

# Analisi degli effetti di barriera capillare nell'attivazione di debris-avalanches in coltri piroclastiche

Grazia Dimarco<sup>1</sup>, Martino Di Quarto<sup>1</sup>, Francesco Fiorillo<sup>2</sup>, Davide Mancarella<sup>1</sup>,  
Vincenzo Simeone<sup>1</sup>

grazia.dimarco@libero.it, madiqua@libero.it, francesco.fiorillo@unisannio.it, davide.manc@libero.it, v.simeone@poliba.it (Autore corrispondente)

<sup>1</sup>Politecnico di Bari - Facoltà di Ingegneria di Taranto - Viale del Turismo 8 - 74100 Taranto

<sup>2</sup>Dipartimento di Studi Geologici ed Ambientali, Università degli Studi del Sannio, Benevento

## *Analysis of capillary barrier effects in the activation of debris avalanches in pyroclastic covers*

**ABSTRACT:** On May 1998 many landslides involving pyroclastic covers laying on the slope of Pizzo D'Alvano range hit the towns of Bracigliano, Quindici, San Felice a Canello, Sarno. They were triggered by a prolonged rainfall event but not extraordinary in terms of return time. The aim of the investigations carried out within this work, by means of in situ and lab testing, and by means of numerical simulations, is to point out some aspects related to triggering mechanisms of the debris flows that appear relevant to the authors. In particular, attention is paid to retention phenomena of filtering waters due to the build up of capillary barriers in the interface between fine and coarser pyroclastic layers, causing suction head to drop down to triggering of the above mentioned landslide event.

*Key terms:* Capillary barriers, Debris flow, Infiltration, Pyroclastic covers

*Termini chiave:* Barriere capillari, Colata detritica, Infiltrazione, Coperture piroclastiche

## **Riassunto**

I movimenti franosi che il 5 e 6 Maggio 1998 hanno coinvolto le coltri piroclastiche a monte degli abitati degli abitati di Bracigliano, Quindici, San Felice a Canello, Sarno e Siano, si sono attivati a seguito di precipitazioni prolungate, ma non eccezionali in termini di tempo di ritorno. Gli approfondimenti effettuati nell'ambito del presente lavoro, attraverso indagini in sito, di laboratorio, modellazioni numeriche vogliono evidenziare taluni aspetti, a parere degli scriventi, rilevanti per comprendere i meccanismi di innesco dei fenomeni di colata detritica. In particolare, vengono approfonditi i meccanismi di ritenzione dei flussi di infiltrazione causati dall'instaurarsi di una barriera capillare al passaggio fra le coltri piroclastiche più fini e quelle più grossolane che può da luogo ad una riduzione della suzione fino al loro collasso.

## **1. Introduzione**

Le frane del 5 e 6 Maggio 1998, che hanno coinvolto le coltri piroclastiche dei versanti a monte degli abitati di Bracigliano, Quindici, San Felice a Canello, Sarno e Siano, oltre a rappresentare eventi catastrofici di rilevante importanza per le drammatiche conseguenze indotte a persone e cose, hanno costituito un fondamentale "case history" su cui i ricercatori hanno dato, in diversi ambiti scientifici e con diversi approcci, il proprio contributo per la

conoscenza dei vari aspetti caratterizzanti queste particolari instabilità di versante (Celico e Guadagno, 1998; Guadagno et alii, 2000; Crosta & Dal Negro, 2003; Basile et alii, 2003; Fiorillo & Wilson, 2004; Guadagno et alii, 2005) Si tratta di fenomeni classificabili come colate detritiche rapide, debris flows e debris avalanches (Hungri et alii, 2001), innescati da scorrimenti di detrito superficiale, inizialmente di piccolo volume che nel loro movimento di caduta si sono accresciute, debris avalanches, e poi incanalati, debris flows (Fiorillo et alii. 2001; Guadagno et alii., 2005).

Hanno avuto origine in un ambiente geologico caratterizzato dalla presenza di piroclastiti, derivanti dall'attività eruttiva esplosiva dei Campi Flegrei e del Somma-Vesuvio, ricoprenti, con assetti spesso complessi, il substrato calcareo della dorsale carbonatica mesozoica del gruppo montuoso del Pizzo d'Alvano (1130 m. s.l.m.) (Guadagno et alii., 2000). La genesi delle coperture piroclastiche predispone inesorabilmente i versanti all'instabilità, tuttavia la comprensione dei meccanismi di innesco delle colate del Maggio 1998 richiede un'analisi integrata di diversi fattori che influenzano in vario modo la stabilità dei versanti di Pizzo d'Alvano in relazione alle:

- peculiari caratteristiche geomorfologiche del sito, caratterizzato da forti pendenze dei versanti, con una particolare giacitura delle coperture piroclastiche che si susseguono secondo orizzonti non ben definiti e con caratteristiche granulometriche variabili. La presenza di

scarpate naturali e tagli stradali interrompono la continuità stratigrafica della copertura piroclastica, determinando condizioni di libertà cinematica condizionando i processi di distacco e di sviluppo dei movimenti (Guadagno et alii., 2000).

- specifiche caratteristiche delle coltri piroclastiche: caratteristiche geotecniche e di permeabilità, natura mineralogica, porosità ordinaria ed intra-clastica dei granuli, la loro velocità di idratazione, la suzione intra ed interclastica. Si tratta di materiali che presentano peculiari caratteristiche di interazione con l'acqua a causa della presenza di vuoti intraclastici, che riescono ad essere saturati solo a seguito di una prolungata idratazione (Esposito e Guadagno, 1998).

La stabilità di queste coltri è probabilmente garantita in parte od in alcuni punti anche dalla suzione (pressione interstiziale negativa) presente nel materiale in condizioni insature per effetto della presenza dei vuoti inter- ed intra-clastici. Il decremento o l'annullarsi della suzione per effetto delle acque di infiltrazione altera le condizioni di stabilità delle coltri, che in alcune zone può favorire l'innescio di fenomeni di instabilità. Quelli del maggio 1998 hanno avuto origine a seguito di precipitazioni prolungate, ma non eccezionali dal punto di vista idrologico (Fiorillo & Wilson, 2004).

Gli approfondimenti effettuati nell'ambito del presente lavoro, attraverso indagini in sito, in laboratorio, e l'utilizzo di simulazioni numeriche vogliono evidenziare i meccanismi di ritenzione dei flussi di infiltrazione causati dall'instaurarsi di una barriera capillare (Shackelford et alii, 1994) al passaggio fra le coltri piroclastiche più fini e quelle più grossolane che si possono verificare a seguito di prolungate precipitazioni di bassa intensità, dando luogo ad una riduzione della suzione nelle coltri piroclastiche più superficiali. Questi meccanismi, sebbene distinti da quelli che fino ad oggi sono stati richiamati per spiegare l'innescio di tali instabilità (Celico e Guadagno, 1998; Guadagno et alii., 2003; Crosta & Dal Negro, 2003; Fiorillo e Wilson, 2004), possono tuttavia fornire ulteriori spunti di riflessione ed essere associati, per alcune zone, a quelli finora proposti.

## 2. Effetti di barriera capillare

Una barriera capillare si forma in condizioni insature allorquando uno strato di terreno a granulometria fine giace su uno molto più permeabile ed il suo effetto si esplica nel limitare, a causa dell'azione esercitata dalla tensione capillare, l'infiltrazione dell'acqua negli strati sottostanti (Shackelford et alii, 1994; Stormont & Anderson, 1999). L'impedenza idraulica fornita dalla barriera capillare spinge lo strato soprastante a comportarsi da recipiente per le acque infiltrate (Khire et alii, 2000) finché il contenuto d'acqua e la pressione dell'acqua, nello stato superiore, è tale da rompere la barriera. L'incremento del contenuto d'acqua in prossimità dell'interfaccia dà luogo ad una diminuzione del potenziale di suzione, finché la conducibilità dello strato

grossolano aumenta rendendo possibile la percolazione dell'acqua. In condizioni di giaciture inclinate la barriera mostra effetti di diversione del flusso evidenti (Ross, 1990) a causa dell'accumulo di acque in corrispondenza dell'interfaccia.

Nell'ambito di questo lavoro sono state effettuate misure di permeabilità in situ, condotte su due siti della dorsale di Pizzo D'Alvano, ed in laboratorio su campioni prelevati nelle stesse aree. Al fine di studiare e verificare l'esistenza di effetti di barriera capillare nelle coperture piroclastiche della suddetta dorsale sono state svolte prove di infiltrazione in colonna per mezzo di una apparecchiatura predisposta in laboratorio.

### 2.1 Prove di permeabilità in situ

Nel periodo Gennaio-Marzo 2003 sono state eseguite sette prove di permeabilità in situ mediante un Permeometro Guelph in aree rappresentative delle caratteristiche morfologiche e idrogeologiche delle aree interessate dalle colate di detrito del Maggio 1998. La massima profondità indagata è stata di 1,2 m dal piano campagna. L'ubicazione delle prove effettuate è riportata in Fig. 1. La copertura piroclastica coinvolta nelle misurazioni si rinviene al di sotto di una coltre vegetale ed è costituita da livelli di pomici facilmente rintracciabili ad una profondità di 60 cm nel sito 1 e di circa 60 cm nel sito 2.



Figura 1. Ubicazione delle prove di permeabilità in situ  
*Sites of in situ permeability tests*

Le indagini in situ compiute hanno messo in evidenza una condizione litostratigrafica con livelli di piroclastici a granulometria fine alternati a livelli di pomici, intendendo per questi ultimi piroclastiti a granulometria grossolana, con una successione a carattere irregolare che conduce, a profondità di circa 120 cm, all'individuazione di strati interpretati come ascrivibili a suoli sepolti (Guadagno et alii., 2000).

I valori di permeabilità satura misurati durante le prove sono riportati in Tab. 1. La conducibilità idraulica misurata nelle *piroclastiti rimaneggiate* è stata di  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  cm/s; nelle *pomici* non è stato possibile effettuare misure perché il

moto dell'acqua è risultato di tipo turbolento; per le *piroclastici in sede*, indicate in letteratura con la sigla Bt (Guadagno et alii, 2000), la conducibilità idraulica misurata è risultata compresa nel range di valori  $6 \cdot 10^{-5} \div 2,94 \cdot 10^{-4}$  cm/s.

### 3. Misure sperimentali

#### 3.1 Prove di permeabilità in laboratorio

I campioni utilizzati per le prove di laboratorio provengono dalle stesse aree in cui sono state eseguite le misure in situ. Sono state eseguite due tipi di prove di permeabilità, una a carico costante in cella da 6", per le pomici grossolane

classificabili quali sabbie limose con ghiaia (SP-SM) (Guadagno et alii., 2000), e una a carico variabile in cella da 4", ritenuta più idonea per le pomici fini classificabili quali sabbie con limo (SM). I valori di permeabilità misurata per le pomici grossolane sono risultati compresi nell'intervallo  $2,2 \cdot 10^{-1} \div 4,75 \cdot 10^{-1}$  cm/s mentre per quelle fini sono risultati compresi tra  $2,46 \cdot 10^{-3}$  e  $9,04 \cdot 10^{-3}$  cm/s. Sulla base dei risultati ottenuti in situ e in laboratorio e precedentemente esposti, emerge una distribuzione dei valori della conducibilità idraulica che può essere schematizzata come riportato in Fig. 2.

Tabella 1. Permeabilità satura misurata in situ. *Measured in situ hydraulic conductivity*

N. PROVA	PROFONDITÀ (in cm dal p.c.)	MATERIALE D'ORIGINE	LOCALITÀ	DATA	k (cm/s)
P 1	30	Pomici	Sito 2	14/03/2003	Moto turbolento
P 2	40	Piroclastiti rimaneggiate	Sito 1	20/01/2003	$1,12 \cdot 10^{-4}$
P 3	60	Piroclastiti in sede? (Bt)	Sito 2	14/03/2003	$2,94 \cdot 10^{-4}$
P 4	62	Pomici	Sito 1	20/01/2003	Moto turbolento
P 5	75	Piroclastiti rimaneggiate	Sito 1	20/01/2003	$10^{-3}$
P 6	78	Pomici	Sito 1	20/01/2003	Moto turbolento
P 7	123	Piroclastiti in sede? (Bt)	Sito 1	20/01/2003	$6 \cdot 10^{-5}$

#### 3.2 Prove di infiltrazione in colonna

Una serie di esperimenti d'infiltrazione sono stati condotti in laboratorio per studiare gli effetti di barriera capillare che possono caratterizzare la successione dei depositi piroclastici presi in esame.

lato 150 mm, riempita con una successione di pomici a granulometria grossolana, per uno spessore circa 450 mm soggiacenti i livelli di piroclastici a granulometria fine per uno spessore di circa 250 mm. (Fig.3 e Fig. 4).

Spessore (cm)	Descrizione	Conducibilità idraulica (cm/s)
40	SM Piroclastiti a grana fine	$10^{-4}$ medio-alta
20	SP-SM Pomici	$10^{-1}$ molto alta (moto turbolento)
30	SM Piroclastiti a grana fine	$10^{-3} \div 10^{-4}$ medio-alta
30	SM Bt (?)	$10^{-5}$ medio-bassa

Figura 2. Stratigrafia schematica della copertura piroclastica indagata e valori di conducibilità idraulica  
*Schematic stratigraphy of the surveyed pyroclastic covers and their hydraulic conductivities*

I test di infiltrazione sono stati eseguiti in una colonna prismatica a base quadrata in plexiglas, di altezza 800 mm e

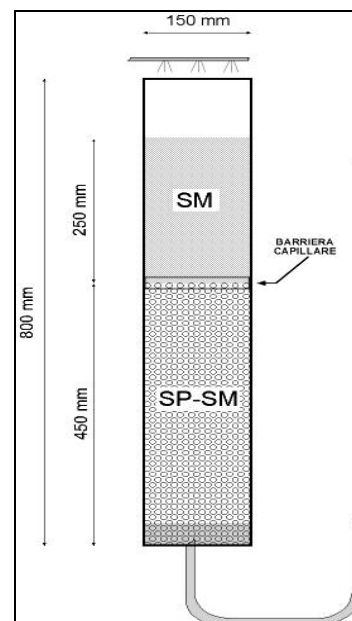


Figura 3. Schema della configurazione sperimentale a colonna adottata nei test di infiltrazione  
*Laboratory column infiltration test apparatus*

Il sistema descritto è stato dotato, alla base, di un piezometro per valutare quando a seguito di percolazione si verifica la rottura della barriera capillare al contatto fra i due materiali. I test di infiltrazione sono stati realizzati simulando piogge di diversa intensità e valutando in questo modo il funzionamento della barriera capillare con cicli bagnato/secco. Sono stati simulati eventi di pioggia con intensità via via decrescente compresa fra 50 mm/h ÷ 2,5 mm/h. Ogni evento di infiltrazione è stato prolungato per il tempo necessario a misurare, nel piezometro alla base della colonna, l'afflusso di acqua di infiltrazione in conseguenza della rottura della barriera capillare. Gli eventi più intensi (50, 25 e 12,5 mm/h) hanno causato dopo pochi minuti,

condizioni di percolazione alla base della colonna. Per eventi di pioggia di intensità uguale o inferiore a 6 mm/h non si sono osservati fenomeni di percolazione prima di 6-8 ore, evidenziando un prolungato funzionamento della barriera capillare.

I risultati delle prove sono riassunti in Tab. 2. La barriera al flusso che si genera al contatto fra i due materiali, da una parte limita di molto la percolazione di acqua verso il basso e dall'altro favorisce l'accumulo di acqua nello strato superiore. Hanno così luogo processi di assorbimento e ritenzione di acqua che favoriscono la decrescita della suzione, fino alla perdita di coesione apparente.

Tabella 2. Risultati dei test d'infiltrazione in colonna – *Results from the laboratory column infiltration test*

PROVA DI INFILTRAZIONE DATA	INTENSITÀ PIOGGIA (mm/h)	FLUSSO D'ACQUA (ml/h)	DURATA DELL' INFILTRAZIONE (h)	PERCOLAZIONE E DALL' INIZIO EVENTO (min)	DURATA DEL FUNZIONAMENTO DELLA BARRIERA CAPILLARE (h)	ACQUA INFILTRATA FINO ALL' INIZIO DELLA PERCOLAZIONE (mm)
I - 12/06/2003	50	1400	8	10	-	8,33
II - 13/06/2003	25	700	8	10	-	4,16
III - 16/06/2003	12,5	350	8	5	-	1,0
IV - 17/06/2003	6	170	11	360	6	36
V - 18/06/2003	6	170	11	480	8	36
VI - 19/06/2003	6	170	11	480	8	36
VII - 23/06/2003	4	117	11	480	8	32
VIII - 24/06/2003	4	117	11	660	11	44
IX - 01/07/2003	2,5	73	11	420	7	28
X - 02/07/2003	2,5	73	11	480	8	32

#### 4. Simulazioni con modello numerico

Sulla base dei positivi riscontri sperimentali si è cercato di modellare dal punto di vista numerico il fenomeno, per poter poi di simulare la situazione dei versanti di Pizzo d'Alvano. I modelli numerici di seguito descritti sono stati implementati utilizzando un codice di calcolo alle differenze finite denominato VSD2DI sviluppato dalla USGS (<http://water.usgs.gov/software/>) e basato sulle equazioni di Richards (Lappala et alii, 1987) per la simulazione di processi di infiltrazione nei terreni insaturi.

##### 4.1 Modello di infiltrazione in colonna

Inizialmente è stata svolta una prova di simulazione numerica dell'esperienza di laboratorio, finalizzata ad ottenere una stima dei coefficienti della curva di van Ghenuchten (van Ghenuchten, 1980; Lappala et alii, 1987) da utilizzare nella simulazione numerica della pendice. Le permeabilità sature adottate nel modello numerico (Fig. 5) sono state quelle ottenute nelle determinazioni sperimentali:  $k = 10^{-3}$  cm/s per lo strato superiore alto 25 cm e  $k = 10^{-1}$  cm/s per lo strato sottostante a granulometria maggiore, di spessore 45 cm.

Il valore dei parametri di van Ghenuchten è stato variato nel modello fino ad ottenere un buon accordo fra i risultati

del modello numerico e di quello sperimentale.



Figura 4. Immagine dell'apparecchiatura sperimentale  
*View of the laboratory column infiltration test apparatus*

Effettuando un'analisi a ritroso è stato così possibile stimare i parametri  $\alpha$  e  $\beta$  di van Ghenuchten che sono risultati rispettivamente pari a  $1,5 \text{ m}^{-1}$  e  $1,8$  per lo strato superiore fine e  $280 \text{ m}^{-1}$  e  $2,5$  per lo strato grossolano.

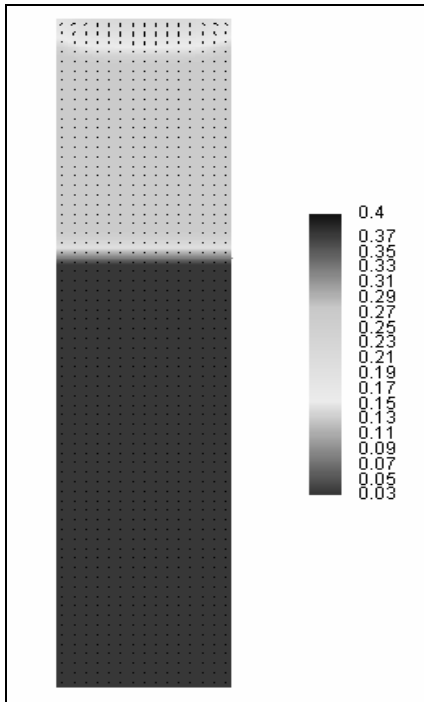


Figura 5. Modello di simulazione in colonna ad incipiente infiltrazione  
*Numerical column model at beginning infiltration*

#### 4.2 Modello di infiltrazione in pendio

La prova di simulazione in pendio ha avuto lo scopo di valutare gli effetti di barriera capillare su una configurazione che rappresentasse idealmente l'assetto geologico e i caratteri idrogeologici di un versante del rilievo del Pizzo d'Alvano.

Come pendio tipo per la modellazione numerica è stato assunto un pendio costituito da due strati di spessore di 100 e 60 cm con le stesse caratteristiche del modello a colonna sopra descritto poggianti sopra uno strato ad elevata permeabilità che vuole simulare i calcari di base. Il pendio termina con un taglio fortemente inclinato che vuole simulare un taglio stradale nelle coltri piroclastiche. Il modello è una rappresentazione volutamente semplificata della situazione esistente nelle zone di attivazione dei debris-avalanches avvenuti sui versanti di Pizzo d'Alvano. La faccia di valle del modello che simula il taglio stradale è stata assunta essere una superficie di filtrazione libera.

Anche la faccia inferiore è stata assunta di filtrazione libera, ritenendo che la permeabilità dei calcari possa essere considerata molto elevata.

Sono state effettuate due simulazioni: utilizzando due intensità di pioggia rispettivamente di  $5 \text{ mm/h}$  e  $50 \text{ mm/h}$ . La geometria del modello, nonché la distribuzione del contenuto d'acqua ed i vettori di flusso in un particolare istante della simulazione ( $t=140040 \text{ s}$ ) sono presentati in Figura 6.

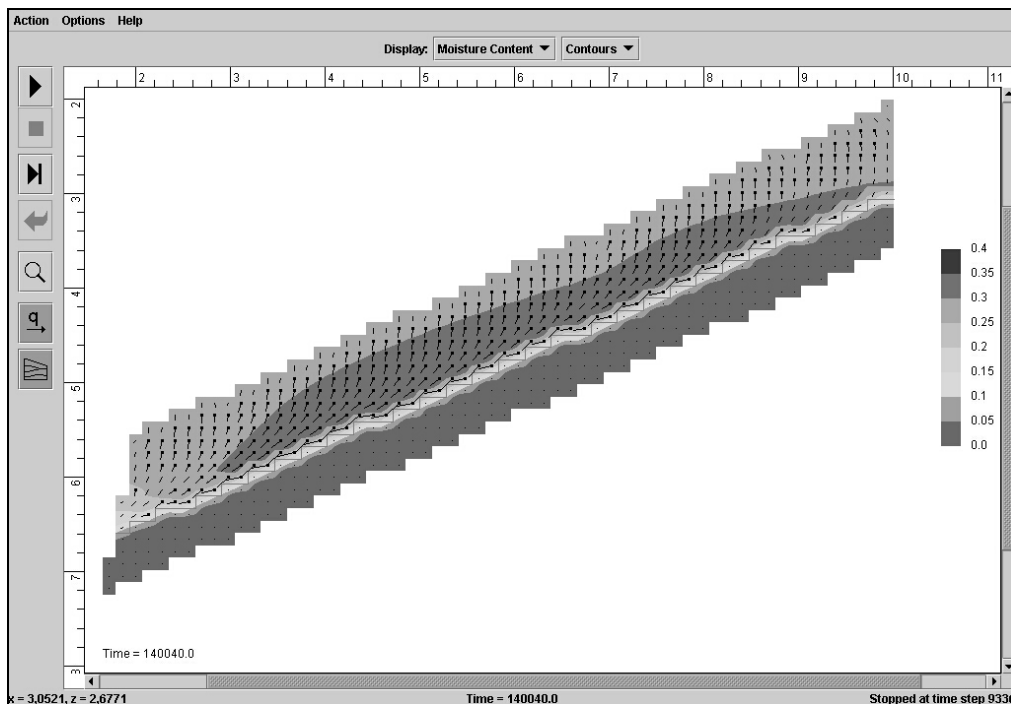


Figura 6. Modello di infiltrazione in pendio – *Numerical slope infiltration model*

L'effetto della barriera capillare, come evidenziato in figura, si esplica nell'aumento del contenuto idrico localizzato a ridosso dell'interfaccia nello strato superiore e che comporta la diversione del flusso idrico con deviazione via via più marcata rispetto alla direzione verticale. Ciò comporta un incremento notevole del contenuto idrico nello strato superiore, con una conseguente decrescita della suzione. Come evidenziato nel paragrafo 3.3. in laboratorio questo effetto è risultato tanto più vistoso quanto più lenta è l'infiltrazione. Le simulazioni numeriche sembrano quindi rafforzare l'idea che basse intensità di precipitazione favoriscano l'instaurarsi di barriere capillari, favorendo la decrescita della suzione che ha un ruolo particolarmente importante per l'equilibrio delle masse piroclastiche.

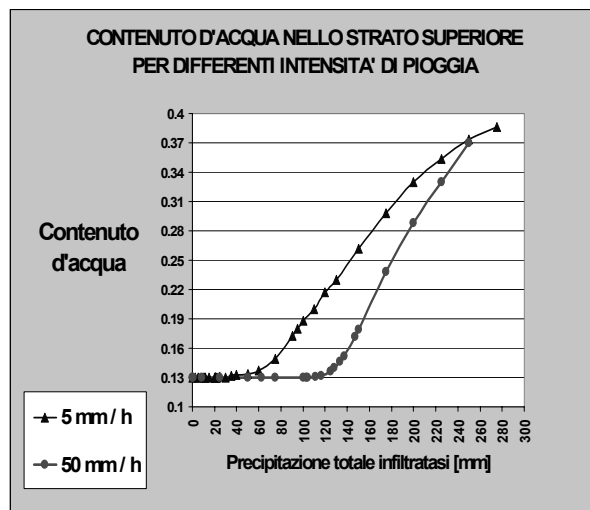


Figura 7. Contenuto d'acqua in un punto d'osservazione nello strato superiore prossimo all'interfaccia per due differenti intensità di precipitazione

*Water content at an observation point in the top layer slightly above the interface for two different rainfall intensities.*

In Fig. 7 e Fig. 8 sono riportati, l'andamento della suzione e del contenuto idrico in un punto di osservazione posto nello strato superiore in prossimità dell'interfaccia, in un'area centrale del modello. Le due figure si riferiscono alle due differenti intensità di precipitazione simulate di 5 e 50 mm/h. Quando la saturazione non è stata ancora raggiunta, a parità di precipitazione totale, l'evento meno intenso provoca un accumulo idrico maggiore e, conseguentemente, un significativo decremento della

suzione.

## 5. Conclusioni

Lo studio svolto ha consentito di evidenziare come il particolare assetto stratigrafico e le caratteristiche intrinseche e di permeabilità delle coltri piroclastiche di copertura della dorsale carbonatica di Pizzo d'Alvano consentano la presenza di una barriera capillare al passaggio fra i materiali a granulometria più fine a quelli sottostanti a granulometria più grossolana. In caso di piogge di lunga durata e bassa intensità risulta quindi favorito l'accumulo di acqua negli strati più superficiali fino eventualmente alla saturazione.

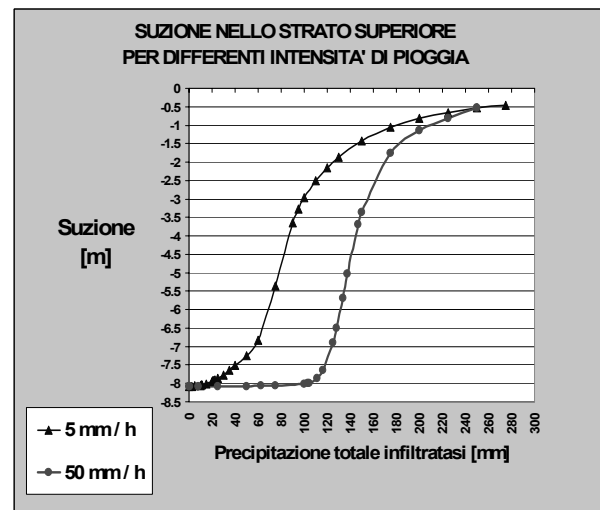


Figura 8. Suzione in un punto d'osservazione nello strato superiore prossimo all'interfaccia per due differenti intensità di precipitazione

*Suction head at an observation point in the top layer slightly above the interface for two different rainfall intensities.*

La lenta idratazione dei depositi superficiali porta ad annullare l'effetto diminuzione della resistenza meccanica delle coltri fino all'instabilità delle stesse. La presenza di una barriera capillare al passaggio fra strati a differente granulometria può essere considerato un ulteriore possibile meccanismo degli inneschi delle instabilità nei materiali piroclastici.

## Bibliografia

Basile A., Mele G., Terribile F., 2003. Soil Hydraulic behaviour of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998. *Geoderma* 117, 331-346

Celico, P., Guadagno, F.M., 1998. L'instabilità delle coltri piroclastiche delle dorsali carbonatiche in Campania: attuali conoscenze. *Quad. Geol. Appl.* 5, 129-188.

Crosta G.B., Dal Negro P., 2003. Observations and modelling of soil slip-Debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno event. In *Natural Hazards And Earth System Sciences* 3, 53-69.

Esposito L., Guadagno F.M., 1998. Some special geotechnical properties of pumice deposits. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57, 41-50

Fiorillo F. & Guadagno F.M., Aquino S. & Blasi A. (2001). The December 1999 Cervinara landslides: further debris flows in the pyroclastic deposits of Campania (southern Italy) - *Bull. Eng. Geol. Env.*, 60, 171-184.

Fiorillo F. & Wilson R. C., 2004. Rainfall induced debris flows in pyroclastic deposits, Campania (southern Italy) - *Engineering*

- Geology, 75 (3-4), 263-289.
- Guadagno F.M., Perriello Zampelli S., Matonti V., 2000. Primo contributo allo studio delle aree di distacco delle frane del 5-6 Maggio 1998 in Campania. *Quaderno di Geologia Applicata*, 7 (2), 121-142, Pitagora Editrice
- Guadagno F.M., Scarascia Mugnozza G. and Martino S. (2003). Influence of man-made cuts on the stability of pyroclastic covers (Campania - Southern Italy): a numerical modelling approach - *Env. Geol.*, 43, 371-384.
- Guadagno F.M., Forte R., Revellino P., Fiorillo F., Focaresta M., 2005. Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: The role of morphological slope discontinuities and the development of failures. *Geomorphology* 66, 237-254.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environ. Eng. Geosci.* 7, 1-18.
- Khire M.V., Benson C.H., Bosscher P. J., (2000) – Capillary barriers: design variables and water balance. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (8), 695-708.
- Lappala E.G., Healey R.W., & Weeks E.P. (1987). Documentation of the computer program VS2D to solve equations of fluid flow in variably saturated porous media. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 87-4099.
- Ross B. (1990) – The diversion Capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, 26 (10), 2625-2629.
- Shackelford C.D., Chang C.-K., Chiu T.-F. (1994). The capillary barrier effect in unsaturated flow through soil barriers. *Proc. of the first International Congress on Environmental Geotechnics*, 789-793.
- Stormont J. C. & Anderson C.E. (1999) – Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer. *J. of Geotech. and Env. Engineering*, 125 (8), 641-648
- van Ghenuchten M.Th. (1980) – A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils – *Soil Sci. Soc. of Am. Proceedings*, 44(5), 892-898.

Questo articolo, presentato al 2° Congresso Nazionale dell'AIGA, Bari 15-17 Febbraio 2006, non è stato pubblicato negli atti del congresso per un disguido redazionale.