



2009

THE FIRST ITALIAN WORKSHOP ON LANDSLIDES

Naples, 8-10 June 2009



# RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES

## mechanisms, monitoring techniques and nowcasting models for early warning systems

Volume 2

1. Calabro, F. de Luca Tuppiti Schinosa, A. Evangelista, S. Ruopolo, A. Scotto di Santolo

2. Cola, N. Calabro, P. Simonini, G. Marcato, A. Pasuto, S. Silvano

3. Confucchia, G. Mitaritonna, G. Elia, F. Santaloia, P. Lollino

4. Costa, P. Frattini

5. Evangelista, A. Scotto di Santolo

6. Lollino, D. Giordan, P. Allasia

7. V. Martina, M. Berti, A. Simoni, E. Todini, S. Pignone

8. Olivares, E. Damiano, G. Urciuoli

9. Papa, M. Pirone, M.V. Nicotera, G. Urciuoli

10. Rabuffetti, D. Tiranti

11. Tommasi, L. Verrucci, D. Boldini, G. Caldarini



Biblioteca  
CNR - IRPI - Bari

Posiz. Invent. 10/212

Editors: Luciano PICARELLI Paolo TOMMASI Gianfranco URCIUOLI Pasquale VERSACE

The first ITALIAN WORKSHOP on LANDSLIDES



CIRIAM  
Centro  
Interdipartimentale  
di Ricerca in  
Ingegneria  
Sismologica



DIGA  
Dipartimento di  
Ingegneria  
Strutturale e  
Ambientale



IRPI

# Meccanismi di frana in pendii in argille dell'Italia Meridionale ed effetti delle precipitazioni meteoriche

F. Cotecchia, G. Mitaritonna, G. Elia  
*Politecnico di Bari, Bari, Italy*

F. Santaloia, P. Lollino  
*CNR - IRPI, Bari, Italy*

**RIASSUNTO:** La nota discute i risultati di alcuni studi sulla suscettibilità da frana in aree appenniniche e pedeappenniniche dell'Italia Meridionale sede di affioramenti argillosi, intensamente disturbati o tettonizzati, che sono spesso interessati da riattivazioni di corpi di frana pre-esistenti. Nel lavoro sono discussi i meccanismi di riattivazione nei pendii indagati, la sensibilità di detti meccanismi alle escursioni piezometriche e la connessione tra le riattivazioni esaminate e le precipitazioni meteoriche.

## 1. INTRODUZIONE

La valutazione del rischio da frana vede come prioritaria l'interpretazione dei meccanismi di frana, alla luce dei quali valutare l'incidenza dei diversi fattori della fenomenologia. Studi recenti stanno infatti mostrando come, anche a scala regionale, si possa giungere ad una valutazione su base deterministica della suscettibilità da frana, sulla base di una caratterizzazione sintetica in termini idro-meccanici del territorio, che permette l'individuazione di meccanismi di frana rappresentativi per un dato contesto geomecanico (Cascani et al. 2003, Savage et al. 2004, Cotecchia et al. 2009).

In questa nota si discutono alcuni risultati di studi sulla suscettibilità da frana in aree appenniniche e pedeappenniniche dell'Italia Meridionale (Figura 1) sede di affioramenti argillosi a significativa energia di rilievo. Si tratta di affioramenti di formazioni argilloso-limose o di successioni torbiditiche, spesso intensamente disturbate a seguito di processi deformativi di origine tettonica o gravitativa. In particolare, detti affioramenti sono spesso sede di corpi di frana pre-esistenti, che oggi vanno in riattivazione con movimenti lenti. La frequenza di queste riattivazioni è testimoniata dal danneggiamento di strutture ed infrastrutture, che rende evidente il rischio elevato generato da questi processi. Nella nota si discutono alcune di queste fenomenologie di riattivazione, che appaiono riconducibili a tre categorie di meccanismo di frana.

Oltre allo stato dell'attività, altro carattere comune delle fenomenologie che si esaminano è il ruolo del regime piezometrico come fattore predisponente. La nota discute la sensibilità alle escursioni piezometriche dei diversi meccanismi di frana indagati e

la connessione, diretta o indiretta, tra le riattivazioni esaminate e le precipitazioni meteoriche. L'interpretazione di tale connessione è prodromica alla definizione delle scelte per la mitigazione del rischio.

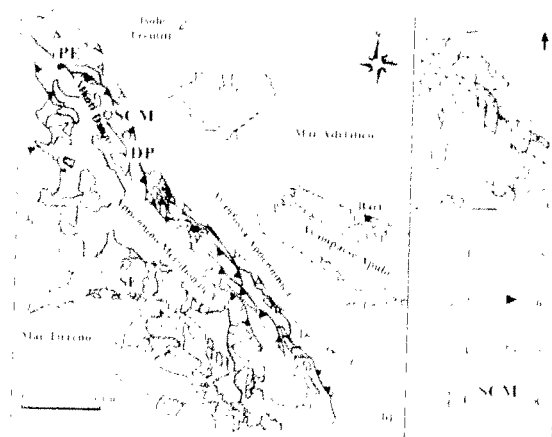


Figura 1. Carta geologica schematica dell'Appennino meridionale (da Scrocca et al. 2008, modificato). 1) depositi marini e continentali, e depositi di bacini di fronte catena, 2) Unità Appenniniche Interne (complessi Liguridi e Sicilidi), 3) Unità della Piattaforma Appenninica, 4) Unità Ligonegri-Molise, 5) Unità della Piattaforma Apula, 6) principali sovrascorrimenti, 7) fronte sepolto dell'alloctono appenninico, 8) casi di studio citati nel testo: PE - Petaccato, SCM - Santa Croce di Magliano, DP - Dama pugliese, SI - Valle del Sele.

## 2. I FATTORI PREDISPONENTI ALL'ATTIVITÀ DEI MECCANISMI DI FRANA INDAGATI

Già nel 1950 Terzaghi identificava quali fattori in tema del meccanismo franoso la geometria del pen-

dio, il suo assetto geostrutturale, le proprietà meccaniche dei litotipi e le loro permeabilità, queste ultime determinanti, in combinazione con la geometria e le condizioni idrauliche al contorno, il regime piezometrico del pendio. Tra questi, venivano definiti fattori predisponenti quelli particolarmente svantaggiosi per la stabilità.

Gli spostamenti di un pendio sono dunque il risultato delle variazioni di equilibrio nell'ambito di un problema al contorno, ove le grandezze coinvolte sono i fattori interni anzidetti ed i fattori esterni. Questi ultimi sono grandezze variabili nel tempo, che inducono modifiche nel regime di equilibrio o nel regime piezometrico del pendio, a cui conseguono gli spostamenti (Terzaghi 1950). Dette modifiche sono pressoché continue, se si considerano gli effetti delle variazioni nel sistema morfoclimatico. Si può dunque ritenere che l'equilibrio di un pendio sia sempre in evoluzione, con incrementi di deformazione lenti ed irreversibili. Se tale dinamica ha sede in un pendio che ha raggiunto i margini dell'instabilità, anche un fattore esterno di entità non eccezionale, come ad esempio un evento pluviometrico con basso tempo di ritorno, può generare delle accelerazioni del processo deformativo e lo sviluppo di movimenti di frana. Quanto detto è tanto più rilevante quanto più i materiali sono di bassa rigidità e resistenza, come nel caso di pendii sede di rotture progressive, che vanno in riattivazione.

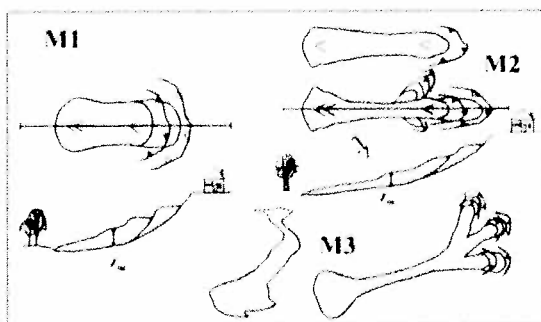


Figura 2. Meccanismi di frana discussi nella nota.

Le fenomenologie di riattivazione esaminate nel presente lavoro sono in generale da molto lente a lente (Cruden & Varnes 1996), con eventuali fasi parossistiche, in cui si registrano localmente velocità massime entro i 10 m/giorno. Come reso evidente nel seguito, queste riattivazioni si sviluppano secondo tre dei meccanismi di frana più diffusi nell'Italia centro-meridionale. Il primo meccanismo è quello dello scorrimento composto (M1 in Figura 2), profondo ( $z_m > 30$  m), a luoghi multiplo e spesso in evoluzione retrogressiva. I casi di frana con meccanismo M1 che si discutono sono: la frana di Petacciato (PE - Figura 1), nell'area pedeappenninica, e quella nel versante Sud-Ovest di Bovino, nel Subappennino

Dauno (DP-Figura 1). Il secondo meccanismo di frana, M2 in Figura 2, è quello dello scorrimento di fango, da mediamente profondo a profondo, di cui si discutono i casi attivi nel versante Ovest di Volturino (DP - Figura 1) e a Santa Croce di Magliano (SCM - Figura 1). Il terzo meccanismo, M3 (Figura 2), comporta maggiore disturbo all'interno del corpo di frana e, a valle di una o più aree di alimentazione, ha una zona tipo canale confluyente in un'ampia area di accumulo. Esso rientra nell'insieme dei movimenti tipo colata (*flow-like*) (Hungry et al. 2001, Picarelli et al. 2008), in particolare riconoscibili come *flowslides* (Hutchinson 2004). Tra i casi esaminati, si è riconosciuto tale meccanismo per la frana Vadoncello, nell'Appennino Irpino (SE - Figura 1), e per la Frana Toppo, nella Daunia (DP - Figura 1).

Il regime piezometrico nei pendii presi in esame è fattore predisponente la riattivazione del meccanismo franoso, per come esso è determinato dalle condizioni al contorno medie nell'anno. Esso è in generale connesso ad un pelo libero poco profondo, soggetto a significative escursioni stagionali per variazioni nel regime di alimentazione. Per i casi di tipo M1 e M2 indagati, i movimenti appaiono connessi a dette escursioni stagionali. Per i casi di tipo M3, invece, detta connessione non è altrettanto evidente.

### 3. CASI DI STUDIO

Nel seguito si discutono i diversi movimenti di massa presi in esame, distinti per tipologia di meccanismo. Essi coinvolgono successioni sedimentarie ascrivibili sia ad unità di avansfossa, come quelle affioranti lungo la costa adriatica (PE - Figura 1), che ad unità di catena affioranti nelle zone interne (Unità Sicilidi, SE) ed esterne (Unità del Fortore e Unità della Daunia; SCM e DP, Figura 1) della catena appenninica meridionale. Per taluni dei casi richiamati, si presentano i primi risultati di studi svolti nell'ambito di un Progetto di Ricerca Strategico sulla valutazione del rischio da frana, finanziato dalla Regione Puglia e tuttora in corso.

#### 3.1 Fenomenologie di tipo M1

Il versante costiero sottostante l'abitato di Petacciato (Figura 1) è sede di riattivazioni complesse di scivolamenti composti, secondo un meccanismo multiplo di tipo M1 (Figura 2) insediato nelle Argille Subappennine. Esso costituisce uno dei più vasti bacini di paleofrana della costa adriatica (4 km<sup>2</sup>, pendenza media 13°, Figura 3), le cui condizioni di dissesto sono comuni a molti altri pendii della costa e generano ricorrenti danni alla ferrovia Adriatica e all'autostrada A14 (Figura 3). Nel bacino sono stati registrati 14 eventi di riattivazione dal 1906 al 1996 (Guerriechio et al. 1996) e l'attività attuale è testimoniata dai movimenti occorsi nel Febbraio 2009.

Figura, (dai colori)

Figura, (dai colori)

Figura, (dai colori)

li fra-  
to di  
cui si  
lturi-  
diano  
figura  
corpo  
zione,  
a area  
immen-  
parelli  
e flo-  
i, si è  
oncel-  
per la

ame è  
ceani-  
e con-  
gene-  
fondo,  
er va-  
i di  
onnes-  
o M3,  
lente.

i mas-  
ecani-  
arie a-  
quelle  
ira 1),  
interne  
rtore e  
a cate-  
asi ri-  
svolti  
co sul-  
o dalla

acciato  
scivo-  
multiplo  
Subap-  
neini di  
ndenza  
lissesto  
e gene-  
tica e  
no stati  
al 1996  
è testi-  
2009.

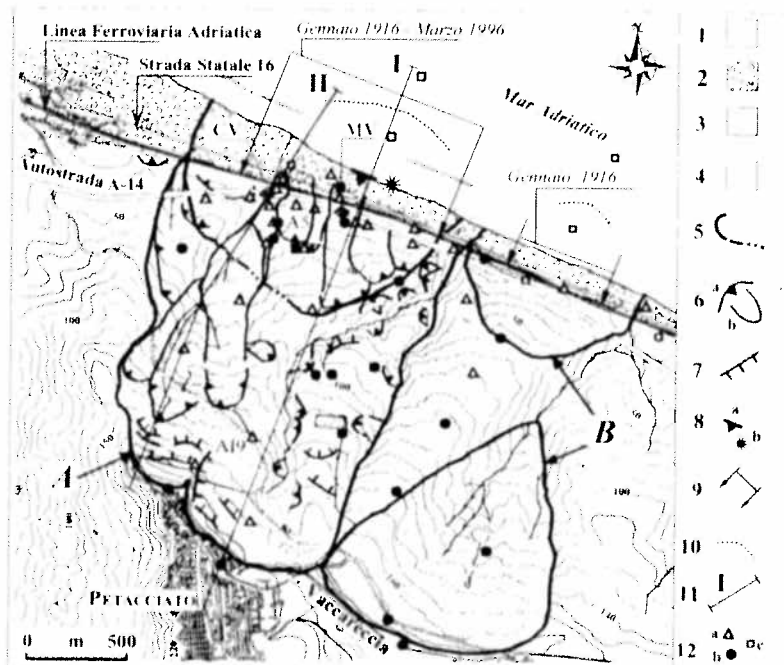


Figura 3. Frana di Petacciato. Carta geologico-geomorfologica schematica: 1) depositi colluviali e/o di frana, 2) depositi di spiaggia, 3) depositi marini e alluvionali, 4) Argille Subappennine, 5) limiti dei corpi di frana profondi, 6) frane da superficiali a mediamente profonde (a: mechia di distacco, b: bordo del corpo di frana), 7) scarpate di frana, 8) lingua di argilla (a) e scoglio conglomeratico (b), 9) tratto della linea ferroviaria maggiormente danneggiata, 10) antico piede di frana, 11) traccia delle sezioni, 12) sondaggi geognostici realizzati nell'area (a: inclinometri, b: piezometri, c: non attrezzati).

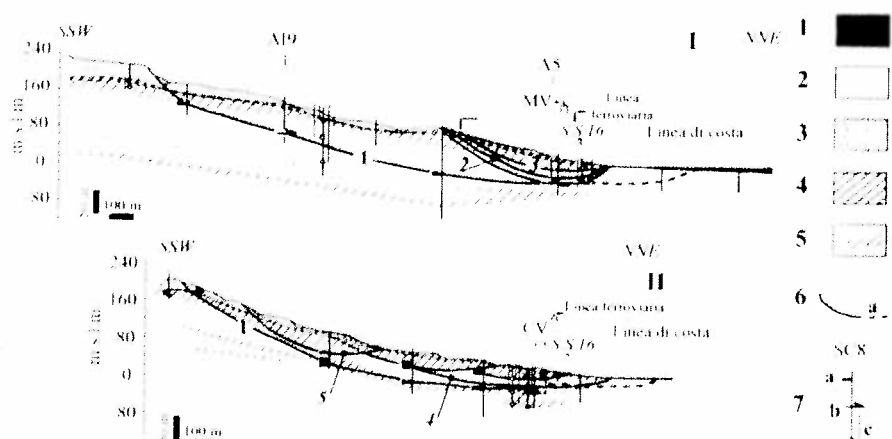


Figura 4. Frana di Petacciato. Sezioni del versante occidentale: 1) depositi marini attuali, 2) deposito di frana o colluviale, 3) depositi marini e alluvionali, 4) unità litologica di passaggio, 5) Argille Subappennine (a: intervalli sabbioso-limosi), 6) superfici di scorrimento; a) piede di paleofrana, 7) sondaggi (a: carote disturbate da taglio, b: rotture inclinometriche, c: livelli piezometrici).

A Petacciato tutte le riattivazioni registrate sono avvenute tra la seconda metà di Gennaio e la fine di Marzo, dopo stagioni autunno-invernali molto piovose, e sono durate da poche ore a pochi giorni, evolvendosi con carattere retrogressivo. La Figura 3 mostra i tratti di ferrovia più danneggiati (spostamenti repentini da 18 a 60 cm) ed il rilievo geomorfologico nel sottobacino più attivo (A in Figura 3).

Corecchia et al. (2008) discutono il meccanismo di riattivazione in tale sottobacino sulla base di analisi geomorfologiche temporali, dei risultati di campagne geognostiche e di monitoraggio (Figura 3), nonché di calcoli a ritroso dell'equilibrio dei corpi nel pendio. La Figura 4 mostra due delle sezioni geotecniche studiate. Nella maggior parte del pendio sono presenti le Argille Subappennine grigie, che interca-

lano strati limo-sabbiosi e sono sovrastate da depositi grossolani alla testa del pendio e da detriti limo-sabbiosi lungo il pendio. Il loro indice di plasticità ( $IP_{medio}=29\%$ ) aumenta con la profondità, il che indica che il variare della composizione del materiale fornisce un contributo a detrimento delle resistenze in profondità, quindi a vantaggio di instabilità profonde. I parametri di resistenza di picco variano tra  $c_p=160\text{kPa}$ ,  $\phi_p=18^\circ$  per le argille più profonde e  $c=0$ ,  $\phi_p=21^\circ$  per le argille indebolite da disturbo nella zona di piede.

Secondo Cotecchia et al. (2008), bande di taglio confinano almeno 4 corpi di frana da mediamente profondi a superficiali, che si innestano in un corpo di paleofrana profondo sino ad almeno 100 m (piegamento degli inclinometri A19 e A5, Figura 4), con piede originale oltre l'attuale linea di costa. Durante l'evento del 1991, una lingua di argilla fu estrusa attraverso le sabbie di spiaggia al piede del pendio e uno scoglio si avvicinò alla costa (Figura 3), entrambi fenomeni indicativi dell'affioramento del piede attuale del corpo profondo presso l'attuale linea di costa. Le analisi all'equilibrio limite dei corpi 1-4 (Figura 4), hanno confermato che il piede di questi corpi sia lungo la linea di costa (Cotecchia et al. 2008). In particolare, per il corpo 1, l'arretramento del piede sino alla linea di costa comporta una riduzione del 20% del fattore di stabilità. I valori delle resistenze operative calcolate per i corpi 1-5 hanno inoltre suggerito una gerarchia di instabilità, secondo la quale la riattivazione ha inizio col movimento del corpo 5 nella porzione alta del bacino, cui consegue la riattivazione dei corpi 4, 3 e 2 nella parte bassa del bacino, per giungere, infine, alla rimobilizzazione del corpo profondo, 1 (Figura 4). L'angolo di attrito mobilizzato ( $c=0$ ) lungo la superficie del corpo 1 varia da  $11.6^\circ$  a  $13.9^\circ$  tra le due sezioni.

In tutte le analisi è stato implementato il regime piezometrico desunto dalle misure rilevate lungo 18 verticali, ognuna sede di 2 o 3 celle piezometriche, mostrate in Figura 5 per la sezione 1. Per la maggior parte delle verticali, i livelli piezometrici misurati

superano il piano campagna e aumentano con la profondità. Gli elevati carichi piezometrici in profondità vanno a discapito delle resistenze nelle bande di taglio profonde e sono quindi importante causa interna di instabilità. In particolare, Cotecchia et al. (in prep.) riportano una modellazione agli elementi finiti della filtrazione nel pendio, che mostra come la distribuzione delle pressioni interstiziali monitorata può essere connessa alle condizioni al contorno, definite dal serbatoio nella placca grossolana alla testa del pendio e dal mare al piede, ed alla presenza del detrito in superficie e di interstrati sabbiosi nelle argille (Figura 4). Queste condizioni generano importanti distorsioni delle superfici equipotenziali, che comportano un flusso con forte componente di velocità dal basso verso l'alto al piede ed elevati carichi idraulici in profondità.

L'esame dei dati pluviometrici (stazioni di Guggionesi e di Termoli) precedenti le 14 riattivazioni registrate nel secolo scorso tra Gennaio e Marzo, mostra che gli eventi pluviometrici immediatamente precedenti le riattivazioni non sono mai stati particolarmente critici per intensità e durata. Viceversa, le riattivazioni sono state sempre precedute da fasi prolungate di aumento delle cumulate di pioggia a 180 giorni, che hanno raggiunto valori nell'intervallo [350 mm - 700 mm] immediatamente prima degli eventi. Questo andamento delle cumulate è coerente con il regime pluviometrico annuale medio (Figura 6) che, a Petacciato, come in tutti gli altri siti esaminati, vede piogge medie mensili superiori alla media annuale da Ottobre ai primi di Maggio (stagione autunno-invernale). È frequente registrare, nelle zone di riferimento, un innalzamento della superficie di falda anche di 2-3 m a fine inverno.

In Figura 5 sono mostrate le linee piezometriche adottate nei calcoli all'equilibrio limite d'anzi disseusi per il pendio di Petacciato: curva *a* per le superfici meno profonde e *b* per le superfici profonde (Figura 4). Cotecchia et al. (in prep.) stimano, per il corpo 1, un aumento del coefficiente di stabilità di circa il 10% per un abbassamento della curva piezometrica (*b*, Figura 5) di circa 4 m, atto a simulare

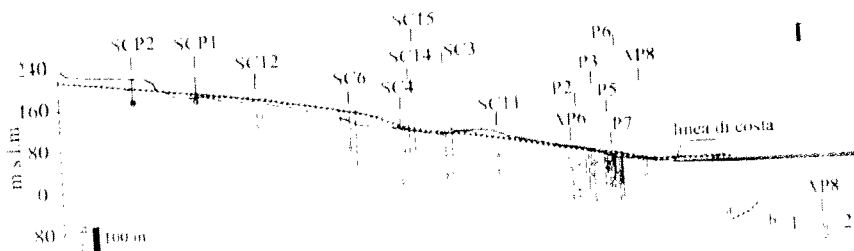


Figura 5. Frana di Petacciato: 1) Linee piezometriche adottate nei calcoli all'equilibrio limite (a per i corpi poco profondi, b per i corpi profondi) e 2) misure piezometriche.

il Q  
ce  
de  
te  
bi  
in

Fig  
vir

figu  
viali  
cont  
et. b

con la pro-  
fondità  
ande di ta-  
usa interna  
et al. (in  
ementi fini-  
come la di-  
monitorata  
ntorno, de-  
na alla testa  
presenza del  
osi nelle ar-  
ano impor-  
enziali, che  
ente di velo-  
vati carichi

ioni di Gu-  
riattivazioni  
io e Marzo,  
mediatamente  
stati partico-  
vicceversa, le  
da fasi pro-  
roggia a 180  
ell'intervallo  
prima degli  
te è coerente  
edio (Figura  
ri siti esami-  
ri alla media  
(stagione au-  
e, nelle zone  
superficie di

siezmometriche  
te dianzi di-  
a a per le su-  
fici profonde  
timano, per il  
di stabilità di  
lla curva pie-  
o a simulare

il passaggio dal regime invernale a quello estivo. Questo risultato supporta quindi l'ipotesi che oggi i corpi di paleofrana a Petacciato si riattivino a seguito dell'escursione piezometrica stagionale. Inoltre, detto risultato supporta l'ipotesi che il disboscamento avvenuto sul pendio alla fine del XIX secolo abbia contribuito all'innescò delle riattivazioni, avendo incentivato l'alimentazione della falda.

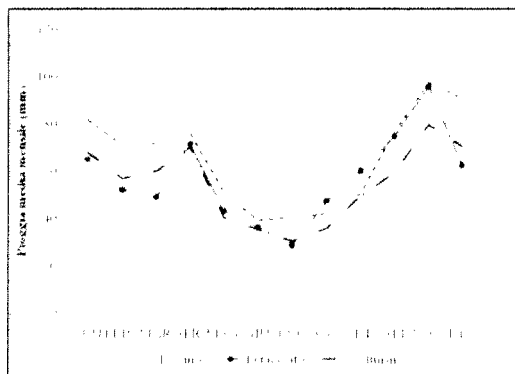


Figura 6. Piogge medie mensili misurate nelle stazioni di Bovino, Petacciato e Volturino (anni 1969 - 2003).

Passando al contesto geo-meccanico dauno, il caso del versante a Sud-Ovest del centro storico di Bovino (Figura 1) è esemplificativo di riattivazioni di meccanismi del tipo M1 nelle unità daune. Nel versante, sede dell'espansione edilizia del paese dagli anni '50, ha sede uno scorrimento che coinvolge le argille del Flysch di Facto (Figura 7), particolarmente attive ( $A \geq 1$ ), il cui indice di plasticità ( $IP_{medio} = 45\%$ ) aumenta con la profondità, come anche rilevato a Petacciato. L'attività della scarpata principale è da anni testimoniata da un diffuso, a luoghi intenso, danneggiamento dell'edificato ed ha altresì generato scorrimenti secondari per retrogressione delle aree di alimentazione. Anche su questo versante l'attività franosa è stata spesso registrata nella stagione invernale (Figura 6), come nel Gennaio 1984, allorquando nell'area di monte ci furono accelerazioni dei movimenti a seguito di un repentino scioglimento del manto nevoso. Gli elementi geomorfologici di superficie e le letture inclinometriche, rilevate di recente, danno evidenza del meccanismo M1, con profondità di piegamento intorno ai 47 m lungo la verticale 12 (Figure 7) e piede lungo il torrente Biletra. Gli spostamenti inclinometrici in Figura 7 sono stati rilevati dopo l'ultima stagione invernale particolarmente piovosa, durante la quale si è misurato un aumento dei livelli piezome-

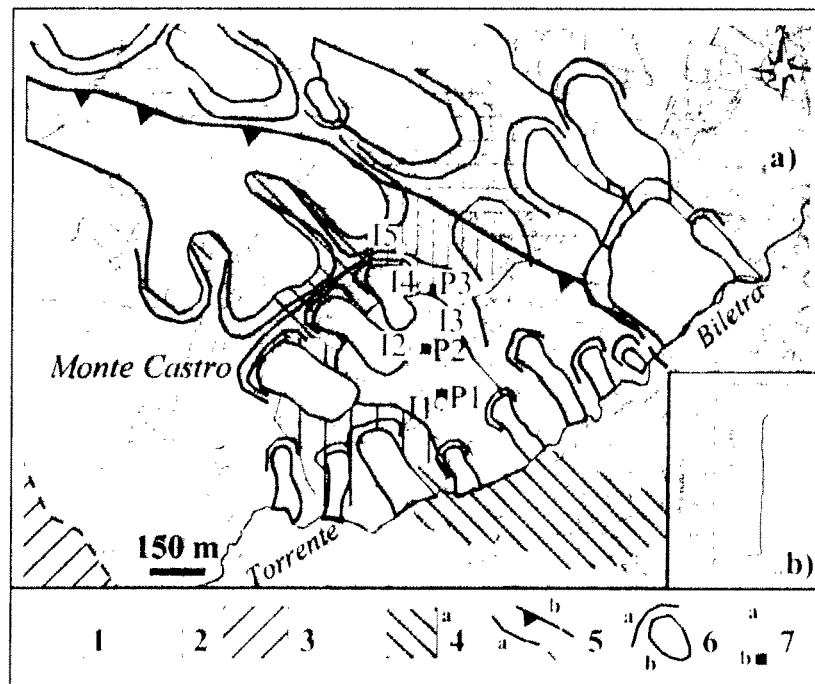


Figura 7. a) Carta geologica e geomorfologica dell'area di Bovino (da Foglio 421, modificato); 1) Detrito di versante, depositi eluviali e colluviali, 2) Sistema di Bovino, 3) Marne di Toppo Capuana, 4) Flysch di Facto (a, porzione prevalentemente argillosa), 5) contatto geologico (a, stratigrafico, b, tettonico), 6) frana (a, micchia, b, corpo), 7) sondaggi geognostici (PST 2008; a, inclinometrici, b, verticali piezometriche); b) Deformata inclinometrica relativa alla verticale 12.

profondi, b per

trici, superficiali e profondi, di circa 1.5 m, come mostrato, ad esempio, dai dati in Figura 8. Inoltre, i piezometri elettrici nelle aree di scarpata (Figura 8) sede di interstrati calcarentici nelle sequenze argillose, hanno rilevato escursioni piezometriche repentine a seguito degli eventi pluviometrici. Comunque, ad oggi non si è rilevata una incidenza immediata delle escursioni piezometriche temporanee sulla dinamica di movimento dei corpi di frana.

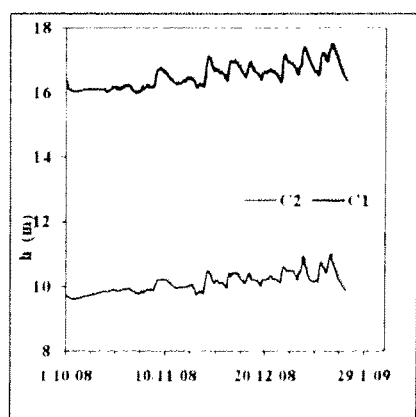


Figura 8. Misure piezometriche lungo la verticale P3 a Bovino (celle elettriche C1 e C2 rispettivamente a 35 e a 17 m dal p.c.).

### 3.2 Fenomenologie del tipo M2

La Figura 9 mostra l'assetto geomorfologico del rilievo su cui si erge l'abitato di Volturino nel Subappennino Dauno (DP - Figura 1). Il centro dell'abitato fonda sul Flysch di Faeto, in contatto ad Ovest con le Marne di Toppo Capuana. La morfologia in affioramento del corpo di frana nel versante Ovest suggerisce che il pendio sia sede di un meccanismo di scivolamento di tipo M2, frequentemente rilevato in questo settore dell'Appennino. Il processo franoso è attivo, come reso evidente dal quadro fessurativo diffuso nell'edificato che contorna la scarpata, che appare quello tipico della patologia strutturale connessa a cedimenti in fondazione. Inoltre, diversi eventi di danneggiamento di infrastrutture occorsi nelle stagioni invernali (Figura 6), suggeriscono la stagionalità della riattivazione.

Sulla base dei rilievi geomorfologici, lo scivolamento nel versante appare insediato nelle Marne di Toppo Capuana, qui costituite prevalentemente da argille e argille marnose, ed ha piede ove il pendio è attraversato trasversalmente dal torrente. Il fenomeno franoso ha un marcato andamento tridimensionale, poiché condizionato dal contatto ad Est tra le argille di Toppo Capuana ed il sottostante Flysch di Faeto, formato da un'alternanza di torbiditi calcio-elastiche, marne e argille, e più resistente delle argille ad Ovest. All'approfondirsi dello strato di argille nella porzione centrale del versante, si veri-

fica una deviazione della direzione di massima pendenza, cui appare adattarsi lo sviluppo del corpo di frana. Secondo questa interpretazione, il pendio è sede di una banda di taglio profonda, che lungo la sezione in Figura 10 congiunge la scarpata, alla testa del pendio, e il piede al torrente (pendenza media  $9.5^\circ$ ). Trattandosi però di un processo di riattivazione, non si esclude l'esistenza di più bande di taglio nel pendio, per sovrapposizione di rotture attuali ad antiche. La presenza di una banda di taglio profonda nel pendio è avvalorata dai primi rilievi inclinometrici svolti nei sondaggi SD1 e SD2 (Figure 10 e 11) e dal rinvenimento di argille rimaneggiate tra 43.5-45 m di profondità lungo il sondaggio SC1, per le quali si sono misurati parametri di resistenza di picco,  $c'_p = 0$   $\phi'_p = 18.5^\circ$ , inferiori ai valori medi ( $c'_p = 15$  kPa e  $\phi'_p = 21^\circ$ ). I profili dell'indice di plasticità (IP), della frazione argillosa (CF) e dell'indice di consistenza (IC; diagrammato come  $(IC-1) \times 100$ ) misurati lungo il sondaggio SC2 (Figura 11), sono indicativi di un aumento della plasticità del terreno con la profondità e di una riduzione della sua consistenza. Questi dati indicano che in questo pendio, così come già osservato a Petacciato, la costituzione delle argille è fattore predisponente lo sviluppo di una rottura profonda.

Rilievi piezometrici hanno mostrato la presenza di una falda con flusso sub-parallelo alla superficie topografica e pelo libero che ad Ottobre è a circa 4.5 m sotto il piano campagna (Figura 10) e risale di 2-3 m nella stagione autunno-invernale. Si è svolta l'analisi a ritroso delle condizioni di instabilità nel pendio con il metodo dell'equilibrio limite, implementando i risultati di due modellazioni agli elementi finiti della filtrazione (SEEP/W): una coerente con i rilievi piezometrici di inizio autunno (*estiva*), ed una con pelo libero circa al piano campagna (*invernale*). L'analisi con il metodo dell'equilibrio limite nella condizione invernale ha mostrato che la profondità critica della superficie di scivolamento con piede al torrente (Figura 10) è di circa 37 m, se  $c'_m = 0$  (angolo di attrito mobilizzato  $\phi'_m = 19^\circ$ ), e aumenta se  $c'_m \neq 0$ , diventando, ad esempio, di 45 m per  $c'_m = 5$  kPa e  $\phi'_m = 18^\circ$ . Tali risultati dunque mostrano che l'equilibrio attuale nel pendio mobilizza, nella fase invernale, resistenze poco inferiori a quelle massime disponibili nelle argille di Toppo Capuana. Quindi, se si considera che nel pendio sono presenti bande di taglio oggi in riattivazione, all'interno delle quali le resistenze disponibili sono verosimilmente inferiori a quelle di picco, si può ritenere che il pendio è oggi al margine dell'instabilità per gran parte dell'anno e che l'instabilità è profonda. Il calcolo mostra, inoltre, che il coefficiente di stabilità del corpo in Figura 10, assumendo  $c'_m = 5$  kPa e  $\phi'_m = 18^\circ$ , aumenta di circa il 7% nella condizione estiva. Questo risultato corrobora l'ipotesi che le riattivazioni invernali siano dovute agli aumenti dei carichi piezometrici.

Fig.  
Top  
corp

Figura  
(b),  
(c) e  
di Ca

Il  
(PL)  
and  
nelle  
prof  
prop

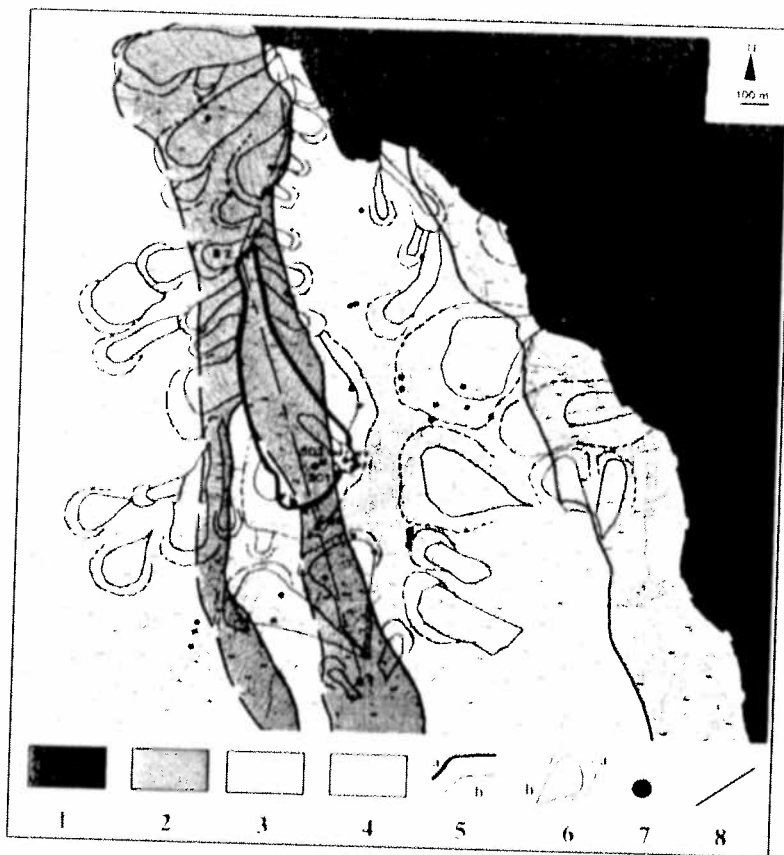


Figura 9. Carta geologico-geomorfologica del territorio di Volturno (da F402, modificato). 1) Argille Subappennine, 2) Marne di Toppo Capurano, 3) Flysch Rosso, 4) Flysch di Lacro, 5) contatto geologico (a - stratigrafico, b - tettonico), 6) trana (a - micchia, b - corpo), 7) sondaggio attrezzato ad inclinometro o a piezometro, 8) traccia di sezione in Figura 10.

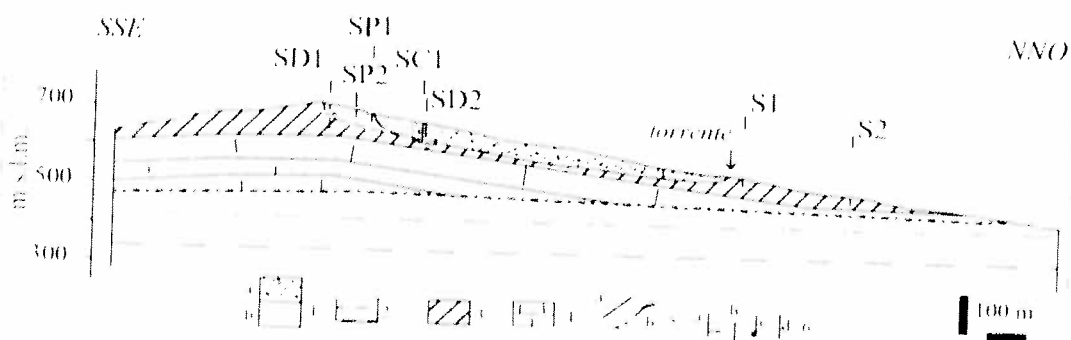


Figura 10. Sezione geologica schematica del versante occidentale di Volturno. 1) corpo di trana (a) e sua probabile retrogressione (b), 2) Argille Subappennine, 3) Marne di Toppo Capurano, 4) Flysch di Lacro, 5) contatto geologico (a - stratigrafico, b - tettonico), 6) verticali di sondaggi inclinometri (a) con profondità delle rotture, verticali piezometriche attrezzate a tubo aperto (b) o con celle di Casarande (c) e relative risalite piezometriche, sondaggi non attrezzati (d).

Infine, si è svolta un'analisi agli elementi finiti (PLAXIS 8.0) del comportamento del pendio, adottando la griglia di discretizzazione in Figura 12, nella quale è stata inserita una banda di taglio di profondità massima 50 m, costituita da materiale di proprietà meccaniche più scadenti rispetto a quelle

del resto dello strato argilloso. In Tabella 1 sono riportati i valori dei parametri adottati nel calcolo; per tutti i materiali è stato adottato il modello costitutivo elastico-perfettamente plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb e flusso non associato ( $\nu = 0$ ).



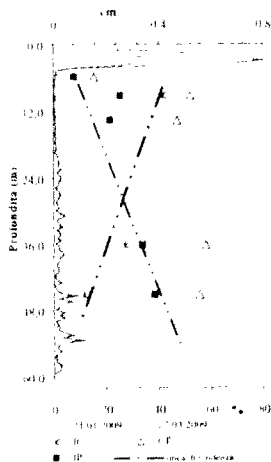


Figura 11. Deformata inclinometrica incrementale del sondaggio SD2 (lettura di zero: 16.10.2009) e profili di IC, CF e IP lungo il sondaggio SC2.

Le simulazioni della filtrazione nel pendio hanno condotto a risultati, sia per la condizione estiva che per quella invernale, pressoché analoghi a quelli implementati nelle analisi con l'equilibrio limite. È stata adottata una tecnica di costruzione del pendio per scavo in condizione sommersa, con proprietà meccaniche nella banda uguali a quelle del resto della formazione di Toppo Capuana. A fine scavo è stato simulato il regime di filtrazione estivo, in connessione al quale il pendio ha coefficiente di stabilità  $F=1.18$  (tecnica della riduzione di  $c'$  e  $\phi'$ ). In questa fase l'equilibrio è risultato associato ad una distribuzione delle deformazioni di taglio che prevede due aree di localizzazione profonde, una con piede a metà pendio e l'altra con piede poco a monte del torrente. Si è poi simulata la presenza della banda, per la quale si sono adottati parametri di resistenza ridotti (Tabella 1). In tale condizione il pendio risulta ancora stabile, ma il calcolo mostra la plasticizzazione di gran parte della banda, con ulteriore sviluppo di deformazioni di taglio nelle aree già sede di localizzazione al di fuori della banda, a metà pendio e a monte del torrente. A seguito della simulazione della risalita della falda (condizione invernale), il pendio perde stabilità, con la progressione del doppio meccanismo di localizzazione anzidetto (Figura 13). Quindi, l'analisi FEM conferma che il pendio tende a perdere stabilità secondo un meccanismo profondo di localizzazione della rottura, riconosciuto già prima dell'inserimento della banda nel calcolo. L'analisi suggerisce che l'attuale meccanismo di riattivazione si estrinseca con la mobilitazione in avanzamento di un corpo profondo nella parte alta del versante, con piede a metà pendio, e la progressiva mobilitazione della parte bassa del pendio, con piede a monte del torrente. La riattivazione produce cedimenti a monte, anche con retrogressioni della

scarpata, che arrivano a lambire le aree dell'edificio oggi danneggiato.

Tabella 1. Parametri adottati nelle analisi PLAXIS della frana di Volturmo.

Formazione	$\gamma$	$c'$	$v$	$e'$	$\phi'$	$k$
	$\text{KN}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{MPa}$		$\text{kPa}$	$^\circ$	$\text{m/s}$
Argille Subappennine	18.5	100	0.25	40	23	$1 \cdot 10^{-10}$
Flysch di Faeto	20.0	100	0.25	40	25	$3 \cdot 10^{-10}$
Argille Toppo Capuana	18.8	70	0.25	13	20	$6 \cdot 10^{-8}$
Banda di taglio	18.8	70	0.25	5	18.7	$6 \cdot 10^{-8}$

Molteplici processi di scivolamento del tipo M2 appaiono attivi anche su versanti in argille meno resistenti di quelle di Toppo Capuana, come quelle del Flysch Rosso presenti nella parte bassa del promontorio di Santa Croce di Magliano (Cotecchia et al. 2007, SCM-Figura 1). Queste sono ivi sovrastate da strati bentonitici e, alla testa, dal Flysch di Faeto, che qui è a forte componente calcareo-calcareonitico-marnosa (Figura 14). Le argille e le bentoniti del Flysch Rosso sono caratterizzate da una fessurazione molto intensa di origine tettonica (Vitone et al. 2009), per cui sono di bassissima resistenza ( $c' \approx 15$  kPa,  $\phi' \approx 13^\circ$ ) e costituiscono un fattore fortemente predisponente l'instabilità dei pendii. Altro fattore predisponente è la filtrazione, che ha superficie di falda poco sotto il piano campagna, come testimoniato dalle numerose sorgenti presenti nella parte alta del pendio. Come mostrato in Figura 14 per i pendii a Sud del promontorio, i corpi di frana sono stretti ed allungati, quindi di morfologia in affioramento che potrebbe apparire simile sia a quella del meccanismo M2 che M3. Le letture inclinometriche (Figura 15) rilevate nel corpo di frana mostrato in Figura 14 mettono in evidenza una banda di taglio a circa 22 m di profondità e quindi dimostrano che si tratta di un meccanismo di scivolamento mediamente profondo. Dunque, anche in pendii in argille scagliose meno acclivi (pendenza media  $7^\circ$ ) di quelli nelle argille di Toppo Capuana, si rilevano meccanismi con netta localizzazione della deformazione di taglio in una banda, per cui questi processi, spesso definiti colate, appaiono evolvere secondo un meccanismo di scivolamento, favorito dalle basse resistenze dei materiali e dal regime di filtrazione.

### 3.3 Meccanismo M3

La frana nel pendio Vadoncello è un caso esemplificativo del meccanismo M3 (Figura 2), che genera grandi deformazioni all'interno del corpo di frana. In Figura 16 è mostrata una fotografia delle porzioni centrale e di accumulo della frana. L'area di alimentazione è sede di scorrimenti rotazionali da superficiali a mediamente profondi.

icato

frana

k

ES

$\times 10^{10}$

$\times 10^{10}$

$\times 10^8$

$\times 10^5$

po M2

no re-

lle del

omon-

et al.

tate da

Facto,

entico-

niti del

razione

et al.

( $c' \geq 15$

temente

fattore

ficie di

testimo-

parte al-

er i pen-

no stret-

ramento

mecca-

nie (Fig-

n Figura

o a circa

si tratta

ente pro-

scagliose

nelle ar-

anismi con

taglio in

o definiti

ecanismi

tenze dei

esemplifi-

che genera

li frana. In

e porzioni

di alimen-

la superfi-

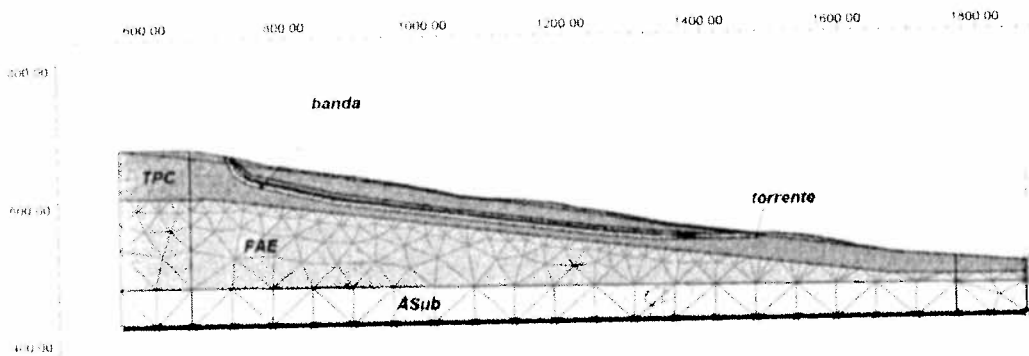


Figura 12. Frana di Volturino. Griglia di discretizzazione adottata nel calcolo.

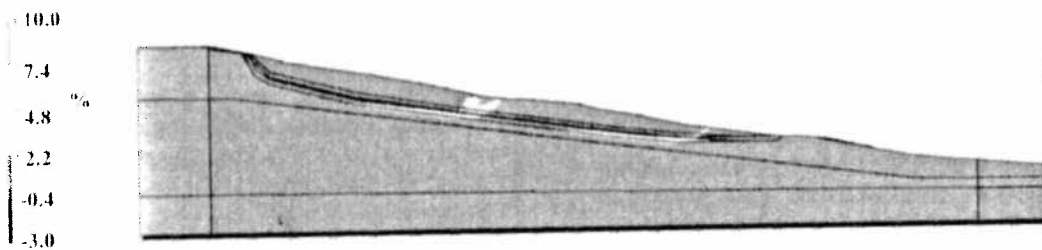


Figura 13. Frana di Volturino. Isolinee delle deformazioni di taglio conseguenti all'instaurarsi del regime invernale (condizione raggiunta prima del collasso).

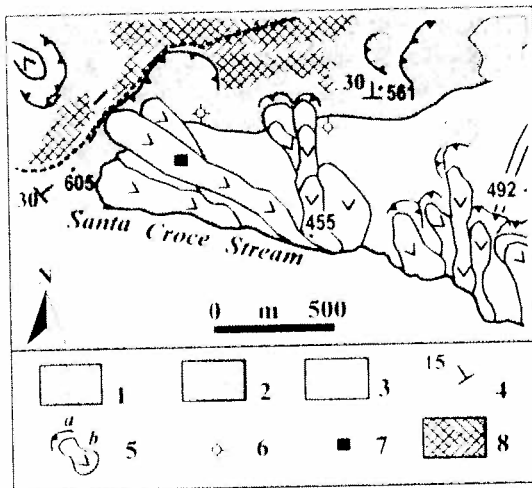


Figura 14. Carta geologica e geomorfologica dell'area in frana a Sud dell'abitato di Santa Croce di Magliano (da Melidoro et al. 2002, modificato). 1) depositi eluviali e colluviali, 2) Flysch di Facto, 3) Flysch Rosso, 4) giacitura di strato, 5) frana (a: macchia; b: corpo), 6) sorgenti, 7) verticale inclinometrica, 8) area urbana.

Il pendio è collocato nell'alta Valle del Sele (SE - Figura 1), ed è sede della formazione delle Argille Varicolori (Complesso Sicilide), una successione di argille scagliose, calcari marnosi e marne, che si in-

tereanano caoticamente. Esso è parte di un versante confinato a monte dal massiccio calcareo carsificato dei Monti Picentini, sede di un importante acquifero che alimenta la falda nei pendii a valle.

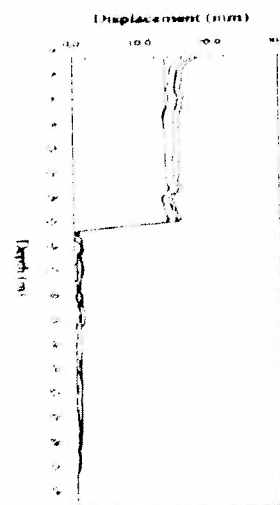


Figura 15. Deformata inclinometrica del sondaggio A (ubicazione Fig. 14) dopo 1, 7, 8 e 9 mesi dalla lettura di zero.



Figura 16. Canale e area di accumulo della frana Vadoncello nell'estate 1994 (da Santaloia et al., 2001).

In Figura 17 è mostrata la carta geomorfologica della porzione di versante sede del pendio ed in Figura 18 è mostrata la sezione longitudinale del pendio (pendenza media 8.5°). Al piede del pendio è presente il corpo di frana Serra dell'Acquara, uno scivolamento profondo circa 30 m (V. Cotecchia et al. 1986), mobilizzato durante il terremoto che ebbe epicentro nella valle nel 1980 (M=6.9). La parte inferiore del pendio Vadoncello fu allora sede di una frana sussidiaria, seguita, negli anni successivi, da lente retrogressioni, sino al Dicembre 1993, allorché si sviluppò lo scivolamento rotazionale nella parte alta del pendio ed il movimento di massa *tipo colata* a valle (Figura 17).

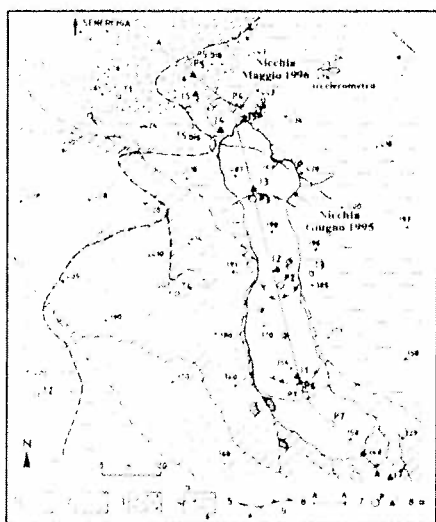


Figura 17. Carta geomorfologica del versante Vadoncello: 1) frana Vadoncello del 1993-95; 2) frana di Serra dell'Acquara; 3) placca detritica, 4) Formazione delle Argille Variegata (b) e detrito calcareo; 5) nischia di frana del 1980 (a) e piedi interni al corpo di frana (b); 6) traccia della sezione di Figura 18; 7), piezometri (P) e inclinometri (I); 8) pilastri per misure topografiche (da Santaloia et al. 2001).

Santaloia et al. (2001) discutono l'interpretazione del meccanismo di frana sulla base di dati geognostici e di monitoraggio (Figura 17) rilevati negli anni successivi. La Figura 18 mostra le variazioni del profilo del pendio dal 1980 al 1995 ed una ricostruzione del suo assetto geologico, secondo cui sono in esso collocati complessi (A-I) costituiti da successioni lito-stratigrafiche ricorrenti.

In particolare, il complesso G è stato riconosciuto come detrito della frana del 1993 ed è profondo circa 10 m, il complesso H come detrito della frana sussidiaria del 1980 ed il complesso I come parte del corpo di frana Serra dell'Acquara. Quest'ultimo soggiace alla zona di accumulo della frana Vadoncello. Lo stato di disturbo del terreno nel pendio, massimo nei primi 5-6 m del corpo G, permane a maggiore profondità; infatti, la consistenza delle argille non aumenta con la profondità, come frequentemente osservato nelle sequenze argillose tettonizzate.

La Figura 19 riporta una mappa dell'attività dei movimenti in una fase di velocità elevata degli spostamenti su tutto il pendio, dall'area di retrogressione (area A) sino all'area di accumulo (area C), e mostra che gli spostamenti nell'area di accumulo hanno la direzione della frana Serra dell'Acquara, anch'essa in movimento molto lento. Al contempo, al piede ed a monte del pendio venivano monitorati spostamenti profondi dagli inclinometri 11 e 14 (Figura 17 e 18), che davano indicazione di un meccanismo attivo in profondità, connesso anche alla lenta attività del corpo di frana Serra dell'Acquara (complesso I). Il meccanismo superficiale *tipo colata* è stato dunque interpretato come parte di un meccanismo più profondo e complesso, definito come *lenta deformazione plastica di lungo termine* da Santaloia et al (2001), probabilmente influenzato dal movimento al contorno di valle.

Fattori interni fortemente predisponenti l'instabilità del pendio Vadoncello sono da ritenersi sia le proprietà meccaniche delle argille scagliose che compongono larga parte del pendio, che l'assetto piezometrico. Santaloia et al. (2001) riconoscono l'esistenza, nel corpo di frana G, di un sistema di filtrazione con superficie di falda poco sotto il piano campagna e che risente dell'infiltrazione della pioggia, come dimostrato dal rilievo di variazioni di pressione interstiziale di circa 15 kPa a seguito di eventi pluviometrici (Figura 20).

Nei terreni in profondità è invece rilevata la presenza di un sistema di filtrazione (Figura 20) che non risente in maniera diretta dell'infiltrazione durante gli eventi pluviometrici. I movimenti, sia superficiali che profondi, non sono comunque apparsi relazionati né ai singoli eventi pluviometrici, né ad escursioni stagionali del regime piezometrico (tempi di ritorno delle cumulate di pioggia da 1 a 180 giorni precedenti l'evento del 1983 tutte inferiori a 3 anni).

Fig. 16.

Figura area 8) ve 10) c

C un'a porti teen ta le terre plast terio no a nell' senz spost stame le ip conce

pretazione  
ti geogno-  
i negli anni  
azioni del  
a ricostrui-  
cui sono in  
da succes-  
iconosciuto  
fondo circa  
frana sussis-  
rte del cor-  
ultimo sog-  
Vadoncello.  
io, massimo  
a maggiore  
argille non  
temente os-  
ate.

L'attività dei  
ta degli spo-  
retrogressio-  
ea C), e mo-  
mulo hanno  
nell'Acquara,  
Al contempo,  
no monitorati  
i 11 e 14 (Fi-  
di un mecca-  
che alla lenta  
equara (com-  
tipo colata è  
un meccani-  
o come lenta  
da Santalonia  
to dal movi-

predisponenti  
da ritenersi  
alle scagiose  
pendio, che  
(2001) rico-  
a G, di un si-  
alda poco sot-  
l'infiltrazione  
lievo di varia-  
15 kPa a se-  
0).  
nlevata la pre-  
gura 20) che  
filtrazione du-  
menti, sia su-  
unque apparsi  
metrici, ne ad  
metrico (tempi  
1 a 180 giorni  
nori a 3 anni)

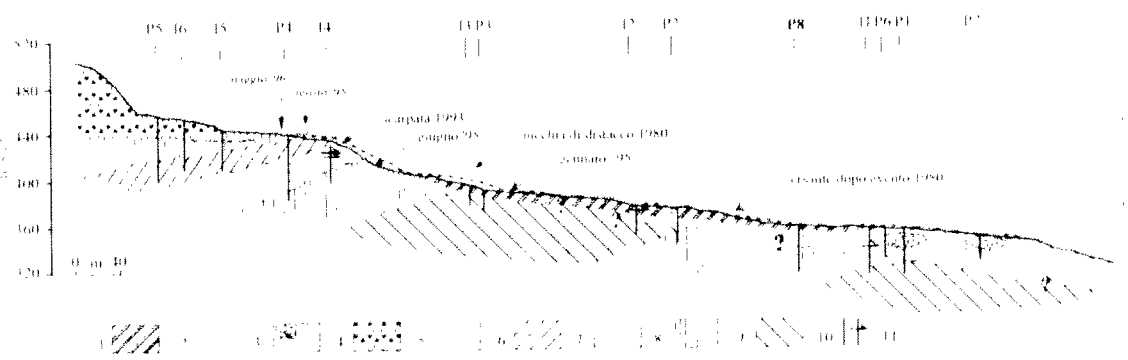


Figura 18. Sezione del versante Vadoncello. Complessi litologici 1) G, 2) H, 3) I con blocchi calcarei (a), 4) A, 5) B, 6) C, 7) D, 8) E, 9) F, 10) piezometri (P1-P8) ed inclinometri (I1-16) con le profondità di rottura, 11) casa (da Santalonia et al. 2001)

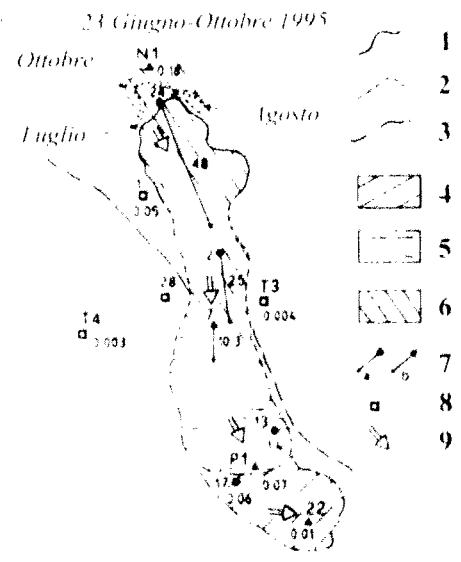


Figura 19. Velocità di spostamenti planimetrici (in mese): 1) area A, 2) area B, 3) area C, 4) 0.02-0.2; 5) 0.4-10; 6) 10-20; 8) velocità massime (a) e minime (b); 9) pilastri topografici; 10) direzioni di spostamento (da Santalonia et al., 2001)

Cotecchia et al. (2000) discutono i risultati di un'analisi alle differenze finite (FLAC 3.30) del comportamento del pendio Vadoncello. Il modello geotecnico adottato è mostrato in Figura 21 ed implementa le proprietà meccaniche dei materiali. Per tutti i terreni si è adottato un modello costitutivo elasto-plastico con frontiera di snervamento definita dal criterio di Mohr-Coulomb ed incrudimento negativo sino a residuo ( $\phi' = 5.5^\circ$ ). Il calcolo è stato fatto sia nell'ipotesi di pressioni interstiziali nulle, che in presenza di filtrazione, che in presenza di una velocità di spostamento del bordo di valle, atta a simulare lo spostamento del corpo Serra dell'Acquara. Per tutte e tre le ipotesi di calcolo, dalla modellazione è risultata la concentrazione degli spostamenti massimi in un'area

del pendio simile a quella coinvolta nel meccanismo superficiale veloce (area 1 in Figura 22), ossia confinata da una superficie pseudo-circolare alla testa del pendio e da una sub-parallela al piano campagna nella zona centrale. Quindi, detto meccanismo appare essere indipendente dalla filtrazione nel pendio, bensì generato dalla combinazione della geometria del pendio e delle proprietà meccaniche dei materiali. I risultati confermano l'esistenza di movimenti lenti alle maggiori profondità (aree 2 e 3 in Figura 22), che appaiono estendersi verso la zona di piede a seguito dell'inserimento nella modellazione del regime di filtrazione e dello spostamento del bordo di valle.

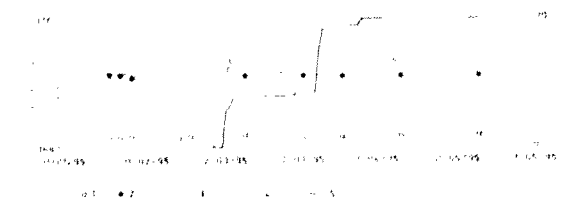


Figura 20. Frana di Vadoncello. Rilevamenti piezometrici lungo la verticale P2 (Figura 17) nelle celle di Casagrande a 15.5 m (1) e a 1.8 m (2) dal p.c., nelle celle elettriche a 15.3 m (3) e a 7.3 m (4) dal p.c. e 5) pioggia cumulata (da Santalonia et al. 2001)

La frana Toppo-Giacomo, presso Carlintino nella Daunia (DP, Figura 1), rappresenta un altro caso di movimento di massa complesso costituito da una frana tipo *flowslide* (M3, Frana Toppo; Figura 23) a valle e da uno scivolamento roto-traslativo profondo (Frana Giacomo) a monte, tra loro interagenti. La frana Toppo, profonda meno di 20 m (SC15 e SC19 in Figura 23), si estende dal centro abitato fino al Lago di Occhito, coinvolgendo le porzioni calcaree del Flysch di Faeto a monte e le argille della formazione delle Argille Varicolori e del Flysch di San Bartolomeo nella zona di canale. È una frana molto antica, che nel secolo scorso ha esibito diverse riattivazioni, causando danni ad alcuni edifici e a parte dei manufatti realizzati per la sua stabilizzazione.

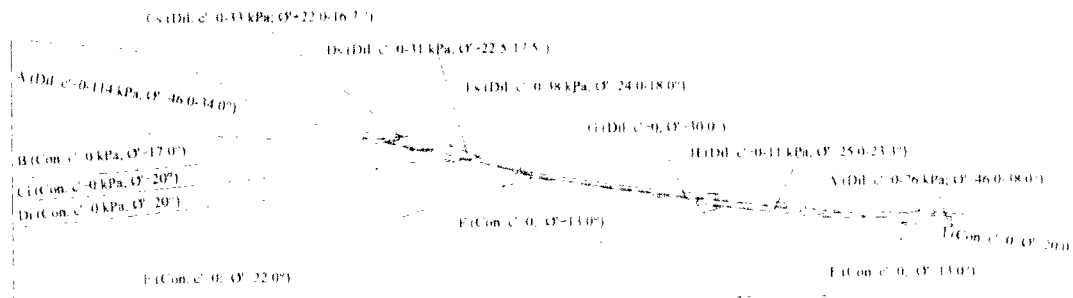


Figura 21. Modello geotecnico del pendio Vadoncello (Dil. dilatante, Con. contraente; da Cotecchia et al. 2000).

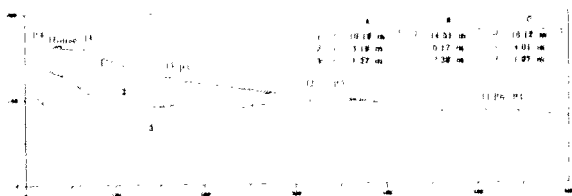


Figura 22. Pendio Vadoncello. Risultati delle analisi numeriche: aree (1, 2 e 3) di modulo di spostamento quasi uniforme (Caso A: Nessuna filtrazione e nessuna traslazione del piede; B: Filtrazione e nessuna traslazione del piede; C: Filtrazione e traslazione del piede; da Cotecchia et al., 2000).

Alla luce delle analisi fenomenologiche svolte, l'attività della frana Toppo sembra essere fortemente influenzata dall'attività della frana Giacomo, la cui superficie di scorrimento è intercettata dagli inclinometri SC18 e SC12 (Figura 23) ed appare incunearsi in una banda di taglio profonda nel versante. Questa osservazione suggerisce che, come per la frana Vadoncello, i movimenti poco profondi della frana Toppo sono parte di un meccanismo più profondo e complesso, la cui attività non appare comunque correlata alla ricarica stagionale della falda.

#### 4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I risultati degli studi discussi appaiono fornire elementi utili a caratterizzare l'influenza dei diversi fattori interni della franosità sul tipo di meccanismo che si sviluppa nel pendio (tra i tre indagati), sulla sua morfologia (es. profondità) e sulla dinamica di riattivazione (es. tempistica di riattivazione). In primo luogo, dato che in tutti i casi esaminati il regime piezometrico è fortemente penalizzante, tanto da essere stato valutato come predisponente l'instabilità, si può desumere che questo non ha contribuito alla diversificazione del meccanismo (scivolamento o *flowslide*) tra i diversi casi. Viceversa, si può ritenere che, per come verificatosi in entrambi i casi Vadoncello e Toppo, allo sviluppo del meccanismo M3 contribuiscano la caoticità delle sequenze litostratigrafiche e le condizioni al contorno. Queste ultime,

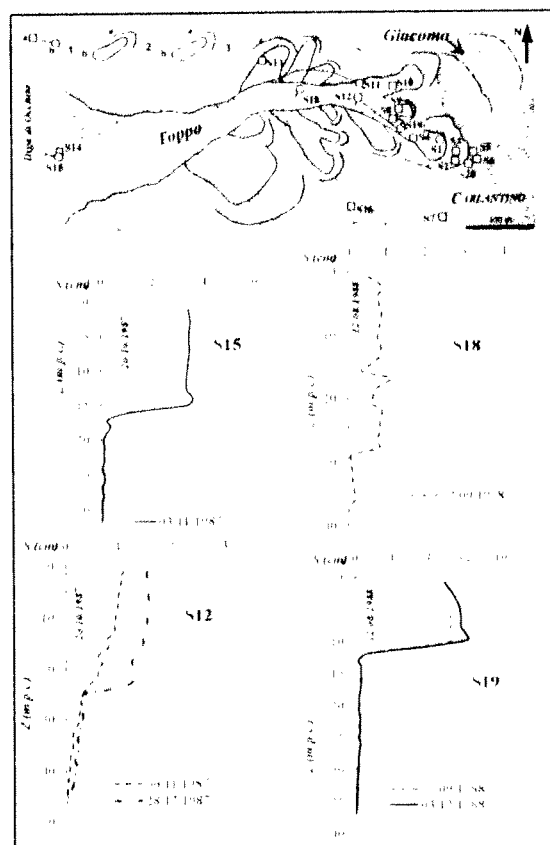


Figura 23. Frana Foppo-Giacomo: planimetria geomorfologica e deformate inclinometriche; 1) sondaggi geognostici attrezzati a piezometro (a) o ad inclinometro (b); andamento planimetrico delle direzioni di spostamento lungo le superfici di scorrimento; circa 2.5 cm per S15, 2) frana Foppo (a: nicchia, b: corpo), 3) frana Giacomo (a: nicchia, b: corpo).

infatti, hanno favorito, in entrambi i casi indagati, lo sviluppo di corpi a diverso stato e stile di attività. Tali osservazioni quindi suggeriscono, al fine di interpretare le cause delle *flowslides*, di considerare, come i corpi superficiali più attivi possano interagire con il resto del versante.

Il verificarsi di casi di tipo M1 e M2 in materiali argillosi di diversa plasticità e consistenza indica che

questi aspetti non condizionano significativamente la morfologia dello scivolamento, quanto probabilmente invece fanno altri fattori, quali, ad esempio la geometria e l'assetto litostratigrafico. Viceversa, si è riconosciuto come l'andamento della plasticità e della consistenza dei materiali con la profondità, come anche il regime di filtrazione (caso di Petacciato), possano favorire l'approfondimento dei corpi di frana.

Infine, si è verificato come, per entrambe le tipologie di scivolamento, M1 e M2, il regime di filtrazione può determinare la tempistica di riattivazione. In particolare, sono le variazioni nel regime piezometrico sul lungo termine, ossia a livello stagionale, e non quelle temporanee conseguenti ai singoli eventi pluviometrici, a generare le riattivazioni degli scivolamenti indagati.

## 5. RINGRAZIAMENTI

La ricerca sui siti dauni è stata finanziata dalla Regione Puglia (Progetto Strategico PST 119); si ringraziano le amministrazioni comunali di Carlantino, Bovino e Volturino per aver reso disponibili dati geognostici. Si ringraziano i Professori Gregorio Rosario Melidoro e Vincenzo Cotecchia per l'aver reso disponibili i dati di indagine per il caso del versante di Petacciato e preziosi spunti di confronto scientifico.

## BIBLIOGRAFIA

- Cascini, U., Sorbino, G., Cuomo, S. 2003. Modelling of flow-slides triggering in pyroclastic soils. *Proc. Int. Conference on Fast Slope Movements - Prediction and Prevention for Risk Mitigation*, Napoli, I, 93-100.
- Cotecchia, F., Santalora, F., Santoro F. 2000. Movements in a rectorized soil slope: comparison of monitoring data and modelling results. *In International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia, 19-24 November 2000*.
- Cotecchia, F., Vitone, C., Cafaro, F., Santalora, F. 2006. The mechanical behaviour of intensely fissured high plasticity clays from Daunia. *Proc. Second International Workshop on Characterisation and Engineering properties of natural Soils (NS2006), Invited Lecture - Singapore, 29 November-1 December 2006*, III, 1975-2003.
- Cotecchia, F., Santalora, F., Bottighieri, O., Monterisi, L. 2008. Landslides in stiff clay slopes along the Adriatic coast (Central Italy). *Proc. X International Symposium on Landslide, Viam, 30 June-4 July 2008*, 1525-1531.
- Cotecchia, F., Lollino, P., Santalora, F., Vitone, C., Mitratonna, G. 2009. A research project for deterministic landslide risk assessment in Southern Italy: methodological approach and preliminary results. *Proc. 2nd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk IS-GIFU, Gifu, Japan, 11-12 June 2009*.
- Cotecchia, V., Del Prete, M., Tafumi, N. 1986. Effects of earthquake of 23rd November 1980 on pre-existing landslides in the Senerchia area (Southern Italy). *Geologia Applicata e Idrogeologia* 21: 177-198.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. In Turner, A.K. & Schuster, L. (eds.), *Landslides. Investigation and mitigation*, 36-75. Transportation Research Board, Special Report 247, Washington D.C.
- ETAC 2D. 1995. *User's Manual*, Version 3.3, ETASCA Consulting Group, Inc., USA.
- GFOSUDIO 2004. *SEEP/W, User's manual*.
- Guerricchio, A., Melidoro, G. & Simeone, V. 1996. Le grandi frane di Petacciato sul versante costiero adriatico (Molise). *Memorie Società Geologica Italiana*, 51, 607-623.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engrg Geoscience*, 7: 221-238.
- Hutchinson, J.N. 2004. Review of flow-like mass movements in granular and fine-grained materials. *Proc. of the Int Workshop "Flows 2003 - Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfill" Sorrento*, 3-16.
- Melidoro, A., Melidoro, G. & Panaro, V. 2002. Deformazioni gravitative dei versanti nei terreni fiscioidi con argille a bentoniti di Santa Croce di Magliano (Molise). *Quarry & Construction*, 11-17.
- Picarelli, L., Olivares, L., Comegna, L., Damiano, E. 2008. Mechanical Aspects of Flow-Like Movements in Granular and Fine Grained Soils. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 41(1): 179-197.
- PI, AXIS 2D 2003. *Reference Manual*, Version 8.
- Santalora, F., Cotecchia, F., Polemio, M. 2001. Mechanics of a tectonized soil slope: influence of boundary conditions and rainfalls. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 34: 165-185.
- Savage, W.Z., Godt J.W., Baum R.L. 2004. Modeling time-dependent areal slope stability. *Proc. IX Int. Symp. Landslides, Rio de Janeiro*, I, 23-36.
- Serocca, D., Carminati, F. & Dogliani, C. 2005. Deep structure of the southern Apennines, Italy: Thin-skinned or thick-skinned? *Tectonics* 24: 1-20.
- Terzaghi, K. 1950. Mechanics of landslides. *Geological Society of America*, 83-123.
- Vitone, C., Cotecchia, F., Desrués, J., Viggiani, G. 2009. An approach to the interpretation of the mechanical behaviour of intensely fissured clays. *Soils & Foundations* (in print).