

MODELLI GEOLOGICO-TECNICI NELLE AREE DI INNESCO DELLE FRANE DEL 30 APRILE 2006 DEL MONTE DI VEZZI (ISCHIA, ITALIA)

ENGINEERING GEOLOGICAL MODELS OF THE INITIAL LANDSLIDES OCCURRED ON THE APRIL 30TH, 2006, AT THE MOUNT DI VEZZI (ISCHIA ISLAND, ITALY)

PANTALEONE DE VITA^(*), ENRICO DI CLEMENTE^(*), MASSIMILIANO ROLANDI^(*) & PIETRO CELICO^(*)

^(*) Dipartimento di Scienze della Terra – Università di Napoli “Federico II”

RIASSUNTO

Nelle prime ore della mattina del 30 aprile 2006, sul versante settentrionale del Monte di Vezzi (Ischia), si sono innescate cinque frane superficiali che sono evolute verso valle in forma di colata rapida, incanalandosi nell'originaria rete idrografica e raggiungendo il piedimonte del rilievo. Una delle frane ha investito un'abitazione collocata allo sbocco di un impluvio, distruggendola e provocando la perdita di quattro vite umane. Le frane sono caratterizzabili come superficiali, poiché hanno coinvolto i terreni piroclastici incoerenti, in copertura di un substrato roccioso di natura vulcanica, per spessori generalmente inferiori ad 1 m. Per lo stile complesso, e per la granulometria dei materiali coinvolti, esse sono classificabili come *debris slides - debris flows* con una fase intermedia di *debris-avalanches*. I summenzionati caratteri generali rendono i fenomeni franosi del Monte di Vezzi assimilabili a quelli che tipicamente avvengono nell'area peri-vesuviana su terreni di substrato carbonatici. La similitudine dei fenomeni, sebbene verificatisi su terreni di substrato differenti, nonché l'interesse per la comprensione dei meccanismi di innesco nella fase iniziale (*debris slide*), hanno indirizzato la ricerca verso la ricostruzione di un modello geologico-tecnico nelle aree di innesco. A tale scopo sono state condotte indagini di campo, consistite in rilievi topografici, stratigrafici, penetrometrici e di caratterizzazione idraulica. Sono state anche eseguite prove di laboratorio per la caratterizzazione delle proprietà fisiche ed indice delle terre piroclastiche. Tra i principali risultati ottenuti è l'evidenziazione del cinematiso rotazionale negli scorrimenti iniziali e del coinvolgimento negli stessi degli orizzonti più superficiali, molto sciolti e permeabili, sovrapposti a cineriti a più elevato grado di addensamento e minore permeabilità. Le analisi, estese fino alla caratterizzazione dei sistemi di discontinuità nei terreni di substrato, affioranti a monte delle frane, hanno consentito di avvalorare che, in concomitanza di un fenomeno pluviometrico di elevata intensità/durata, il locale incremento delle pressioni di poro, fino alla saturazione, sia stato il fattore scatenante. Ai fini dell'analisi della suscettibilità a franare, la localizzazione spaziale degli scorrimenti iniziali appare essere attribuibile ad una condizione di spessore e di angolo di pendio maggiormente critica nelle zone di innesco, favorita da condizioni morfologiche locali e da irregolarità dell'interfaccia con il substrato roccioso. Per questi caratteri, oltre che per la similitudine delle condizioni idrogeomorfologiche, le

ABSTRACT

On the April 30th, 2006, during the early morning, five shallow landslides were triggered on the northern side of the Mount di Vezzi (Ischia Island, Italy) that moved down slope, as very rapid flows, channelled into the hydrographical network, and reached the foot of the relief. One of the landslides stroke and destroyed a building located in correspondence of the outlet of a channel, leading to the loss of four human lives. Already by the earliest surveys, the landslides were recognised as shallow and involving loose pyroclastic soils covering a volcanic bedrock just for a depth less than one meter. Moreover the landslides appeared to be classifiable with a complex style and, according to the grain size of the depleted soils, as debris slides - debris flows with an intermediate phase of debris-avalanches. These general features make the landslides of Mount di Vezzi very similar to those that typically occur in the peri-vesuvian area on a carbonate bedrock. Owing to both these similarities, despite the different bedrock, and the interest in understanding the triggering mechanism leading to the initial debris slide, the research has been focused in the reconstruction of engineering geological models of the initiation areas. With this specific purpose, field surveys consisted of topographic, stratigraphic, penetrometric measurements as well as hydraulic testing have been carried out. Laboratory tests on the pyroclastic soils have been also executed in order to characterise their physical and index properties. Among the principal results achieved are the reconnaissance of a rotational kinematics of the initial slides and of the involvement of the surficial pyroclastic deposits, very loose and permeable, overlapping a fine ash pyroclastic soil with higher compaction grade and lower permeability. The field analyses, extended up to the characterisation of the discontinuities network in the outcrops of the volcanic bedrock located above the landslides, confirmed the hypothesis that the local increase of pore pressure up to the saturation due to a high intensity/duration rainfall as being the triggering factor. As for the landslide susceptibility assessment, the spatial localisation of the initial debris slides can be referred to a critical combination of higher pyroclastic soil thickness and slope angle, favoured by local morphological conditions and by irregularities of the interface with the bedrock. Basing on these characters, besides of the similarity in hydrogeomorphological conditions, the landslides occurred on the Monte di

frane accadute sul Monte di Vezzi sono analoghe a quelle avvenute in numerosi altri casi verificatisi sui versanti carbonatici peri-vesuviani.

TERMINI CHIAVE: coperture piroclastiche, scorrimenti di detrito iniziali, caratterizzazione delle terre, modellazione geologico-tecnica

INTRODUZIONE

Nelle prime ore della mattina del 30 aprile 2006, sul versante settentrionale del Monte di Vezzi (Ischia), si sono innescate cinque frane superficiali che sono evolute verso valle in forma di colata rapida, incanalandosi nell'originaria rete idrografica e raggiungendo il piedimonte del rilievo. Una delle frane ha investito un'abitazione collocata allo sbocco di un impluvio, distruggendola e provocando la perdita di quattro vite umane.

Già dalle prime indagini, le frane sono apparse caratterizzabili come superficiali poiché hanno coinvolto, per spessori generalmente inferiori ad 1 m, i terreni piroclastici incoerenti in copertura di un substrato roccioso di natura vulcanica. Esse hanno uno stile complesso e sono classificabili, per la granulometria dei materiali coinvolti, come *debris slides-debris flows* (CRUDEN & VARNES, 1996) con una fase intermedia di *debris-avalanches* (HUNGR *et alii*, 2001). La relazione di causa-effetto con piogge prolungate e di forte intensità appare essere chiara, poiché, nonostante le irrilevanti piogge registrate dal pluviometro più prossimo all'area, localizzato a Forio d'Ischia (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007), le testimonianze degli abitanti indicano univocamente l'accadimento di una pioggia definita "torrenziale" che è persistita per tutta la notte. Ciò avvalorerebbe l'ipotesi di un evento meteorico di elevata intensità e molto localizzato nello spazio. Il settore di versante interessato dall'innescò delle frane è una fascia altimetrica limitata, tra le quote 300 m s.l.m. e 350 m s.l.m., con un'estensione approssimativa di circa 1.5 ha, nella quale verosimilmente sussistevano le condizioni di maggiore suscettibilità a franare.

I summenzionati caratteri generali rendono i fenomeni franosi del Monte di Vezzi assimilabili a quelli che tipicamente avvengono nell'area peri-vesuviana su terreni di substrato carbonatici (DE RISO & NOTA D'ELOGIO, 1973; CELICO *et alii*, 1986). La similitudine dei fenomeni, sebbene verificatisi su terreni di substrato differenti, nonché l'interesse per la comprensione dei meccanismi di innescò nella fase iniziale (*debris slide*), hanno rappresentato il filo conduttore dell'attività di ricerca discussa in questo lavoro. Questa è stata pertanto limitata alle aree di innescò e finalizzata alla ricostruzione di un modello geologico-tecnico di dettaglio mediante indagini di campo, consiste in rilievi topografici, stratigrafici, penetrometrici e di caratterizzazione idraulica. Sono state eseguite anche analisi di laboratorio, finalizzate alla stima delle proprietà fisiche ed indice delle terre piroclastiche. L'applicazione dei suddetti metodi di rilevamento, seppur tradizionali quale quello topografico, è da considerarsi innovativa su questo tipo di frane, soprattutto per le notevoli difficoltà logistiche che ne rendono gravosa la realizzazione lungo i versanti ad elevata pendenza e con copertura boschiva.

Particolare attenzione è stata rivolta all'analisi delle condizioni

Vezzi can be considered analogous to those of the numerous other cases occurred along the peri-vesuvian carbonate slopes.

KEY WORDS: pyroclastic soil mantle, initial debris slides, soil testing, engineering geological modelling

INTRODUCTION

On the April 30th, 2006, during the early morning, five shallow landslides were triggered on the northern side of the Mount di Vezzi (Ischia Island, Italy) that moved down slope, as rapid flows, channelled into the hydrographical network, and reached the foot of the relief. One of the flows stroke and destroyed a building situated in correspondence of the outlet of a channel, leading to the tragic loss of four human lives. Since the first surveys, the landslides were recognized as shallow, because the loose pyroclastic deposits covering the volcanic bedrock has been involved just for a depth less than one meter, moreover they appeared to be classifiable as complex debris slide - debris flow according to grain size of the involved materials (CRUDEN & VARNES, 1996), and with an intermediate phase of debris avalanche (HUNGR *et alii*, 2001). The cause-effect relationship existing between these phenomena and the occurrence of intense rainfall events appears to be clear, even if the Forio d'Ischia rain gauge records are not relevant (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007), several indications from local inhabitants confirm that a severe rainfall event occurred during the whole night. The previous indications lead to hypothesize the rainfall event as very intense and localised in the space. The sector of slope where landslides initiated is a narrow zone located at the foot of a lava cliff, included in the range between 300 and 350 m a.s.l., with an extension of about 1.5×10^{-2} km², characterised by the highest landslide susceptibility conditions. These general features make the Mount di Vezzi landslides very similar to those that typically occur in the peri-vesuvian area, involving the pyroclastic soils that mantle the carbonate bedrock (DE RISO & NOTA D'ELOGIO, 1973; CELICO *et alii*, 1986). Owing to both this similarity, despite the different bedrock, and the interest in understanding the triggering mechanism that lead to the debris slide initiation, the research has been focused on the initiation areas, and specifically addressed to the reconstruction of a detailed engineering geological model, based on field investigations consisted of topographic, penetrometric, stratigraphic surveys and hydraulic testing of the pyroclastic soils. Laboratory tests for the estimation of the physical and index properties of pyroclastic soils have been also carried out. The application of such traditional analyses to this kind of landslides, like the post failure topographic measurements, can be considered innovative, mostly because of the high logistic difficulties arising during their development on steep and wooded slopes.

A particular care has been dedicated to the analysis of the stratigraphic and morphological settings that control the infiltra-

stratigrafiche e morfologiche che controllano i processi di infiltrazione e la possibile formazione di un flusso laterale (in condizioni di saturazione) nei depositi piroclastici di copertura, altrimenti definibile come "falda sospesa occasionale" (CELICO & GUADAGNO, 1998), anche valutando il contributo dei terreni di substrato.

L'approccio allo studio è stato quindi orientato alla comprensione delle condizioni fisiche che determinano la localizzazione spaziale delle frane, quindi, all'identificazione dei fattori che condizionano la suscettibilità a franare, necessari per una valutazione, anche secondo modelli distribuiti, del rischio a franare. Tale comprensione è di fondamentale importanza per la corretta programmazione di opere di difesa attiva e passiva delle abitazioni e delle infrastrutture poste alla base dei versanti.

CARATTERI GEOLOGICI DEL MONTE DI VEZZI

Il Monte di Vezzi (392 m s.l.m.), assieme al rilievo de Il Torone (377 m s.l.m.), costituisce una dorsale, allungata in direzione antiappenninica, che caratterizza l'orografia del settore sudorientale dell'isola d'Ischia, ben identificata da un sistema di faglie ad andamento NE-SW, confermato anche dalle indagini aeromagnetiche (PAOLETTI *et alii*, 2007). A questi lineamenti tettonici sono ascrivibili il graben del settore orientale dell'Isola e la morfologia costiera acclive del settore sudorientale. L'assetto morfostrutturale del rilievo è anche controllato dalle caratteristiche geologiche, riconosciute come ascrivibili ad una cupola lavica, spessa circa 150 m (VEZZOLI, 1988). Più in dettaglio, il rilievo del Monte di Vezzi è costituito da una successione di eventi vulcanici (RITTMANN & GOTTINI, 1980; VEZZOLI, 1988) che è ben esposta lungo la falesia costiera, nota come Scarrupata di Barano.

In questa successione sono riconoscibili i due principali cicli di attività che hanno caratterizzato l'evoluzione vulcanologica dell'intera Isola d'Ischia: quello antico, compreso tra 150 e 74 ka, e quello recente iniziato da 55 ka fino all'Attuale (CHIESA *et alii*, 1987; VEZZOLI, 1988), separati dalla deposizione del Tufo Verde del Monte Epomeo, antecedente a 55 ka (VEZZOLI, 1988). Dal basso, l'attività vulcanica precedente al Tufo Verde del Monte Epomeo è rappresentata dalla Formazione della Scarrupata di Barano, costituita da tufi e tufo-breccie con pomice collassate. Seguono le lave alcalitrachitiche del Monte di Vezzi (126 ka \pm 4), affioranti anche a Punta San Pancrazio e a Punta della Cannuccia. Durante le fasi vulcaniche successive, i depositi lavici sono stati ricoperti da prodotti piroclastici derivanti da differenti eruzioni di diversi centri eruttivi (RITTMANN & GOTTINI, 1980). Queste eruzioni hanno causato, nell'area del Monte di Vezzi, la deposizione: della Formazione di Pignatiello, costituita da banchi di lapilli e breccie pomicee da caduta, di un deposito in facies di *ash-flow* e *pumice-flow* non saldato, ascrivito alla Formazione del Tufo Verde del Monte Epomeo ed, infine, della Formazione di Piano Liguori (6 ka), costituita da cineriti chiare ed intercalati livelli pomicee. Nell'area sono inoltre ampiamente rappresentate le coltri detritiche prodotte dalla denudazione dei rilievi vulcanici tra cui sono molto rilevanti quelli attribuibili a fenomeni gra-

tion process and the formation of a lateral saturated flow (through-flow) in the pyroclastic soils, namely of a temporary perched groundwater flow (CELICO & GUADAGNO, 1998), also taking into account the contribution of the underlying bedrock.

The approach has been focused on the understanding of the physical conditions that control the spatial localization of the landslides, therefore to the identification of the parameters of landslide susceptibility that are necessary for a correct landslide hazard evaluation even with distributed models. Such understanding can be obviously conceived as fundamental achievements for the optimal design of active and passive protection works for buildings and infrastructures located at the foot of the slopes.

GEOLOGY OF THE MOUNT DI VEZZI

The Mount di Vezzi (392 m a.s.l.), together with the "Il Torrione" relief (377 m a.s.l.), constitutes an anti-Appennine elongated ridge that characterizes the orography of the south-eastern sector of the Ischia Island, well delimited by a NE-SW oriented fault system, also confirmed by the aeromagnetic surveys (PAOLETTI *et al.*, 2007). These tectonic alignments formed the wide graben of the eastern sector and the steep coastal morphology in the south-eastern sector of the Island. The morphostructural setting of the relief is also controlled by the geological characters that have been associated with a lava dome, 150 m thick (VEZZOLI, 1988). More deeply, the Mount di Vezzi area is constituted by a succession of volcanic events (RITTMANN & GOTTINI, 1980; VEZZOLI, 1988) clearly outcropping in correspondence of the southern coastal cliff, locally known as the "Scarrupata di Barano". In such a volcanic succession the two principal cycles of the Ischia Island volcanic activity can be recognised: the ancient one, comprised between 150 and 74 ka, and the recent one started from 55 ka up to the Present (CHIESA *et al.*, 1987; VEZZOLI, 1988), separated by the deposition of the Mount Epomeo Green Tuff, preceding to 55 ka (VEZZOLI, 1988). From the bottom, the volcanic activity antecedent the Monte Epomeo Green Tuff is represented by the "Scarrupata di Barano" Formation, constituted by tuffs and tuff-breccias with collapsed pumices. Followings there are the Mount di Vezzi alcalitrachitic lavas (126 ka \pm 4), outcropping also at Saint Pancrazio Point and at Cannuccia Point. During the following volcanic phases, the lavas was overlapped by pyroclastic products derived by various eruptions and ejected from different eruptive centres (RITTMANN & GOTTINI, 1980). These eruptions caused in the Mount di Vezzi area the deposition of the Pignatiello Formation, constituted by very thick strata of lapilli, pumiceous ash-fall breccias, unwelded ash-flow and pumice-flow deposit, belonging to the Green Tuff of Mount Epomeo Formation and, finally, the Piano Liguori Formation (6 ka), constituted by light coloured ash with intercalated pumiceous lapilli layers. Moreover, abundant detrital deposits are diffused in the area, mostly derived by denudational processes

vitativi di versante (MELE & DEL PRETE, 1998).

Le indagini geologiche condotte nell'ambito delle attività di ricerca per lo studio delle frane del 30 aprile 2006 hanno aggiornato e dettagliato l'assetto geologico e strutturale del Monte di Vezzi (DI NOCERA *et alii*, 2007), identificando, al disotto delle lave, la presenza di scorie saldate, con immersione verso il quadrante meridionale, che costituirebbero i fianchi dell'antico Vulcano di Vezzi. Le frane si sono sviluppate nell'ambito di terreni piroclastici incoerenti, in parte pedogenizzati, ascrivibili alla Formazione di Piano Liguori in copertura delle scorie saldate.

I FENOMENI FRANOSI DEL MONTE DI VEZZI DEL 30 APRILE 2006

Come descritto in precedenza, lungo il versante settentrionale del Monte di Vezzi, nelle prime ore del mattino del 30 aprile 2006, hanno preso origine cinque fenomeni franosi sviluppatisi a partire da quote comprese tra 300 m s.l.m. e 350 m s.l.m. e terminati al piedimonte del rilievo, tra le quote 100 e 125 m s.l.m. Sulla base delle osservazioni di campo e della cartografazione dei fenomeni, effettuata sulla cartografia tecnica regionale del 1982 in scala 1:5.000 (Fig. 1), l'evoluzione e la propagazione dei fenomeni franosi, ad eccezione del primo che verrà di seguito descritto, è schematizzabile in quattro fasi: a) innesco, avvenuto per scorrimento dei depositi superficiali (*debris slide*), con coinvolgimento di volumi limitati; b) ampliamento della massa franata e della superficie di rottura su tratti di versante privi di un canale ben definito (*debris avalanche*), controllato da meccanismi di liquefazione dei materiali parzialmente saturi (HUNGR *et alii*, 2001); c) canalizzazione dei flussi nelle aste drenanti (*debris flow*) (HUNGR *et alii*, 2001), durante la quale la massa spostata è complessivamente aumentata, sia per l'incremento del contenuto d'acqua, dovuto al coinvolgimento delle acque di ruscellamento, che per erosione del fondo dell'alveo e delle sponde (benché localmente siano esistiti fenomeni di deposizione in relazione alle variazioni di velocità del flusso sia longitudinali che trasversali al canale); d) accumulo della massa franata in lobi le cui caratteristiche morfologiche indicano un comportamento reologico dei flussi di tipo Bingham (PIERSON & COSTA, 1987), poiché formanti una zona centrale (*plug*) nella quale il materiale è stato trasportato in massa al disopra di una zona di flusso a contatto con il fondo del canale, dove è stato raggiunto lo sforzo di taglio limite (*yield strength*). La velocità di propagazione può essere ipotizzata, come tipico di questi fenomeni (REVELLINO *et alii*, 2004), come compresa tra molto rapida ed estremamente rapida, mentre il contenuto d'acqua compreso tra bagnato e molto bagnato (CRUDEN & VARNES, 1996).

Dal punto di vista dell'analisi storica dei fenomeni franosi che hanno interessato il Monte di Vezzi, è da citare un'importante testimonianza degli abitanti del luogo che, riportando il racconto di persone nate alla fine dell'800 ed ormai scomparse, hanno riferito che, agli inizi del '900, l'intero versante settentrionale del Monte di Vezzi fu interessato da un ampio dissesto delle coperture piroclastiche che riempirono il fondovalle. Detta testimonianza trova molto probabil-

developed along the volcanic slopes (MELE & DEL PRETE, 1998).

The geological surveys carried out during the research activities that regarded the landslides of the April 30th, 2006 have updated and detailed the geological and structural setting of the Mount di Vezzi area (DI NOCERA *et al.*, 2007), identifying the presence of welded scoria under the alkali-trachitic lavas, with attitude toward southern sector, that would constitute the flanks of the ancient Vezzi volcano. The landslides involved the partly pedogenised surficial loose pyroclastic deposits, belonging to the Piano Liguori Formation and covering the welded scoria.

THE LANDSLIDES OF THE APRIL 30TH, 2006, OF THE MOUNT OF VEZZI

As described before, along the northern slope of the Mount di Vezzi, in the early morning of the April 30th, 2006, five landslides initiated between the altitude of 300 and 350 m a.s.l. and reached the foot of the relief, between the altitude of 100 and 125 m a.s.l. On the basis of field surveys and the mapping of landslides (Fig. 1), based on the 1982's regional technical topographic maps (1:5.000 scale), the evolution and the propagation of the landslides can be schematized in four phases, except for the first landslide that will be described after: a) initiation, occurred as shallow slides involving very low volumes of surficial deposits (*debris slide*); b) widening of the mass and of the rupture surface on sectors of open slopes without a well defined hydrographic network (*debris avalanche*), controlled by liquefaction of partially saturated pyroclastic soils (HUNGR *et alii*, 2001); c) canalisation of flows in the hydrographic channels (*debris flow*) (HUNGR *et alii*, 2001) during which the depleted mass is progressively enlarged both by the increasing in water content due to the runoff involvement and by erosion of channel bed and walls (even if deposition locally existed because of longitudinal and transversal variation of the velocity along the channel); d) accumulation in lobes whose morphological features indicates a Bingham's rheological behaviour (PIERSON & COSTA, 1987) since a central plug is formed, in which material has been transported above a flow zone in contact with the channel bed, and where the yield strength value has been overcome. The propagation velocity can be supposed as comprised between very rapid and extremely rapid (REVELLINO *et alii*, 2004) while the water content comprised between wet and very wet (CRUDEN & VARNES, 1996).

From the historical analysis of landslide phenomena that interested the Mount di Vezzi area, it has to be said that, according to local population reports, people born at the end of '800, and thus not still alive, used to speak about a huge instability phenomenon occurred at the beginning of '900 that interested the northern sector of the relief and that largely involved the pyroclastic cover and filled the foothill. This report can be likely matched with a news of the October 24th 1910, from the historical analysis of the instability phenomena that interested the Ischia Island (DEL PRETE & MELE, 2006), when diffuse flooding interested the eastern and southern part of the

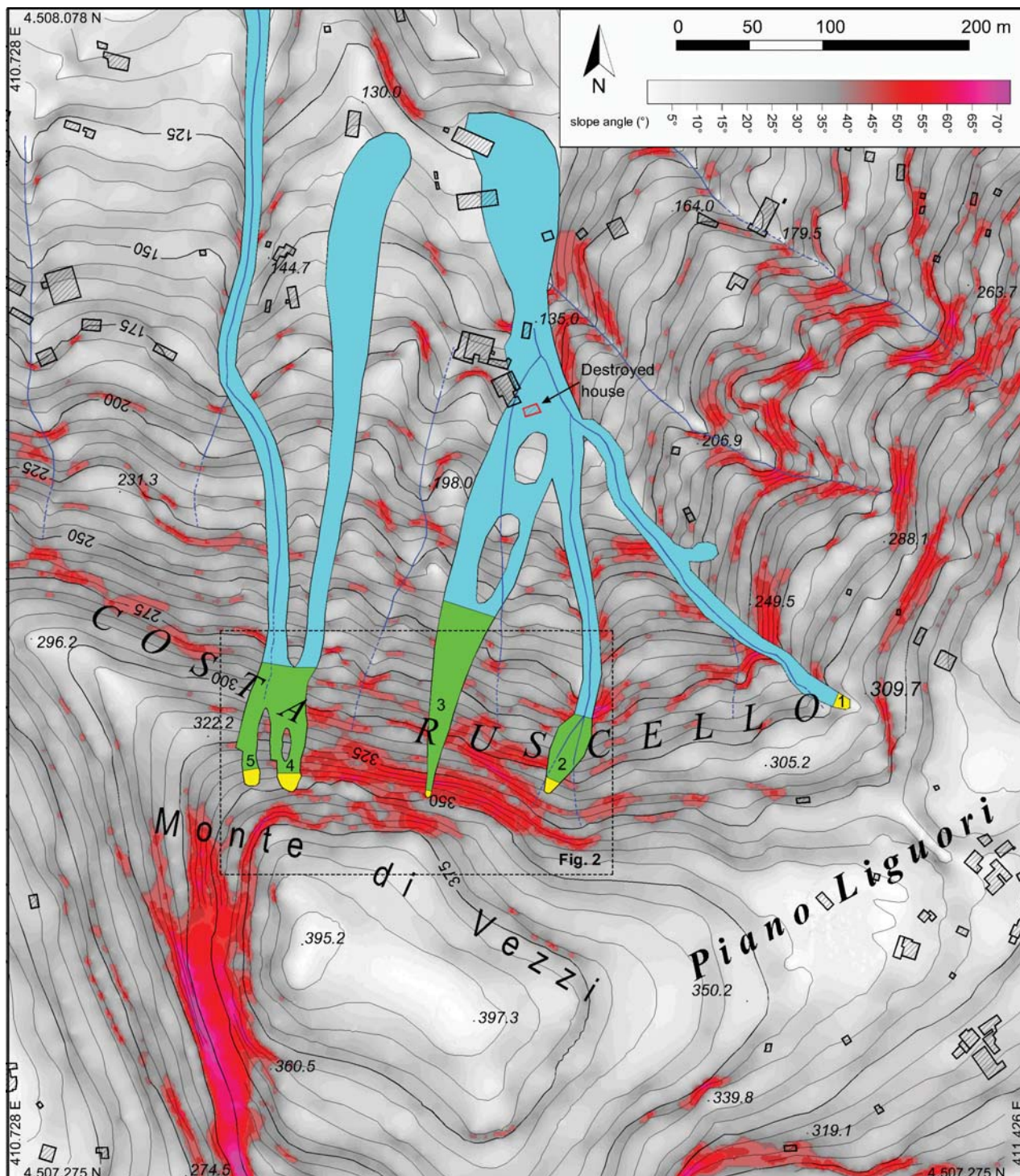


Fig. 1 - Perimetro e numerazione delle frane, riportati sulla cartografia tecnica regionale del 1982 (CASMEZ; 1:5.000), modificata. L'ombreggiatura indica l'angolo di pendio (rosso a partire da 40°). I colori nelle aree coinvolte dalle frane indicano la successione dei differenti tipi di movimento: giallo scorrimento; verde valanga; ciano colata. Il rettangolo demarca il riquadro rappresentato nella Fig. 2. Le coordinate sono riferite al sistema UTM (fuso 33)

- Perimeters and numeration of the landslides, mapped on the redraw of the 1982's regional technical cartography (CASMEZ; 1:5.000). The shading indicates the slope angle (red above 40°). The colours in the areas involved in the landslides correspond to the type of movement: yellow slide; green avalanche; cyan flow. The rectangle remarks the particular illustrated in the Fig. 2. The coordinates are referred to the UTM system (33 fuse)

mente riscontro in una notizia risalente al 24 ottobre 1910, riportata nell'analisi storica dei fenomeni di dissesto dell'Isola d'Ischia (DEL PRETE & MELE, 2006), quando si verificarono, nella parte orientale e meridionale dell'Isola, diffusi fenomeni di alluvionamento, tanto da far segnalare nelle cronache dell'epoca la "cancellazione" della strada Testaccio-Maronti oltre che ingenti danneggiamenti nelle località di Ischia Ponte e nelle contrade montane.

Dei cinque fenomeni (Fig. 1), il primo, localizzato nel settore orientale, è quello meno rilevante per il volume complessivamente coinvolto e per il meccanismo di innesco, imputabile all'instabilità di una piccola porzione di terrazzamento agricolo. Questa frana si è incanalata, subito dopo l'innesco, in un impluvio di primo ordine gerarchico molto inciso e, non avendo coinvolto nell'instabilità un ulteriore volume di terreno, per la competenza delle litologie presenti al fondo del canale, si è diluito nell'acqua di ruscellamento.

La seconda frana, innescatasi alla quota di circa 320 m s.l.m., dopo una breve fase di scorrimento, si è ampliata sul versante con meccanismo di *avalanche*, descrivendo un angolo apicale di 36°. Dopo un percorso di circa 60 m, il flusso si è incanalato in un'asta drenante di secondo ordine gerarchico, a seguito di un salto verticale di circa 20 m, coincidente con una cornice per morfoselezione formata dall'affioramento di scorie saldate in banchi.

La terza frana si è innescata come un piccolo scorrimento occorso a circa 350 m s.l.m., alla sommità di una parete rocciosa, alta circa 25 m, costituita dalle lave del Monte di Vezzi. La massa franata, di pochi m³, dopo aver coinvolto nell'instabilità anche blocchi instabili di roccia lavica, si è abbattuta alla base della parete da dove si è propagata verso valle per altri 150 m, in un tratto di versante privo di aste drenanti, quindi in forma di *debris avalanche*, descrivendo un angolo apicale di 17°. Successivamente, il flusso si è incanalato in due incisioni poco accentuate che, almeno nella parte iniziale, appaiono essere state prodotte dall'escavazione, operata dal flusso stesso, di canali preesistenti riempiti di depositi colluviali (pertanto non rappresentati in cartografia). Per l'accentuata curvatura di uno di questi, il materiale è debordato ed, in seguito, si è ricongiunto con quello defluente nel canale limitrofo, circoscrivendo così due piccole isole. Allo sbocco degli impluvi, alla base del versante, il flusso ha impattato contro un'abitazione distruggendola e provocando le quattro vittime. In seguito, il flusso è confluito in un unico impluvio, assieme a quello proveniente dalla prima e dalla seconda frana.

La quarta e la quinta frana, similari per posizione e dimensioni, hanno avuto origine da due scorrimenti indipendenti avvenuti anch'essi attorno a 350 m s.l.m. Successivamente alla breve fase di scorrimento, i due flussi in forma di *debris avalanches* hanno avuto percorsi sul versante parzialmente sovrapposti, per poi incanalarsi in due impluvi differenti. In particolare, la quarta frana ha dato luogo ad una zona di accumulo ben identificata al piede del versante. Mentre, l'accumulo della quinta frana, essendosi questa incanalata in un alveo più inciso e rettilineo, si è distribuito e progressivamente diluito nell'impluvio stesso, nel quale verosimilmente sussisteva un cospicuo

Island, so that a local journal reported the "stroke" of the "Testaccio-Maronti" road, besides of huge damages at the Ischia Ponte location and in correspondence of mountain districts.

The first of the five landslides (Fig.1), placed in the eastern sector, is the less relevant, because of the low volume involved, and of the triggering mechanism, due to the slide of a surficial part of an agricultural terrace. The depleted soil mass has been immediately canalised in a deep channel of first hierarchical order and it is not increased along its path, because of the compactness of the channel bed lithology, so it has been progressively diluted by runoff.

The second landslide, triggered at 320 m a.s.l., after an initial sliding phase, has widened on an open slope sector according to the avalanche mechanism, with an apex angle of 36°. After about 60 m, the depleted mass inflowed in a second hierarchical channel subsequent to a 20 m high fall attributable to a morphoselection bench due to very thick strata of welded scoria.

The third one started on the edge of a 25 m high sub-vertical cliff constituted of Mount di Vezzi lava. The fallen mass, with a volume valuable in a few cubic meters, after involving other unstable lava blocks, stroked the pyroclastic soils at the foot of the rocky cliff provoking a landslide that assumed the characters of a debris avalanche and proceeded down slope for about 150 m, describing an apex angle of 17°. Followings, the mass inflowed in two gullies that appear, almost in the upper part, to be caused by the excavation of pre-existing channels buried by colluvial deposits (so that, not reported in the topographic maps). Because of the high curvature of one gully, the mass overflowed outside and subsequently inflowed newly in the same channel so describing two small islands. At the outlet of the gullies, located at the base of the slope, the fluid mass hit and destroyed a house, causing the loss of four human lives. Later on the flow converged in a unique channel together with the ones of the first and second landslides.

The fourth and the fifth landslides are similar for what concerns the dimensions and the location on the slope, but they initiated from different debris slides occurred about 350 m a.s.l. After the short sliding phase, the paths of debris avalanches have each other partially overlapped and later on the landslide masses inflowed into two separated channels. The fourth landslide has a well defined accumulation zone at the foothill. Instead, the depleted mass of the fifth landslide has been distributed in a deep and rectilinear channel and diluted by the abundant runoff, so that portions of material have been found at distances up to 500 m forward from the tips of the other landslides.

The reconstruction of the perimeter of the landslides, based on GPS surveys and oblique terrestrial photos, allows a preliminary estimation of the involved volumes, by which correlation with the angle formed by the ratio between the height (H) and the length (L) of the landslide, namely the travel angle (HUTCHINSON, 1988) or the angle of reach (COROMINAS, 1996), an indicative and preliminary

ruscellamento, tanto che porzioni del materiale sono state osservate fino a 500 m più avanti dell'ungghia delle altre frane.

La ricostruzione del perimetro delle frane, basato su rilievi GPS e fotografie terrestri oblique, ha consentito di fornire una stima preliminare dei volumi coinvolti nell'instabilità dalla cui correlazione con l'angolo formato dal rapporto tra l'altezza (H) e la lunghezza della frana (L), *travel angle* (HUTCHINSON, 1988) o *angle of reach* (COROMINAS, 1996), è stato possibile caratterizzare, sia pure in maniera indicativa e preliminare, la mobilità dei suddetti fenomeni. In particolare, sono state considerate le frane per le quali la zona di accumulo è ben identificabile, quindi l'insieme della seconda e della terza frana (ritenute approssimativamente simultanee) e la quarta la frana.

Per l'insieme della seconda e della terza frana è stata stimata un'altezza media di 190 m (H) che, rapportata alla lunghezza media delle due frane (L) pari a circa 472 m, ha fornito un rapporto H/L di 0.403, ovvero un angolo pari a circa 22°. In base all'estensione della zona di svuotamento, e considerando uno spessore medio dei depositi coinvolti variabile tra 0.5 e 1.0 m, è stato indicativamente stimato un volume complessivo della massa spostata di circa 7.500÷15.000 m³.

Anche per la quarta frana, l'altezza (H) è stata stimata pari a 190 m e la lunghezza (L) pari a 425 m, quindi è stato calcolato un valore pari a circa 24°. Il volume coinvolto, stimato con la tecnica precedente, risulta indicativamente variabile tra 2.500 m³ e 5.000 m³. Nonostante l'incertezza, la correlazione tra i dati di volume ($\log_{10}V$) e di angolo (H/L) rientra approssimativamente nel campo della relazione empirica proposta per la mobilità dei *debris flows* dei versanti peri-vesuviani (BUDETTA & DE RISO, 2004).

Le analisi sviluppate in questo lavoro sono state condotte nelle aree di innesco della seconda, quarta e quinta frana, avendo escluso la prima e la terza, rispettivamente per la scarsa significatività e per le rischiose condizioni logistiche.

METODOLOGIE DI RILEVAMENTO

Aspetto fondamentale delle indagini di campo è stato rappresentato dalla caratterizzazione stratigrafica dei terreni coinvolti dalle frane mediante l'esame degli affioramenti nelle scarpate principali, e lungo i fianchi delle stesse, anche con scavi effettuati a mano. Ai fini del rilevamento stratigrafico delle coperture piroclastiche, è stato adottato il criterio classificativo basato sul riconoscimento degli orizzonti pedologici (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993; USDA, 1998); questo criterio, abbinato a quello propriamente litostratigrafico, ha consentito di riconoscere la successione di differenti episodi deposizionali, alternati a fasi di stasi, durante le quali hanno agito i fenomeni pedogenetici (TERRIBILE *et alii*, 2000). Inoltre, i vari orizzonti, dopo campionatura in condizioni di disturbo limitato (Q3 } Q4; AGI, 1977), ottenuta mediante infissione di fustelle metalliche a bordo tagliente, sono stati oggetto di analisi di laboratorio delle proprietà indice e quindi classificati mediante il sistema internazionale USCS. Le analisi di laboratorio sono state condotte secondo gli standard ASTM e BS: ASTM D421, ASTM D2217 e ASTM D422, per le analisi granulo-

characterisation of the mobility of these phenomena has been obtained. In particular, the landslides with a well identifiable accumulation zones have been only considered, thus the sum of the second and the third landslide (approximately considered simultaneous) and the fourth.

For the sum of the second and the third landslides, an average height of 190 m (H) has been estimated that, considering the average length (L) of about 472 m, leads to a value of the H/L ratio of 0.403, namely an angle of about 22°. From the depletion area and the average thickness of the depleted pyroclastic mantle, estimated as ranging from 0.5 to 1.0 m, the value of the overall involved volume is indicatively of 7,500÷15,000 m³. Also for the fourth landslides, the value of height (H) is about 190 m and the length (L) has been estimated in about 425 m, thus the value of the angle is about 24°. Applying the same criterion described before, the estimated volume ranges is variabile from 2,500 m³ and 5,000 m³. Despite the uncertainty the correlation of landslide volumes ($\log_{10}V$) and the angle (H/L) results to be included in the range of the empirical correlation proposed for the mobility of debris flows in the peri-vesuvian area (BUDETTA & DE RISO, 2004).

In this paper, the results of the analyses carried out in the initiation zones of the second, the fourth and the fifth landslides are presented, having excluded the first and the third ones because of the respective low relevance and the dangerous logistic conditions.

FIELD SURVEY METHODS

A fundamental aspect of the field surveys has been represented by the stratigraphic characterisation of the soils involved in the landslides by means of the analysis of natural cuts, identifiable in the main scarps and flanks of landslides, and of test pits. To assess the surficial stratigraphy, a criterion based on the nomenclature of the pedologic horizons has been adopted (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993; USDA, 1998). The former, matched with the properly lithostratigraphic one, allowed to define several depositional episodes, alternated with stasis, during which pedogenetic processes took place (TERRIBILE *et al.*, 2000). Moreover, soils of the different horizons, after pseudo-undisturbed sampling (Q3 } Q4; AGI, 1977), obtained by the pushing of thin-wall metallic samplers, have been tested in laboratory for the characterisation of the physical and index properties needed for the classification with the USCS international system. The laboratory tests have been carried out according to the ASTM and BS standards: ASTM D421, ASTM D2217, e ASTM D422, for the grain size assessment; ASTM D4318, BS

metriche; ASTM D4318 e BS 1377 per i limiti di consistenza. Per la determinazione del limite di plasticità è stato adottato anche il metodo di WROTH & WOOD (1978).

Gli scavi hanno raggiunto il substrato solo nei casi in cui lo spessore apparente delle coperture è risultato inferiore ai 3÷4 m. Pertanto, al fine di ampliare le informazioni stratigrafiche, anche a profondità superiori, e caratterizzare le proprietà meccaniche dei terreni, sia pure in maniera indicativa, è stata realizzata una serie di sondaggi penetrometrici dinamici mediante un penetrometro specificamente progettato per essere facilmente trasportabile in condizioni logistiche difficili ed idoneo alla caratterizzazione dei depositi molto sciolti come quelli superficiali piroclastici. Il penetrometro dinamico utilizzato consiste in una massa battente di 6 kg (m) che è fatta cadere da un'altezza di 0.5 m (H) su un'incudine di 3.2 kg; questa ultima è collocata all'estremità superiore di una batteria di aste di 16 mm di diametro (1.58 kg per metro lineare) ed alla cui estremità inferiore è collocata una punta con caratteristiche geometriche conformi a quelle standard (CEN/TC 341), con sezione di $6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (A). L'energia totale sviluppata dalla caduta della massa metallica è pari a 29.43 J ($m \times H \times g$). Invece, l'energia trasferita al terreno è inferiore di un'aliquota corrispondente all'inerzia dell'incudine e delle aste infisse (m'), considerando trascurabili gli effetti dello svergolamento delle aste e dell'attrito laterale delle stesse. Ne consegue che la caratterizzazione della resistenza meccanica del terreno può essere valutata, con riferimento al numero di cadute del maglio (N_z) occorso per l'avanzamento delle aste di un intervallo di lunghezza costante (z), mediante la resistenza dinamica (R), espressa dalla formula degli olandesi ("Dutch formula") (SANGLERAT, 1972; CASSAN, 1988):

$$R[Pa] = \frac{m \times H \times g}{A \times \frac{z}{N_z}} \times \frac{m}{m + m'}$$

Nel caso specifico, l'intervallo di profondità di penetrazione (z), rispetto al quale è stata discretizzata la resistenza dinamica, è di 0.1 m.

Altro aspetto importante della caratterizzazione geologico-tecnica dei terreni coinvolti nei movimenti franosi è stata la stima della conducibilità idraulica di campo a saturazione ($K_{\text{sat field}}$) mediante prove di infiltrazione in sito. Queste sono state effettuate mediante il permeometro di Amoozegar (AMOOZEGAR, 1989), noto anche come CCHP (Compact Constant Head Permeometer), considerabile un'evoluzione del permeometro di Guelph (REYNOLDS & ELRICK, 1986). Il permeometro di Amoozegar consente di mantenere un carico idraulico costante (H) nell'ambito di un foro (di raggio r), quindi, con il livello idrico posizionato a quota inferiore a quella del piano di campagna; ciò avviene imponendo un carico idraulico opposto a quello naturale, mediante un circuito in cui l'aria può entrare nel serbatoio solo dopo il superamento di un carico equivalente (principio della bottiglia di Mariotte). La prova di infiltrazione in foro viene prolungata nel tempo al fine di escludere gli effetti transitori del flusso nel non saturo. La conducibilità idraulica di campo a saturazione

1377 for the consistency limits assessment. In order to estimate the plastic limit the method of WROTH & WOOD (1978) has been also applied.

Test pits reached the bedrock just in those cases in which the apparent thickness of the pyroclastic mantle was lower than 3÷4 m. Therefore, in order to extend the information obtained from the stratigraphic surveys to that layers located at depth not reached with the excavations and to indicatively define the mechanical properties of soils, a set of dynamic penetrometric tests has been carried out. An on-purpose-designed dynamic penetrometer, easy to carry in very difficult logistic conditions, and suitable for the characterization of loose deposits, as the pyroclastic overburdens, has been applied. This is constituted by a 6 kg beating mass (m), that fall by a height of 0.5 m (H), on a 3.2 kg anvil; the latter is connected to a 16 mm diameter rod series (1.58 kg/m), at which bottom there is a standard tip (CEN/TC341) with a $6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ area (A). The total energy developed by the falling mass is 29.43 J ($m \times H \times g$). While energy transferred to the soil must be lowered of a quantity that corresponds to the anvil and the rods inertia (m'), not taking into account the warping and the lateral friction of the rods themselves. It follows that the soil mechanical strength characterization can be evaluated, starting from the number of blows (N_z) needed for the penetration of a constant depth interval (z), using the penetration resistance (R), expressed by the "Dutch Formula" (SANGLERAT, 1972; CASSAN 1988):

In this case the value of the penetration interval (z), in which the dynamic strength has been discretized, is 0.1 m.

Another fundamental aspect of the engineering geological characterization of the soils involved in landslides has been the estimation of the field saturated hydraulic conductivity ($K_{\text{sat field}}$), by means of borehole infiltration tests carried out by the Amoozegar permeameter (AMOOZEGAR, 1989), also known as CCHP (Compact Constant Head Permeameter), that is an evolution of the Guelph permeameter (REYNOLDS & ELRICK, 1986). The Amoozegar permeameter allows to keep a constant hydraulic head (H) in a borehole (with radius r), thus with a water level lower than the ground surface. This condition is achieved by neutralising the natural hydraulic head using a hydraulic circuit in which the air can entry after the overcoming of an equivalent pressure (principle of the Mariotte's bottle). This infiltration test is prolonged over a relatively long time in order to minimise the unsaturated flow transitory effects. The saturated field conductivity ($K_{\text{sat field}}$) can be estimated by means of the Glover formula (ZANGAR, 1953) that is

(K_{sat_field}) può essere stimata mediante la formula di Glover (ZANGAR, 1953), derivata dalla soluzione della legge di Darcy per un moto di filtrazione assialsimmetrico da una superficie cilindrica, applicata in condizioni stazionarie di flusso saturo (HORTON, 1933; PHILIP, 1957):

$$K_{sat_field} = \frac{C \times Q}{2 \times \pi \times H^2} \quad C = \sinh^{-1} \left(\frac{H}{r} \right) \left[\left(\frac{r}{H} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} + r/H$$

L'affioramento di pareti rocciose costituite dalle lave del Monte di Vezzi, immediatamente a monte delle aree in frana, ha motivato l'esecuzione di rilievi strutturali sui sistemi di discontinuità, finalizzati alla comprensione delle modalità di circolazione idrica sotterranea e delle possibili interazioni con la stabilità delle coperture piroclastiche. Per la spaziatura circa sub-metrica delle discontinuità, i rilievi sono stati effettuati sulle intere superfici di affioramento, quindi con la tecnica del campionamento a finestra (PAHL, 1981; ISRM, 1978) in differenti stazioni di misura. I parametri di interesse idrogeologico rilevati, tra quelli di interesse geomeccanico, sono stati, oltre che la giacitura ed i caratteri genetici delle discontinuità, anche l'apertura ed il riempimento delle stesse.

Com'è noto, la ricostruzione di un attendibile modello fisico di una frana, sia in chiave puramente geologica che geotecnica, non può prescindere dall'analisi topografica del versante sul quale essa si sviluppa. Il modello, che mira alla ricostruzione geometrica tridimensionale, è, di norma, realizzato in sezioni delle quali quelle orientate monte-valle sono maggiormente significative ai fini delle verifiche di stabilità. La scelta tra i differenti metodi (JEFFREY & DE GRAFF, 1996) è, ovviamente, funzione della scala di analisi e quindi delle dimensioni dei fenomeni franosi, oltre che della necessità di valutare le condizioni topografiche precedenti e successive al fenomeno franoso stesso. Pertanto, l'acquisizione delle informazioni topografiche, che sembra essere scontata su frane di medie e grandi dimensioni, per le quali è possibile una ricostruzione attendibile anche a partire da comuni cartografie tecniche in scala 1:5.000 o 1:10.000, è di difficile soluzione per frane superficiali come quelle del Monte di Vezzi o quelle dei versanti carbonatici perivesuviani, caratterizzate dalla mobilitazione di uno spessore medio anche inferiore ad 1 m su pendenze comprese tra 35° e 40°. Per queste frane, l'utilizzazione delle cartografie tecniche in scala 1:5.000 è insufficiente anche solo per una ricostruzione delle condizioni topografiche antecedenti il fenomeno franoso, soprattutto per la presenza del bosco che spesso inficia l'accuratezza della cartografia stessa.

Tale problema è stato affrontato mediante un rilevamento topografico nelle aree di distacco, effettuato con un tacheometro dotato di precisione nella stima delle distanze di ± 10 cm su 100 m, quindi con precisione relativamente elevata per gli scopi prefissati e per l'estensione dei rilievi, in ogni caso non superiore a 50 m. È stata utilizzata la tecnica dell'irradiamento (BARTORELLI, 1986), a partire da un punto a coordinate note, posto al disopra del top delle frane, e con l'ausilio di un altro punto di riferimento, anch'esso a coordinate note, utilizzato per la corretta collocazione spaziale dei punti rilevati. Il rilievo topografico è stato effettuato, su ciascuna frana, mediante una

derivata dalla soluzione di Darcy's law for an axialsymmetric flow through a cylindrical surface, applied in saturated and steady state conditions (HORTON, 1933; PHILIP, 1957):

The presence of a rocky cliff constituted of the Mount di Vezzi lava, close behind the initiation areas, motivated the analysis of discontinuities systems finalised to the comprehension of the groundwater circulation modality and of the possible interaction with the pyroclastic soils. Because of the sub-metric spacing of the fractures, the surveys have been carried out in correspondence of the entire outcropping surface, thus by means of the window sampling technique (PAHL, 1981; ISRM, 1978) in different measurement stations. Among all the other relevant hydrogeological and geomechanical parameters, the width and the filling have been estimated besides of the attitude and the genetic characterisation of discontinuities.

As known, the reconstruction of a reliable physical model of a landslide, both from geological and geotechnical points of views, can not neglect the evaluation of the slope topography. The model, by means of which it is possible to obtain a three-dimensional reconstruction, is usually based on sections among which those oriented downstream are the mostly representative. The choice of a suitable method (JEFFREY & DE GRAFF, 1996) is related to the scale of the analysis, and thus to the dimensions of the phenomenon, and also it depends by the necessity in evaluating the topography before and after the landslide. Therefore, the acquisition of topographic data could seem obvious if referred to deeper seated landslides, for which it is possible to obtain reliable results by technical topographic maps (1:5.000 - 1:10.000 scale). Conversely, similar evaluations are difficult to achieve in cases like those of Mount di Vezzi and those interesting the carbonate peri-vesuvian slopes with slope angle ranging in the interval 35° - 40°, for which the mobilized thickness is less than 1 m. For these landslides the topographic map at the 1:5000 scale is not sufficiently detailed neither for the sole assessment of the slope topography before the landslide occurrence, due to the presence of the wood that affects the accuracy of the measures.

We tried to solve such a problem carrying out topographic surveys in correspondence of the initiation areas by means of a tacheometer with a ± 10 cm/100 m precision, which is relatively high with respect to the scope and to the extension of the measures never exceeding 50 m. It has been adopted the irradiation technique (BARTORELLI, 1986), starting from a known coordinates point, set above the top of each examined landslides, and with the reference of another known coordinates point, used for the correct spatial location of the surveyed points. The topographic surveys have been carried out on each landslide leading to the reconstruction of profiles corresponding to the axial line and to two transversal profiles

sezione assiale, coincidente con l'asse mediano della frana stessa, e due o più sezioni trasversali. I dati geologico-tecnici rilevati lungo i fianchi delle frane, dagli scavi esplorativi o dai sondaggi penetrometrici, sono stati successivamente proiettati nelle sezioni assiali ed è stato quindi ricostruito il modello geologico-tecnico.

IL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO

Le indagini stratigrafiche effettuate mediante scavi esplorativi, nella scarpata principale e lungo i fianchi delle frane investigate (Fig. 2), hanno evidenziato la presenza di un assetto stratigrafico comune. Adottando i criteri di nomenclatura litologici e dei principali orizzonti pedologici (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993; USDA, 1998), nonché il sistema di classifica internazionale USCS (Figg. 3 e 4), è stata riscontrata una sequenza di terreni di origine piroclastica comunemente caratterizzata dai seguenti orizzonti: 1) orizzonte A; 2) orizzonte B, caratterizzato prevalentemente da piroclasti pomicei alterati, variabili granulometricamente da lapilli a ceneri grossolane, immersi

at least. The engineering geological data collected along the flanks of each landslide by means of test pits and penetrometric tests have been successively projected in the axial sections allowing the reconstructing of the engineering geological model.

THE ENGINEERING GEOLOGICAL MODEL

The test pits made in the initiation areas in correspondence of the main scarps and along the flanks of the investigated landslides (Fig. 2) allowed the recognition of a common stratigraphic setting. With reference to the lithologic identification of soils and to the nomenclature of principal pedologic horizons (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993; USDA, 1998) as well as to the international soil classification system USCS (Figs. 3 and 4), in all the cases the following sequence of pyroclastic soils has been outlined: 1) A horizon; 2) B horizon, mainly characterized by weathered pumiceous pyroclasts with grain size ranging from lapilli to coarse

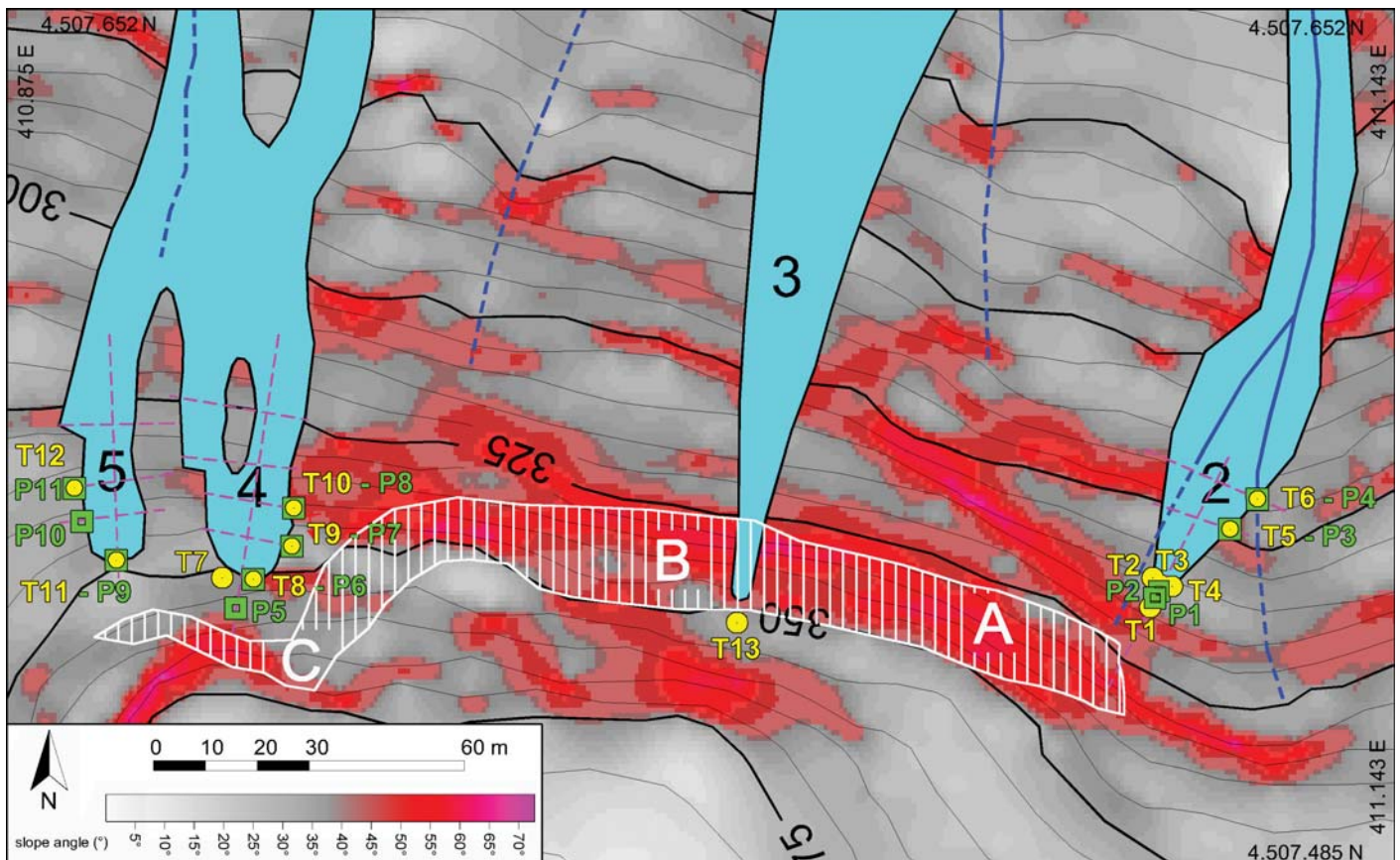


Fig. 2 - Particolare delle aree di innesco delle frane 2, 3, 4 e 5 con ubicazione dei: profili topografici longitudinali e trasversali (linee tratteggiate magenta), delle trincee esplorative (Tn - giallo) e delle prove penetrometriche (Pn - verde). Con il rigato verticale bianco è rappresentata la parete di roccia lavica, sulla quale è stato effettuato il rilevamento delle discontinuità nelle stazioni A, B e C. Il ciano corrisponde alle aree interessate dai fenomeni franosi. Le coordinate sono riferite al sistema UTM (fuso 33)

- Detail of the initiation areas of the landslides 2, 3, 4 and 5 with location of: longitudinal and transversal topographic profiles (magenta dashed lines), test pits (Tn - yellow) and penetrometric tests (Pn - green). The white vertical hatch indicates the rocky cliff constituted of lavas on which discontinuities surveys have been carried out in the measurement stations A, B and C. The cyan corresponds to the areas involved in the landslides. The coordinates are referred to the UTM system (33 fuse)

in matrice sabbioso-limosa, contraddistinto dalla presenza di apparati radicali e strutture da bioturbazione; 3) orizzonte C superiore (C₁), costituito da piroclasti pomicei, e subordinatamente scoriacei, scarsamente alterati e quasi sempre contraddistinti da tracce di rimaneggiamento, variabili granulometricamente dai lapilli alle ceneri grossolane con dimensione massima fino a 20 mm; 4) orizzonte C inferiore (C₂), costituito da cineriti compatte color nocciola chiaro con sporadica presenza di croste rossastre; 5) orizzonte Bb, rappresentativo di un orizzonte B sepolto, di colore marrone-rossastro, assimilabile ad un paleosuolo; 6) orizzonte R, corrispondente al substrato roccioso che, nelle aree di innesco delle frane, è costituito da scorie saldate stratificate in strati medi e spessi ed assetto giaciturale a reggipoggio. Dal punto di vista litostratigrafico, la sequenza può essere riferita, in base alle caratteristiche degli orizzonti C, rappresentativi del "parent material", alla Formazione di Piano Liguori. Gli apparati radicali degli alberi, in prevalenza di castagno, generalmente non si approfondiscono oltre l'orizzonte B, essendo molto più rarefatti negli orizzonti sottostanti. Limitatamente alle aree di innesco, i fenomeni di instabilità hanno riguardato prevalentemente i primi tre orizzonti coinvolgendo solo marginalmente l'orizzonte delle cineriti compatte.

La suddetta caratterizzazione degli orizzonti stratigrafici è confermata anche dalle proprietà indice stimate sui terreni campionati (Fig. 4). Prescindendo dall'orizzonte A, di spessore limitato ed assimilabile ad una terra organica (Pt), l'orizzonte B è caratterizzato da un fuso

ash, dispersed in a slightly organic sandy-silt matrix with diffused root apparatuses and bioturbation structures; 3) upper C horizon (C₁), constituted of pumiceous and subordinately scoriaceous pyroclasts with low weathering degree, locally reworked, with grain size ranging from lapilli to coarse ash (with maximum dimension up to 20 mm); 4) lower C horizon (C₂), made of light brown compact ash with sporadic presence of reddish crusts; 5) Bb horizon, defined as a buried B horizon, reddish-brown in colour, therefore assimilable to a paleosoil; 6) R horizon, representing the volcanic bedrock, that in the initiation areas is constituted of welded scoria in very thick strata with an attitude upstream dipping. From the lithostratigraphic point of view, the volcanoclastic series can be referred to the "Piano Liguori" Formation on the basis of the C horizon characters that are representative of the parent material. The roots apparatuses of the vegetation, mainly constituted of chestnut trees, dip till the B horizon being rarefied in the deeper horizon. For what concerns the initiation areas, the instability involved mainly the first three horizons and only marginally the lower compact ash horizon.

The aforesaid stratigraphic characterisation is also confirmed by the soil index properties obtained from laboratory analyses (Fig. 4). Excepting from horizon A, very thin and similar to an organic soil (Pt), the horizon B is characterized by a quite narrow range of the grain size curves, going from the gravel (25% aver-

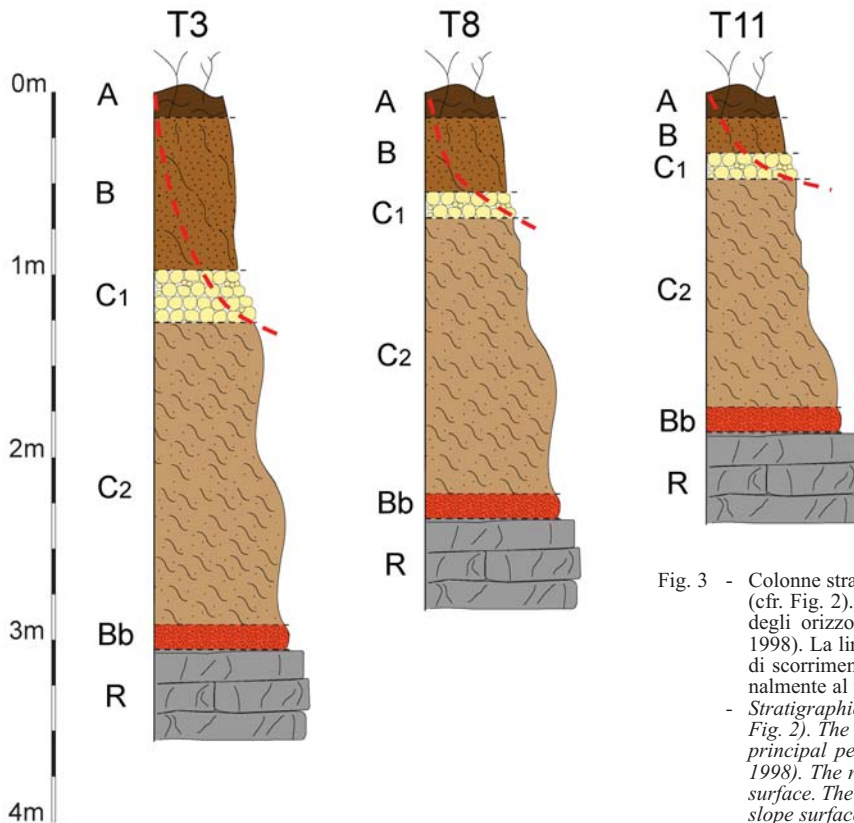


Fig. 3 - Colonne stratigrafiche rilevate in corrispondenza delle sommità delle frane (cfr. Fig. 2). La caratterizzazione stratigrafica è basata sulla nomenclatura degli orizzonti pedologici (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993; USDA, 1998). La linea rossa tratteggiata rappresenta simbolicamente la superficie di scorrimento. Gli spessori sono in termini reali, quindi calcolati ortogonalmente al piano del pendio

- Stratigraphic columns surveyed in correspondence of landslides' tops (cfr. Fig. 2). The stratigraphic characterization is based on the nomenclature of principal pedologic horizons (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993; USDA, 1998). The red dashed line symbolically represents the trace of the sliding surface. The depths are in real terms, thus calculated perpendicularly to the slope surface

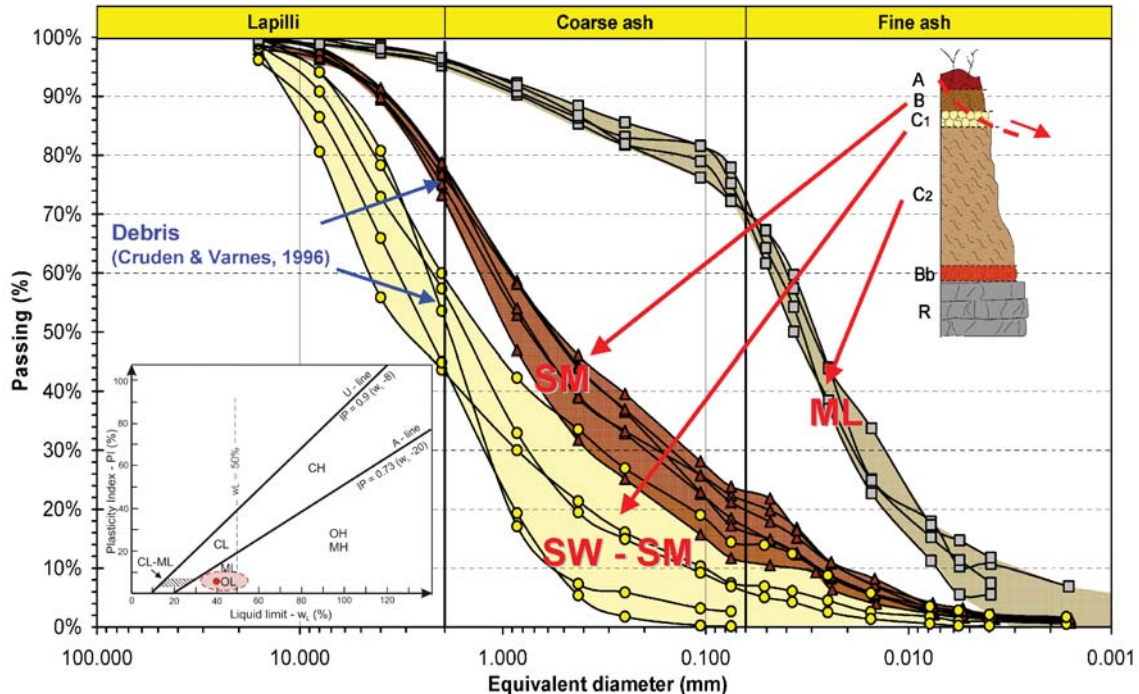


Fig. 4 - Caratterizzazione delle proprietà indice utilizzate dal sistema internazionale USCS. I differenti simboli sono così riferiti: triangolo marrone all'orizzonte B; cerchio giallo all'orizzonte C₁; quadrato grigio all'orizzonte C₂. Le fasce ombreggiate rappresentano i fusi granulometrici. In basso a sinistra, la caratterizzazione dei campioni degli orizzonti B e C₂ nella carta di plasticità di Casagrande, dove il valore medio ed i limiti di variazione sono rispettivamente indicati con il pallino rosso e con l'ellisse ombreggiata. Le classi granulometriche sono riferite a quelle dei depositi piroclastici (SCHMIDT, 1981) - Characterization of the soil index properties according to the international USCS system. The different symbols are so defined: brown triangle to the B horizon; yellow circle to the C₁ horizon; grey square to the C₂ horizon. Shaded areas represent the ranges of grain size curves. Lower left, the characterization of samples from B and C₂ horizons with the Casagrande plasticity chart, where the average value and the limits of variation are respectively indicated by the red dot and by the shadowed ellipse. The grain size classes are referred to those of the pyroclastic deposits (SCHMIDT, 1981)

granulometrico abbastanza ristretto, che si estende dal campo delle ghiaie (25% in media) a quello dei limi (20% in media) (SM). L'orizzonte C₁, costituito da ceneri grossolane e lapilli pomicei, e subordinatamente scoriacei, ha un fuso granulometrico più ampio del precedente, estendendosi anch'esso dal campo delle ghiaie (45% in media) a quello dei limi (10% in media) (SW-SM); ciò evidenzia, soprattutto per alcuni campioni, il rimaneggiamento subito dopo la deposizione sul versante. L'orizzonte C₂, costituito dalle cineriti compatte, è caratterizzato da un fuso granulometrico molto ristretto che è principalmente compreso nei campi dei limi (65% in media) e delle sabbie (25% in media) e solo subordinatamente, in quello delle ghiaie e delle argille (5% in media) (ML). I limiti di consistenza stimati sulla frazione fine (passante al N. 40 ASTM) sono caratterizzati da un limite di liquidità (w_L) variabile nell'intervallo 30% - 55%, con un valore medio pari a circa 40%, mentre da un indice di plasticità (IP) variabile tra 1% e 10%, con un valore medio di circa 5%.

In accordo alle summenzionate caratteristiche, le terre di origine piroclastica coinvolte nelle frane iniziali possono essere classificate come *debris* (CRUDEN & VARNES, 1996) o *debris* (IP < 5%) - *earth* (IP > 5%) (HUNGR *et alii*, 2001), considerando trascurabile il contributo dell'orizzonte C₂.

age) to the silt (20% average) (SM). The horizon C₁, constituted of coarse ash and pumiceous lapilli, has a wider grain size range, going from the gravel (45% average) to the silt (10% average) (SW-SM), which confirms, especially for some samples, the reworking effect after the deposition on the slope. The horizon C₂, constituted of compact ash has a very narrow range of grain size curves that is included in the field of the silts (65% average) and of the sands (25% average), and only subordinately in that of the gravels and clays (5% average respectively) (ML). The consistency limits estimated for the finer fraction (passing at the N 40 ASTM) are characterised by a variation of the liquid limit (w_L) in the range 30% - 55%, with an average value of about 40%, while a plasticity index (PI) ranging from 1% to 10%, with an average value of about 5%.

According with the abovementioned characteristics, soils of pyroclastic origin involved in the initial landslides can be classified as *debris* (CRUDEN & VARNES, 1996) or *debris* (PI < 5%) - *earth* (PI > 5%) (HUNGR *et al.*, 2001), excluding the involvement of the horizon C₂.

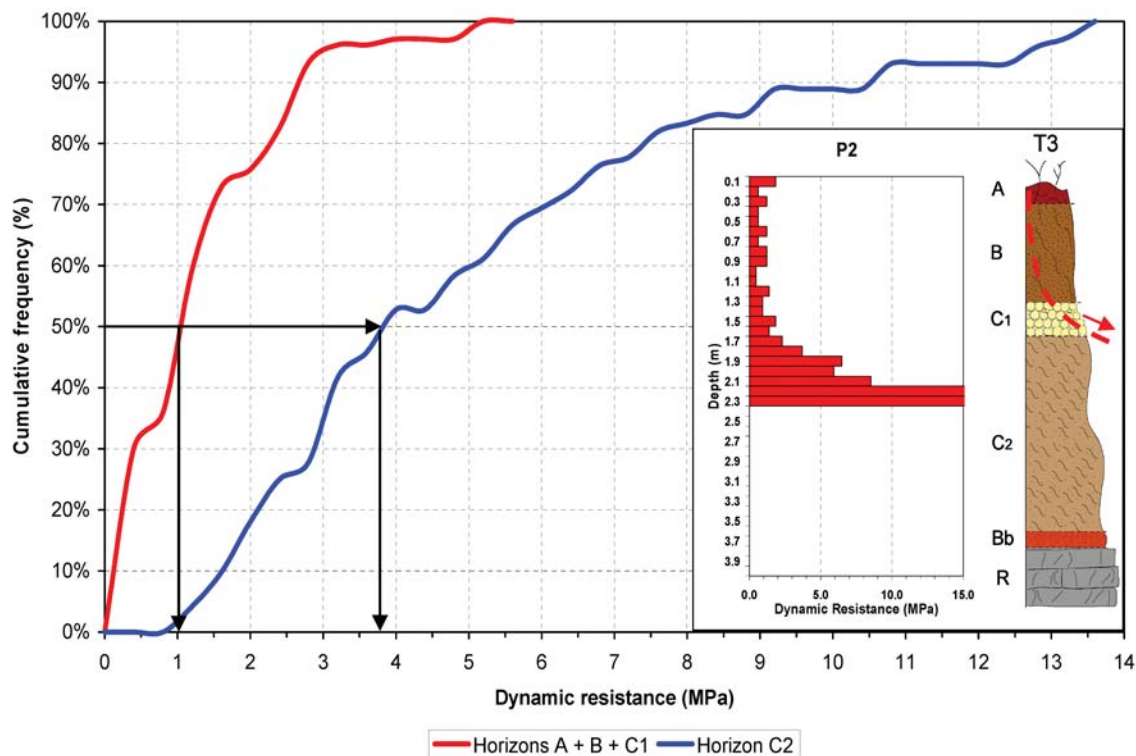


Fig. 5 - Curve di frequenza cumulata della resistenza dinamica (R), stimata mediante la formula degli olandesi (SANGLERAT, 1972; CASSAN, 1988), riferite all'insieme dei dati penetrometrici per gli orizzonti A + B + C₁ (108 dati), coinvolti nei debris slides iniziali (curva rossa), e per l'orizzonte C₂ (82 dati), non coinvolto nei fenomeni franosi iniziali (curva blu). Nel riquadro, confronto tra la stratigrafia della trincea T3 e la corrispondente penetrometria P2.
 - Cumulated frequency curves of the penetration resistance (R), estimated by means of the Dutch Formula (SANGLERAT, 1972; CASSAN, 1988), for the whole set of penetrometric data of the sum of the horizons A + B + C₁ (108 data), involved in the initial debris slides (red curve), and for horizon C₂ (82 data), not involved in the initial instability (blue curve). In the square is showed the match between the test pit T3 and the corresponding penetrometer test P2

Orizzonte / Horizon	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	e	n
B	8.92	10.69	13.92	1.86	0.65
C ₁	8.14	11.08	14.41	2.04	0.67
C ₂	12.55	17.35	17.45	0.96	0.49

Tab. 1 - Proprietà fisiche delle terre piroclastiche determinate sui campioni prelevati negli orizzonti B, C₁ e C₂
 - Physical properties of pyroclastic soils determined on the samples belonging to horizons B, C₁ e C₂

I risultati delle prove penetrometriche, espressi in termini di resistenza dinamica (R), sono stati correlati alle prove SPT da cui è stato stimato qualitativamente il grado di addensamento dei depositi (TERZAGHI & PECK, 1948), assumendo gli stessi come equivalenti ad una sabbia. L'insieme degli orizzonti superficiali A + B + C₁ è omogeneamente caratterizzato da bassi valori di resistenza dinamica (mediana 1.1 MPa), quindi da un grado di addensamento definibile molto sciolto. Differentemente, l'orizzonte C₂, corrispondente alle cineriti compatte, si caratterizza con valori più elevati di resistenza dinamica (mediana 3.8 MPa) e, quindi, definibile da sciolto a mediamente addensato (Fig. 5). Ciò trova riscontro anche nelle proprietà fisiche ed indice dei depositi, determinate mediante prove di laboratorio (Tab. 1), ed il particolare nell'indice dei vuoti (e) che è circa dop-

The results of the penetrometric tests, expressed in terms of penetration resistance (R) have been correlated to the SPT test, from which the relative density of the deposits has been qualitatively estimated (TERZAGHI & PECK, 1948), assuming the equivalence of the tested soils with sands. The sum of the shallow horizons A + B + C₁, result approximately homogeneous in relation to the penetration resistance and generally characterized by lower values (median 1.1 MPa), corresponding to the very loose relative density degree. Differently the C₂ horizon corresponding to the compact ash, is distinguished by higher values of the penetration resistance (median 3.8 MPa), and equivalent to the medium relative density degree (Fig. 5). This is also confirmed by the physical and index properties of pyroclastic soils, determined by laboratory tests (Tab. 1), and particularly

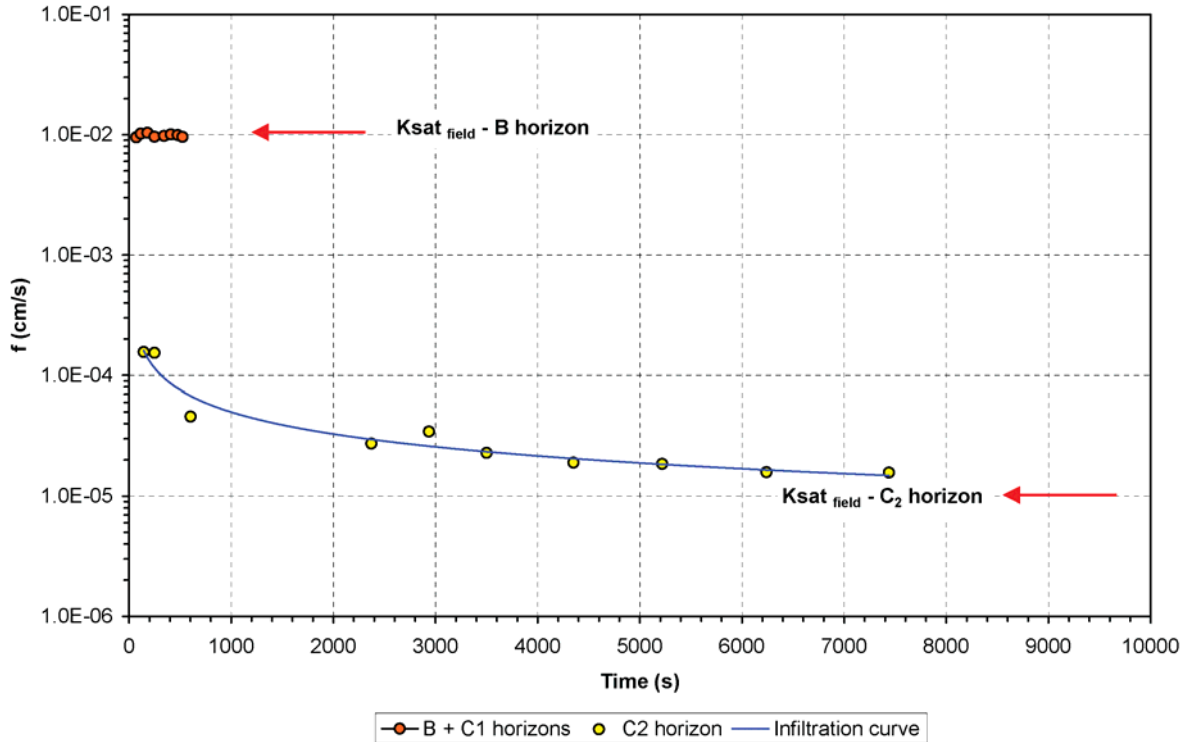


Fig. 6 - Test di infiltrazione in foro effettuati mediante il permeametro a carico costante di Amoozegar. La differente durata delle prove è stata condizionata dal volume d'acqua contenuto nel dispositivo (12 dm^3) e dalla diversa capacità di infiltrazione dei terreni
 - Borehole permeability tests carried out by means of the constant hydraulic head Amoozegar permeameter. The different duration of infiltration tests has been influenced by the volume of available water in the device (12 dm^3) and by the different infiltration capacity of the soils

pio negli orizzonti B e C_1 , rispetto a quello delle cineriti (C_2). In mancanza di specifiche relazioni empiriche, le stime della resistenza dinamica possono essere considerate solo indicativamente rappresentative della resistenza al taglio dei terreni, che è quindi da ritenersi notevolmente più bassa negli orizzonti superficiali rispetto a quello delle cineriti (C_2).

Anche dal punto di vista delle caratteristiche idrauliche, i test di permeabilità, effettuati in foro con il permeametro a carico costante di Amoozegar, confermano il differente comportamento dell'insieme degli orizzonti superficiali coinvolti nei fenomeni franosi ed il sottostante orizzonte cineritico (Fig. 6). In particolare, i test effettuati sull'orizzonte B evidenziano un valore della conducibilità idraulica di campo a saturazione ($K_{\text{sat field}}$) pari a circa $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, mostrando un fenomeno transitorio di flusso insaturo/saturo molto rapido e trascurabile. Ciò è in accordo con la granulometria grossolana e con lo scarso grado di addensamento che caratterizzano i depositi in questo orizzonte. Diversamente, i test effettuati sul sottostante orizzonte cineritico mostrano un valore della capacità di infiltrazione (f) decrescente nel tempo, fino ad un valore asintotico di circa $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, che corrisponde alla conducibilità idraulica di campo a saturazione ($K_{\text{sat field}}$). Questo comportamento è attribuibile al flusso in condizioni non sature, tipico dei terreni a granulometria fine ed, in particolare, di quelli limosi. I test, sebbene non effettuati anche sugli orizzonti A e C_1 , indicano

from the void ratio (e) that for the B and C_1 horizons is double respect the C_2 one. Because of the lack of specific empirical correlations, the obtained estimation of the penetration resistance can give qualitative indications about the shear strength values of the tested soils that are to be considered lower in the shallow horizons with respect to the deeper ashy horizon (C_2).

As it regards the hydraulic conductivity characterisation, the constant head borehole permeability tests have confirmed the different behaviour of the sum of the surficial horizons, involved in the instability, and the underlying ash horizon (Fig. 6). In particular, the tests conducted in the B horizon give a saturated field hydraulic conductivity value ($K_{\text{sat field}}$) of about $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, with very rapid and negligible transient from unsaturated to saturated flow that can be correlated with the coarse grain size and the low relative density of soils in this horizon. On the contrary, the test conducted in the ashy layer showed a strong decrease in infiltration capacity (f) over the time, till an asymptotic value of about $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ that can be assumed as the saturated field hydraulic conductivity value ($K_{\text{sat field}}$). This behaviour is caused from the unsaturated flow condition that typically is relevant in the fine grain size soils, and, in particular, in the silts. Even if the A and C_1 horizons have not been tested, the obtained results allow inferring a marked difference in the permeability between surface horizons and the

una marcata differenza nella permeabilità tra gli orizzonti superficiali e quello cineritico, estesa fino a circa 3 ordini di grandezza.

Al fine di analizzare le condizioni idrogeologiche che hanno favorito la formazione di una presunta falda sospesa negli orizzonti superficiali interessati dall'instabilità, è stato ampliato il volume significativo di indagine estendendolo fino alla parete di lava, posizionata a distanze comprese tra 5 e 15 m a monte dei coronamenti delle frane investigate. Infatti, per la localizzazione molto prossima al piede della parete rocciosa, non sussiste, a monte delle frane, un bacino idrografico di rilevanti dimensioni e, quindi, non sussistono le condizioni tipiche per la formazione di un deflusso sub-superficiale (HEWLETT, 1961; HEWLETT & HIBBERT, 1963; WHIPKEY, 1965; KIRKBY, 1978) in cui le concavità morfologiche (*hollow*) hanno l'effetto di amplificazione dei livelli piezometrici (DIETRICH *et alii*, 1986). Pertanto, le indagini superficiali sono state estese anche alla caratterizzazione dei sistemi di discontinuità che pervadono l'ammasso roccioso lavico.

I rilievi delle discontinuità sono stati effettuati su tre superfici rocciose affioranti (Fig. 2) con la tecnica del campionamento a finestra (PAHL, 1981; ISRM, 1978). L'analisi statistica delle discontinuità rilevate (70 dati complessivamente rilevati, su circa 300 m²) evidenzia la presenza dei seguenti raggruppamenti principali (Fig. 7), approssimativamente coincidenti con quelli analizzati da DI NOCERA *et alii* (2007): tre sistemi di discontinuità subverticali con rispettiva direzione di 5°N (J1), 50°N (J2) e 100°N (J3); un sistema di discontinuità con immersione 300°N ed inclinazione 30° (J4); un layering magmatico con immersione 135° ed inclinazione di 30° (L).

deeper ash horizon of about 3 magnitude orders.

In order to understand the hydrogeological conditions that possibly led to the formation of a temporary perched groundwater in the surficial horizons involved in the instability, the investigated volume has been extended up to the outcropping lava rock mass, located at a distance variable from 5 to 15 m upstream the landslide crowns. In fact, because of the position of the landslides tops very close to the feet of the lava cliff, a significant hydrographic basin cannot be identified. Consequently the conditions for the formation of a throughflow (HEWLETT, 1961; HEWLETT & HIBBERT, 1963; WHIPKEY, 1965; KIRKBY, 1978), in which the hollows act an amplifying effect on the piezometric levels (DIETRICH *et alii*, 1986), are not verified. Thus the surveys have been extended also to the characterization of the discontinuity systems of the lava rock mass.

The measurements on the outcropping discontinuities have been effectuated, in three surveying areas (Fig. 2) with the window sampling technique (PAHL, 1981; ISRM, 1978). The statistical analysis of the surveyed discontinuities (70 data on 300 m² of total surface) shows the existence of the following main sets (Fig. 7), approximately correspondent to the ones analysed by DI NOCERA *et al.* (2007): three sub-vertical discontinuity system, with direction of, respectively 5°N (J1), 50°N (J2) e 100°N (J3); a discontinuity system with dip direction 300°N, and dipping 30° (J4); a magmatic layering with dip direction 135° and dipping 30° (L).

According to the attitude of the sub-vertical lava cliff, with height ranging from 5 to 25 m, and dipping about 20°N, the presence of

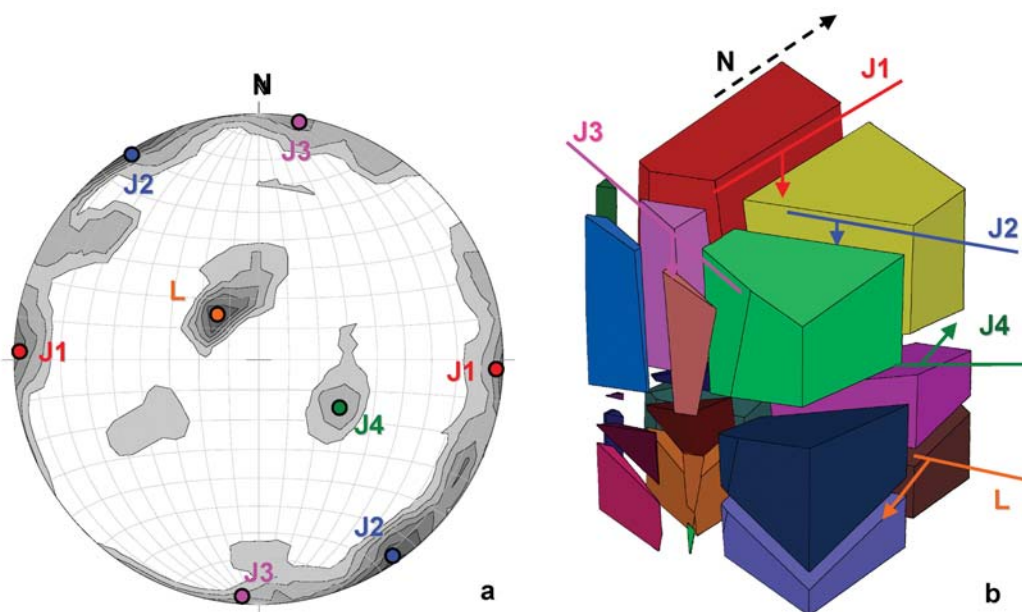


Fig. 7 - a) densità dei poli delle discontinuità rilevate su tre stazioni di rilevamento (Fig. 2) con il metodo del campionamento a finestra (PAHL, 1981; ISRM, 1978); rappresentazione esplosa dell'ammasso roccioso lavico. La parete rocciosa lavica, sub-verticale, ha un'immersione generale a 20°N
 - a) pole density of the discontinuity surveyed in the three stations (Fig. 2) using the window sampling technique (PAHL, 1981; ISRM, 1978); b) exploded representation of the lava rock-mass. The sub-vertical lava cliff has a dip direction of 20°N

Per l'orientazione generale della parete di lava, alta da 5 a 25 m, immergente a circa 20°N e sub-verticale, la coesistenza di tre sistemi sub-verticali (J1-J3) con uno basale a basso angolo (J4) crea una condizione favorevole all'instabilità di blocchi per ribaltamento, oltre che per scivolamento di cunei (MATHESON, 1983). Tale condizione si esplica con la notevole apertura delle discontinuità dei tre sistemi sub-verticali che varia da alcuni mm fino a 100 mm e, pertanto, definibili quasi sempre beanti e caratterizzati dall'assenza di riempimento. In molti casi è possibile osservare che l'apertura tende ad aumentare verso l'alto, evidenziando l'incremento della trazione dovuta all'incipiente ribaltamento. Tale condizione strutturale conferisce all'ammasso un'elevata permeabilità verticale (Kz) e, quindi, la possibilità di drenare e convogliare in maniera concentrata acque di ruscellamento, o di deflusso sub-superficiale, provenienti dalle parti soprastanti la parete stessa.

I dati delle discontinuità sono stati ulteriormente elaborati con le relazioni proposte da PALMSTROM (1996) per la stima del conteggio volumetrico dei giunti (Jv) e di altri parametri utili ai fini della caratterizzazione dell'ammasso roccioso quali la spaziatura media tra le discontinuità (S) ed il volume medio dei blocchi (V). Come previsto nel caso di rilievi su superfici, mediante il campionamento a finestra, il conteggio volumetrico dei giunti (wJd) è stato ricavato come media ponderata in base all'angolo di intersezione tra le discontinuità e la superficie di affioramento (δ) e con riferimento all'intera superficie (A), mediante la nota relazione:

$$wJd = \frac{1}{\sqrt{A}} \sum \frac{1}{\sin \delta_i}$$

La stima del conteggio volumetrico dei giunti ha quindi consentito di stimare la spaziatura media dei giunti ed il volume medio dei blocchi (Tab. 2).

Stazione / Station	Area	wJD		S	V
	(m ²)	(ad.)	(descrizione/ description)	(m)	(m ³)
A	146	5.1	moderatamente giuntato- moderately jointed	0.7	0.3
B	90	1.7	debolmente giuntato lowly jointed	2	3.0
C	75	3.4	moderatamente giuntato moderately jointed	1	0.9

Tab. 2 - Stima del conteggio volumetrico dei giunti (wJd) e determinazione della spaziatura media delle discontinuità e del volume dei blocchi mediante relazioni empiriche (PALMSTROM, 1996). La localizzazione delle stazioni di misura è mostrata nella Fig. 2
 - Weighted volumetric joint count (wJd) and estimation of the average discontinuities spacing and blocks volume using empirical correlations (PALMSTROM, 1996). The location of the measuring stations is showed in the Fig. 2

INTERPRETAZIONE DEI MECCANISMI DI INNESCO E DELLA SUSCETTIBILITÀ A FRANARE

La caratterizzazione dei terreni di copertura e di substrato, in combinazione con i rilievi topografici, hanno permesso la ricostruzione di modelli geologico-tecnici, sintetizzati in sezioni longitudinali coincidenti con l'asse mediano delle frane, e trasversali (Figg. 9 e 10), e di interpretarne i meccanismi di innesco. In particolare, dal-

three high dip angle systems (J1-J3) and a basal one with low dip angle (J4), create a suitable condition for the instability of rock blocks, both by toppling and by wedge sliding (MATHESON, 1983). Such a condition can be also recognised by the high opening of the discontinuities, ranging from few millimeters up to 100 mm that can be considered in the majority of the cases as open and not filled. In several cases the width of the openings has been observed to increase in the vertical direction, thus highlighting the traction due to the incipient toppling. Such structural setting gives to the rock mass a high vertical permeability (Kz), and consequently a high capability to drain and outflow punctually the runoff and the throughflow coming from the upper part of the rocky cliff itself.

The data of discontinuities have been further elaborated, using the empirical correlations proposed by PALMSTROM (1996) between the volumetric joint count (Jv) and several very useful parameters for the characterisation of the rock mass, like the discontinuities spacing (S) and the average volume of the blocks (V). As in the case of surface surveys, by means of the window sampling technique, the volumetric joint count is obtained as a weighted average (wJd), based on the intersection angle between the discontinuities and the slope surface (δ) and with reference to the whole surveyed surface (A) using the following well known expression:

The weighted volumetric joint count allowed the evaluation of the average discontinuities spacing and the average volume of the blocks (Tab. 2).

INTERPRETATION OF THE TRIGGERING MECHANISMS AND THE LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY

The characterization of the pyroclastic mantle and of the rocky bedrock, matched with the topographic surveys, allowed both the reconstruction of engineering geological models, which have been synthesised in the axial and transversal sections of each landslide (Figs. 9 and 10), and the interpretation of the triggering mechanisms.

l'intersezione delle sezioni topografiche trasversali con quella assiale è stato estrapolato lo spessore della coltre dei terreni piroclastici nel piano della sezione assiale. L'interpretazione dei dati mette in risalto i seguenti punti, fondamentali per la comprensione dei meccanismi di innesco delle frane.

Dall'analisi geometrica del profilo topografico, si identifica chiaramente nelle zone di innesco uno scorrimento iniziale (*debris slide*) caratterizzato da una superficie di scorrimento circolare con raggio di curvatura variabile da circa 16 m, per le frane 2 e 5, a circa 28 m, per la frana 4. La tangente alla superficie di scorrimento nel tratto terminale è inclinata circa 37°, per la frana 2, e circa 40° per le frane 4 e 5.

La componente rotazionale del movimento è ben identificabile anche da tracce di sollevamento e debordamento della massa spostata, attualmente rilevabili sui fianchi delle frane in corrispondenza della fine delle superfici di scorrimento stesse.

Gli scorrimenti iniziali hanno una lunghezza, stimata rispetto alla corda della superficie di scorrimento, variabile dai 12 ai 18 m e coinvolgono un volume di circa 90 m³ per la frana 2, 180 m³ per la frana 4 e 45 m³ per la frana 5.

La ricostruzione stratigrafica, proiettata nella sezione assiale delle frane, consente di identificare il coinvolgimento, nello scorrimento iniziale, dell'insieme degli orizzonti superficiali A + B + C₁, essendo la superficie di scorrimento tangente all'interfaccia tra gli orizzonti C₁ e C₂. Solo più a valle della fine della superficie di scorrimento, anche l'orizzonte delle cineriti è stato coinvolto nel movimento fino all'emersione del paleosuolo basale e del substrato roccioso, localmente costituito dalle scorie saldate. Ciò è giustificabile in base al cambiamento di cinematico da scorrimento (*debris slide*) a flusso non incanalato (*debris avalanche*), pertanto caratterizzato da elevato potere erosivo. Tra gli altri elementi a favore di questa interpretazione, è l'elevata regolarità della superficie di scorrimento nel settore interessato dallo scorrimento e, invece, la marcata irregolarità nel settore interessato dal cinematico da flusso, dovuta anche al condizionamento esercitato dalle asperità del substrato roccioso. Il coinvolgimento, nello scorrimento iniziale, solo degli orizzonti soprastanti quello cineritico trova una chiara giustificazione nella notevole differenza nella resistenza dinamica dei terreni (SANGLERAT, 1972), ovvero nella resistenza al taglio degli stessi, nonché nelle condizioni favorevoli alla formazione di una falda sospesa in concomitanza di un evento pluviometrico eccezionale, connessa con l'elevato contrasto di conducibilità idraulica.

Tracce di circolazione idrica sub-superficiale, simultanea all'innesco o immediatamente successiva allo stesso, sono rilevabili, nella scarpata principale delle frane, sotto forma di erosione per rivoli (*rill erosion*), le cui sorgenti sono riscontrabili al limite tra gli orizzonti superficiali A + B + C₁ e quello C₂ delle cineriti (Fig. 8). Ciò giustifica l'ipotesi di un flusso sub-superficiale saturo proveniente da monte anziché dal substrato, attraverso un eventuale recapito concentrato localizzato nell'ambito della zona di innesco. Quest'ultima ipotesi, peraltro, appare essere fortemente contrastata dalla bassa permeabilità dell'orizzonte di cineriti che ricopre il substrato stesso e ne

In particular, from the intersection of transversal and longitudinal sections it has been possible to extrapolate the thickness of the pyroclastic cover in the plane of the axial section. The interpretation of data, highlights the following points that are fundamental for the comprehension of the landslide triggering mechanisms.

From the geometrical analysis of the topographic profile, a circular sliding surface can be clearly identified in the debris slides initiation areas, whose radiuses range from 16 m, for the landslide 2 and 5, to about 28 m, for the landslide 4. The inclination of sliding surface in its terminal part is about 37° for the landslide 2, and about 40° for the landslides 4 and 5.

The rotational component of the movement can be identified also from the rising and the overflowing traces of the sliding mass, still visible on the flanks in correspondence of the end of the sliding surface.

The initial debris slides have a length, estimated respecting to the sliding surface cord, ranging from 12 to 18 m, and involving a volume of about 90 m³, for landslide 2, 180 m³ for landslide 4 and 45 m³ for the landslide 5.

The stratigraphic reconstruction, projected in the landslide axial sections, allows to recognise that the sum of the horizons A, B and C₁ have been involved in the initial debris slides, being the sliding surface tangent to the interface between C₁ - C₂ horizons. Only after the end of the sliding surface, the underlying ashy horizon is involved leading to the outcropping of the basal paleosoil and of the volcanic bedrock, locally constituted by welded scoria. This can be justified by the change of kinematics from slide to avalanche, being the latter characterized by a strong erosive action on the underlying soils. Several elements confirm the previous interpretation, like the high regularity of the surface in the sliding area that contrasts with the marked irregularity in the sector in which the flow kinematics took place, also due to the roughness with the bedrock interface. The involvement in the initial debris slide of the first three horizons only, is attributable both to the high differences in penetration resistance (SANGLERAT, 1972), namely in shear strength, markedly lower than that the C₂ horizon, and to the high difference in hydraulic conductivity that lead to the formation of a perched groundwater flow during an extreme rainfall event.

Traces of throughflow, occurred simultaneously or successively to the landslide triggering, have been noted in the landslides main scarps forming erosion rills whose sources can be recognized at the interface between A + B + C₁ and C₂ horizons (Fig. 8). Such observation confirms the occurrence of a saturated throughflow coming from up slope and not from the bedrock through an eventual punctual outlet located in the initiation area. In fact, the latter hypothesis appears to be in contrast with the low permeability of the basal ashy horizon that covers and fills the discontinuities of the bedrock.

For the particular local hydrogeomorphological setting, during the exceptional rainfall event the throughflow in the initiation areas could have been also fed by a flow coming from the sub-vertical



Fig. 8 - Tracce di erosione per rivoli rilevate nella scarpata principale della frana 5 (linee tratteggiate blu). I punti sorgente (cerchi rossi) sono localizzati al contatto tra gli orizzonti A + B + C1 e l'orizzonte C2
 - Rill erosion traces surveyed in the main scarp of the fifth landslide (dashed blue lines). The source points (red circles) are located at the contact between A + B + C1 and C2 horizons

riempie i sistemi di discontinuità.

Per la particolare condizione idrogeomorfologica locale, il deflusso sub-superficiale proveniente da monte può essere stato alimentato, in concomitanza dell'evento pluviometrico eccezionale, da un flusso proveniente dai sistemi di discontinuità sub-verticali che pervadono il soprastante ammasso roccioso lavico che, ruscellando al piede (e, quindi, successivamente infiltrandosi) e/o travasando lateralmente, attraverso gli orizzonti superficiali più permeabili, ha consentito, negli stessi, la formazione di una falda sospesa. Per il ricoprimento dell'ammasso lavico da parte di depositi piroclastici, con una condizione idrogeologica simile a quella riscontrata a valle della parete stessa, la circolazione idrica nella rete di discontinuità potrebbe essere alimentata da sorgenti temporanee posizionate alla sommità della parete, laddove si verifica la terminazione verso valle degli orizzonti più permeabili su quello cineritico. Per l'alimentazione della falda sospesa nei terreni piroclastici, posti alla base della parete rocciosa, non può essere escluso il ruolo del ruscellamento diretto sulla superficie di roccia che, benché limitato dalla condizione di sub-verticalità, potrebbe non essere stato trascurabile nel caso di pioggia con vento e di elevata intensità.

In base alle osservazioni effettuate sulle sezioni assiali e trasversali, la specifica localizzazione degli scorrimenti iniziali appare essere giustificata dal più elevato spessore delle coperture piroclastiche in corrispondenza delle zone di innesco e dalla concomitante morfologia caratterizzata da valori critici dell'angolo di pendio. Detta condizione è localmente riconducibile ad una forma convessa del pendio (ASCIONE *et alii*, 2007; IOVINO *et alii*, 2007), così come dimostrato dai profili assiali e trasversali delle frane, caratterizzati da un progressivo incremento dell'angolo di pendio verso valle, a partire dalle zone soprastanti le sommità (Figg. 9 e 10). In tale condizione morfologica, cui compete una progressiva riduzione dello spessore della coltre piroclastica (verificata dai risultati delle indagini di campo), i terreni contenuti nelle zone di innesco erano maggiormente soggetti all'instabi-

open discontinuities of the lava rock mass, that rilling (and subsequently infiltrating) and/or laterally draining into the high permeable surficial horizons, allowed in the latter the formation of perched groundwater flow. Because of the presence of a pyroclastic cover on the top of the lava cliff, with a hydrogeological setting similar to that found at the foot of the cliff itself, the hydraulic circulation in the system of fractures could have been fed by temporary springs, set at the top of the cliff, where the pinch out of the high permeability horizons on the ashy one occurs. In order to explain the formation of a perched groundwater flow in the pyroclastic mantle, the role of direct runoff on the rocky cliff can not be neglected especially in case of high intensity rainfall and with the action of the wind, even if limited by the sub-vertical condition.

Starting from the observations derived from the axial and transversal sections of landslides, the specific localisation of the initial debris slides can be related to the locally higher thickness of the pyroclastic soils and to the concomitant critical slope angle values. Such condition is also recognisable in a convex morphology (ASCIONE *et al.*, 2007; IOVINO *et al.*, 2007), as it is well demonstrated by axial and transversal profiles of landslides showing a downstream progressive increase in slope angle, starting from the zones located above the tops of the landslides (Figs. 9 and 10). Taking this morphological condition into account, which implies a progressive downward decreasing thickness of pyroclastic mantle (confirmed by field measurements), an unstable condition can be identified in the downward discontinuity of the mantle. Moreover, even if considering the transversal direction, the presence of higher thickness in the initiation areas can be attributed both to the interface irregularities with the rocky bedrock, due to structural and/or morphoselection factors, and to the differential action of the denudational processes that locally preserved higher thickness of pyroclastic soils. About the structural factors, the intersections of

lità per l'esistenza di una discontinuità della coltre verso valle. Inoltre, in senso trasversale al pendio, la presenza di maggiori spessori di depositi piroclastici nelle zone di innesco è attribuibile al ruolo esercitato dalle irregolarità del substrato roccioso, attribuibile a fattori strutturali e/o di morfoselezione, e dalla differente azione dei processi denudazionali che, agendo in maniera disomogenea sul versante, hanno consentito la conservazione nelle zone di innesco di maggiori spessori di terreni piroclastici. In merito ai fattori strutturali, anche l'intersezione dei principali sistemi di discontinuità ha determinato l'irregolarità, in senso laterale, della morfologia del substrato roccioso che ha potuto favorire localmente la conservazione di maggiori spessori di depositi piroclastici sciolti di copertura. Infine, il differente comportamento morfoselettivo tra le lave e le sottostanti scorie saldate sembra aver determinato nella fascia di contatto le condizioni morfologiche per un maggiore accumulo di terreni piroclastici.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

I meccanismi di innesco e le condizioni di suscettibilità identificati per le frane accadute al Monte di Vezzi il 30 aprile 2006 rendono questi fenomeni assimilabili a quelli che tipicamente interessano le coperture piroclastiche che ammantano i versanti carbonatici peri-vesuviani, dei Monti di Sarno, Lattari e di Salerno. Infatti, anche per queste frane superficiali, sebbene impostate su un substrato differente, la ricostruzione dei modelli geologico-tecnici nelle aree di innesco (CROSTA & DAL NEGRO, 2003; CALCATERRA & SANTO, 2004; GUIDA, 2003; CASCINI *et alii*, 2005; DE VITA *et alii*, 2006a; 2006b) ha evidenziato che l'instabilità ha coinvolto una sequenza di terreni di origine piroclastica, rappresentata dall'insieme degli orizzonti A (Pt) + B (SM) + C (lapilli pomicei; SW-GW-GP), con conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}) variabile da 10^1 a 10^{-2} cm/s, separata dal substrato carbonatico da un paleosuolo, Bb (SM), con conducibilità idraulica variabile da 10^{-3} a 10^{-5} cm/s. Analogamente, lo scorrimento iniziale è caratterizzato da una superficie di taglio che interessa solo parzialmente il sottostante orizzonte a bassa permeabilità; quest'ultimo viene successivamente coinvolto per erosione, in concomitanza del cambio di cinematismo da scorrimento a flusso, fino alla sua completa abrasione e, quindi, al conseguente affioramento del substrato carbonatico. Il coinvolgimento degli orizzonti superficiali nell'instabilità iniziale può essere giustificato, anche in questi casi, dalla minore resistenza al taglio degli stessi, attribuibile al basso grado di addensamento. Il meccanismo di innesco è attribuibile alla formazione di una falda sospesa occasionale i cui effetti destabilizzanti si amplificano puntualmente, in relazione alla concentrazione del deflusso sub-superficiale che comporta l'incremento localizzato delle pressioni neutre. Ciò può essere indotto da motivi topografici e/o stratigrafici, questi ultimi principalmente identificabili nella chiusura verso valle degli orizzonti di lapilli pomicei, che causa una brusca riduzione della trasmissività idraulica della coltre piroclastica (DE VITA *et alii*, 2006b). Ovviamente, le suddette condizioni consentono l'innesco

the principal discontinuity sets have produced lateral variations of the bedrock morphology that can favour the local preservation of pyroclastic soils with higher thickness. Moreover, the different morphoselection behaviour between the lava and the underlying welded scoria seems to determine in the contact zone the morphologic conditions favourable to thicker accumulation of pyroclastic soils.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The triggering mechanisms and the susceptibility conditions identified for the landslides occurred at the Mount di Vezzi on the April 30th, 2006, allow to consider these phenomena as similar to those that typically involve the pyroclastic overburdens covering the peri-vesuvian carbonate slopes of Sarno, Lattari and Salerno Mountain ranges. In fact, even if these landslides occur in a geological condition characterized by a different bedrock, the reconstruction of the engineering geological model in the initiation areas (CROSTA & DAL NEGRO, 2003; CALCATERRA & SANTO, 2004; GUIDA, 2003; CASCINI *et alii*, 2005; DE VITA *et alii*, 2006a; 2006b) proves that landslides involve a series of pyroclastic origin soils analogously represented by the sum of A (Pt) + B (SM) + C (pumiceous lapilli; SW-GW-GP) horizons, with saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) in the range 10^1 - 10^{-2} cm/s, separated from the bedrock by a paleosoil, Bb (SM), with saturated hydraulic conductivity ranging from 10^{-3} to 10^{-5} cm/s. Likewise the initial slides are characterized by a rupture surface that only partially crosses the interface with the underlying low hydraulic conductivity horizon. The latter is involved only later on, in correspondence of the change in the landslide kinematics from sliding to flow, till its complete abrasion leading to the carbonate bedrock outcropping. The shallow horizons are involved in the initial instability also in this case, because of the low value of the shear strength due to the lower relative density of the deposit, and to the formation of a temporary perched groundwater flow. The instability effects of throughflow can be locally amplified both by the topographic and stratigraphic conditions basically recognisable in the pinch out of C horizon (DE VITA *et alii*, 2006b), that can determine a local concentration of flow and the increase in pore pressure, due to the reduction of the hydraulic transmissivity. Obviously the abovementioned conditions led to the landslide triggering only where slope angle and soil thickness are critical for the stability.

Regarding the localization of the initial instability areas in the ridge-foothill morphological system, the landslides of the April

del fenomeno franoso iniziale solo laddove l'angolo di pendio e lo spessore della coltre assumo valori critici per la stabilità.

Anche per ciò che riguarda la localizzazione delle aree di innesco nel sistema crinale-fondovalle, le frane del Monte di Vezzi del 30 aprile 2006 hanno una relazione rispetto alle discontinuità morfologiche naturali, provocate dalla morfoselezione o dall'assetto strutturale del substrato roccioso, del tutto simile alle principali casistiche nelle quali si verificano le frane nelle coperture piroclastiche dei versanti peri-vesuviani (CELICO & GUADAGNO, 1998; GUIDA, 2003; CASCINI *et alii*, 2005; DI CRESCENZO & SANTO, 2005; GUADAGNO *et alii*, 2005). Infatti, come discusso in precedenza, la seconda, quarta e quinta frana sono localizzate a breve distanza dal piede della parete rocciosa, mentre la terza frana si è innescata alla sommità della stessa, coinvolgendo, con uno scorrimento rotazionale, un volume molto ridotto di terreni piroclastici posizionati al bordo superiore. L'innescò, in entrambe le condizioni morfologiche, può essere giustificato dalla precaria stabilità dei terreni piroclastici, acquisita localmente per la presenza di una condizione critica di angolo di pendio e di spessore, in cui il deflusso sub-superficiale ha avuto un ruolo determinante nell'innescò, soprattutto per le condizioni idrogeologiche (ridotta trasmissività idraulica della coltre piroclastica) che hanno localmente favorito l'incremento delle pressioni neutre (Fig. 11). Per le caratteristiche idrogeologiche discusse in precedenza, il deflusso sub-superficiale può teoricamente esistere, in condizioni di saturazione, in entrambe le situazioni morfologiche e, comunque, laddove su un versante sussista la condizione di uno strato superficiale a permeabilità relativamente elevata su uno sottostante a minore permeabilità e qualora si verificano piogge con intensità superiore alla conducibilità idraulica dell'orizzonte a minore permeabilità.

Infine, per ciò che riguarda l'applicabilità dei modelli concettuali finora discussi alla redazione di una cartografia della suscettibilità a franare ed alla programmazione di opere di difesa attiva, sono da evidenziare due aspetti fondamentali, confermati dalle indagini di campo. Il primo, riguarda la localizzazione puntuale, fino alla scala metrica, delle condizioni critiche all'innescò delle frane, riconoscibili in una combinazione di spessore e di angolo di pendio, che non sono identificabili se non con un approccio tridimensionale al problema. Infatti, nel caso specifico delle frane del Monte di Vezzi, così come verificato in numerosi altri riguardanti frane sviluppatesi nei versanti peri-vesuviani, il materiale piroclastico franato è confinato lateralmente da una risalita del substrato roccioso, raggiungendo nelle aree di innesco lo spessore maggiore.

I suddetti elementi concettuali inducono alla formulazione di un modello di distribuzione dei terreni piroclastici da caduta sui versanti, in copertura di un substrato roccioso, in progressiva denudazione (a partire dalla fase di deposizione) e con una generale relazione inversa tra lo spessore e l'angolo di pendio (DE VITA *et alii*, 2006a; 2006b) che, alla scala di dettaglio, mostra variabilità laterali attribuibili all'azione differenziale dei processi erosivi e/o indotte dalle irre-

30th, 2006, at the Mount di Vezzi have a relationship respect to the morphological natural discontinuities, caused by morphoselection or by the structural setting of the bedrock, very similar to the more recurrent casuistry of landslides occurring in the pyroclastic cover in the peri-vesuvian area (CELICO & GUADAGNO, 1998; GUIDA, 2003; CASCINI *et alii*, 2005; DI CRESCENZO & SANTO, 2005; GUADAGNO *et alii*, 2005). This is confirmed, as previously discussed, by the very close location of the second, fourth and fifth landslide to the foot of the rocky cliff, while the third initiated on the top of the cliff, involving a very little volume of pyroclastic soils with a rotational slide too. The trigger, with respect to both the cases, can be explained by a local condition due to a critical slope angle and soil thickness values in which the occasional throughflow played a determinant role, mainly for the hydrogeological conditions (reduced hydraulic transmissivity of the pyroclastic mantle) that have induced the local increase of the pore pressure (Fig. 11). The discussed hydrogeological features of the pyroclastic cover can theoretically permit the formation of a saturated throughflow in both the morphological situations, as well as anywhere on a slope in which the overlap of higher permeability onto lower permeability layers exists and if there occur rainfall events with intensity higher than the saturated hydraulic conductivity of the less permeable layer.

Finally, as it concerns the applicability of the presented conceptual models to the distributed landslide susceptibility assessment and to the design of active mitigation works, two main aspects should be taken into account, which have been confirmed by the field surveys. The first is the localization, up to the metric scale, of the most critical landslide susceptibility conditions, namely of a combination of soil thickness and slope angle that are identifiable only through a three-dimensional approach. In fact, in the specific case of the Mount di Vezzi landslides, as well as of several other cases occurred in the peri-vesuvian area, the low volume soil masses depleted by initial slides are laterally confined by the rise of the interface with the bedrock, reaching the higher thickness in the initial instability areas. This observation can be considered as an improvement of a general distribution model of ash-fall pyroclastic soils covering slopes that is characterised by progressive denudation phenomena (started till the deposition) and by a general inverse relationship between thickness and slope angle (DE VITA *et alii*, 2006a; 2006b). This general model shows, at a detailed scale, lateral variabilities in pyroclastic soil thickness due to the differential action of denudational processes and/or to irregularities of the interface with the bedrock, which imply the preservation, even if very localised, of relatively higher soil thickness, therefore more susceptible to instability. Based on the previous concept, the second critical aspect, regarding the applicability of distributed instability models, is the difficulty to take into account of the aforesaid high spatial variability. In fact, one of the main aspects that could limit the detailed-scale applicability of such models seems to be the "unpredictable" buried mor-

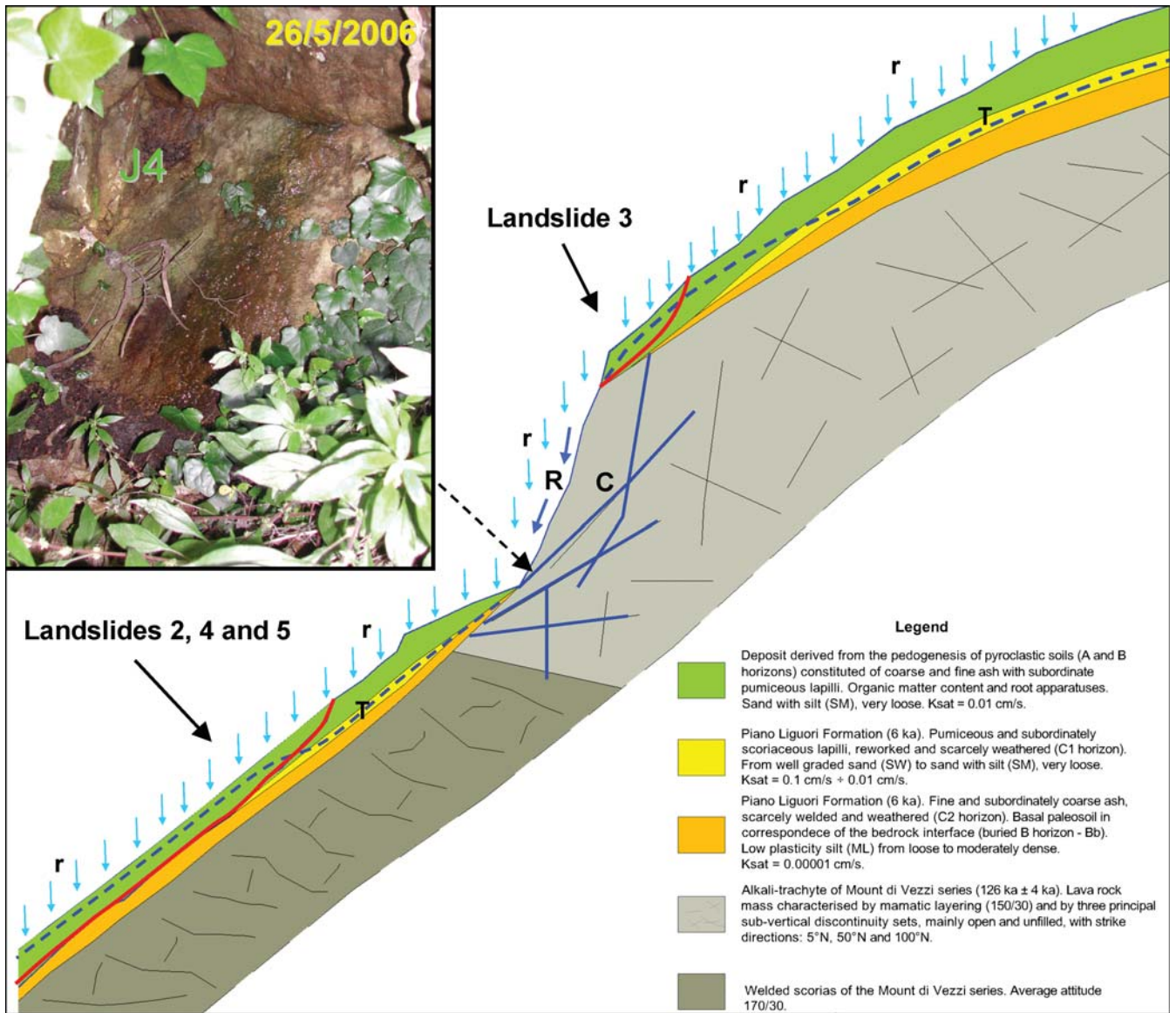


Fig. 11 - Modello idrogeomorfologico concettuale dell'innescio delle frane iniziali alla sommità (frana 3) ed alla base (frane 2, 4 e 5) della parete di lava. L'incremento dell'angolo di pendio verso valle causa la riduzione dello spessore della coltre piroclastica (orizzonti A + B + C₁) e della sua trasmissività idraulica, in particolare per la terminazione verso valle dell'orizzonte C₁. A ciò consegue, per il moto di filtrazione laterale, l'incremento critico delle pressioni neutre. Simbologia: r pioggia intensa e prolungata; R ruscellamento sulla parete rocciosa; C) flusso di acqua canalizzato nei sistemi di discontinuità; T) falda sospesa occasionale (throughflow). Nella fotografia è visualizzata una discontinuità, appartenente al sistema J4, che mostrava segni di scorrimento di acqua al 26 maggio 2006

- Conceptual hydrogeomorphological model for the initial landslides at the top (3rd landslide) and at the base (2nd, 4th and 5th landslides) of the lava cliff. The downstream increase of the slope angle induces the reduction of the pyroclastic soil thickness and of its hydraulic transmissivity (A + B + C₁ horizons), particularly due to the pinch out of the C₁ layer, thus the critical increase of pore pressure due to the lateral seepage. Symbols: r) intense and prolonged rainfall; R) runoff on the rocky cliff; C) groundwater flow canalised in the discontinuity systems; T) temporary perched groundwater flow (throughflow). In the photograph, a discontinuity belonging to the J4 set was still dripping on the May 26th, 2006

golarità dell'interfaccia con il substrato. Ciò comporta la conservazione, anche molto localizzata, di depositi di origine piroclastica con spessori relativamente elevati, pertanto maggiormente predisposti all'instabilità. Alla luce di questa constatazione, il secondo aspetto critico riguarda la reale applicabilità, alla scala di dettaglio, di model-

phology of the interface with the bedrock, and the true reliability of topographic data that often, due to accuracy and resolution of usual aerophotogrammetric surveys, do not show the morphological variability existing at the metric scale.

li distribuiti di instabilità che possano tenere conto di queste condizioni di elevata variabilità laterale. Infatti, tra i limiti principali è la non prevedibilità delle morfologie sepolte e la reale rappresentatività dei dati topografici che normalmente, per limiti di accuratezza e di risoluzione dei rilievi aereofotogrammetrici, non evidenziano condizioni di variabilità morfologica esistenti alla scala metrica.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AGI (1977) – *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*.
- AMOOZEGAR A. (1989) - *A compact constant head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone*. Soil Science Society of America Journal, **53**: 1356-1361.
- ASCIONE S., CINQUE A., FRANZA A. & ROMANO P. (2007) - *Il ruolo dei fattori geomorfologici nell'innesco e propagazione delle frane del 30 aprile 2006 sul Monte Vezzi (Ischia, Italia)*. In this issue.
- BARTORELLI U. (1986) – *Topografia*. 2^a edizione. Patron editore, 539 pp.
- BUDETTA P. & DE RISO R. (2004) - *The mobility of some debris flows in pyroclastic deposits of the northwestern Campanian region (southern Italy)*. Bulletin of Engineering Geology and Environment, **63**: 293-302.
- CALCATERRA D. & SANTO A. (2004) - *The January 10, 1997 Pozzano landslide, Sorrento Peninsula, Italy*. Engineering Geology, **75**: 181-200.
- CASCINI L., CUOMO S. & SORBINO L. (2005) – *Flow-like mass movements in pyroclastic soils: remarks on the modelling of the triggering mechanisms*. Rivista italiana di Geotecnica, **4**: 11-31.
- CASSAN M. (1988) - *Les essais in situ en mécanique des sols*. Volume 1 réalisation et interpretation. 2^{ème}.
- CELICO P., GUADAGNO F.M. & VALLARIO A. (1986) - *Proposta di un modello interpretativo per lo studio delle frane nei terreni piroclastici*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **21**: 173-193.
- CELICO P. & GUADAGNO F.M. (1998) - *L'instabilità delle coltri piroclastiche delle dorsali carbonatiche in Campania: attuali conoscenze*. Quaderni di Geologia Applicata, **5-1**: 75-133.
- CENT/TC 341 N 119 E (2003) - *Geotechnical Investigation and Testing - Part 2: Dynamic Probing* edition: 146-151. Eyrolles. Paris.
- CHIESA S., CIVETTA L., DE LUCIA M., ORSI G. & POLI S. (1987) – *Volcanological evolution of the Island of Ischia*. Rend. Acc. Scienze Fis. E Mat., Special Issue “The volcanoclastic rocks of Campania (southern Italy)” P. Di Girolamo editors. Liguori Editore.
- COROMINAS J. (1996) – *The angle of reach as a mobility index for small and large landslides*. Canadian Geotechnical Journal, **33**: 260-271.
- CROSTA G. & DAL NEGRO P. (2003) - *Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **3**: 53-69.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslides Types and Processes*. In: “*Landslides: Investigation and Mitigation*”. Transportation Research Board. National Academy of Sciences.
- DE RISO R. & NOTA D'ELOGIO E. (1973) - *Sulla franosità della zona sud-occidentale della Penisola Sorrentina*. Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata, **12**, Napoli.
- DEL PRETE S. & MELE R. (2006) – *Il contributo delle informazioni storiche per la valutazione della propensione al dissesto nell'isola d'Ischia (Campania)*. Rend. Soc. Geol. It. Nuova Serie, **2**: 29-47.
- DE VITA P., AGRELLO D. & AMBROSINO F. (2006a) - *Landslide susceptibility assessment in ash-fall pyroclastic deposits surrounding Mount Somma-Vesuvius: Application of geophysical surveys for soil thickness mapping*. Journal of Applied Geophysics **59**, 126-139. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.09.001.
- DE VITA P., CELICO P., SINISCALCHI M. & PANZA R. (2006b) – *Distribution, hydrogeological features and landslide hazard of pyroclastic soils on carbonate slopes in the area surrounding Mount Somma-Vesuvius*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1**: 1-24.
- DIETRICH W.E., RENEAU S.L. & WILSON C.J. (1986) - *Hollows, colluvium and landslides in soil-mantled landscapes*. In: *Hillslope processes*, Abrahams, A.D. ed., Allen and Unwin: 361-388.
- DI NOCERA S., MATANO F., ROLANDI G. & ROLANDI M. (2006) - *Contributo sugli aspetti geologici e vulcanologici di M.te Vezzi (Ischia)*. In this issue.
- DI CRESCENZO G. & SANTO A. (2005) - *Debris slides-rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region (Southern Italy): morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility*. Geomorphology, **66**: 255-276
- HEWLETT J.D. & HIBBERT A.R. (1963) - *Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage*. Journal of Geophysical Research, **68**: 1081-1087.
- HEWLETT J.D. (1961) - *Soil flow from steep mountain watersheds*. Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, N. Carolina, U.S. Dept. Agric. – Forest Ser., Station Paper, 132.
- HORTON R.E. (1933) - *The role of infiltration in the hydrological cycle*. American Geophysical Union, Transaction, **14**: 446-460.
- HUCHTHINSON J.N. (1988) - *General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology*. In: Proc., Fifth

ENGINEERING GEOLOGICAL MODELS OF THE INITIAL LANDSLIDES OCCURRED ON THE APRIL 30TH, 2006, AT THE MOUNT DI VEZZI (ISCHIA ISLAND, ITALY)

- International Symposium on Landslides (C. Bonnard Ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1: 3-35.
- HUNGR O., EVANS S.G., BOVIS M.J. & HUCTIONSON J.N. (2001) - *A review of the classification of landslides of flow type*. Environmental and Engineering Geoscience, **7(3)**: 221-238.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM) (1978) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, **15**: 319-368.
- GUADAGNO F.M., FORTE R., REVELLINO P., FIORILLO F. & FOCARETA M. (2005) - *Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: The role of morphological slope discontinuities and the development of failure*. Geomorphology, **66**: 237-254.
- GUIDA D. (2003) - *The role of the zero-order basins in flowslide-debris flow occurrence and recurrence in Campania (Italy)*. Int. Conference on Fast Slope Movements Prediction and Prevention for Risk Mitigation, **I**: 255-262. Napoli.
- JEFFREY R.K. & DEGRAFF J.V. (1996) - *Surface observation and geologic mapping*. In: "Landslides investigation and mitigation" Turner A.K. & Schuster R.L. Eds.
- IOVINO M., PERRIELLO ZAMPELLI S. & SAVANELLI S. (2006) - *The April 30th, 2006, M.Vezzi landslides (Ischia island, Italy) in the context of volcanic soil slides-flows in Campania*. This issue.
- KIRKBY M.J. (1978) - *Hillslope hydrology*. John Wiley & Sons, 389 pp.
- MATHESON G.D. (1983) - *Rock stability assessment in preliminary investigations. Graphical methods*. Department of the Environment, Department of Transport and Road Research Laboratory Report LR 1039.
- MAZZARELLA A. & DE LUISE E. (2007) - *L'evento meteorico del 30 Aprile 2006 ad Ischia*. In this issue.
- MELE R. & DEL PRETE S. (1998) - *Fenomeni di instabilità dei versanti in Tufo Verde di Monte Epomeo (isola d'Ischia-Campania)*. Boll. Soc. Geol. It., **117 (1)**: 93-112.
- PAHL P.J. (1981) - *Estimating the mean length of discontinuity traces*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, **18**: 221-229.
- PAOLETTI V., RAPOLLA A. & SECOMANDI M. (2007) - *The structural setting of the Monte di Vezi area, Ischia Island, derived from geophysical data*. In this issue.
- PALMSTROM A. (1996) - *RMI. A System for Characterising Rock Mass Strength for Use in Rock Engineering*. Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, **1, 2**: 69-108.
- PHILIP J.R. (1957) - *The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution*. Soil Science, **83**: 345-357.
- PIERSON T.C. & COSTA J.E. (1987) - *A rheologic classification of subaerial sediment-water flows*. Geol. Society of America. Reviews in Engineering Geology, **7**: 1-12.
- REVELLINO P., HUNGR O., GUADAGNO F.M. & EVANS G.S. (2004) - *Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy*. Environmental Geology, **45**: 295-311.
- REYNOLDS W.D. & ELRICK D.E. (1986) - *A method for simultaneous in-situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the conductivity-pressure head relationship*. Ground Water Monit. Rev. **6**: 84-95.
- RITTMANN A. & GOTTINI V. (1980) - *L'isola d'Ischia. Geologia*. Bollettino Servizio Geologico It., **101**: 131-274.
- SANGLERAT G. (1972) - *The Penetrometer and Soil Exploration*. Developments in Geotechnical Engineering 1. Elsevier Publishing: New York.
- SCHMIDT R. (1981) - *Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the I.U.G.S. Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Geology, **9**: 41-43.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (1993) - *Soil survey manual*. U.S. Department of Agriculture, **18**: 437 pp.
- TERRIBILE F., DI GENNARO A., ARONNE G., BASILE A., BUONANNO M., MELE G. & VINGIANI S. (2000) - *I suoli delle aree di crisi di Quindici e Sarno: aspetti pedo-geografici in relazione ai fenomeni franosi del 1998*. Quaderni di Geologia Applicata, **7-1**: 81-95.
- TERZAGHI K. & PECK R.B. (1948) - *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, New York: 729 pp.
- USDA (1998) - *Keys to soil taxonomy*. USDA-Nat. Res. Cons. Service, 8th ed.: 328 pp.
- VEZZOLI L. (1988) - *The island of Ischia*. CNR Quaderni de "La Ricerca Scientifica", **114**: 1-122, Roma, Italia.
- WHIPKEY R.Z. (1965) - *Subsurface stormflow from forested slopes*. Bulletin of International Association Science of Hydrology, **10**: 74-85.
- WROTH C.P. & WOOD D.M. (1978) - *The Correlation of Index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soils*. Canadian Geotechnical Journal, **15**, 2: 137-145.
- ZANGAR C.N. (1953) - *Theory and problems of water percolation*. U.S. Bureau Engineering Monograph, 8. U.S. Bureau of Reclamation Denver, CO.

Received October 2006 - Accepted February 2007