# LA FRANA MISTA DI PENNA S. ANDREA (TERAMO, ABRUZZO): CRITERI PRELIMINARI E METODOLOGIA DI CONTROLLO

# TALLINI M. & GIAMBERARDINO A.

Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno - Università dell'Aquila

PASCULLI A., SCIARRA N., CALISTA M.& MANGIFESTA M. Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Chieti

**RIASSUNTO:** Nell'ambito di un progetto finalizzato alla valutazione e mitigazione del rischio da frane complesse e rapide, è stata presa in esame, nell'Abruzzo teramano un'area caratterizzata da una frana mista situata presso Penna S. Andrea (Teramo). La frana è attiva e persistente nella stessa area da oltre un cinquantennio, ed, inoltre, la sua attività ha obbligato l'evacuazione di alcuni edifici abitativi e lo spostamento del tracciato della S.S. n. 81 Piceno-Aprutina, via di comunicazione a percorrenza medio-elevata.

La frana interessa le alternanze torbiditiche argillosoarenacee del Pliocene dell'Abruzzo periadriatico. È caratterizzata da fenomeni di crollo da una testata alta circa 40 metri che sta arretrando rapidamente, e da una colata nel fosso Pietro e Paolo sottostante. I suoli e il regolite, alla sommità della testata, sono decorticati e allontanati da frane superficiali rototraslazionali, che facilitano l'esposizione e l'attacco da parte degli agenti esogeni della roccia fresca. La colata, in basso, è, invece, ulteriormente alimentata da apporti laterali di frane minori di tipo roto-traslazionale

Gli obiettivi della ricerca, articolata con approccio multidisciplinare, sono stati quelli di definire la geometria e la cinematica dell'area in frana, di caratterizzare i terreni dal punto di vista geo-meccanico e geotecnico ed, infine, di controllare, con una rete opportunamente dimensionata, la cinematica e la geometria dei movimenti in atto. È stato possibile, inoltre, correlare con i dati dei parametri dell'input idrologico (piogge e andamento del livello freatico nel corpo di frana) con i dati di spostamento. Infine una modellazione numerica alle differenze finite ha permesso di caratterizzare lo stato tensionale e il cinematismo della colata del Fosso Pietro e Paolo.

Termini chiave: frane complesse, crolli, colate, torbiditi argilloso-arenacee, monitoraggio ambientale, Abruzzo.

# ABSTRACT The Penna S. Andrea complex landslide (Teramo, Abruzzi): Preliminary report

Within a project oriented to the evaluation and mitigation of risk from fast and complex landslides, an area was investigated near Penna S. Andrea (Teramo, Italy). In this area a complex landslide that involved about 1 million m3 is located. It is active in the same area since fifty years ago and it is located in an area with sandstone and clay unit (Pliocene turbidite formation) in the Abruzzo region, near the Adriatic sea. Besides its evolution imposed the evacuation of some home buildings and the shifting of the road "S.S. 81 Piceno-Aprutina" with medium traffic. The landslide is characterise by two main models of evolution: i) the crown area moves back rapidly because of rock-, debris-fall and rock-toppling; ii) the debris, fallen at the toe of the scarp, triggers continually a huge mud-flow that flows in the "Pietro e Paolo" gully. Soils and regolite, at the top of the crown, are eroded and moved away by surficial roto-translational landslides and soil creeping that help the exposition of the bedrock and the attach by the atmospheric agents. The flow below, in the gully, is instead further fed by lateral contributions from smaller roto-translational landslides.

The aims of the research, that has a multidisciplinary approach, were i) to define the geometries and the kinematics of the landslide, ii) to perform geotechnical and geomechanical soil and rock characterisation and, finally, iii) to control the landslide kinematics, with a monitoring network. It was also possible to correlate the input hydrological data (precipitations and water table level variations within the landslide) with the landslide kinematics data (inclinometric data). Moreover a numerical modelling was performed to characterize the mudflow.

Keywords: complex landslide, rockfall, mudflow, terrigenous turbidites, environmental monitoring, Abruzzi.

# INTRODUZIONE

Le frane complesse a rapida evoluzione ed estese arealmente pongono tutta una serie di problematiche connesse alla mitigazione o riduzione del fenomeno, soprattutto se questo insiste sull'ambiente o su infrastrutture antropiche. Una prima problematica riguarda la caratterizzazione dei meccanismi genetici e la ricostruzione dei cinematismi, tale da essere di aiuto per una successiva modellazione numerica. Inoltre, nella mitigazione di fenomeni franosi estesi, ma di rapido cinematismo, è auspicabile progettare una rete di monitoraggio che sia idonea a controllarne l'evoluzione spazio-temporale.

In Abruzzo dissesti di questo tipo sono assai ben rappresentati e sono stati oggetto di numerosi studi che hanno approfondito la loro ubicazione nel contesto morfodinamico e di evoluzione quaternaria (CENTAMORE ET ALII, 1996), la ricostruzione geometrica e cinematica locale (BOZZANO ET ALII, 1998; PAOLUCCI ET ALII, 2001), gli aspetti legati alla modellazione numerica (SCIARRA, 2000; SCIARRA & CALISTA, 2001).

Per quanto detto, nell'ambito di un progetto finalizzato alla valutazione e mitigazione del rischio da frane complesse e rapide, è stata presa in esame, nell'Abruzzo teramano un'area caratterizzata da una frana mista situata presso Penna S. Andrea. La frana è attiva e persistente nella stessa area da almeno un cinquantennio, ed, inoltre, la sua attività ha obbligato l'evacuazione di alcuni edifici abitativi e lo spostamento del tracciato della S.S. n. 81 Piceno-Aprutina, via di comunicazione a percorrenza medio-elevata.

Allo scopo è stata eseguita una ricerca preliminare sulla franosità storica dell'area finalizzata all'individuazione degli stadi evolutivi dell'area. Sono stati utilizzati dati di archivio, osservazioni sul posto effettuate negli anni novanta e foto aeree del volo IGM del 1945 e del 1985 confrontate con la Carta Tecnica Regionale a scala 1:5.000 degli anni novanta. La frana risulta attiva da oltre 50 anni. Lo stesso tracciato della S.S. 81 Loreto-Aprutina all'epoca percorreva l'area in frana, a mezza costa, e fu spostato a causa del progredire del movimento; nonostante questo, circa 20 anni fa l'A.N.A.S. ha dovuto realizzare una palificata a protezione di un tratto della strada sul versante sinistro del Fosso Pietro e Paolo, nell'area degli apporti laterali. Nell'ultimo quinquennio, la corona della frana è arrivata a poche decine di metri da un caseggiato (soggetto ad ordinanza di sgombero) e sta raggiungendo lo spartiacque principale ortogonale al Fosso Pietro e Paolo. Data la pericolosità del fenomeno la Provincia di Teramo ha recentemente commissionato uno studio al fine di proporre soluzioni per mitigare gli effetti del dissesto.

# METODOLOGIA DI STUDIO

Gli obiettivi della ricerca, articolata con approccio multidisciplinare, sono stati quelli di definire la geometria e la cinematica dell'area in frana, di caratterizzare i terreni dal punto di vista geo-meccanico e geotecnico ed, infine, di controllare, con una rete di monitoraggio opportunamente dimensionata, la cinematica e la geometria dei movimenti in atto. È stato possibile, inoltre, correlare i dati dei parametri dell'input idrologico (piogge e andamento del livello freatico nel corpo di frana) con i dati di spostamento.

La frana interessa le alternanze torbiditiche argillosoarenacee del Pliocene dell'Abruzzo teramano. È caratterizzata da fenomeni di crollo da una testata alta circa 40 metri che sta arretrando rapidamente, e da una colata nel fosso (denominato Pietro e Paolo) sottostante. I suoli e il regolite, alla sommità della testata, sono decorticati e allontanati da frane superficiali rototraslazionali e soil creeping, che facilitano l'esposizione e l'attacco da parte degli agenti esogeni della roccia fresca. La colata, in basso, è, invece, ulteriormente alimentata da apporti laterali di frane minori di tipo roto-traslazionale. In figura 1 viene riportato il quadro geomorfologico complessivo dell'area in frana: l'indagine geologicotecnica è consistita nell'analisi della fratturazione dell'ammasso roccioso della scarpata e nello studio della dinamica evolutiva della colata tramite modellazione numerica. In figura 2 è riportata la sezione D-D' presente in figura 1 con la caratterizzazione geologico-tecnica dei materiali riconosciuti in affioramento e nei sondaggi eseguiti nel corso della campagna geognostica. Tale sezione è quella utilizzata nelle successive modellazioni numeriche.



Fig. 1 – Schema geomorfologico della frana di Penna S. Andrea. 1- colata; 2- testata; 3- zona di apporti laterali; 4- corona; 5sondaggio con inclinometro; 6 sondaggio con piezometro; 7sezione. Geomorphological scheme of the Penna S. Andrea landslide. 1- mud-flow; 2- scarp area; 3- lateral landslide area; 4- crown; 5- well with inclinometer; 6- well with piezometer; 7section.

La programmazione delle attività è stata articolata in varie fasi finalizzate alla caratterizzazione del modello evolutivo, alla valutazione degli stati tensionali nel pendio e al riconoscimento della cinematica in atto. Le fasi hanno previsto: a) un rilevamento geologico tecnico e geomorfologico di dettaglio di tutta l'area in dissesto (scala 1:5.000) e della scarpata in particolare; b) l'esecuzione di cinque sondaggi geognostici a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati per analisi di laboratorio; c) la realizzazione di prove SPT; d) l'installazione di tubi inclinometrici nei due sondaggi a monte; e) l'installazione di piezometri di Casagrande nei tre sondaggi posizionati in colata; f) l'installazione di cinque capisaldi per monitoraggio con tecnologie GPS nell'intera area in frana (i cui risultati sono ancora in corso di elaborazione); g) l'installazione e funzionamento di un pluviometro, posizionato in testata.

Su tutti i campioni prelevati sono state eseguite prove di classificazione e quando possibile di caratterizzazione meccanica.



Fig. 2 – Profilo longitudinale della frana. 1) suolo, regolite; 2) corpo di frana e coltre alterata; 3) substrato litoide (arenarie e marne siltose) (Sciarra). *Landslide section. 1- soil, regolite; 2-landslide and weathering units; 3- bedrock (sandstone and silty marl).* 

#### IL CONTESTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Nell'area in frana, estesa circa 16 ha, affiorano torbiditi silicoclastiche di avanfossa del cosiddetto "Flysch di Teramo" (PATACCA ET ALII, 1991), depositatesi durante l'intervallo Pliocene inferiore -Messiniano "lago-mare"; si tratta di alternanze peliticoarenacee in strati sottili con intercalati a diverse altezze orizzonti arenacei (CENTAMORE ET ALII, 1992).

L'assetto strutturale delle litologie esercita un marcato controllo sulle caratteristiche del rilievo e sui fenomeni di dissesto. Quello principale si esplica con modalità diversificate lungo il Fosso Pietro e Paolo, la cui testata è caratterizzata da una scarpata subverticale costituita dalle alternanze pelitico-arenacee con strati subverticali o inclinati intorno ai 40° disposti a traverso poggio. La stratigrafia delle torbiditi della testata è caratterizzata da peliti con strati di qualche centimetro e con lamine piano parallele millimetriche ben marcate, cui si intercalano sia livelli diffusi di spessore centimetrico di arenarie scarsamente cementate, sia alcune bancate metriche di arenarie ben cementate (fig. 3). L'ammasso roccioso è condizionato, oltre che dalla stratificazione e dalle laminazioni sottili, anche dalla presenza di discontinuità tettoniche rappresentate da faglie di primo ordine con rigetti metrici, ben visibili in affioramento (figg. 3 e 4) e da famiglie di fratture pervasive che si intersecano disarticolando ulteriormente l'ammasso roccioso.

Gli elementi macrostrutturali che caratterizzano la scarpata sono una serie di sovrascorrimenti subverticali

orientati circa N20°-30°W che presentano geometrie tipo flat e angoli di cut-off di pochi gradi. Interessano una sequenza sedimentaria dritta, come evidenziato dalla giacitura delle controimpronte di fondo (fig. 4). Sul lato est della scarpata, sono individuabili due sovrascorrimenti disposti a traverso poggio e inclinati verso ovest con geometrie tipo rampa (angoli di cut-off pari a 60°) che presentano rigetti pari a diversi metri (fig. 4). La frequenza. l'analoga giacitura e le medesime caratteristiche strutturali dei sovrascorrimenti fa ritenere che l'area si trovi nei pressi di una zona di taglio inversa di relativa importanza come attestato da dati strutturali regionali (CENTAMORE ET ALII, 1992, VEZZANI & GHISETTI, 1998). La zona di taglio inversa sembra essersi enucleata in tempi precoci e quindi ha subito in seguito un basculamento insieme alla stratificazione in un contesto di deformazione graduale e continua. La roccia, localizzata lungo gli elementi tettonici è costituita da cataclasiti foliate e da micro-fault breccia o fault breccia sensu SIBSON (1977). Le prime si rinvengono soprattutto in corrispondenza delle peliti, le brecce tettoniche caratterizzano le arenarie. Si determina quindi una minuta destrutturazione della roccia che facilità l'innesco di locali, ma diffusi, debris fall.

La sequenza stratigrafica più bassa, posta ad est del fosso principale è costituita da fitte alternanze deca- e centimetriche di marne siltose e arenarie debolmente cementate (rapporto pelite/arenite pari a 2 circa), a cui si intercalano bancate di arenarie cementate di spessore metrico (settore est di fig. 3).

La sequenza a ovest del fosso principale è caratterizzata quasi esclusivamente dalle peliti con intercalate spesse bancate di arenarie.

Le discontinuità mesostrutturali, che influenzano lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso, in effetti, differiscono in relazione alle differenti litologie presenti nei due settori sopra definiti.



Fig. 3 – Panoramica della scarpata del Fosso Pietro e Paolo alla cui base si innesca la colata. La scarpata è alta circa 40 m. Landscape of the landslide scarp (height of about 40 m) and geologial section (bottom). At its bottom starts the mud-flow (Fosso Pietro e Paolo).



Fig. 4 – Stato dell'ammasso roccioso della testata: serie di sovrascorrimenti (sov); stx: stratificazione cf: controimpronte di fondo; J1 set di fratture suborizzontali (settore est della scarpata - fig. 3). Rock-mass condition of the scarp: overthrusts (sov); stx: bedding; cf: flute-cast; J1: set of subhorizontal joints (eastern sector of the scarp – fig. 3).



Fig. 5 – Stato dell'ammasso roccioso della testata: sistemi di fratture J1 e J2 e stratificazione (stx) (settore est della scarpata - fig. 3). Rock-mass condition of the scarp: sets of joint J1, J2 and bedding (stx) (eastern sector of the scarp – fig. 3).

Nel settore est si individuano, soprattutto nelle arenarie, tre tipi di discontinuità principali fortemente pervasive (fig. 5): la stratificazione e le laminazioni (stx di figg. 5 e 6) che presentano una spaziatura da decimetrica, per le prime, a millimetrica per le seconde e due set di fratture. Il sistema J1 (figg. 5 e 6) è caratterizzato da fratture suborizzontali con spaziatura da millimetrica a centimetrica; il secondo sistema J2 (figg. 5 e 6) è costituito invece da fratture, in molti casi beanti, subverticali e subparallele alla scarpata principale con spaziatura fra le fratture di circa 10 cm.

La genesi dei due sistemi di fratture, probabilmente costituenti un sistema coniugato, sembra essere

riconducibile ad un regime compressivo di tipo andersoniano (TWISS & MOORES, 1992), in concomitanza con l'enucleazione dei sovrascorrimenti. In seguito, con il progredire della deformazione, l'insieme fratture, stratificazioni e sovrascorrimenti sarebbe stato basculato su un asse orientato N20°W con una rotazione di circa 90° da est verso ovest (fig. 7).



Fig. 6 – a) Poliedro elementare definito dai due sistemi di fratture J1 e J2 e dalla stratificazione (stx) e dalla laminazione piano-parallela (la). b) reticolo di Schmidt (emisfero inferiore) degli elementi strutturali dello schema in b) e di fig. 5. a) Elementary polyedron defined by the two sets of joints J1, J2, the bedding and the plano-parallel lamination (stx); b) mesostructural elements of the scheme reported in b) and in fig. 5, Schmidt projection (lower emisphere).

I due set di fratture caratterizzano tutta la scarpata, soprattutto nel settore est, ma si nota, per il sistema J1, al passaggio dalle peliti (materiali meno competenti) alle arenarie, una notevole riduzione della spaziatura, in accordo con quanto noto circa i fenomeni di rifrazione dei joint (fig. 8) al passaggio fra mezzi meccanicamente diversi (HANCOCK, 1985).

Le modalità della fratturazione delle marne siltose (settore est - fig. 3) differisce rispetto alle alternanze di peliti e arenarie del settore ovest, dove le discontinuità individuano i poliedri prima descritti.

La fratturazione delle marne siltose è condizionata da laminazioni piano parallele, da sottili orizzonti sabbiosi, da locali fratture e faglie planari o curve, e soprattutto da fratture di contrazione, curve, ad andamento anatomizzante, estese qualche centimetro che presentano una geometria frattale (fig. 9). Quindi si realizzano poliedri irregolari a facce curve delimitati da queste fessure di contrazione.

Le laminazioni e le fratture, principalmente, e la stratificazione e le faglie, in secondo luogo, caratterizzate da una maggiore spaziatura, determinano, in definitiva, il comportamento tipo "soft rock" (HOEK, 2000) dell'ammasso roccioso; si realizzano poliedri di dimensioni di qualche centimetro che si accumulano alla base della scarpata secondo modalità di distacco di singoli frammenti o con l'innesco di debris fall. Inoltre si distaccano anche blocchi di qualche metro cubo soprattutto provenienti dalla bancate arenacee con meccanismi di rock-fall, -slide e -toppling.

# I DISSESTI PER COLATA

Il meccanismo di asportazione di materiale dalla scarpata, con conseguente suo arretramento, è continuo e prosegue con le medesime modalità in quanto lo stato di fratturazione, condizionato dall'assetto tettonico, caratterizza pervasivamente l'intero versante spingendosi anche all'interno dello stesso. Inoltre, il fenomeno di destrutturazione ed allontanamento del materiale è favorito dalla decorticazione al di sopra della testata, tramite frane roto-traslazionali molto superficiali e soil creeping che interessano il suolo e il regolite.

Questi dissesti facilitano, tra l'altro, l'esposizione e l'attacco da parte degli agenti esogeni della roccia fresca. Questo primo meccanismo d'evoluzione del versante, per crolli e ribaltamenti, va ad alimentare, con continuità, alla base della scarpata, la colata principale di materiale argilloso che scorre all'interno del fosso Pietro e Paolo (fig. 10). Ciò è dovuto al fatto che le litologie si comportano come ammasso roccioso tipo soft rock in scarpata, mentre i poliedri che si accumulano alla base rammolliscono e si plasticizzano quando si saturano e costituiscono il materiale argilloso della colata di fango, che comunque è alimentata anche da apporti laterali da frane in genere roto-traslazionali ubicate nei versanti limitrofi (fig. 11).



Fig. 7 – Giacitura pre- e post-basculamento (situazione attuale) delle discontinuità di figg. 3 e 5, reticolo di Schmidt (emisfero inferiore). *Pre- and post- tilting accomodation of the mesostructural elements reported in fig. 3 and 5, Schmidt projection (lower emisphere).* 

Il risultato concomitante crollo-colata crea in sostanza un arretramento progressivo della testata del fosso che attualmente ha raggiunto quasi lo spartiacque principale del crinale Penna S. Andrea – Cermignano, trasversale al fosso. In sintesi i meccanismi di dissesto principali sono rappresentati dai crolli degli strati arenacei e pelitici presenti in testata. Quindi si realizza la conseguente attivazione della colata di fango alimentata con continuità dai crolli in testata e dagli apporti laterali provenienti dai versanti limitrofi.



Fig. 8 – Stato dell'ammasso roccioso della testata: rifrazione della fratturazione al passaggio dalle peliti e arenarie (a+p) alle arenarie (a). J1: sistema di fratture come in fig. 5; stx: stratificazione) (settore est della scarpata - fig. 3). Rock-mass condition of the scarp: refraction of jointing passing from pelite and sandstone (a+p) to sanstone (a). J1: set joint as in fig. 5; stx: bedding (eastern sector of the scarp – fig. 3).

#### LA CAMPAGNA D'INDAGINE GEOGNOSTICA

I movimenti presenti nel Fosso Pietro e Paolo coinvolgono sia caseggiati, alcuni dei quali sono stati già evacuati nei primi anni novanta, sia infrastrutture (S.S. 81 - Piceno-Aprutina). Al fine di comprendere i cinematismi in atto e i tempi di attivazione, è stata approntata una campagna d'indagine supportata da un programma di monitoraggio multidisciplinare. La campagna geognostica è stata eseguita nel mese di settembre 2001. Sono stati eseguiti cinque fori di sondaggio a carotaggio continuo, uno sulla testata della frana (sondaggio S1), uno nella parte sommitale del versante est del fosso (sondaggio S2, in prossimità della S.S. n. 81), entrambi hanno raggiunto una profondità di 35 m, e tre fori di sondaggio lungo l'asse della colata (sondaggi S3, S4, S5), spinti a profondità tali da superare il corpo in frana (fig. 1). Durante le perforazioni sono stati prelevati numerosi campioni (indisturbati e non) con carotiere "Shelby" nella parte superficiale del terreno, mentre in profondità è stato necessario l'utilizzo del carotiere "Mazier" (in un caso è stato usato il carotiere "Triplo").



Fig. 9 – Stato dell'ammasso roccioso della testata: stato di fratturazione nelle marne siltose. fa: faglia; fc: fessure di contrazione a geometria frattale (settore ovest della scarpata - fig. 3). Rock-mass condition of the scarp:jointing of silty marl; fa- fault; fc: contraction joint with fractal geometry (western sector of the scarp – fig. 3).



Fig. 10 – Colata del Fosso Pietro e Paolo dalla sommità della testata. *View of Fosso Pietro e Paolo mud-flow from the top of the crown.* 

Le colonne stratigrafiche evinte dai sondaggi hanno evidenziato le litologie successivamente descritte.

#### Zona di testata

Sondaggio S1. Si è rinvenuto uno strato di 0.7 m di suolo e regolite, a seguire uno strato di 2.1 m di limo argilloso

sabbioso più o meno consistente in cui si trovano frammenti di arenaria, successivamente un banco di 4.3 m di limo argilloso debolmente sabbioso consistente ed infine si è raggiunto il substrato costituito da argilla siltosa marnosa.

Sondaggio S2. La stratigrafia è simile a S1, con 0.6 m di suolo e regolite; 4.4 m di limo argilloso sabbioso; 5.1 m di limo argilloso debolmente sabbioso e a seguire il substrato.

# Zona di colata

Sondaggio S3. È stato eseguito immediatamente sotto la scarpata e ha evidenziato l'esistenza di uno strato di 6 m di limo argilloso debolmente sabbioso di colore da avana a grigio chiaro, molto alterato con segni di ossidazione, corrispondente al corpo di frana. A seguire si è rinvenuto uno strato di 1.7 m di limo argilloso consistente che viene interpretato come alterazione del substrato geologico sottostante che si rinviene a 7.7 m dal p.c.

Sondaggio S4. È stato eseguito nella zona mediana della colata è ha evidenziato uno strato di 4.7 m di limo argilloso debolmente sabbioso, di colore prevalentemente grigio, corrispondente al corpo di frana. Anche in tale sondaggio si rinviene uno strato di 1.6 m di limo argilloso molto consistente, alterazione della sottostante formazione di argilla siltosa marnosa che si rinvien a 6,3 m

Sondaggio S5. È stato effettuato nella zona distale della colata, la zona d'accumulo. Ciò è evidente dalla contropendenza e da una scarpata di 30 m corrispondente al fronte della colata più recente. dal p.c. I dati del log stratigrafico concordano con quanto osservato. Si rinviene dapprima uno strato di 1.2 m di limo argilloso sabbioso avana-grigiastro di suolo, sedimenti di suolo e regolite, dopo uno strato di 16.3 m di limo argilloso debolmente sabbioso di colore prevalentemente grigiastro che corrisponde al corpo di frana. Il substrato è stato rinvenuto a 18 m dal p.c.



Fig 11 – Rock-slide (apporti laterali al fosso principale) (settore ovest della scarpata - fig. 3). Rock-slide (lateral contribution to the mud-flow - western sector of the scarp - fig. 3).

#### CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE DEI TERRENI

La caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni è riferita alle sole porzioni pelitiche campionabili in modo indisturbato o quasi. Le peliti sono classificabili, nel diagramma di Casagrande, come "argille inorganiche di media plasticità". I valori ottenuti sono visibili in tab. 1. Granulometricamente le peliti risultano omogenee in tutta la sequenza con frazione limosa preponderante sulla frazione argillosa. La componente sabbiosa è scarsa. È presente un elevato contenuto di carbonato di calcio con punte del 41 %. L'alto valore di CaCO3 nelle peliti, definite anche come "argille marnose", ha un ruolo notevole nella loro cementazione e quindi nelle conseguenti caratteristiche meccaniche. Dal punto di vista meccanico (tab. 2) i campioni analizzati mostrano caratteristiche non propriamente omogenee con coesione variabile tra 0 e 60 kPa ed angoli d'attrito tra 20 e 30°. Oltremodo variabili i parametri responsabili della compressibilità con valori molto scadenti riscontrati nel campione 5/3 prelevato nella zona di colata al di sotto della stessa (si osservino i dati del modulo edometrico).

#### CAMPAGNA DI CONTROLLO

Il programma di monitoraggio ambientale è stato messo in atto al fine di verificare la stretta correlazione fra precipitazioni e crolli in testata e fra precipitazioni, oscillazioni della falda all'interno della colata e movimento della stessa. Per accertare tali correlazioni è stata avviata una campagna che ha previsto l'installazione di un pluviografo, di tre piezometri nei sondaggi in colata (S3, S4, S5) al fine di valutare le oscillazioni della falda e di due tubi inclinometrici nei due sondaggi in testata (S1, S2). È stato inoltre approntato un monitoraggio tramite GPS, con la realizzazione di opportuni capisaldi in cemento posizionati sia in testata (n. 3 capisaldi, di cui due posizionati in prossimità dei sondaggi S3, S4, S5).

#### Misure pluviometriche

Il pluviografo a movimento meccanico è stato installato in prossimità della parte sommitale della frana, in adiacenza alla S.S. n. 81. Nel primo periodo di osservazione, dal 25/09/2001 al 04/03/2002, non si sono riscontrate precipitazioni di rilievo. D'altra parte le misure inclinometriche hanno messo in evidenza, nello stesso periodo, movimenti consistenti, che quindi sembrano essere indipendenti in prima approssimazione alle precipitazioni. Attualmente lo strumento è ancora in funzione.

#### Misure freatimetriche

Le misure freatimetriche, che hanno riguardato il controllo del livello piezometrico in colata, sono state effettuate con piezometri Casagrande installati nei sondaggi S3, S4 e S5.

Sond.	Campioni	Profondità	WL	IP	CaCO <sub>2</sub>	
		(m)	(%)	(%)		
1	1A	2.1-2.3	46	27		
	1/1(*)	4.0-4.6	35	19		
	1B	5.0-5.2	32	18	30	
	1C	7.0-7.2	48	28	24	
	1D	9.8-10.0	46	27		
	1/2 (*)	23.0-23.35	44	19		
	1E	30.0-30.2	41	28	29	
2	2A	3.00-3.20	37	19	28	
	2/1 (*)	4.0-4.45	53	27		
	2B	7.0-7.2	49	27		
	2C	11.5-11.7	47	24		
	2/2 (*)	12.3-12.55	41	19		
	2D	27.0-27.2	53	31	26	
3	3-A	4.0-4.2	44	24	26	
	3-В	6.5-6.7	44	23	41	
	3-C	8.7-9.0	42	20		
4	4-A	3.0-3.3	42	20	27	
	4-B	5.5-5.7	46	23		
	4-C	7.0-7.2	44	21	24	
	4-D	11.7-12.0	44	21	26	
5	5-A	5.0-5.3	47	24	25	
	5-B	18.5-18.7	46	22	25	

Tab. 1 – Caratteristiche di plasticità e di contenuto di carbonati in alcuni dei campioni prelevati. Atterberg limits and  $CaCO_3$  content in some samples.

(\*) campioni indisturbati

Tab. 2 – Valori medi di alcuni parametri meccanici ricavati da prove di laboratorio. *Mechanical parameters from laboratory tests.* 

Sond.	Camp.	Prof.	c'	φ	φ'	Cu	Eed
		(m)	(kPa)	(°)	(°)	(kPa)	(MPa)
1	1	4.0-4.6	25	24			20
2	1	4.0-4.45	60	25			
2	4	34.2-34.7					54
4	1	4.2-4.6				51	
4	2	7.5-7.85				1700	
5	1	2.5-3.0	0	30	22		
5	2	8.5-9.0				300	
5	3	17.3-17.8	27	20	19	213	7

c' = coesione;  $\varphi$  =angolo d'attrito di picco; $\varphi$ ' = angolo d'attrito residuo; Cu =coesione non denata; Eed= modulo edometrico a 400 kPa di pressione verticale efficace.

I piezometri sono stati posizionati ad 11.5 m dal p.c. in S3 ed S4, mentre a 17.5 m dal p.c. in S5. Le misure sono state ripetute a cadenza quindicinale e sono state riportate in figura 12. Dai primi dati si evince che il livello della falda è pressoché costante, indipendentemente dalle precipitazioni, che comunque nel periodo esaminato sono state scarse. Non si esclude per il sondaggio S3 (sondaggio alla base della scarpata) una rottura del piezometro causata dalla ripresa di movimento della colata. Ad eccezione del piezometro S3 che ha subito un forte abbassamento e poi si è mantenuto costante, gli altri non sembrano aver subito variazioni apprezzabili. Va notato che nel piezometro S5 il livello registrato è praticamente coincidente con il piano campagna.

#### Misure inclinometriche

Le misure, eseguite su quattro guide, sono state effettuate con Sonda OTR SN/104. Alla data del 04/02/2002, il tubo inclinometrico installato nel foro S2, prospiciente la S.S. n. 81, è risultato essersi tranciato alla profondità di 4 m dal p.c., mentre il tubo installato nel sondaggio S1 tuttore funzionante presenta segni di movimento alla profondità di (fig. 13).

# Misure GPS

Il monitoraggio con rete GPS ha permesso di monitorare il cinematismo della frana. I vertici GPS sono stati posizionati nella zona in frana, sia in colata, in prossimità dei sondaggi S3, S4, S5, al fine di poter valutare l'entità del movimento, sia in testata, in prossimità dei sondaggi S1, S2.

La materializzazione dei capisaldi è stata effettuata utilizzando i piastrini "Gubellini" (a centramento forzato). La monumentazione dei vertici da monitorare è stata realizzata, con strutture fisse in cemento, diversamente per i capisaldi in colata rispetto ai punti in testata, cambiando la forma del manufatto. I vertici in testata sono costituiti da un plinto di base di dimensioni 50x50x50 cm, alla cui sommità è stato realizzato un pilastrino di dimensioni 30x30x50 cm; in colata i capisaldi sono costituiti da colonnine in calcestruzzo armato a sezione circolare con diametro di circa 160 mm, interrate di almeno 1.5 m dal p.c..

Grazie a questa soluzione la colonnina è libera di seguire il movimento (visco-plastico) del terreno che lo ospita, rimanendovi ben ancorata. Sulla sommità della colonnina è inserito il centramento forzato. In questa prima fase di monitoraggio ci si è limitati a eseguire la lettura dello zero.



Fig. 12 - Diagrammi piezometrici. Piezometric diagrams.



Fig. 13 – Diagramma inclinometrico sondaggio S1. Inclinometric diagrams referred to S1 borehole.

# MODELLAZIONE

La modellazione della sezione D-D' (fig. 14) implica l'analisi del comportamento di due differenti litotipi, distinti come materiali di colata (argille limose dal comportamento duttile) e materiali di testata (formazioni marnoso-arenacee dal comportamento fragile). È stato utilizzato il codice di calcolo FLAC-2D (2000) che utilizza un metodo di soluzione numerica alle differenze finite. È chiaro che la meccanica evolutiva delle due formazioni è indipendente; infatti, i crolli in testata e lo scivolamento della colata non possono essere rappresentati contemporaneamente in quanto appartenenti a due differenti evoluzioni temporali. Un elemento che può accomunare i due meccanismi è la variazione topografica generale. Inoltre, è stata effettuata una stima del volume mobilizzato per l'intervallo 1955 e 2000 (fig.15).

Il volume medio annuo mobilizzato risulta essere di circa 2800 m<sup>3</sup>/anno. Considerando che l'altezza della scarpata è di circa 40 m. Si può stimare un arretramento della corona di frana dell'ordine di 1 m/anno. In questa fase si propongono i risultati ottenuti per la colata.

I risultati dell'analisi numerica confermano la differente dinamica evolutiva dei terreni lungo la prescelta sezione. Dalla fig. 16 si evince l'andamento dei vettori di spostamento che risultano elevati proprio sul limite di innesco della colata.



Fig. 14 – Sezione D-D' analizzata per la modellazione. *D-D'* section used for the modelling.



Fig. 15 - Evoluzione morfologica della frana con calcolo dei volumi in difetto ed in eccesso lungo il profilo tra il 1955 ed il 2002. *Morphological evolution of the slope with the volumes in excess and in deficit along the profile between 1955 and 2002.* 

I terreni di testata ed il substrato risultano praticamente immobili. Il sistema arriva a rottura significando una cinematica evolutiva attiva. Nella zona di innesco del fenomeno di colata sono anche concentrate, come ovvio, le massime deformazioni di taglio (fig. 17). Osservando le condizioni di plasticizzazione (fig. 18) si osserva, comunque, che le condizioni di snervamento sono distribuite sia lungo tutto il corpo di colata che quindi trasla in condizioni non rigide, sia in testata dove sono possibili fenomeni di crollo (rottura fragile).

# CONCLUSIONI

È stata indagata, nell'Abruzzo teramano un'area caratterizzata da una frana mista situata presso Penna S. Andrea (Teramo). La frana è attiva da oltre un cinquantennio e la sua attività ha obbligato l'evacuazione di alcuni edifici abitativi e lo spostamento del tracciato della S.S. n. 81 Piceno-Aprutina. La frana è caratterizzata da fenomeni di crollo da una testata alta circa 40 m che sta arretrando rapidamente, e da una colata nel fosso sottostante. I suoli e il regolite, alla sommità della testata, sono decorticati e allontanati da frane superficiali roto-traslazionali, che facilitano l'esposizione e l'attacco da parte degli agenti esogeni della roccia fresca. La colata, in basso, è, invece, ulteriormente alimentata da apporti laterali di frane minori di tipo roto-traslazionale



Fig. 16 – Andamento dei vettori di spostamento. Displacements vectors



Fig. 17 – Distribuzione delle deformazioni di taglio. *Max shear strain distribution*.



Fig. 18 – Condizione di stress in ciascuna maglia. *Stresses conditions in each mesh.* 

La ricerca ha definito la geometria e la cinematica dell'area in frana, ha caratterizzato i terreni dal punto di vista geo-meccanico e geotecnico ed, infine, ha permesso di controllare la cinematica e la geometria dei movimenti in atto attraverso un sistema di monitoraggio. Infine è stata approntata una modellazione numerica alle differenze finite per caratterizzare lo stato tensionale e il cinematismo della colata del Fosso Pietro e Paolo.

#### RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata con fondi MIUR (D.L. 720/99 progetto "Ambiente terrestre" - sottoprogetto Cluster C11b, coord. Prof. D. Magaldi). Si ringraziano i tecnici di laboratorio Dott.ssa Loredana Ferracuti e Toro Gabriele per l'apporto dato nella esecuzione delle prove di laboratorio

## BIBLIOGRAFIA

- BOZZANO F., CESATI E., PRESTININZI A. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (1998) – Stato e tipo di attività di movimenti di versante lungo fronti di sovrascorrimento dell'Appennino centrale: elementi di valutazione dedotti dalla frana di Bussi (PE). Atti del Convegno Internazionale ALBA 1996 "La prevenzione delle catatstrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica" Alba 5-7 novembre 1996, (a cura di F. Luino), Pubbl. GNDCI 1600, vol. I, 305-316, Torino, Italia.
- CENTAMORE E., ADAMOLI L., BERTI D., BIGI G., BIGI S., CASNEDI R., CANTALAMESSA G., FUMANTI F., MORELLI C., MICARELLI A., RIDOLFI M. & SALVUCCI R. con la collaborazione di CHIOCCHINI M., MANCINELLI A., POTETTI M. & CHIOCCHINI U. (1992) - Carta geologica dei bacini della Laga e del Cellino e dei rilievi carbonatici circostanti (Marche meridionali, Lazio nord orientale, Abruzzo settentrionale). S.EL.CA., Firenze.
- CENTAMORE E., CICCACCI S., DEL MONTE M., FREDI P. & LUPIA PALMIERI E. (1996) – Morphological approach to the study of the structural arrangement of northeastern Abruzzo (central Italy). Geomorphology, 16, 127-137, Amsterdam, The Netherlands.
- HANCOCK P.L. (1985) Brittle microtectonics: principles and practice. J. Struct. Geol., 7, 437-457.
- HOEK E. (2000) *Practical Rock Engineering*. In rete su: <u>http://www.rockeng.utoronto.ca/roc/Hoeh/Hoek.htm</u>.
- PAOLUCCI G., PIZZI R. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (2001) Analisi preliminare della frana di Lettopalena (Abruzzo). Mem. Soc. Geol., 56, 139-149, Roma, Italia.
- PATACCA E., SCANDONE P., BELLATALLA M., PERILLI N. & SANTINI U. (1991) La zona di giunzione tra l'arco appenninico settentrionale e l'arco appenninico meridionale nell'Abruzzo. Studi Geologici Camerti, vol. spec. 1991/2 CROP 11, 417-441.
- SCIARRA N. (2000) Rigid formation over plastic substratum: modelling of a lateral spread in central Italy. Proceedings of the 8<sup>th</sup> ISSMGE & BGS International Symposium on Landslides, Cardiff, Wales, 3, 1339-1346.
- SCIARRA N. & CALISTA M. (2001) Modellazione del comportamento di formazioni rigide su di un substrato deformabile: il caso di Caramanico terme (PE). Mem. Soc. Geol., 56, 139-149, Roma, Italia.
- SIBSON R.H. (1977) Fault rocks and fault mechanisms. J. Geol. Soc. London, 133, 191-214.
- TWISS R.J. & MOORES E.M. (1992) Structural Geology. W. H. Freeman and Company, 532 pp.
- VEZZANI L. & GHISETTI F. (1998) Carta Geologica dell'Abruzzo (scala 1/100.000). S.EL.CA., Firenze.
- U.S. CORPS OF ENGINEERS (1953) *The unified soil classification system*. Warerways, Experiment station, Vicksburg, Miss., Techn. Mem., Vol I.