

## **MODELLAZIONE DEI PROCESSI DI FILTRAZIONE TRANSITORIA INDOTTI DALL'INTERAZIONE SUOLO-CLIMA-VEGETAZIONE IN PENDII ARGILLOSI ETEROGENEI E TETTONIZZATI: UN CASO DI STUDIO**

Giuseppe Pedone  
*Politecnico di Bari*  
*g.pedone@poliba.it*

Osvaldo Bottiglieri  
*Politecnico di Bari*  
*o.bottiglieri@poliba.it*

Federica Cotecchia  
*Politecnico di Bari*  
*f.cotecchia@poliba.it*

### **Sommario**

I pendii argillosi eterogenei e tettonizzati situati in zone di catena, quali l'Appennino Meridionale, sono frequentemente affetti da movimenti di frana lenti e profondi innescati dall'interazione suolo-clima-vegetazione. Con riferimento al caso di studio del versante Pisciole, nella nota vengono riportati i risultati della caratterizzazione idraulica delle argille fessurate coinvolte nei fenomeni di instabilità, la cui esecuzione ha consentito di effettuare l'analisi numerica dei processi di filtrazione transitoria indotti dall'infiltrazione e dell'evapo-traspirazione delle acque di pioggia. I risultati di quest'analisi sono presentati con riferimento alla sola colonna di terreno rappresentativa della zona più attiva del pendio, con l'obiettivo di validare la strategia adottata per la modellazione dell'interazione pendio-atmosfera.

### **1. Introduzione**

L'Appennino Meridionale è ricorrentemente sede di processi di frana lenti (1-20 cm/anno) e profondi (oltre i 30 m) in pendii argillosi eterogenei e tettonizzati (Cotecchia et al., 2011). Tali processi di instabilità presentano sistematicamente accelerazioni alla fine della stagione invernale, in corrispondenza del picco delle altezze piezometriche incrementate dall'accumulo in profondità delle piogge, cui fa seguito la massima riduzione delle resistenze a taglio ivi disponibili. Il principale fattore innescante (Terzaghi, 1950) i movimenti di frana dianzi menzionati è dunque rappresentato dalle piogge, che si infiltrano nei pendii e che in essi si accumulano durante le stagioni più piovose, mentre il principale fattore predisponente (Terzaghi, 1950) risiede nella fessurazione delle argille coinvolte nei fenomeni di instabilità. Le argille fessurate, infatti, sono caratterizzate da permeabilità più alte (Pedone et al., 2013) e resistenze più basse rispetto alla stessa argilla quando intatta (Vitone & Cotecchia, 2011).

La seguente nota presenta il caso di studio del versante Pisciole (Melfi), quest'ultimo ben rappresentativo dei processi di frana dianzi menzionati. Tale versante, situato in destra idraulica del fiume Ofanto, è interessato da un meccanismo di frana lento e complesso che coinvolge depositi torbiditici a prevalente componente argillosa. Al piede del pendio si collocano importanti infrastrutture, le quali vengono spesso danneggiate dai processi di frana attivi. La condotta interrata, in particolare, collocata al piede del versante (Fig. 1a), ha subito ingenti danni negli ultimi anni, inducendo la società Acquedotto Pugliese (AQP) S.p.A. a finanziare una campagna di indagini geognostiche atte alla progettazione di interventi di stabilizzazione del versante.

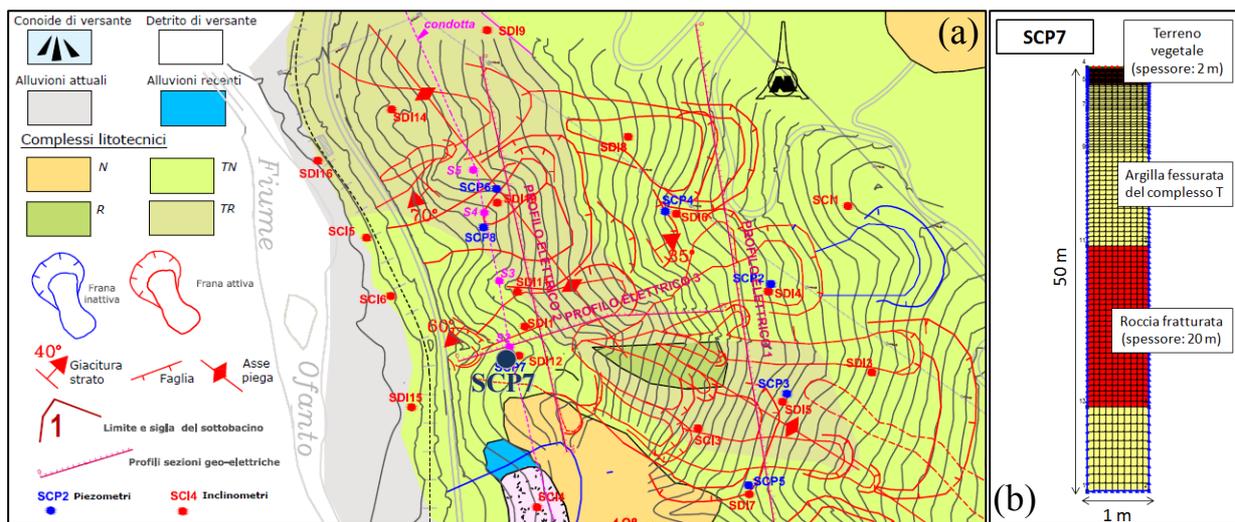


Fig 1. Carta litotecnica del versante Pisciollo (a) ove si riportano i complessi litotecnici individuati (Pedone et al., 2012) e la zona di campionamento del materiale prelevato in superficie (cerchiata); modello della verticale di sondaggio SCP7 (non in scala) impiegato nelle analisi agli elementi finiti (b).

## 2. Il caso di studio del versante Pisciollo

### 2.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

I rilievi geologici eseguiti in sito, unitamente all'analisi di profili di resistività e delle stratigrafie di sondaggio, hanno consentito di individuare all'interno del versante Pisciollo tre principali complessi litotecnici (Cotecchia et al., 2012). Il complesso più profondo (R in Fig. 1a) è costituito da argille scagliose molto plastiche, appartenenti al Flysch Rosso, caratterizzate dalla presenza di interstrati prevalentemente calcarenitici. Tale complesso, pur trovandosi al nucleo di un'anticlinale, affiora nella parte centrale del pendio, a ridosso di una faglia normale sub-verticale, a seguito dell'erosione del complesso litotecnico collocato al tetto della sequenza (N in Fig. 1a). Quest'ultimo, costituito da sabbie argillose appartenenti al Flysch Numidico e caratterizzate da interstrati prevalentemente arenacei, affiora soltanto nella porzione meridionale del pendio. Sul resto del versante, invece, affiora un terzo complesso litotecnico (TN e TR in Fig. 1a, di seguito indicato come complesso T), con caratteristiche intermedie fra quelle degli altri due. Esso è costituito da argille fessurate (CF=40-70%), localmente siltose (MF=35%) o sabbiose (SF=10-20%), intervallate da blocchi di roccia fratturata di dimensioni variabili da pochi centimetri a diverse decine di metri.

L'assetto geomorfologico attuale del versante Pisciollo, riportato in Fig. 1a, è stato ottenuto a seguito di numerosi rilievi e dopo aver analizzato foto aeree e dati inclinometrici. I 3 bacini di frana individuati su tutto il pendio sono caratterizzati principalmente dalla presenza di meccanismi di frana di tipo roto-traslazionale, da lenti ad estremamente lenti (1-18 cm/anno), con bande di taglio da mediamente profonde a profonde (fino a 50 m).

### 2.2 Inquadramento geotecnico

La caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni argillosi fessurati appartenenti al complesso T è stata svolta attraverso prove di laboratorio condotte su 40 campioni indisturbati prelevati durante l'estesa campagna geognostica AQP S.p.A. (Cotecchia et al., 2012). Attraverso tali prove si è potuto osservare come i suddetti materiali presentino elevate attività ( $A=0,8-1,0$ ) e basse resistenze meccaniche, che contrariamente a quanto atteso diminuiscono con la profondità ( $\phi'=19^\circ$  e  $c'=20\text{kPa}$  a medie e basse profondità;  $\phi'=14^\circ$  e  $c'=5\text{kPa}$  a profondità elevate), circostanza questa che favorisce l'approfondimento delle bande di taglio.

Il coefficiente di conducibilità idraulica satura  $k_{\text{sat}}$ , è stato ottenuto sia a mezzo di prove di laboratorio che attraverso prove in sito (Pedone et al., 2013). Tale indagine si è resa indispensabile stante anche la

difficoltà del reperimento in letteratura di dati relativi a caratterizzazioni idrauliche condotte su argille fessurate naturali (Urciuoli, 1994). I coefficienti di permeabilità misurati in laboratorio sono dell'ordine di  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  m/s e sono stati ottenuti attraverso prove edometriche condotte su provini prelevati a profondità variabili fra 0,5 e 80 m. I valori di  $k_{sat}$  misurati in sito a profondità inferiori ai 20 m, invece, sono superiori a  $10^{-9}$  m/s, ovvero risultano più elevati di circa uno o due ordini di grandezza rispetto a quelli mediamente ottenuti in laboratorio.

### *2.3 Interpretazione fenomenologica del meccanismo di frana a mezzo di dati di monitoraggio*

I dati di monitoraggio ad oggi disponibili mostrano come le massime accelerazioni dei movimenti di frana, misurate nel periodo post-invernale a mezzo di inclinometri e sensori GPS, si manifestino in corrispondenza degli incrementi massimi delle altezze piezometriche, queste ultime misurate in corrispondenza delle bande di taglio (Pedone et al., 2012). Tali incrementi, inoltre, sono concomitanti ai massimi incrementi della cumulata di pioggia a 180 giorni, parametro questo a mezzo del quale si riconosce il carattere stagionale del regime pluviometrico tipico delle aree mediterranee. L'analisi dei dati di monitoraggio evidenzia, dunque, gli effetti che hanno sulla franosità i processi di filtrazione transitoria indotti dall'interazione pendio-atmosfera, consentendo di osservare come le escursioni stagionali delle altezze piezometriche che ne conseguono (0,5-5 m) rappresentino il principale fattore innescante i processi di frana individuati nel versante Pisciole, caso, quest'ultimo, ben rappresentativo dei meccanismi di instabilità lenti e profondi osservati in pendii argillosi eterogenei e tettonizzati situati in zone di catena.

## **3. Caratterizzazione idraulica dei terreni superficiali**

L'interpretazione del meccanismo di frana riscontrato nel pendio in esame richiede, dunque, un'analisi dettagliata dei processi di filtrazione transitoria indotti dall'interazione pendio-atmosfera. A tal fine, è stata avviata una più estesa caratterizzazione idraulica delle argille fessurate coinvolte nei fenomeni di instabilità, che non si è limitata all'analisi dei coefficienti di permeabilità satura differenzialmente dedotti, come illustrato nel paragrafo 2.2, ma che ha perseguito l'obiettivo di misurarne anche la curva di ritenzione idraulica. Lo studio del comportamento idraulico dei materiali affioranti riveste un ruolo fondamentale poiché tali porzioni di terreno del pendio, essendo superficiali e quindi situate al di sopra della superficie libera di falda, sono quasi tutto l'anno in condizioni di parziale saturazione, rappresentando dunque la zona attraverso la quale si esplicano i processi di infiltrazione ed evapotraspirazione delle piogge.

### *3.1 Misura della curva di ritenzione*

Diversi campioni indisturbati di argille fessurate appartenenti al complesso T sono stati prelevati a profondità variabili fra 0,5 e 2 m (Fig. 1a) a mezzo di un campionatore ad anelli. Le caratterizzazioni fisica e meso-strutturale del materiale prelevato in superficie indicano che si tratta di un'argilla altamente fessurata (Vitone & Cotecchia, 2011) di alta plasticità ( $CF=61,0\%$ ;  $PI=29,47\%$ ;  $G_s=2,737$ ), mentre prove di compressione edometrica indicano come la permeabilità ( $k_{sat}=10^{-10}$ - $10^{-11}$  m/s), a parità di indice dei vuoti, sia simile a quella dedotta per lo stesso materiale quando prelevato a maggiori profondità.

Dai campioni prelevati in superficie sono stati preparati 6 provini cilindrici ( $D=56$  mm;  $H=20$ - $40$  mm), al fine di sottoporli a percorsi di essiccamento atti alla determinazione della curva di ritenzione. I dati riportati nella seguente nota fanno riferimento a misure di suzione svolte mediante la tecnica della carta filtro in contatto (Chandler & Gutierrez, 1986; Marinho & Oliveira, 2006), benché siano in corso anche misure dirette di suzione con tensiometri Imperial College ad alta capacità (Ridley & Burland, 1993) e con minitensiometri Soil Moisture Equipment Corporation (Stannard, 1992).

Le carte filtro impiegate nella sperimentazione sono del tipo Whatman No. 42, né pre-trattate (Chandler & Gutierrez, 1986), né pre-essiccate in forno (Marinho & Oliveira, 2006). Su ciascun provino, al termine di ogni fase del percorso di essiccamento imposto, per le misure di suzione sono stati utilizzati n°4 dischi di carta filtro. In particolare, per ogni misura, due coppie di carta filtro sono state rispettivamente poste in contatto con le basi dei provini cilindrici, al fine di determinarne la suzione di matrice, assumendo che quest'ultima sia la componente della suzione che regola i processi idraulici in analisi. Per ciascuna coppia di carta filtro, una è stata posta in contatto "diretto" con il provino, fungendo da protezione per l'altra, posta quindi in contatto "indiretto" (Bulut et al., 2001). Per la sperimentazione è stato adottato un tempo di equalizzazione di 2 settimane, mentre come curva di calibrazione si è ricorso a quella ottenuta con estrattore da Leong et al. (2002).

In Fig. 2a sono riportati gli stati di ritenzione misurati in termini di grado di saturazione  $S_r$ , e suzione  $s$ , da cui si evince l'ottima concordanza fra le misure ottenute con le carte filtro poste in contatto diretto e quelle in contatto indiretto. I provini testati sono tutti caratterizzati da valori iniziali di  $S_r$  prossimi al 90%, sebbene tali valori sembrano essere più elevati rispetto a quelli che definiscono l'inizio del ramo di transizione. Questa circostanza è presumibilmente dovuta ai cicli di imbibizione ed essiccamento che il materiale ha subito a causa dell'interazione con il clima e la vegetazione, conseguentemente ai quali lo stato del materiale è caratterizzato da  $S_r < 100\%$  anche quando ci si avvicina ad  $s=0$  kPa.

In Fig. 2b, invece, sono riportati gli stati di ritenzione misurati in termini di contenuto volumetrico d'acqua  $\theta_w$ , e suzione  $s$ , assieme alla relativa funzione di ritenzione in essiccamento dedotta per interpolazione mediante la formulazione proposta da van Genuchten (1980).

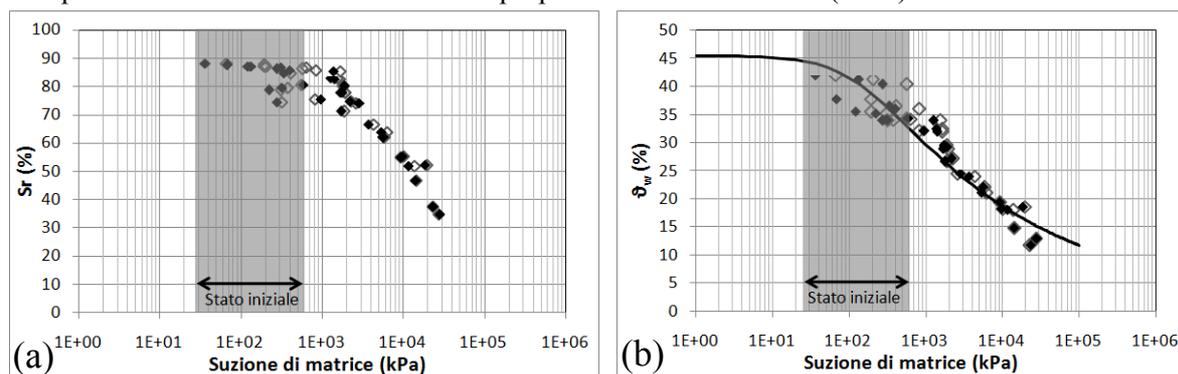


Fig 2. Curva di ritenzione dell'argilla fessurata (i simboli vuoti si riferiscono alle misure effettuate con le carte filtro poste in contatto "indiretto", quelli pieni alle misure effettuate con le carte filtro poste in contatto "diretto").

#### 4. Modellazione dei processi di filtrazione indotti dall'interazione suolo-clima-vegetazione

L'analisi numerica dei processi di filtrazione transitoria indotti dall'interazione suolo-clima-vegetazione è stata condotta, sulla base dei dati sin qui riportati, a mezzo del codice agli elementi finiti Seep/w (GeoSlope International Ltd., 2004), il quale consente di integrare numericamente l'equazione di Richards (1931). Per brevità di trattazione, in questa nota, sono riportati soltanto i risultati delle analisi condotte con riferimento ad una colonna di terreno, di base 1 m e altezza 50 m, rappresentativa della verticale di sondaggio SCP7 (Fig. 1b), quest'ultima collocata nella porzione più attiva del versante (Fig. 1a) ed attrezzata con due celle piezometriche, situate rispettivamente a 15 e 36 m di profondità. Sono state tuttavia condotte anche analisi con riferimento a diverse sezioni del pendio, mentre analisi pienamente accoppiate idro-meccanicamente sono in fase di esecuzione.

La modellazione numerica è stata svolta generando una griglia di elementi quadrangolari a 4 nodi e 4 punti di Gauss, le cui dimensioni tendono a ridursi gradualmente in corrispondenza del p.c., ove lo spessore degli elementi è circa 0,2 m. Il bordo inferiore ed i bordi laterali della colonna sono stati assunti impermeabili, mentre sul bordo superiore è stato applicato ciclicamente un anno di piogge giornaliere rappresentativo del regime pluviometrico dell'area indagata. In particolare sono state applicate le piogge giornaliere nette afferenti all'anno Settembre 2006-Agosto 2007, calcolate come

differenza fra le piogge giornaliere totali misurate dalla stazione meteorologica di Melfi (Fig. 3a) ed i flussi evapo-traspirativi giornalieri stimati sulla base delle temperature misurate dalla stazione meteorologica di Melfi (Fig. 3b) a mezzo del metodo FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), tenendo conto che il pendio è in parte coltivato a grano ed in parte ricoperto da vegetazione spontanea.

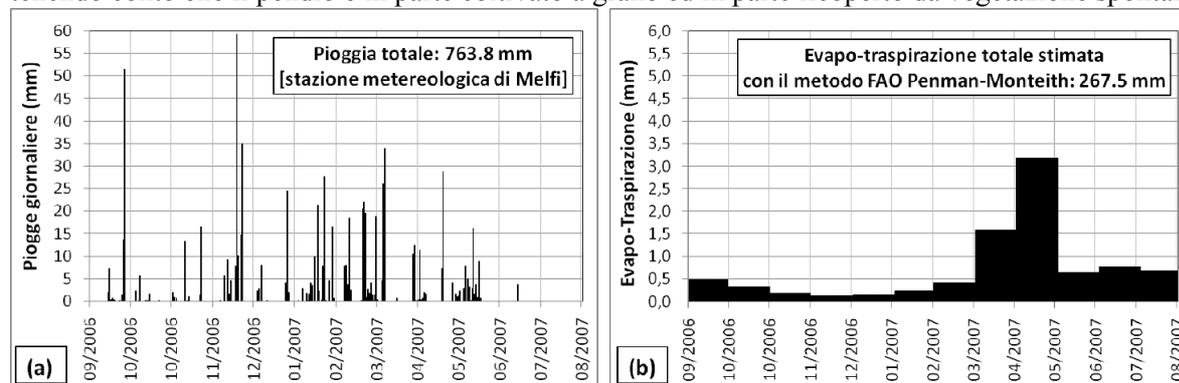


Fig 3. Pioggia totale (a) ed evapo-traspirazione (b) utilizzate nelle analisi numeriche.

Una prima analisi è stata effettuata trascurando la presenza dell'inclusione di roccia fratturata rinvenuta a circa 20 m di profondità lungo la verticale SCP7, ovvero supponendo che la colonna fosse costituita soltanto dal litotipo argilloso appartenente al complesso litotecnico T e da uno strato di terreno vegetale rinvenuto per i primi 2 m. Per tali materiali è stata assunta la curva di ritenzione riportata in Fig 2b, per la quale il codice utilizzato richiede di definire anche una pendenza relativa all'intervallo positivo delle pressioni, nella fattispecie determinato in modo che fosse proporzionale al coefficiente di compressibilità volumetrica determinata durante le prove edometriche ( $m_w=5 \cdot 10^{-5}$  1/kPa). La curva di conducibilità idraulica, invece, è stata ottenuta utilizzando il modello proposto da van Genuchten (1980), assumendo per l'argilla fessurata una  $k_{sat}$  pari a quella misurata in sito ( $10^{-9}$  m/s) e per il terreno vegetale una  $k_{sat}$  pari a  $10^{-8}$  m/s, essendo quest'ultimo caratterizzato dalla presenza di fratture formatesi per essiccamento (di profondità variabile durante l'anno e massima in estate).

I risultati della prima analisi (linea puntinata in Fig. 4) mostrano come i valori numericamente ottenuti per le altezze piezometriche afferenti ai punti situati a 15 e 36 m di profondità dal p.c. siano dello stesso ordine di grandezza dei valori misurati in sito. Tuttavia le escursioni stagionali delle altezze piezometriche ottenute nell'analisi sono decisamente meno pronunciate rispetto a quelle misurate.

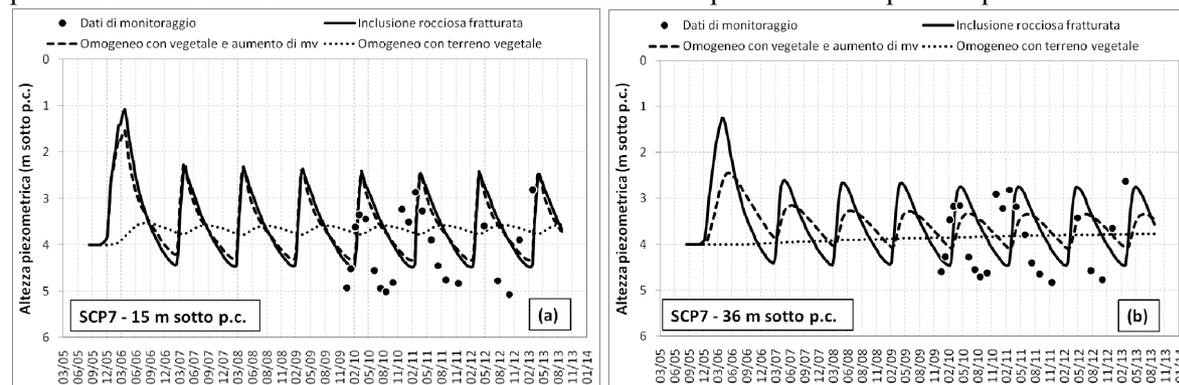


Fig 4. Risultati numerici a confronto con i dati di monitoraggio afferenti alla verticale piezometrica SCP7.

Una seconda analisi è stata effettuata riducendo la pendenza della curva di ritenzione con riferimento all'intervallo delle pressioni positive, ovvero assumendo indirettamente un coefficiente di compressibilità volumetrica che fosse all'incirca mezzo ordine di grandezza minore rispetto a quello misurato in laboratorio ( $m_w=2 \cdot 10^{-6}$  1/kPa). In tal modo si ottengono numericamente (linea a tratto discontinuo in Fig. 4) valori delle altezze piezometriche molto simili a quelli misurati in sito alla profondità di 15 m, mentre i valori afferenti alla profondità di 36 m risultano ancora caratterizzati da escursioni delle altezze piezometriche di ampiezza minore rispetto a quella dei dati misurati in sito.

La terza analisi, infine, è stata effettuata inserendo l'inclusione di roccia fratturata rinvenuta a 20 m di profondità lungo la verticale SCP7, per la quale è stata assunta una  $k_{sat}=10^{-6}$  m/s ed un  $m_w=2*10^{-9}$  1/kPa. I risultati di quest'ultima analisi consentono di ottenere escursioni delle altezze piezometriche simili a quelle misurate in sito anche alla profondità di 36 m (linea continua in Fig. 4).

## 5. Conclusioni

La nota presenta la curva di ritenzione relativa a terreni argillosi di elevata plasticità (Fig. 2), raramente riportata in letteratura con riferimento a materiali argillosi fessurati naturali. Tale curva di ritenzione è stata implementata in analisi numeriche agli elementi finiti condotte al fine di indagare i processi di filtrazione transitoria indotti dall'interazione suolo-clima-vegetazione, i quali rappresentano il principale fattore innescante i processi di frana lenti e profondi diffusamente rinvenuti in pendii argillosi eterogenei e tettonizzati situati in zone di catena. I risultati delle analisi riportati nella nota (Fig. 4) consentono di asserire come la modellazione dei processi di interazione pendio-atmosfera possa essere effettuata con successo se, tenendo conto degli effetti legati ai processi evapo-traspirativi, si assumono valori di rigidità dei terreni superiori rispetto a quelli ottenuti con riferimento agli intervalli deformativi indagati durante le prove edometriche. Le altezze piezometriche ottenute numericamente, inoltre, risultano essere molto prossime a quelle misurate in sito se si implementano nelle analisi le eterogeneità di permeabilità, nella fattispecie rappresentate dagli intervalli rocciosi fratturati frequentemente rinvenuti nel versante Pisciole.

## Bibliografia

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapo-transpiration (guidelines for computing crop water requirements). *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56.
- Bulut R., Lytton R. L., Wray W. K. (2001). "Soil suction measurements by filter paper". Proc. of Geo-Institute Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at the ASCE 2001 Civil Engineering Conference, Houston, Texas, 10-13 October, 243-261.
- Chandler R. J. & Gutierrez C. I. (1986). "The filter paper method of suction measurements", *Géotechnique*, 36, 2, 265-268.
- Cotecchia, F., Santaloia, F. & Lollino P. (2011). "Slow landsliding as effect of hydro-mechanical coupled processes: examples of resulting damages and mitigation strategies". Proc. 2<sup>nd</sup> Italian Workshop on Landslides, 28-29 September 2011, Naples, Italy.
- Cotecchia F., Santaloia F., Vitone C., Palladino G. (2012). "A slow and complex landslide process in the Southern Apennines (Italy)". Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp. Lands., Canada, June 2012.
- Geo-Slope International Ltd. (2004). Seepage modeling with Seep/w, User's guide. Calgary, Alberta.
- Leong E. C., He L., Rahardjo H. (2002). "Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements", *Geotech. Test. J.*, 25, 3, 1-12.
- Marinho F. A. & Oliveira O. M. (2006). "The filter paper method revisited", *Geotech. Test. J.*, 29, 3, 250-258.
- Pedone G., Cotecchia F., Vitone C. (2012). "Caratterizzazione idraulica di flysch argillosi sede di escursioni piezometriche stagionali innescanti movimenti di frana". IARG, Padova, Italy, 2-4 July.
- Pedone G., Cotecchia F., Bottiglieri O., Santaloia F. (2013). "Monitoring and modeling slope-atmosphere interaction effects in a fissured clay slope (Pisciole hill-slope, Southern Apennines)". International Conference on Landslide Risk (ICLR13), Tabarka-Ain Drahem, 14-16 March.
- Richards L.A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous media". *Physics*, 1, 318-333.
- Ridley A. M. & Burland J. B. (1993). "A new instrument for the measurements of soil moisture suction", *Géotechnique*, 43, 2, 321-324.
- Stannard D. I. (1992). "Tensiometers: theory, construction, and use", *Geotech. Test. J.*, 15, 1, 48-58.
- Terzaghi K. (1950). Mechanisms of landslides. Geological Society of America, Berkley, 83-123.
- Urciuoli G. (1994). "Permeabilità di argilliti a scaglie". Proc. Conf. "Il ruolo dei Fluidi nei Problemi di Ingegneria Geotecnica", Mondovì, 1, 185-204.
- van Genuchten M.T. (1980). "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Vitone C. & Cotecchia F. (2011). "The influence of intense fissuring on the mechanical behaviour of clays", *Géotechnique*, 61, 12, 1003-1018.