

MECCANISMI DI DEFORMAZIONE E ROTTURA DI UN PENDIO A SEGUITO DI SCAVI

Luigi Pugliese

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria, Rende, 87036, Cosenza
luigi.pugliese@unical.it*

Antonello Troncone

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria, Rende, 87036, Cosenza
antonello.troncone@unical.it*

Enrico Conte

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria, Rende, 87036, Cosenza
enrico.conte@unical.it*

Sommario

Vengono presentati alcuni risultati numerici riguardanti l'analisi di una frana verificatasi in Calabria nel 2014. In particolare, l'evento occorso è stato innescato a seguito di scavi eseguiti al piede del pendio, per la realizzazione di una cabina elettrica primaria. La frana ha interessato diverse opere di sostegno, quali gabbioni e paratie di pali, che sono state notevolmente danneggiate. La superficie di rottura si è sviluppata prevalentemente all'interno di uno strato di argilla, caratterizzata da un pronunciato comportamento strain-softening. Nel presente lavoro, vengono analizzati i meccanismi di innesco della frana e la sua evoluzione tenendo conto anche della fase post-rottura. A tal fine è stato utilizzato il metodo del punto materiale (MPM), insieme ad un modello costitutivo del terreno di tipo Mohr-Coulomb, in cui il comportamento strain-softening è stato simulato riducendo i parametri di resistenza al taglio all'aumentare delle deformazioni deviatoriche plastiche. L'ubicazione della superficie di rottura, l'entità degli spostamenti e la configurazione finale del corpo di frana ottenuti dall'analisi numerica, sono risultati in buon accordo con quanto realmente osservato.

1. Introduzione

I processi di deformazione e rottura dei pendii vengono generalmente suddivisi in quattro fasi ben distinte (Leroueil et al., 1996): pre-rottura, rottura, post-rottura e riattivazione. I meccanismi deformativi che interessano le varie fasi risultano molto differenti tra di loro, rendendo l'analisi dell'intero processo di rottura estremamente complicata. In generale, nella pratica corrente la fase post-rottura di un evento franoso viene del tutto trascurata, sebbene un'analisi predittiva di tale fase potrebbe risultare molto utile, per la valutazione del rischio connesso alla frana e per la progettazione dei più idonei interventi di stabilizzazione.

L'analisi si complica ulteriormente quando i fenomeni di rottura interessano terreni argillosi consistenti, caratterizzati da un pronunciato comportamento strain-softening. La fragilità di tali terreni, infatti, gioca un ruolo fondamentale non solo nella fase pre-rottura, dando luogo al fenomeno della rottura progressiva (Bjerrum, 1967; Bishop, 1967; Burland et al., 1977; Potts et al., 1990), ma influisce anche sulla cinematica della frana nella fase post-rottura, dove la velocità del corpo di frana aumenta all'aumentare della fragilità del terreno. Approcci semplificati, che si rifanno al classico metodo dell'equilibrio limite, sono per loro natura del tutto incapaci di analizzare siffatti problemi. Le tecniche numeriche tradizionali, come ad esempio il metodo degli elementi finiti (FEM) o delle differenze finite (FDM), permettono di analizzare solo le fasi di pre-rottura e rottura (Potts et al., 1997; Griffiths and Lane, 1999; Troncone, 2005; Picarelli et al., 2004; Troncone et al., 2014; Conte et al., 2018). Infatti, siffatti metodi, a causa dell'elevata distorsione della mesh, risultano del tutto inadeguati quando si

vuole analizzare l'intera evoluzione di un fenomeno franoso, tenendo conto anche della fase post-rottura.

Negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche numeriche sempre più avanzate, finalizzate all'analisi di problemi caratterizzati da grandi deformazioni. Una di queste è il metodo del punto materiale (MPM), originariamente introdotto da Sulsky et al. (1994). In tale metodo, il mezzo continuo è discretizzato mediante un set di sottodomini, le proprietà di ognuno dei quali sono concentrate all'interno di un punto Lagrangiano, detto punto materiale. Inoltre, i punti materiali sono sovrapposti ad una mesh Euleriana, la quale ha una funzione puramente computazionale. Tutte le informazioni contenute nei punti materiali vengono trasferite, all'inizio di ogni time-step, ai nodi della mesh. In corrispondenza di questi ultimi, vengono risolte le equazioni governanti e calcolate le quantità incognite. Successivamente, le informazioni ottenute sono utilizzate per aggiornare le accelerazioni, velocità e posizioni dei punti materiali, e per calcolarne tensioni e deformazioni. In definitiva, i grandi spostamenti vengono simulati mediante il movimento dei punti materiali attraverso la mesh computazionale, che generalmente viene mantenuta fissa durante l'intera simulazione. Recentemente, sono stati pubblicati diversi studi in letteratura in cui tale metodo è stato utilizzato con successo per analizzare l'evoluzione di una frana tenendo conto anche della fase post-rottura (Soga et al., 2016; Conte et al., 2019; Fern et al., 2019; Yerro et al., 2019; Conte et al., 2020). Nel presente studio, il metodo del punto materiale è utilizzato per analizzare una frana occorsa in Calabria, a causa dell'esecuzione di alcuni scavi eseguiti al piede del pendio per la realizzazione di una cabina elettrica. I meccanismi di deformazione e rottura del pendio, dalla fase pre-rottura a quella post-rottura, sono analizzati in modo completo, portando in conto anche il comportamento strain-softening dei terreni coinvolti.

2. L'evento franoso

La frana si è verificata in un sito distante circa 50 km da Cosenza, in Calabria, il 5 marzo del 2014. L'evento franoso ha interessato un pendio alto circa 40 m, caratterizzato da un angolo di inclinazione di circa 18° rispetto all'orizzontale. Due mesi prima della frana, era stato eseguito uno sbancamento al piede del pendio, con una profondità massima di circa 14 m, per consentire la realizzazione della cabina elettrica primaria a servizio di quel territorio. Preventivamente erano state realizzate due paratie di pali (a monte e a valle dello sbancamento) e alcune file di gabbioni. Una fotografia della frana è riportata in Fig. 1a, mentre la planimetria del corpo di frana è rappresentata in Fig. 1b, in cui è indicata anche la posizione delle opere di sostegno precedentemente menzionate. Come mostrato in Fig. 1b, le dimensioni della frana sono circa 50 m in larghezza e 70 m in lunghezza. La superficie di rottura è stata individuata ad una profondità di circa 10 m a partire dal piano campagna originario. Di conseguenza il volume di terreno coinvolto nella frana è di circa 35000 m^3 . Secondo Cruden e Varnes (1996), la frana può essere classificata come uno scorrimento prevalentemente traslazionale.

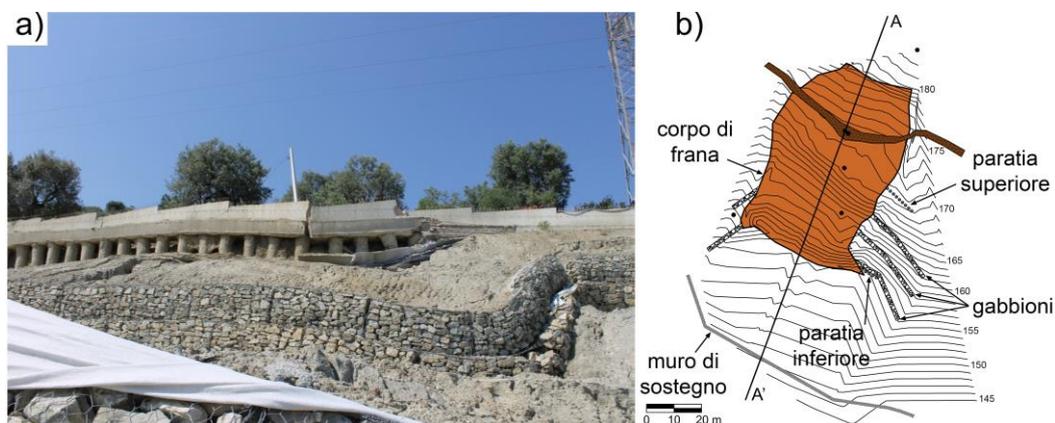


Fig 1. La frana oggetto di studio: a) vista del corpo di frana; b) planimetria.

L'evento occorso ha causato danni importanti, specialmente nella porzione del pendio situata tra le due

paratie di pali. In particolare, la paratia ubicata a monte ha subito una considerevole rotazione, con uno spostamento orizzontale del cordolo di circa 4 m ed un abbassamento di circa 3 m del terreno a tergo di tale opera. Inoltre, i gabbioni sono stati severamente danneggiati e diverse fessure si sono manifestate nell'area compresa tra la paratia di monte e il coronamento.

A seguito della frana è stata condotta un'accurata compagna di indagine, costituita da sondaggi meccanici, prove in sito e di laboratorio. Sulla base delle indagini eseguite, l'area in frana risulta caratterizzata dalla presenza di una formazione di argilla marnosa del Miocene, ricoperta da una coltre di limo sabbioso con argilla di più recente formazione. Per quanto riguarda la formazione di argilla marnosa, una caratteristica peculiare di tale formazione è la sua instabilità meccanica resa evidente da un pronunciato comportamento strain-softening, come evidenziato dai risultati delle prove di laboratorio. Le prove eseguite hanno anche evidenziato una variazione delle proprietà fisico-meccaniche, all'aumentare della profondità. In particolare, la porzione superiore, fino ad una profondità di circa 13 m dal piano campagna, è costituita da un terreno classificabile come limo argilloso da un punto di vista granulometrico, che sarà indicato nel seguito come argilla consistente, per distinguerlo da quello sottostante. A profondità maggiori, la componente marnosa aumenta e la frazione argillosa diminuisce. Di conseguenza, il terreno può essere classificato come un limo argilloso con sabbia e sarà indicato nel seguito come argilla marnosa. I parametri geotecnici ottenuti dalle indagini eseguite sono sintetizzati in Tab. 1.

Tab 1. Parametri geotecnici

Terreno	γ (kN/m ³)	c_p' (kPa)	ϕ_p' (°)	c_r' (kPa)	ϕ_r' (°)	E' (MPa)
coltre	20.8	20	19	0	19	17
argilla consistente	22.8	100	26	8.5	20	17
argilla marnosa	23	40	40	0.5	30	70

Sulla base delle indagini eseguite, è stato riprodotto lo schema geologico di Fig. 2, che si riferisce alla sezione di traccia A-A' indicata in Fig. 1b. In aggiunta, la Fig. 2 riporta anche la posizione della falda, ricostruita sulla base delle misure piezometriche eseguite con piezometri Casagrande, e la superficie di rottura, determinata sulla base delle misure inclinometriche.

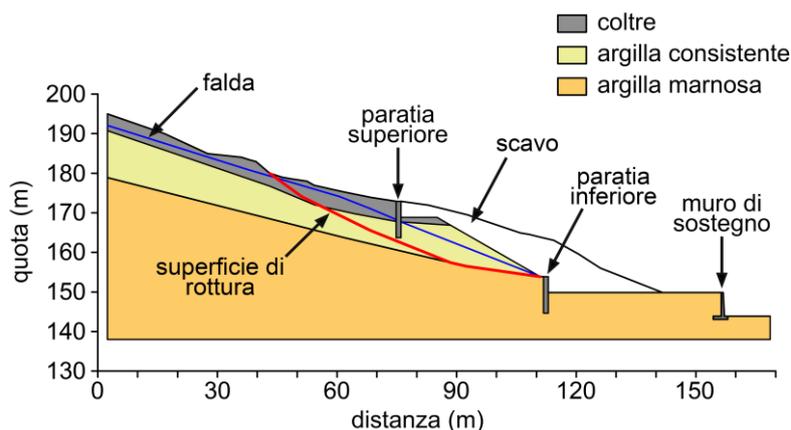


Fig 2. Schema geologico del pendio.

Come si evince dalla Fig. 2, la superficie di rottura si sviluppa prevalentemente all'interno dello strato di argilla consistente, passa al di sotto della paratia di pali situata nella parte a monte del pendio e si collega ad un preesistente gradino morfologico a monte. Al contrario, lo strato sottostante di argilla marnosa e la paratia di pali di valle non sono stati interessati dalla frana. Poiché forma e posizione della superficie di rottura sono note, un'analisi di stabilità del pendio è stata preliminarmente eseguita mediante il classico approccio dell'equilibrio limite, utilizzando i parametri geotecnici indicati in Tab. 1. Tale analisi ha fornito un valore del fattore di sicurezza pari a $FS = 2.54$ assumendo i parametri di

picco per tutti i terreni coinvolti. Al contrario, il pendio risulta instabile ($FS = 0.81$) considerando i parametri di resistenza residua per i terreni lungo la superficie di scorrimento. Ciò implica che un fenomeno di rottura progressiva dovrebbe essersi verificato per effetto degli scavi eseguiti al piede del pendio (Bjerrum, 1967).

3. Analisi della frana con il metodo del punto materiale

Le analisi sono state effettuate in condizioni di deformazione piana utilizzando il codice di calcolo Anura3D (www.anura3d.com). La sezione rappresentativa del pendio sottoposta a calcolo è mostrata in Fig. 2. Per caratterizzare il comportamento fragile dei terreni è stato utilizzato un modello costitutivo alla Mohr-Coulomb, in cui il comportamento strain-softening è stato simulato riducendo progressivamente i parametri di resistenza al taglio (c' e φ') all'aumentare dell'invariante di deformazione plastica, ε_d^P , in accordo alle seguenti espressioni:

$$c' = c'_r + (c'_p - c'_r) e^{-\lambda \varepsilon_d^P} \quad (1)$$

$$\varphi' = \varphi'_r + (\varphi'_p - \varphi'_r) e^{-\lambda \varepsilon_d^P} \quad (2)$$

in cui ε_d^P è espresso da

$$\varepsilon_d^P = \sqrt{\frac{2}{3}} e_{ij}^P e_{ij}^P \quad (3)$$

e e_{ij}^P è la parte deviatorica del tensore delle deformazioni plastiche. Il parametro λ contenuto nelle Eqs. (1) e (2) regola la velocità di decadimento di c' e φ' . In particolare, tale decadimento sarà più rapido all'aumentare di λ . Nel caso in esame i valori di λ sono stati calibrati sulla base dei risultati delle prove di taglio diretto disponibili, utilizzando una procedura appositamente predisposta per ridurre la dipendenza dei risultati dalle dimensioni della mesh. I valori dei parametri geotecnici utilizzati nelle analisi sono riassunti in Tab. 1. Inoltre, per tutti i terreni è stato assunto nullo l'angolo di dilatanza e pari a 0.3 il rapporto di Poisson.

La Fig. 3 mostra la mesh computazionale utilizzata per eseguire le analisi. Tale mesh è composta da elementi triangolari, caratterizzati da una dimensione media di 1 m. Inizialmente, ogni elemento attivo della mesh contiene tre punti materiali. Le analisi sono state effettuate utilizzando l'approccio *one phase-single point* (Fern et al., 2019). Per quanto riguarda le condizioni al contorno, lungo i bordi verticali sono imposti nulli gli spostamenti orizzontali, mentre alla base sono impediti tutti gli spostamenti. Per semplicità, le paratie di pali sono state installate all'inizio della simulazione e per esse è stato considerato un comportamento elastico lineare. Lo stato tensionale iniziale è stato riprodotto utilizzando la ben nota procedura di gravity loading, assumendo la falda nella posizione indicata in Fig. 2, così come rilevato dalle misure piezometriche disponibili. Al termine della gravity loading, è stato simulato lo scavo rimuovendo i punti materiali coinvolti.

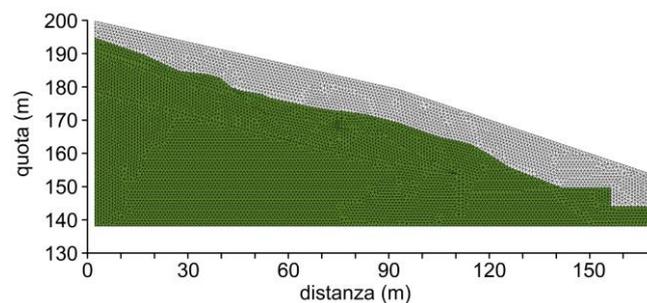


Fig 3. Mesh computazionale utilizzata nelle analisi.

Di seguito vengono presentati alcuni dei risultati ottenuti dall'analisi. In Fig. 4, per esempio, viene mostrato il campo degli spostamenti finali del corpo di frana. Per confronto vengono anche indicati il profilo topografico determinato dagli scavi e quello rilevato dopo la frana.

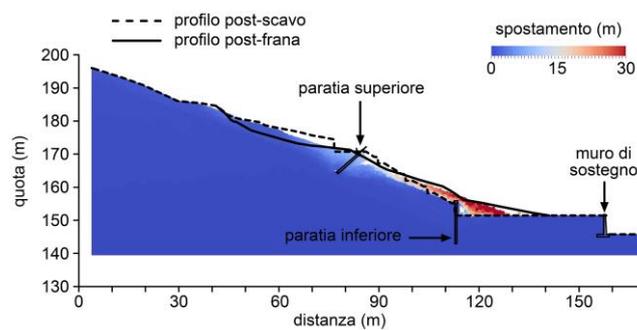


Fig 4. Campo degli spostamenti finali ottenuto dall'analisi numerica MPM, con indicazione dei profili rilevati dopo lo scavo e a seguito della frana. Un comportamento di tipo strain-softening è stato assunto per tutti i terreni coinvolti.

Benché il profilo restituito dal calcolo risulti sufficientemente aderente a quello realmente misurato e l'entità dello spostamento massimo ottenuto dall'analisi numerica (circa 30 m) compatibile con quello osservato, è possibile individuare alcune discrepanze tra il profilo ottenuto dalla simulazione e quello effettivamente misurato. Ciò si evince confrontando le porzioni di terreno a monte e a valle del corpo di frana. In particolare, le zone di accumulo e di abbassamento ottenute dalla simulazione numerica hanno dimensioni ridotte rispetto a quelle reali.

Pertanto, nel tentativo di migliorare il confronto tra predizione ed osservazione, è stata eseguita una seconda analisi in cui il comportamento della sola coltre superficiale è stato simulato mediante un modello costitutivo elasto-plastico perfetto alla Mohr-Coulomb, con parametri di resistenza pari a quelli residui. Tale assunzione è giustificata da alcune evidenze riscontrate in sito, attestanti movimenti pregressi della coltre superficiale, quali la presenza di alcuni gradini morfologici, brusche variazioni della pendenza del pendio e preesistenti deformazioni lungo una stradina sterrata presente nell'area in frana. Per tutti gli altri terreni è stato considerato un comportamento di tipo strain-softening. La Fig. 5 mostra il campo degli spostamenti nella configurazione finale con riferimento a quest'ultima analisi.

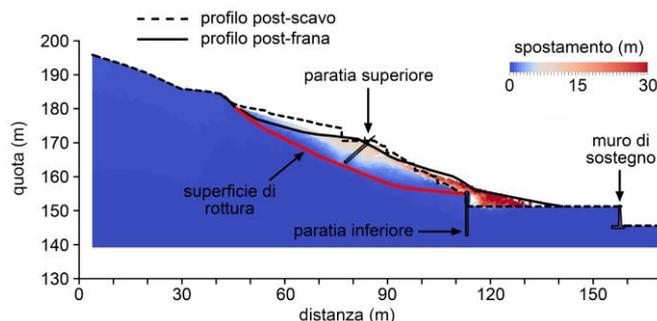


Fig 5. Campo degli spostamenti finali ottenuto dall'analisi numerica MPM, con indicazione dei profili rilevati dopo lo scavo e a seguito della frana. Un comportamento di tipo strain-softening è stato assunto per l'argilla consistente e l'argilla marnosa, mentre la coltre superficiale è stata assunta in condizioni di resistenza residua.

Come è possibile notare, in questa seconda analisi, il profilo finale del pendio è predetto in modo del tutto soddisfacente dal MPM, così come la distanza di run-out (definita come la distanza tra la punta del materiale spostato e il piede della superficie di rottura). Inoltre è stato calcolato un abbassamento di circa 3 m nella porzione di terreno a tergo della paratia di monte, come realmente occorso. Anche il movimento di tale paratia, caratterizzato da una considerevole rotazione di tipo rigido, è in stretto accordo con quanto realmente osservato, come pure la posizione della superficie di rottura.

Le analisi, quindi, dimostrano che si tratta una frana di primo distacco che si è verificata a seguito di un fenomeno di rottura progressiva innescato dagli scavi eseguiti al piede del pendio.

4. Conclusioni

Sono stati presentati i risultati di uno studio riguardante una frana indotta da scavi. La frana si è verificata in Calabria ed ha interessato prevalentemente uno strato di argilla caratterizzata da un

pronunciato comportamento strain-softening. L'intero processo deformativo occorso nel pendio, dalla fase pre-rottura fino a quella post-rottura, è stato analizzato utilizzando il metodo del punto materiale (MPM). Si tratta di una tecnica numerica avanzata in grado di superare le limitazioni dei metodi numerici tradizionali nello studio dei problemi caratterizzati da elevate deformazioni. A tal fine, è stata adottata una legge elastoplastica alla Mohr-Coulomb, in cui il comportamento strain-softening è stato simulato riducendo i parametri di resistenza al taglio del terreno all'aumentare delle deformazioni deviatoriche plastiche. L'analisi ha consentito di interpretare in maniera razionale l'evento franoso occorso. In particolare, si è trattato di un fenomeno di rottura progressiva del pendio innescato dagli scavi eseguiti al piede circa due mesi prima della frana. La superficie di rottura si è sviluppata prevalentemente nello strato di argilla consistente, così come realmente rilevato dalle misure inclinometriche. La frana è stata prevalentemente di primo distacco, sebbene il terreno di copertura in passato sia stato interessato da movimenti pregressi. Dalle analisi numeriche effettuate è emerso che la posizione della superficie di rottura, la cinematica della frana dopo la rottura e la configurazione finale del pendio sono risultati in buon accordo con quanto realmente osservato.

Bibliografia

- Bishop A.W. (1967). "Progressive failure-with special reference to the mechanism causing it". Proc. Geotech. Conf., Oslo 2, 142-150.
- Bkerrum L. (1967). "Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clays and clay shales", *J. Soil Mech. Found. Engng. Div., ASCE*, 93(5), 1-49.
- Burland J.B., Longworth T.I., Moore J.F.A. (1977). "A study of ground movement and progressive failure caused by a deep excavation in Oxford clay", *Géotechnique*, 27(4), 557-591.
- Conte E., Donato A., Pugliese L., Troncone A. (2018). "Analysis of the Maierato landslide (Calabria, Southern Italy)", *Landslides*, 15, 1935-1950.
- Conte E., Pugliese L., Troncone A. (2019). "Post-failure stage simulation of a landslide using the material point method", *Eng. Geol.*, 253, 149-159.
- Conte E., Pugliese L., Troncone, A. (2020). "Post-failure analysis of the Maierato landslide using the material point method", *Eng. Geol.*, 277, 105788.
- Cruden D.M.; Varnes D.J. (1996). "Landslides—Investigation and Mitigation". Special Report No. 247, Transportation Research Board; National Academy Press: Washington, DC, USA.
- Fern J., Rohe A., Soga K., Alonso E. (2019). *The Material Point Method for Geotechnical Engineering. A Practical Guide*. CRC Press.
- Griffiths D.V., Lane P.A. (1999). "Slope stability analysis by finite element", *Géotechnique*, 49(3), 387-403.
- Leroueil S., Vaunat J., Picarelli L., Locat J., Faure R., Lee H. (1996). "A geotechnical characterization of slope movements". Proc. 7th International Symposium on Landslides, Trondheim. vol. 1. pp. 53-74.
- Picarelli L., Urciuoli G., Russo C. (2004). "Effect of groundwater regime on the behaviour of clayey slopes", *Can Geotech J*, 41, 467-484.
- Potts D.M., Dounias G.T., Vaughan P.R. (1990). "Finite element analysis of progressive failure of Carsington embankment", *Géotechnique*, 40(1), 79-101.
- Potts D.M., Kovacevic N., Vaughan P.R. (1997). "Delayed collapse of cut slopes in stiff clay", *Géotechnique*, 47(5), 953-982.
- Soga K., Alonso E., Yerro A., Kumar K., Bandara S. (2016). "Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method", *Géotechnique*, 66(3), 248-273.
- Sulsky D., Chen A., Schreyer H. (1994). "A particle method for history-depend materials", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 118, 179-196.
- Troncone A. (2005). "Numerical analysis of a landslide in soils with strain-softening behaviour", *Géotechnique*, 55(8), 585-596.
- Troncone A., Conte E., Donato A. (2014). "Two and three-dimensional numerical analysis of the progressive failure that occurred in an excavation-induced landslide", *Eng. Geol.*, 183, 265-275.
- Yerro A., Soga K., Bray J.D. (2019). "Runout evaluation of Oso landslide with the material point method", *Can. Geotech. J.*, 56(9), 1304-1317.