrico, risultando in una variazione più lenta delle pressioni neutre anche in presenza di piogge intense. Le misurazioni inclinometriche mostrano gli spostamenti orizzontali che si verificano dopo i periodi di pioggia, tipicamente all'inizio di ogni anno. La velocità media degli spostamenti orizzontali superficiali cumulati annualmente è relativamente piccola, circa 2 cm all'anno.

3. Modello numerico

L'interazione pendio-atmosfera è stata studiata mediante modelli numerici 2D implementati nel codice

agli Elementi Finiti (FE) PLAXIS 2D (Brinkgreve et al., 2022). Il modello FE adottato incorpora una rappresentazione accurata della reale topografia e della stratigrafia e tiene conto delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione registrate sul versante in esame. La Fig. 2 mostra il modello geotecnico adottato per le simulazioni numeriche e coerente con quello proposto da Picarelli et al. (1999).

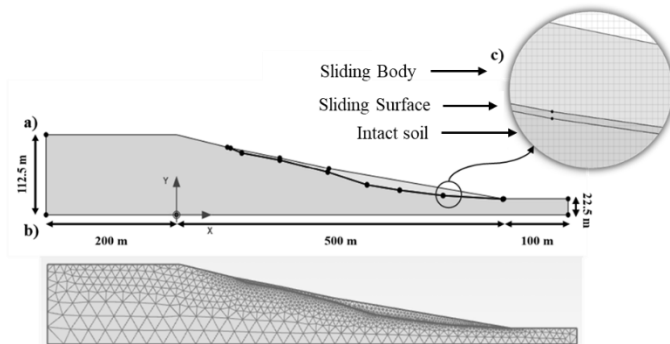


Fig. 2. Modello numerico del versante Miscano: a) modello geometrico e stratigrafico, b) mesh degli elementi finiti, c) close-up che mostra lo strato di spessore pari 1 m implementato per la simulazione della banda di taglio.

In dettaglio, la banda di taglio è rappresentata da uno strato di spessore di 1 m le cui caratteristiche meccaniche in genere risultano ridotte rispetto al materiale circostante per via del decadimento della resistenza e della rigidezza indotto dal movimento del corpo di frana. In Tabella 1 sono riportati i parametri fisico-meccanici implementati nel modello MC. È opportuno sottolineare che i valori di c' , ϕ' e del modulo di Young, E , sono stati ottenuti attraverso una procedura iterativa.

Al primo passo di calcolo i valori di c' e ϕ' sono stati selezionati sulla base dei dati proposti da Picarelli et al. (1999) e riportati nel paragrafo 2; invece, sulla base di esperienze su materiali simili alle argille scagliose fessurate che caratterizzano il sito in esame (Pellegrino et al., 1985), il valore di E è stato assunto pari a 23'000 kPa per la banda di taglio e il corpo di frana e pari a 25'000 kPa per il materiale intatto. In seguito, i valori di c' , ϕ' ed E , brevemente denominati p_a , sono stati ridotti in maniera iterativa nel rispetto della condizione $p_{a\text{banda_di_taglio}} < p_{a\text{corpo_di_frana}} < p_{a\text{materiale_intatto}}$. Ad ogni passo dell'iterazione sono stati calcolati gli spostamenti cumulati a circa metà anno e a fine anno e sono stati confrontati con le misure in sito disponibili relative all'anno 1993. Quindi, i valori riportati in Tabella 1 sono quelli che hanno permesso di ottenere l'errore minimo. È risultato che i valori di c' e ϕ' per il materiale intatto e il corpo di frana sono prossimi al limite superiore indicato da Picarelli et al. (1999) invece per la banda di taglio il valore di ϕ' è pari al limite inferiore dello stesso intervallo. Invece, il valore di c' è risultato minore rispetto al limite inferiore indicato da Picarelli et al. (1999) ma maggiore di 0 per garantire la convergenza numerica delle simulazioni. Per quanto riguarda i parametri assunti per il modello HSsmall per la prima iterazione della procedura sopra descritta, il valore del modulo di rigidezza a taglio alle piccole deformazioni, G_0 , è stato determinato sulla base dell'equazione $G_0 = \rho \cdot V_s^2$ dove ρ è la densità di massa e V_s è la velocità di propagazione delle onde di taglio, quest'ultima determinata pari a 300 m/s tramite la mappa di Forte et al. (2019). Inoltre, il valore della deformazione di taglio $\gamma_{0.7}$ per la quale il modulo secante, $G_{S\text{ref}}$, risulta pari a $0.722 \cdot G_{0\text{ref}}$, è stato determinato in maniera tale da riprodurre al meglio le curve proposte da Vucetic & Dobry (1991) per l'indice di plasticità, PI, pari al 40% (Picarelli et al., 1999). La rigidezza secante in prove triassiali standard drenate riferita alla pressione p_{ref} , E_{50}^{ref} , è stata determinata attraverso l'equazione $E_{50}^{\text{ref}} = (0.06 \sim 0.26) \cdot E_0^{\text{ref}}$ (Mayne, 2006) essendo E_0^{ref} , il modulo di Young alle piccole deformazioni, ottenuto tramite l'equazione $E_0^{\text{ref}} = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G_0$ dove ν è il coefficiente di Poisson posto pari a 0.2. Inoltre, la rigidezza tangente per primo carico edometrico riferita alla pressione p_{ref} , $E_{\text{od}}^{\text{ref}}$, è stata assunta pari a $0.7 \cdot E_{50}^{\text{ref}}$; invece, la rigidezza di scarico/ricarico in prova triassiale standard drenata relativa alla pressione p_{ref} , $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, è stata assunta pari a $3 \cdot E_{50}^{\text{ref}}$. Il parametro m è stato posto pari a 0.5; tale parametro permette di modulare la variazione di G_0 in funzione dello stato tensionale efficace. I valori dei parametri del modello HSsmall ottenuti al termine della procedura iterativa sono riportati in Tabella 2.

Per ogni simulazione numerica sono state adottate due fasi di calcolo: la prima fase è di tipo *gravity loading* e permette di ottenere la condizione litostatica iniziale mentre la seconda fase è di tipo *fully*

coupled flow-deformation e permette di simulare sia la variazione dello stato tenso-deformativo che dipende dal modello costitutivo del terreno sia la variazione della pressione interstiziale indotta dalla condizione idraulica al piano campagna (i.e., $\Delta_{\text{discharge}}$) che rappresenta la pioggia netta giornaliera. Quest'ultima è pari alla differenza $P - ET_0$, dove P è la pioggia giornaliera e ET_0 è l'evapotraspirazione.

Parametro	Banda di taglio	Corpo di frana	Terreno intatto
E [kPa]	18000	18000	20000
ν [-]	0.3	0.3	0.4
c [kPa]	4	4	5
ϕ' [°]	18	21	25
ψ' [°]	0	0	0
γ [kN/m ³]	19	19	20
k_x [m/day]	0.03	0.03	0.03
k_y [m/day]	0.03	0.03	0.03

Tabella 1. Parametri fisico-meccanici relativi al modello MC.

Parametro	Banda di taglio	Corpo di frana	Terreno intatto
E_{50}^{ref} [kPa]	16250	19500	35000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kPa]	11250	13500	20000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [kPa]	48750	58000	105000
$\gamma_{0.7}$ [-]	$8E^{-5}$	$5E^{-4}$	$5E^{-4}$
G_0^{ref} [kPa]	50000	60000	100000
ν [-]	0.2	0.2	0.2
OCR [-]	5	5	5

Tabella 2. Parametri fisico-meccanici relativi al modello HSsmall. I valori di c , ϕ , γ , k_x e k_y sono quelli riportati in Tabella 1.

I valori giornalieri di pioggia sono quelli relativi ad una stazione pluviometrica installata sul versante in esame. Invece, il valore dell'evapotraspirazione giornaliera media per ogni mese, ET_0 , è stato calcolato con il metodo Penman-Monteith (Allen et al., 1998) in funzione dei dati relativi alla stazione climatologica denominata NAPOLI (Altitudine 110 m, Latitudine 40.88° N, Longitudine 14.28° E) disponibile nel database CLIMWAT (<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/en/>). Con riferimento all'anno 1993, l'andamento della pioggia netta, $\Delta_{\text{discharge}}$, applicata al modello numerico è mostrato in Fig. 3a. Con riferimento alla fase iniziale, sono stati impediti gli spostamenti orizzontali lungo i bordi verticali del modello e gli spostamenti verticali lungo la base. Inoltre, la condizione *open* è stata impostata per tutti i bordi del modello durante la seconda fase. Questa condizione permette il flusso di acqua in entrata e in uscita dal bordo al di sopra della posizione della superficie di falda assegnata nella prima fase, invece, assume che l'altezza piezometrica coincida con la posizione della superficie di falda assegnata nella prima fase per la porzione del bordo al disotto della posizione iniziale della superficie di falda.

4. Risultati

La Fig. 3a mostra il confronto tra la previsione numerica delle pressioni interstiziali nel tempo e le misure in sito con riferimento ad una cella piezometrica posta a 2.79 m di profondità. È possibile osservare una diretta correlazione tra tale andamento e quello del flusso al piano campagna. Dal giorno 0 al giorno 225 si osserva una riduzione della pressione da circa 23 kPa a circa 10 kPa seguita da un incremento sino a circa 27 kPa. In particolare, nell'intervallo di giorni 250-270 si osserva un valore costante della pressione con falda al piano campagna e *run-off* (i.e., $\Delta_{\text{discharge}} = 0$ anche se in input $\Delta_{\text{discharge}} > 0$). Inoltre, tramite la simulazione numerica è possibile apprezzare il valore delle pressioni neutre giornaliere rispetto a quanto osservabile tramite le misure discrete in sito relative a 4 giorni su circa 300 simulati numericamente. La Fig. 3b mostra il confronto tra i risultati numerici e i dati di sito in termini di spostamenti orizzontali cumulati al piano campagna, u_x , in corrispondenza della verticale I3 indicata in Fig. 1. È interessante osservare che l'andamento degli spostamenti nel tempo ottenuto

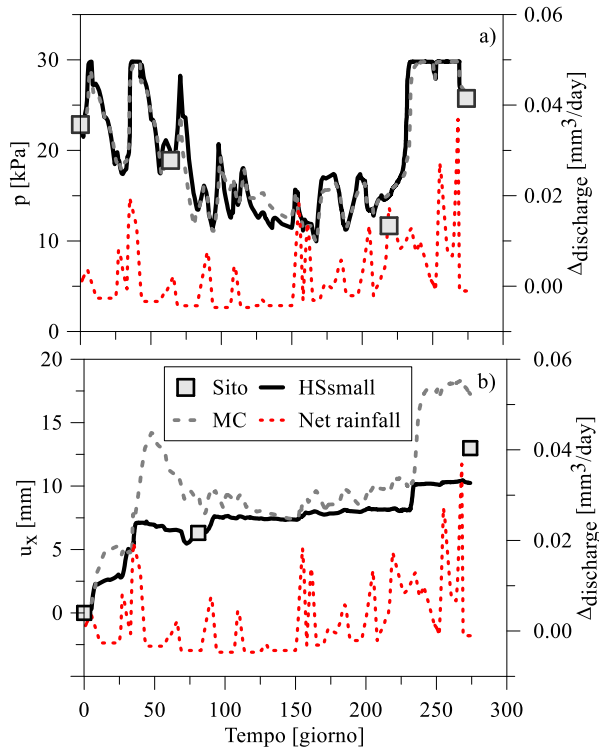


Fig. 3. Con riferimento alla verticale I3 di Fig. 1, confronto tra dati di sito e risultati numerici in termini di: a) pressioni interstiziali alla profondità di 2.79 m dal piano campagna e b) spostamenti orizzontali cumulati al piano campagna. In figura è riportata anche la pioggia netta giornaliera ($\Delta\text{discharge}$).

In Fig. 4 è mostrato il confronto tra u_{x_FE} , ottenuti tramite l'analisi numerica, e le misure in sito disponibili, u_{x_sito} , e sono indicati i valori dell'errore $\varepsilon = (u_{x_FE} - u_{x_sito}) / u_{x_sito}$; con riferimento a tale figura è possibile osservare che la previsione ottenuta adottando il modello HSsmall permette di avere una stima più accurata dei dati di sito con una sottostima al più pari a circa il 21%. Invece, la previsione ottenuta adottando il modello MC comporta una sovrastima dei dati di sito nell'intervallo 32-46%.

5. Conclusioni

La modellazione idro-meccanica di un versante del bacino del torrente Miscano (BN) è stata eseguita utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 2D e adottando due leggi costitutive per il terreno: il modello lineare elasto-plastico (Mohr-Coulomb, MC) e il modello *Hardening Soil*

with small strain stiffness (HSsmall). Entrambi i modelli sono stati calibrati riducendo al minimo la differenza tra i dati di monitoraggio in sito in termini di pressioni interstiziali, p , e di spostamenti orizzontali cumulati al piano campagna, u_x , e i valori calcolati. La previsione numerica delle pressioni neutre è stata soddisfacente, indipendentemente dal modello costitutivo adottato. Tuttavia, per rendere il modello più realistico sarebbe opportuno implementare eventuali eterogeneità verticali e laterali nella distribuzione della permeabilità. Invece, la previsione di u_x risulta significativamente condizionata dalla

tramite le simulazioni numeriche basate sul modello HSsmall, $u_{x_HSsmall}$, risulta essere più realistico rispetto a quello basato sul modello MC, u_{x_MC} . Infatti, l'andamento di u_{x_MC} presenta una serie di picchi direttamente correlati all'andamento di $\Delta\text{discharge}$, invece $u_{x_HSsmall}$ mostra un andamento a gradini. In particolare, u_{x_MC} mostra un andamento decrescente dal giorno 58 al giorno 75 che risulta irrealistico. È opportuno osservare che questa diversa risposta dei modelli numerici è dovuta alla formulazione dei due modelli costitutivi; il modello MC è un modello elastico lineare perfettamente plastico invece HSsmall è un modello elastico non lineare ad incrudimento isotropo. Quindi, l'andamento a gradini ottenuto con il modello HSsmall è dovuto al graduale accumulo di deformazioni plastiche e alla risposta elastica non lineare grazie alla quale ad ogni inversione di carico il materiale mostra una risposta più rigida che riduce l'andamento decrescente di $u_{x_HSsmall}$ rispetto a u_{x_MC} in presenza di un periodo per il quale prevale l'evapotraspirazione ($\Delta\text{discharge} < 0$).

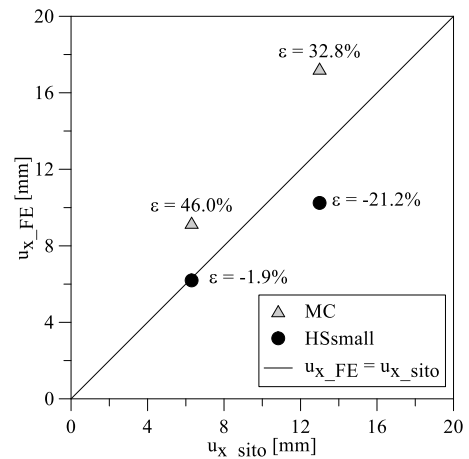


Fig. 4. Scatter-plot dei risultati numerici confrontati con le misure in sito dello spostamento orizzontale cumulato al piano campagna per la verticale I3 di Fig. 1.

formulazione del modello costitutivo. È stato osservato che la previsione ottenuta adottando il modello HSsmall consente una stima più accurata dei dati di sito con una sottostima al più pari a circa il 21%. Invece, la previsione ottenuta adottando il modello MC comporta una sovrastima dei dati di sito nell'intervallo del 32-46%. Inoltre, l'andamento di u_x nel tempo ottenuto tramite le simulazioni numeriche basate sul modello HSsmall risulta essere più realistico rispetto a quello basato sul modello MC. In futuro i due modelli costitutivi saranno validati utilizzando dati di sito registrati durante gli anni successivi al 1993. Inoltre, saranno adottati per eseguire analisi numeriche di risposta sismica locale al fine di valutare gli effetti di sito in funzione delle diverse condizioni di stabilità del versante che si possono avere durante l'anno.

Ringraziamenti

Lo studio pubblicato è stato finanziato dall'Unione Europea - Next Generation EU, nell'ambito del progetto GRINS - Growing Resilient, INclusive and Sustainable (GRINS PE00000018 – CUP E63C22002140007). Le opinioni espresse sono esclusivamente quelle degli autori e non riflettono necessariamente quelle dell'Unione Europea, né l'Unione Europea può essere ritenuta responsabile per esse.

Bibliografia

- Allen, R. G., et al. (1998). Crop evapo-transpiration (guidelines for computing crop water requirements).
- Benz, T. (2006). Small-Strain Stiffness of Soils and its numerical consequences.
- Benz, T., et al. (2009). A small-strain overlay model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(1), 25–44. <https://doi.org/10.1002/nag.701>.
- Brinkgreve, R. B. J., et al. (2022). PLAXIS 2D CONNECT Edition V22 Update 1.
- Cotecchia, F., et al. (2015). Slope instability processes in intensely fissured clays: case histories in the Southern Apennines. *Landslides*, 12(5), 877–893. 10.1007/s10346-014-0516-7.
- Elia, G., et al. (2017). Numerical modelling of slope-vegetation-atmosphere interaction: An overview. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50(3), 249–270. <https://doi.org/10.1144/qjegh2016-079>.
- Elia, G., et al. (2020). Analysis of the Effects of Seasonal Pore Pressure Variations on the Slope Stability Through Advanced Numerical Modelling. *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 40, pp. 184–194). Springer. 10.1007/978-3-030-21359-6_20.
- Forte, G., et al. (2019). Seismic soil classification of Italy based on surface geology and shear-wave velocity measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 79–93. 10.1016/j.soildyn.2019.04.002.
- Mayne, P. W. (2006). In-Situ Test Calibrations for Evaluating Soil Parameters. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 3–4, 1601–1652. 10.1201/NOE0415426916.CH2
- Pedone, G., et al. (2021). Coupled hydro-mechanical modelling of soil-vegetation-atmosphere interaction in natural clay slopes. *Canadian Geotechnical Journal*. 10.1139/CGJ-2020-0479.
- Pellegrino, A., et al. (1985). Geotechnical properties and slope stability in structurally complex clay soils. *Geotechnical Engineering in Italy. An Overview. ISSMFE Golden Jubilee.*, 195–214.
- Picarelli, L., et al. (1999). Controlli su di un pendio instabile attraversato da un metanodotto. XX Convegno Nazionale di Geotecnica: Sviluppo nell'esecuzione e nell'impiego delle indagini geotecniche, 555–562.
- Pirone, M., & Urciuoli, G. (2016). Cyclical suction characteristics in unsaturated slopes. *Volcanic Rocks and Soils. Proceedings of the International Workshop on Volcanic Rocks and Soils*, 183–184.
- Rouainia, M., & Wood, D. M. (2015). A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure. *Geotechnique*. 50(2), 153–164. 10.1680/GEOT.2000.50.2.153
- Schanz, T., et al. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Ten Years of PLAXIS International. Proceedings of the International Symposium, Amsterdam, March 1999.*, 281–296. 10.1201/9781315138206-27.
- Urciuoli, G. (2002). Strains Preceding Failure in Infinite Slopes. *International Journal of Geomechanics*, 2(1), 93–112. 10.1061/(asce)1532-3641(2002)2:1(93).
- Urciuoli, G., et al. (2016). Long-term investigations on the pore pressure regime in saturated and unsaturated sloping soils. *Engineering Geology*, 212, 98–119. 10.1016/j.enggeo.2016.07.018.
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89–107. 10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89).