

VARIAZIONE DELLA COMPOSIZIONE DEL FLUIDO INTERSTIZIALE DELLE ARGILLE COME POSSIBILE CAUSA DI SCORRIMENTO “VISCOSO”

Caterina Di Maio e Gianvito Scaringi

Università degli Studi della Basilicata

caterina.dimaio@unibas.it, gianvito.scaringi@unibas.it

Sommario

Da alcuni anni l'unità di ricerca della Basilicata conduce uno studio teso a valutare l'influenza dei processi chimico-fisici d'interazione fra scheletro solido e fluido di porosità sulla dinamica delle grandi frane attive in terreni argillosi. Questa nota riporta alcuni risultati di una sperimentazione di laboratorio che evidenziano gli effetti provocati da variazioni di composizione del fluido interstiziale sugli scorrimenti di due argille lungo una superficie di rottura in condizioni residue. I materiali sono stati ricostituiti con soluzioni di NaCl a diverse concentrazioni e tagliati a velocità costante fino al residuo in assenza di gradienti chimici. Raggiunta la resistenza residua τ_r , i provini in soluzione sono stati sottoposti a prove di *creep* da taglio con $\tau < \tau_r$, inducendo così trascurabili spostamenti di tipo primario. Al termine di questa fase, i provini sono stati esposti ad acqua distillata. Dopo l'esposizione si sono verificati scorrimenti con velocità crescente nel tempo fino a valori tipici di una rottura. Il fenomeno è stato attribuito alla riduzione di resistenza causata dalla diminuzione della concentrazione ionica nel fluido interstiziale. Una prima semplice modellazione approssimata dei processi suggerisce che la diffusione ionica dai pori verso il fluido di cella sia stata la causa principale dei comportamenti osservati.

1. Introduzione

La colata di Costa della Gaveta (PZ) è da tempo oggetto di studio da parte dell'unità di ricerca dell'Università della Basilicata. Numerosi sondaggi, prove di sito e di laboratorio, monitoraggio di lungo termine di spostamenti superficiali e profondi hanno permesso di ricostruire la geometria tridimensionale del corpo di frana e di descriverne in modo soddisfacente la cinematica (Di Maio et al., 2010; Di Maio et al., 2013, Vassallo et al., 2014). In questa fase, lo studio della frana è incentrato anche sugli aspetti chimici che potrebbero rivelarsi utili per l'interpretazione della sua dinamica. Fra le altre determinazioni è stata effettuata la valutazione della composizione chimica del fluido interstiziale. Questo è risultato essere una soluzione salina a concentrazione gradualmente variabile, andando da profondità più o meno elevate fino al p.c., da quella tipica dell'acqua marina a valori trascurabili (Fig. 1a). Di Maio et al. (2014) hanno discusso la possibilità che tale diminuzione e il relativo gradiente chimico possano essere cause “nascoste” degli spostamenti viscosi della frana. I primi risultati sperimentali (Fig. 1b) mostrano infatti che l'esposizione ad acqua di provini preparati con soluzioni concentrate porta ad una evoluzione degli spostamenti che ricorda il *creep* terziario. Al fine di verificare l'ipotesi è stato intrapreso uno studio i cui risultati, in parte riportati in Di Maio e Scaringi (2015), vengono qui riassunti per il caso di una montmorillonite sodica.

Questo materiale è stato scelto poiché, tra i diversi tipi di argilla, mostra la più grande sensibilità alla composizione del fluido interstiziale. Come fluidi interstiziali sono state scelte soluzioni di NaCl poiché esso è il principale sale disciolto nell'acqua di mare e pertanto i suoi effetti rivestono un interesse pratico e diretto per i terreni di origine marina. Il cloruro di sodio permette inoltre di minimizzare i processi di scambio ionico quando impiegato con argille sodiche.

Le prove di *creep* sono state condotte su provini pre-tagliati al residuo, non soltanto per indagare il

comportamento viscoso delle frane attive, ma anche perché lo stato residuo è la condizione ideale per valutare l'influenza di qualsiasi parametro sul comportamento a taglio. Può infatti essere considerato uno stato "stazionario" in cui il terreno si può ipotizzare scorrere in modo continuo, a volume costante, senza variazioni di struttura e sotto forze interparticellari normali e tangenziali medie costanti.

2. Metodi e risultati

Per la sperimentazione ci si è avvalsi delle apparecchiature di Casagrande, Bishop e Bromhead. Le prime due sono state modificate per consentire l'applicazione di carichi orizzontali controllati (Di Maio et al., 2014). Sono stati impiegati provini di bentonite sodica ricostituita con acqua o con soluzioni di NaCl, inizialmente immersi in un fluido uguale a quello di porosità.

Ogni prova è consistita di tre fasi: 1) taglio a velocità di scorrimento controllata fino al residuo; 2) taglio a tensioni controllate con $\tau < \tau_r$ in assenza di gradienti chimici fino ad esaurimento del *creep*

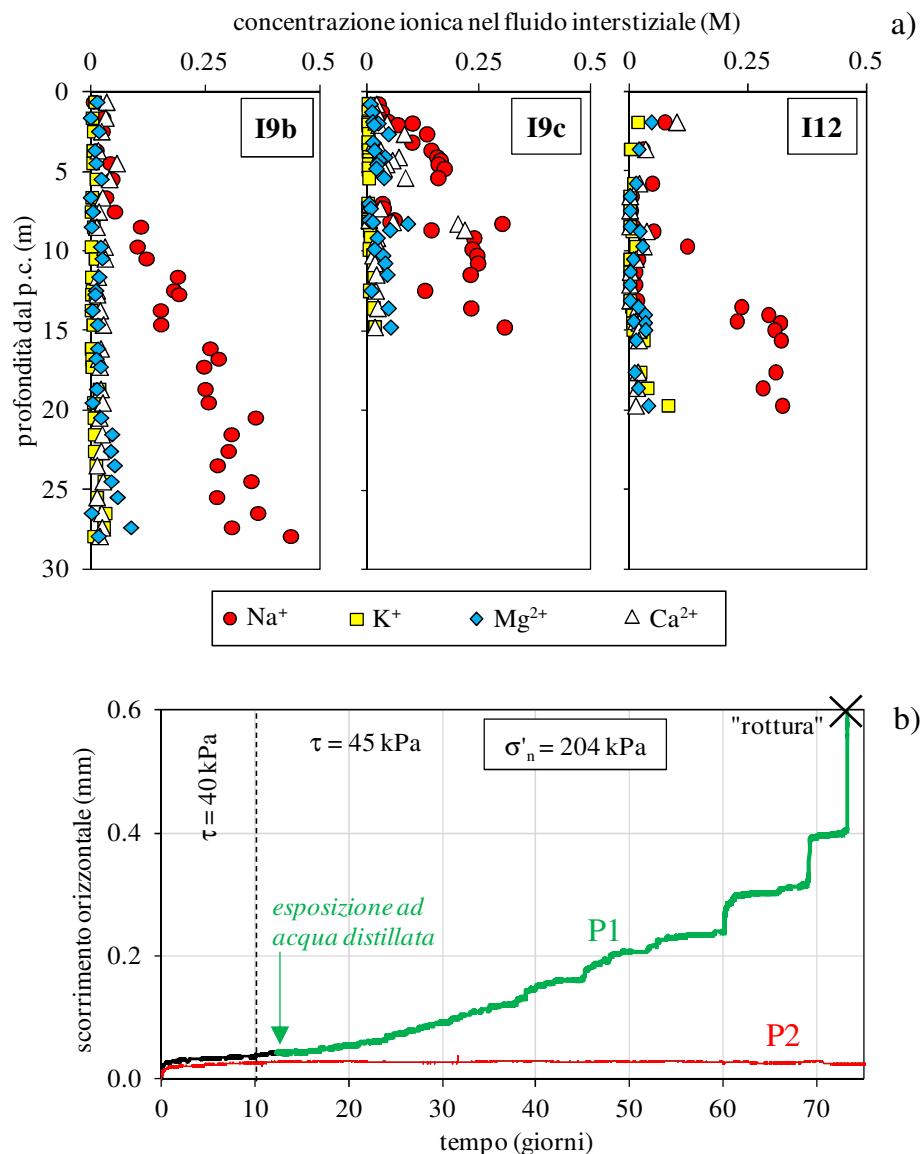


Fig. 1. Concentrazione ionica nel fluido interstiziale dei campioni estratti da tre fori di sondaggio nella frana di Costa della Gaveta (a), scorrimenti orizzontali in funzione del tempo ottenuti da prove a carichi orizzontali controllati per un provino (P2) ricostituito con - ed immerso in - soluzione 1M NaCl e per un provino (P1) ricostituito con soluzione ed esposto ad acqua distillata (b) (Di Maio et al., 2014).

primario, e quindi esposizione ad acqua distillata; 3) taglio a velocità controllata, con continua esposizione ad acqua distillata. Nel corso della prova sono state monitorate conducibilità elettrica e temperatura del fluido di cella. Periodicamente è stata analizzata la sua composizione chimica.

I risultati della prima fase mostrano che, all'aumentare della concentrazione ionica, si passa da $\varphi'_r = 5^\circ$, per i provini in acqua distillata, a $\varphi'_r = 17^\circ$ in soluzione 1M di NaCl, con gradienti che si riducono con la molarità.

I risultati della seconda fase mostrano che l'esposizione ad acqua durante il processo di *creep* primario dei provini in soluzione provoca un graduale aumento della velocità di scorrimento con un andamento non lineare che ricorda il *creep* terziario fino a "rottura" (Fig. 2).

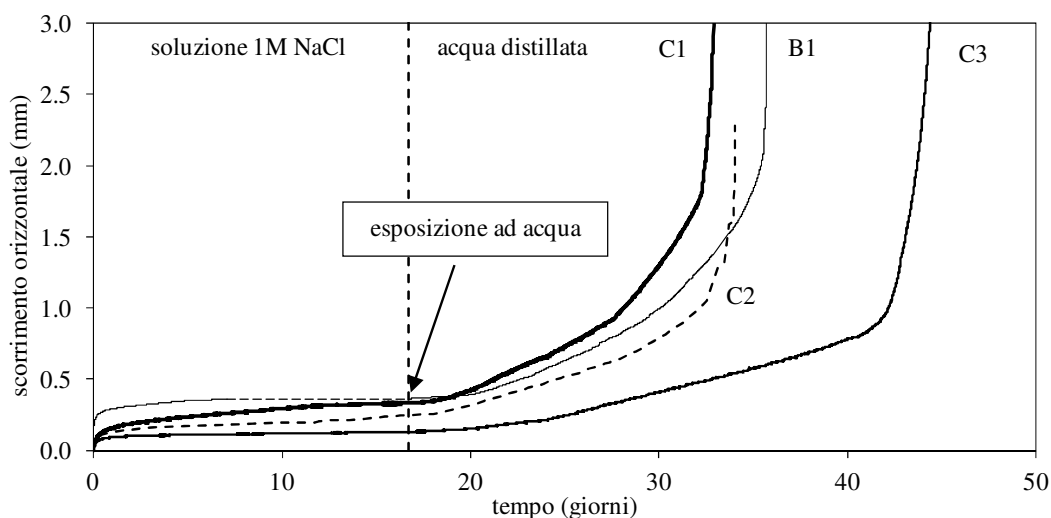


Fig. 2. Spostamenti orizzontali in funzione del tempo sotto l'azione di forze di taglio costanti per alcuni provini di bentonite ricostituiti con soluzione 1M di NaCl, inizialmente immersi nella stessa soluzione e, al termine del *creep* primario, esposti ad acqua distillata. Le tensioni medie applicate sono minori della resistenza residua ottenuta per il materiale in soluzione 1M di NaCl e maggiori della resistenza in acqua distillata (Di Maio e Scaringi, 2015).

Per valutare la resistenza disponibile al momento della rottura, le prove sono proseguite a velocità di scorrimento controllata, riportando le apparecchiature di taglio nella configurazione originaria. I risultati sono mostrati, per un provino, in Fig. 3a insieme a quelli relativi alle precedenti fasi, in funzione del tempo; i processi che si sono verificati nella seconda fase, flussi di ioni e di acqua, sono infatti dipendenti da questa variabile. Si può osservare che all'inizio della terza fase la resistenza disponibile era notevolmente diminuita rispetto alla resistenza residua in soluzione ed era diventata molto simile alla tensione applicata nella seconda fase. Continuando con il taglio e l'esposizione ad acqua distillata, si è infine determinata una resistenza uguale a quella dei provini ricostituiti con - ed immersi in - acqua distillata.

La Figura 3b riporta la quantità di NaCl diffuso dai pori di alcuni provini verso il fluido di cella durante l'esposizione ad acqua. La figura mostra che il processo di diffusione ionica ha avuto inizio immediatamente dopo l'esposizione ad acqua distillata e che, al momento della "rottura" sotto una forza di taglio costante, la maggior parte del cloruro di sodio aveva già diffuso verso l'esterno. È interessante anche notare che le variazioni di volume (Fig. 3c) sono diventate significative soltanto quando la concentrazione ionica si era già notevolmente ridotta.

Osservando i risultati della prova nel suo insieme (Fig. 3a) è ragionevole ipotizzare che i processi alla base della riduzione di resistenza abbiano agito in modo indipendente dalla modalità di taglio dall'inizio alla fine della prova, cioè dal punto A al punto C (Di Maio e Scaringi, 2015). La curva tratteggiata in Fig. 3a riporta la resistenza valutata teoricamente con un semplice modello, descritto nel

seguito, che sembra ben interpretare il processo fra B e C, in cui il confronto fra dati sperimentali e dati teorici è puntuale. La curva teorica interpreta anche gli estremi A e B del processo avvenuto nella fase 2 e, ragionevolmente, l'intero processo.

Per una prima simulazione approssimata dei processi osservati si è fatto uso di un codice agli elementi finiti che simula la sola diffusione ionica (CTRAN/W - Krahn, 2008). Fissate le opportune condizioni al contorno, il modello ha fornito l'andamento delle concentrazioni ioniche nel tempo all'interno del dominio e, in particolare, lungo la loro distribuzione sulla superficie di scorrimento.

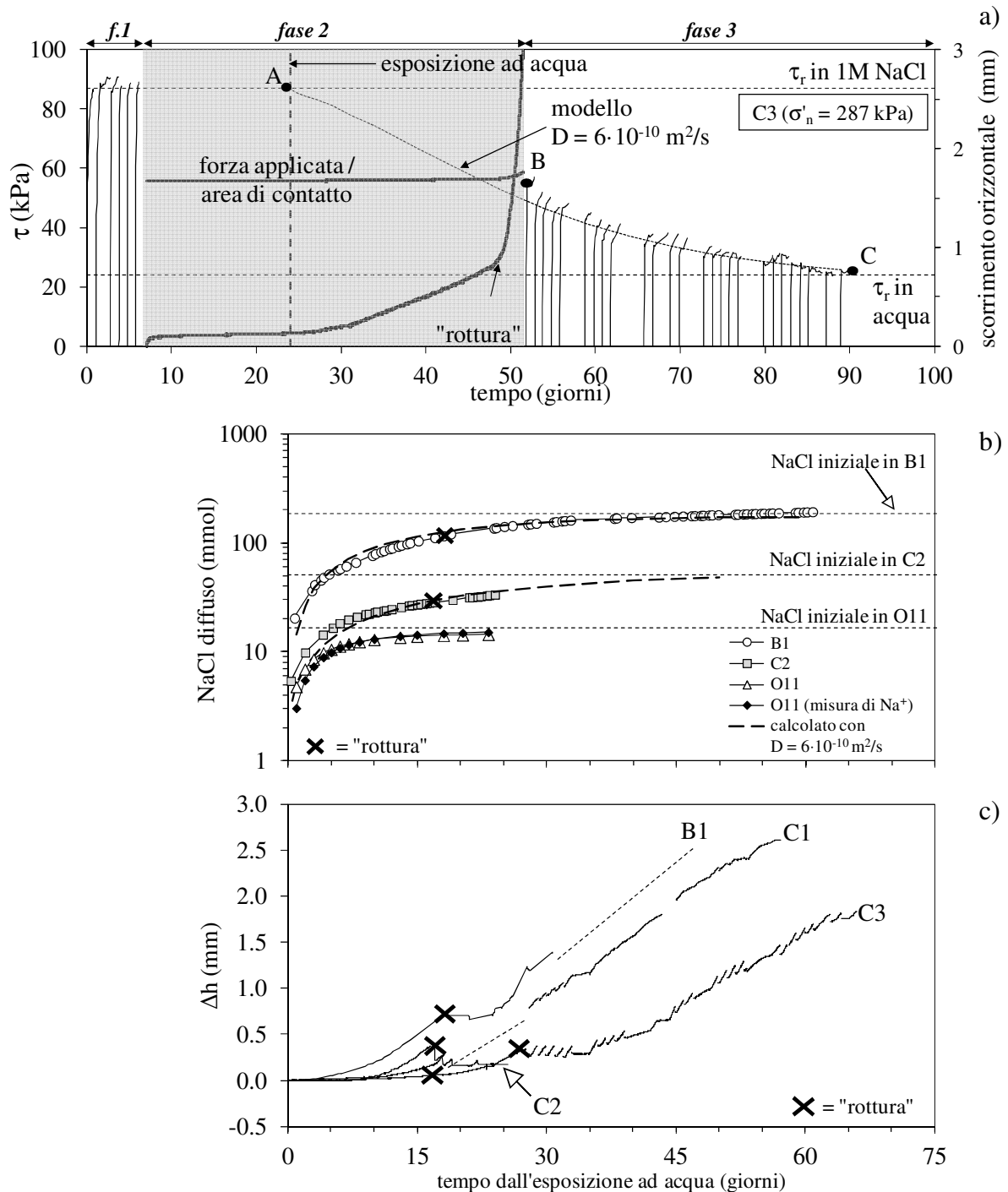


Fig. 3. Resistenza a taglio durante le prove a scorrimento controllato e spostamenti orizzontali sotto l'azione di una forza di taglio costante (a); quantità di NaCl diffuso dai pori del provino nel fluido di cella dopo l'esposizione ad acqua distillata (b); variazioni di altezza provocate dall'esposizione ad acqua distillata (c) (Di Maio e Scaringi, 2015).

Associando alla concentrazione ionica la resistenza ottenuta mediante prove di taglio a velocità controllata, in condizioni drenate ed in assenza di gradienti chimici, si può stimare l'evoluzione della resistenza media disponibile. Il modello è stato calibrato in modo che la quantità di ioni diffusa nel fluido di cella ottenuta dal calcolo fosse uguale a quella misurata. La simulazione si è mostrata soddisfacente (Fig. 4) per valori del coefficiente di diffusione del terreno pari a $D = 6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, valore coerente con quelli riportati da altri Autori (Shackelford, 1988; Dominijanni et al., 2013; Gajo & Loret, 2004).

Le Figg. 3 e 4 mostrano il confronto fra i risultati sperimentali e i risultati del modello nella fase da B a C, cioè nella fase a velocità di scorrimento controllata. La coerenza fra i dati consente di ipotizzare che anche nella precedente fase da A a B il modello simuli in modo accettabile il processo reale.

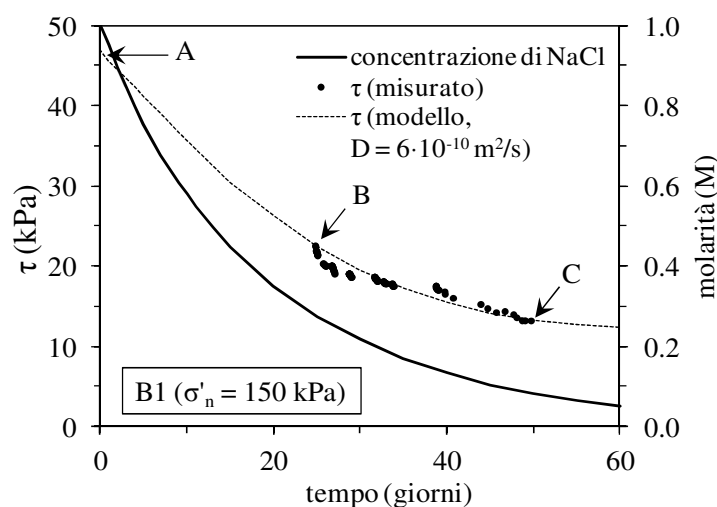


Fig. 4. Resistenza a taglio durante la fase a forze di taglio controllate (tratto AB) e durante la fase a scorrimento controllato (tratto BC): confronto fra i valori misurati e quelli calcolati per un provino di bentonite nel taglio anulare di Bishop. Confronto fra gli andamenti della resistenza e della concentrazione media di NaCl sulla superficie di scorrimento (Di Maio e Scaringi, 2015).

3. Conclusioni

La resistenza residua a taglio è generalmente considerata una soglia di *creep*. Tuttavia essa può variare nel tempo e, in particolare, diminuire, sotto tensioni efficaci $\sigma' = \sigma - u$ costanti, per effetto di una variazione della composizione del fluido interstiziale. Tale diminuzione può provocare una notevole accelerazione degli scorrimenti, con evoluzione simile a quella di un *creep* terziario.

I risultati riportati in questa nota possono trovare applicazione nell'interpretazione dei movimenti viscosi di frane attive in argille marine, sulle cui superfici di scorrimento è disponibile la resistenza residua. Nel caso di Costa della Gaveta, tipica colata in Argille Varicolori caratterizzata da spostamenti visco-plastici, si è infatti osservato che la composizione del fluido interstiziale varia notevolmente lungo la verticale, passando da concentrazioni tipiche dell'acqua marina, a profondità più o meno elevate in funzione della posizione lungo il versante, a valori bassissimi in prossimità del piano di campagna. Il ruolo di queste variazioni e dei gradienti di potenziale chimico sul comportamento della frana, attualmente oggetto di studio, si sta gradualmente chiarendo sulla base di studi come quello presentato in questa nota.

Bibliografia

- Di Maio C. & Scaringi G. (2015). Shear displacements of a clay in the residual condition induced by decrease in pore solution concentration. Sottoposto per la pubblicazione su rivista.
- Di Maio C., Vassallo R., Vallario M., Pascale S., Sdao F. (2010). Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian Southern Apennines. *Engineering Geology*, 116, 311–322.
- Di Maio C., Vassallo R., Vallario M. (2013). Plastic and viscous shear displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation. *Engineering Geology*, 162, 53-66.
- Di Maio C., Scaringi G., Vassallo R. (2014). Residual strength and creep behaviour on the slip surface of specimens of a landslide in marine origin clay shales: influence of pore fluid composition. *Landslides*. Published on line, DOI 10.1007/s10346-014-0511-z.
- Dominijanni, A., Manassero, M., Puma, S. (2013). Coupled chemical-hydraulic-mechanical behaviour of bentonites. *Géotechnique* 63, No. 3, 191–205.
- Gajo, A. & Loret, B. (2004). Transient analysis of ionic replacements in elastic–plastic expansive clays. *Int. J. Solid Struct.* 41, 7493–7531.
- Krahn, J. (2008). *Transport Modeling with CTRAN/W: An Engineering Methodology*, 3rd edn. Calgary: Geo-Slope International Ltd.
- Shackelford, C. D. (1988). Diffusion as a transport process in fine-grained barrier materials, *Geotechnical News* 6, No. 2, 24–27.
- Vassallo R., Grimaldi M.G., Di Maio C. (2014). Pore water pressures induced by historical rain series in a clayey landslide: 3D modeling. *Landslides*. Published on line, DOI 10.1007/s10346-014-0508-7.