

INTERAZIONI TRA CARSIAMO E DEFORMAZIONI GRAVITATIVE PROFONDE DI VERSANTE NELLA GENESI DI SINKHOLES

MARTINO SALVATORE* & PRESTININZI ALBERTO*

*Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Centro di Ricerca C.E.R.I. Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici (Valmontone – RM)

ABSTRACT

La presente nota riporta i risultati relativi allo studio condotto in un'area appenninica complessa, costituita da un sistema piana-versante dove la diffusa presenza di sinkholes, insieme a fenomeni di Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV), impone specifici approfondimenti soprattutto in relazione ai rischi generati da una rilevante presenza antropica. In particolare, viene discusso il ruolo di DGPV sulla genesi di sinkholes in corrispondenza del versante mentre le ricerche relative alla piana sono in corso di elaborazione. Il fenomeno deformativo in oggetto coinvolge integralmente il versante a nord dell'abitato di Pendenza (Rieti) alle pendici del M. Nuria ove sono anche ubicate le Sorgenti del Peschiera che, con una portata media di 18 m³/s, costituiscono una delle più importanti emergenze idriche dell'intero Appennino.

Il caso studiato ha permesso di considerare le possibili interazioni esistenti tra ammassi carbonatici fratturati, filtrazione, carsismo e genesi di sinkholes, nel quadro dell'evoluzione spazio-temporale degli stati tenso-deformativi connessi a fenomeni di DGPV. In particolare, le diffuse evidenze geomorfologiche ed un dettagliato rilievo geomeccanico, supportato da indagini in sito, monitoraggio ed analisi di laboratorio, hanno consentito di descrivere dinamiche e cinematismi del fenomeno gravitativo in atto, portando alla ricostruzione di un modello geologico-evolutivo che è stato validato anche mediante un'analisi numerica effettuata con il codice alle differenze finite FLAC 4.0.

INTRODUZIONE

Nell'Appennino Centrale carbonatico la presenza di fenomeni di deformazione gravitativa profonda di versante (DGPV) è relazionabile alla strutturazione della catena il cui edificio a falde sovrapposte comporta, da un lato, la frequente giustapposizione di litologie con differenti rigidità, quali calcari e flysch, dall'altro la presenza di elementi tettonici risultanti dalla complessa evoluzione dell'orogene, ai quali si deve l'elevato stato di fratturazione degli ammassi, specie in corrispondenza o in prossimità degli elementi tettonici stessi (CAVALLIN et alii, 1987; AMADEI et alii, 1988; CRESCENTI et alii, 1994; CROSTA, 1996). I recenti studi condotti nel Lazio per la perimetrazione delle aree a rischio da frana hanno messo in luce la presenza di numerosi fenomeni gravitativi profondi, soprattutto sui rilievi montuosi del reatino e del frusinate (PRESTININZI, 2000). A fronte di ciò si rende indispensabile la conoscenza e la descrizione di tali fenomeni che non può prescindere dal loro inquadramento in un più ampio contesto geologico-evolutivo, come anche dallo studio e dall'analisi delle loro dinamiche e dei loro cinematismi.

Nella presente nota viene discusso un caso di DGPV che coinvolge integralmente il versante a nord dell'abitato di Pendenza (Rieti) alle pendici del M. Nuria, in corrispondenza della Piana di S.Vittorino (Figura 1).

La composizione essenzialmente carbonatica delle rocce affioranti sul versante e la presenza al suo interno di un importante acquifero regionale rendono il caso studiato di specifico interesse ed al contempo rappresentativo di analoghe fenomenologie esistenti



Fig. 1 – Vista panoramica dalla Piana di S.Vittorino delle propaggini sudoccidentali del M.te Nuria.

ti lungo l'intera dorsale appenninica. Infatti, le caratteristiche presentate dal caso studiato consentono di analizzare, in termini di evoluzione spazio-temporale degli stati tenso-deformativi, le possibili interazioni esistenti tra ammassi carbonatici deformati e fratturati, filtrazione, carsismo, ed evoluzione di processi di DGPV. In particolare, il caso studiato pone in risalto le peculiarità relative alla presenza ed evoluzione di forme di tipo sinkhole in relazione con i processi di deformazione gravitativa di ammasso, dimostrando la stretta interazione tra processi di detensionamento concentrato in fasce o nuclei trattivi, filtrazione e carsismo.

Le interazioni tra attività di DGPV e carsismo ipogeo sono state affrontate e discusse dal Settore Geologia Applicata dell'Università "La Sapienza" di Roma (BRUNAMONTE et alii, 1994; MARTINO et alii, 2001; MARTINO et alii, 2004; MAFFEI et alii, 2004), specie in presenza di importanti discontinuità tettoniche o gravitative dell'ammasso, che possono portare alla formazione di depressioni superficiali o pozzi da crollo (sinkholes), comunemente colmati da ingenti quantità di detrito che può essere interessato da fenomeni di asportazione meccanica per flusso sotterraneo selettivo, se le acque di infiltrazione superficiale sono interconnesse con i circuiti carsici profondi (GUERRICCHIO, 1983; BRUNAMONTE et alii, 1994).

1. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA DEL VERSANTE

Il versante oggetto di studio è situato alle propaggini sud-occidentali del M. Nuria, a partire dalla Piana di S.Vittorino fino all'abitato di Pendenza (Rieti) e comprende le Sorgenti del Peschiera, che, con una portata di magra superiore a $15\text{m}^3/\text{s}$, rappresentano attualmente la principale risorsa idropotabile per l'intero Comune di Roma. L'area comprendente la Piana di S.Vittorino, tra le propaggini nordoccidentali del M. Nuria e quelle sudoccidentali dei Monti Reatini, è situata nella "zona d'incontro" (SCARSELLA, 1951) tra dominio pelagico umbro-marchigiano-sabino, dominio neritico laziale-abruzzese e fascia di transizione tra piattaforma e bacino (Figura 2). In corrispondenza del versante in studio (Figura 3) affiorano essenzialmente calcari di margine di piattaforma e di piattaforma interna, appartenenti all'Unità del M. Nuria (CAPORTI

et alii, 1995; CIOTOLI et alii, 2001; BIGI & COSTA PISANI, 2002), riferibili all'intervallo Malm p.p.- Cretacico inferiore p.p. ed in particolare:

- Calcari ad Echinidi e Coralli (Malm p.p.) – mudstone e grainstone da avana a grigiastri, stratificati in strati medi che talvolta presentano orizzonti massivi con bancate di qualche metro di spessore. L'ambiente di sedimentazione al quale sono riferibili è quello di margine della piattaforma carbonatica.
- Calcari a Coralli e Diceratidi (Malm sup.) – grainstone e rudstone, raramente packstone, clastici e bioclastici (coralli, idrozoi, resti di diceratidi ecc.), da avana ad avana scuro, in strati medi e spessi, talvolta massivi. Tali calcari presentano frequenti intercalazioni di livelli ricristallizzati e sono attribuibili ad un ambiente deposizionale di margine di piattaforma.
- Calcari a Birdseyes (Cretacico inf. p.p.) – wackestone e mudstone con intercalazioni di grainstone e packstone (abbondanti alla base). Gli elementi costituenti sono dati da intraclasti, da subangolosi ad arrotondati, e da ooidi e bioclasti (gasteropodi, frammenti di echinidi, coralli ecc.). A tratti, a scala metrica, sono riconoscibili sequenze shallowing-upward, frequenti strutture da disseccamento, subordinati mudstone avana grigiastri e breccie di emersione. L'ambiente di sedimentazione è quello di piattaforma interna.

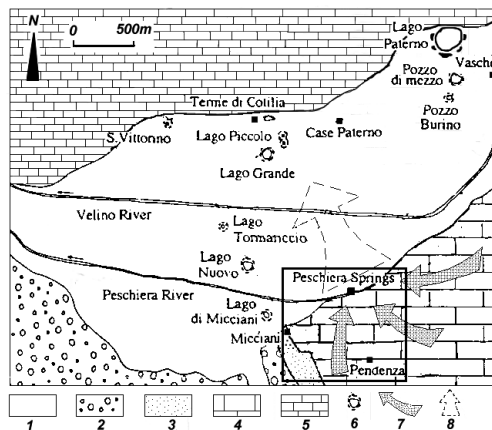


Fig. 2 - Schema delle depressioni colmate da laghetti nella Piana di S.Vittorino (Rieti – Italia): 1) depositi alluvionali e detritici; 2) conglomerati in facies di alluvial fan; 3) flysch; 4) successione carbonatica Laziale-Abruzzese meso-cenozoica; 5) successione di transizione Umbro-Sabina meso-cenozoica; 6) pozzi di collasso; 7) acquifero carbonatico: schematizzazione del flusso convergente verso le Sorgenti del Fiume Peschiera; 8) acquifero carbonatico: schematizzazione del flusso nel bedrock della piana. Nel riquadro l'area del versante di Pendenza riportata in dettaglio in Figura 3.

L'assetto strutturale dei litotipi presenti sul versante è monoclinale, con direzione degli strati circa EW con immersione a nord di $30^{\circ} \div 40^{\circ}$.

I Calcari a Coralli e Diceratidi affiorano in tutto il settore occidentale del versante e ad Est sono in contatto tettonico con i Calcari ad Echinidi e Coralli, lungo una faglia ad andamento circa NS. Verso Sud i termini giurassici sono in contatto tettonico con i Calcari a Birdseyes del Cretacico attraverso una faglia passante a nord dell'abitato di Pendenza. Ad Ovest, la faglia Fiamignano-Micciani Auct. (BOSI, 1975; BERTINI et alii, 1986; MARIOTTI & CAPOTORTI, 1988; FACCENNA et alii, 1993; BIGI & COSTA PISANI, 2002) mette a contatto i Calcari a Coralli e Diceratidi con i depositi torbiditici del Miocene sup. costituiti da Flysch arenaceo-pelitico e pelitico-arenaceo comprendente grossi blocchi

di Scaglia detritica (CAPOTORTI & MARIOTTI, 1991; CAPOTORTI et alii, 1995). Un elemento tettonico compressivo, parallelo alla Faglia Fiamignano-Micciani, mette a contatto il Flysch arenaceo-pelitico con i conglomerati della Formazione di Fosso Canalicchio (Pliocene sup. - Pleistocene p.p.) (CIOTOLI et alii, 2001).

Lungo il versante sono diffusamente presenti accumuli di depositi residuali (terre rosse) connessi ai processi di dissoluzione carsica del calcare affiorante (Figura 3). Tali depositi colmano depressioni, testate di vallecole a fondo piatto (anche ad alta quota – Est di Pendenza) e sinkholes. Significativa è anche la presenza di grosse conoidi e falde di detrito di versante costituite da accumuli perlopiù grossolani con clasti spigolosi ed eterometrici generalmente ben gradati in senso longitudinale.

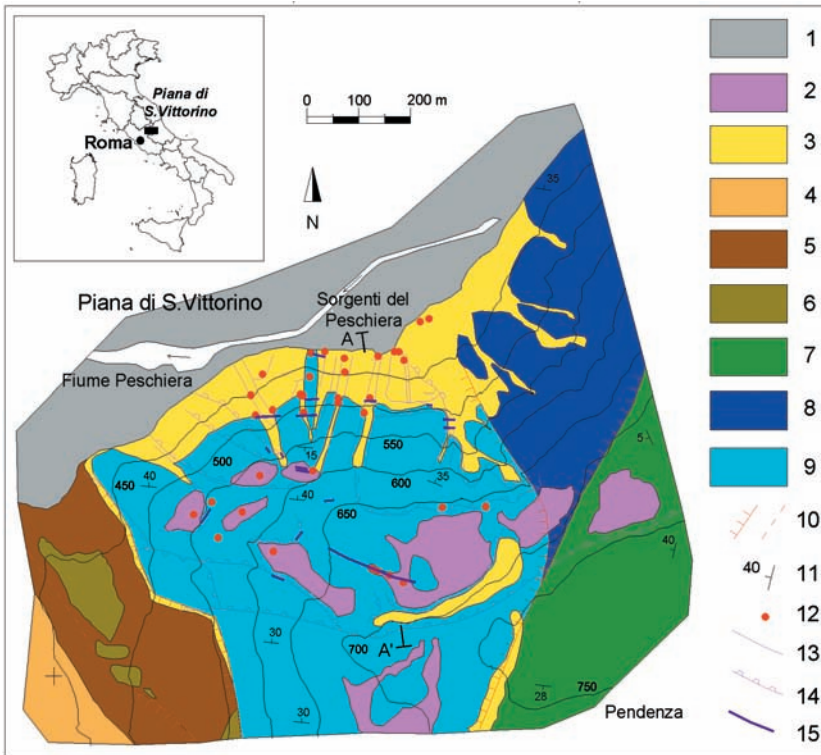


Fig. 3 – Schema geologico del versante a nord di Pendenza con i principali elementi geomorfologici: 1) alluvioni; 2) terre rosse; 3) detrito di versante; 4) Formazione di Fosso Canalicchio; 5) Flysch arenaceo-pelitico; 6) Scaglia detritica 7) Calcari a Birdseyes; 8) Calcari a Coralli e Diceratidi; 9) Calcari ad Echinidi e Coralli; 10) faglia (tratteggiata se presunta); 11) giacitura degli strati; 12) sinkhole; 13) scarpata con dislivello minore di 5 m; 14) scarpata con dislivello maggiore di 5 m; 15) frattura di trazione.

Un contributo significativo al rilevamento geomorfologico di dettaglio è stato fornito dall'analisi di profili digitali ottenuti lungo il versante in esame, dai quali si sono ricavati profili di inclinazione (inclinazione in funzione della quota) (Figura 4); dall'analisi di tali profili risulta una differenziazione tra il settore di Valle Stura ed il settore di Costa Cattera, rispettivamente ad ovest ed ad est del contatto tettonico tra Calcari a Coralli e Diceratidi e Calcari a Echinidi e Coralli, in relazione ad un'evidente diversificazione della convessità delle forme del rilievo. La morfologia meno marcatamente convessa presentata dal settore di Valle Stura rispetto a quello di Costa Cattera (Figure 4b, 4c) si asso-

cia alla presenza di numerosi disturbi nei profili di inclinazione, ben correlabili con scarpate e linee di trincea esistenti in questo settore di versante. Contrariamente, il settore di Costa Cattera presenta una convessità più regolare, i cui disturbi possono essere riferiti alla presenza di valloni molto incisi nei quali vanno accumulandosi detriti di versante che alimentano i coni detritici coalescenti e dunque le falde di detrito. Lungo tutti i profili di inclinazione analizzati, con particolare chiarezza nel settore di Valle Stura, è possibile individuare alla sommità del versante, tra 700 e 750 m di quota, la scarpata principale che sblocca una paleosuperficie i cui lembi sono attualmente riconoscibili ad ovest dell'abitato di Pendenza. Infine, il profilo realizzato nella porzione più occidentale del versante (profilo I), rivela una morfologia marcatamente concava in corrispondenza dei settori di affioramento del flysch miocenico (Figura 4c).

Molto rappresentate sull'intero versante sono le scarpate (Figura 3), i cui dislivelli variano da meno di 5 m a più di 10 m; tali scarpate sono disposte tanto in senso longitudinale quanto in senso trasversale rispetto al versante. Le scarpate di maggiore

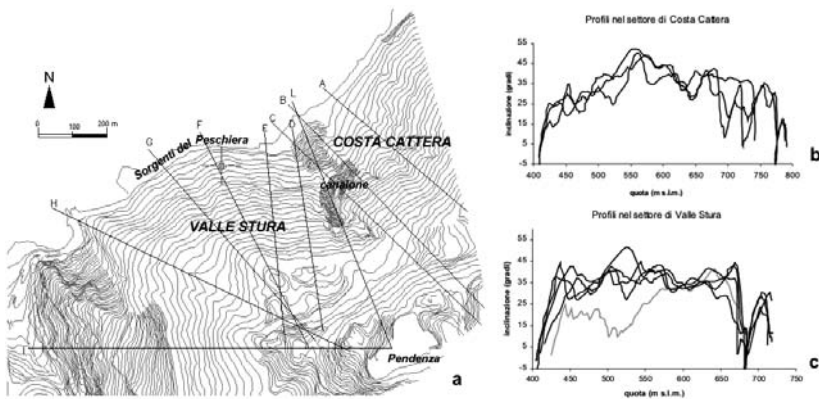


Fig. 4 – Analisi dei profili digitali di inclinazione: a) tracce dei profili, b) profili relativi al settore di Costa Cattera, c) profili relativi al settore di Valle Stura (in grigio il profilo I) (da MARTINO et alii, 2004).

acclività e dislivello (> 10 m) si ritrovano essenzialmente nei settori di monte del versante, al di sopra dei 650 m di quota s.l.m., ed hanno un'orientazione perlopiù trasversale, mentre scarpate di dislivello compreso tra i 5 m ed i 10 m sono abbondantemente rappresentate a mezza costa con orientazioni tanto longitudinali che trasversali. Scarpate con dislivello minore di 5 m delimitano tipicamente le trincee longitudinali ben rappresentate a meno di 600 m di quota; alla base delle scarpate di trincea si ritrovano a luoghi evidenze di recenti movimenti. Le trincee sono generalmente colmate da detrito grossolano ed eterometrico che alimenta un'estesa falda di detrito di base e, a luoghi, cono di detrito.

Peculiare elemento della morfologia del versante è il "canalone" che separa il settore di Valle Stura da quello di Costa Cattera; tale "canalone," bordato da pareti acclivi con dislivello dell'ordine dei 10m e scarpate soggette a fenomeni di crollo e locali scorriimenti rototraslazionali, ospita anche un cono di detrito di ampiezza pari a circa 100 m al piede e 30 m all'apice e lunghezza di circa 250 m.



Fig. 5 – Esempi di sinkholes osservabili sul versante a nord di Pendenza.

Di particolare interesse appare la presenza sull'intero versante di numerose depressioni e sinkholes aventi dimensioni in pianta variabili da meno di 5 m a circa 15 m e profondità variabili da 0.5 m a circa 9 m. La loro localizzazione è generalmente a valle delle principali scarpate trasversali o all'interno delle trincee (Figure 4, 5). In corrispondenza dell'intera Piana di S. Vittorino sono presenti "pozzi di collasso" (Figura 2) la cui genesi è fortemente influenzata sia dai carichi idraulici dovuti all'acquifero carbonatico sia alle acque mineralizzate di circuiti profondi che trovano nelle discontinuità tettoniche del substrato carbonatico vie preferenziali di risalita (CIOTOU et alii, 2001); mentre la presente nota riporta i risultati di studi già condotti riguardo ai sinkholes del versante di Pendenza, i processi che regolano la genesi dei "pozzi di collasso" della Piana di S.Vittorino sono ancora in fase di studio da parte del gruppo di ricerca del C.E.R.I.. Da un'analisi morfometrica, la forma dei sinkholes rilevati in corrispondenza del versante di Pendenza risulta variabile da circolare a subcircolare, con un graduale passaggio da forme a piatto e a scodella fino a forme a imbuto e a pozzo, ben correlabile, in generale, con l'aumento delle dimensioni medie; ciò consente di riconoscere un'evoluzione per approfondimento delle forme esaminate (Figura 6). Nelle forme più approfondite, sono riconoscibili evidenze di cedimento del fondo, attribuibili a fenomeni di crollo di cavità sotterranee. Inoltre, la presenza di riempimenti essenzialmente grossolani nei sinkholes dalle forme più evolute prova la loro connessione idraulica con il reticolo di fessure e cavità ipogee attraverso un substrato calcareo assorbente per fratturazione e carsificazione, che rende possibile l'asporto idrico delle componenti fini dei depositi di riempimento; i sinkholes dalle forme meno evolute sono, invece, caratterizzati da riempimenti ancora ricchi di depositi residuali (terre rosse) (BRUNAMONTE et alii, 1994).

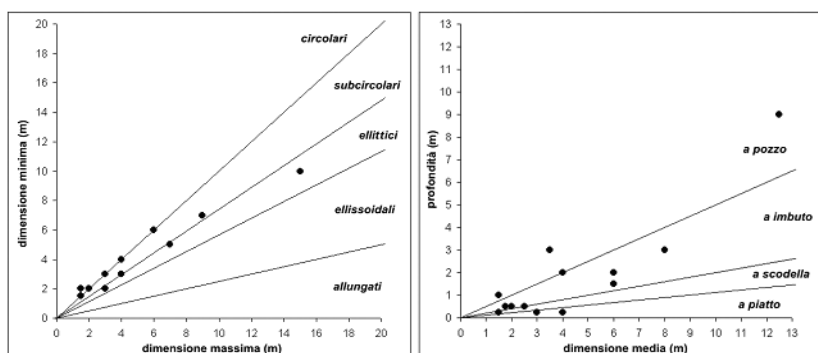


Fig. 6 – Morfometria dei sinkholes rilevati in corrispondenza del versante a nord di Pendenza: dimensioni in pianta (a sinistra) ed in sezione (a destra) (da MARTINO et alii, 2004).

Particolarmente diffuse sono anche fratture da trazione (Figura 3), generalmente prive di riempimento ed a luoghi beanti, e depressioni strette ed allungate in corrispondenza dei settori con maggiori coperture detritiche o di terre rosse, lungo le quali generalmente si localizzano depressioni subcircolari e sinkholes. Alcuni dei sinkholes e delle depressioni si allineano a fratture di trazione; in generale, le forme non circolari presentano direzioni di allungamento circa EW o circa NS, analoghe a quelle delle fratture di trazione o delle trincee.

Le fratture da trazione risultano in parte associate alle scarpate, come loro prosecuzione, come fratture di detensionamento lungo il loro coronamento o come fratture che delimitano blocchi di roccia all'interno dei volumi di versante già isolati dalle scarpate. Nel primo caso, in particolare, le fratture di trazione sono indice di una neoformazione di scarpate o di un arretramento delle scarpate preesistenti. A luoghi, lungo il coronamento delle scarpate già esistenti, si individuano tratti di scarpate secondarie, con dislivello anche superiore ai 5m, che ancora non individuano un unico lineamento continuo ma che ben si distinguono da scarpate di forma subcircolare e di dislivello generalmente inferiore a 5m che delimitano, invece, locali instabilità rototraslative lungo il coronamento o associate a blocchi di roccia già isolati e in contropendenza.

L'insieme delle evidenze fin qui descritte ha reso possibile la distinzione di tre settori del versante per i quali è possibile riconoscere un diverso stadio evolutivo dei processi gravitativi in atto (MARTINO et alii, 2004): un primo settore, comprendente la porzione occidentale del versante e la sua sommità, presenta evidenze di incipiente attività deformativa connesse a forme ancora poco evolute con entità delle deformazioni ancora contenute; un secondo settore, in zona centrale, presenta evidenze di evoluzione matura dei processi di deformazione gravitativa, in tale settore le maggiori deformazioni sono prevalentemente concentrate lungo i principali elementi geomorfologici; un terzo settore, comprendente la porzione orientale del versante, presenta evidenze di evoluzione molto avanzata delle forme, conseguente alla presenza di una diffusa attività deformativa. Nel settore più orientale del versante, inoltre, le caratteristiche morfometriche del "canalone" e la tipologia dei depositi che costituiscono il cono di detrito portano a non escludere la sua formazione per collasso di una porzione del versante come fase ultimale di processi deformativi molto evoluti.

2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEI CALCARI COINVOLTI NELLA DGPV

L'analisi dello stato di fratturazione dell'ammasso ha messo in evidenza l'esistenza di una correlazione tra i sistemi subverticali orientati circa EW e le fratture di trazione rilevate lungo il versante, tra i sistemi subverticali $N45^{\circ}W \pm 5^{\circ}$ e $N45^{\circ}E \pm 10$, le scarpate trasversali (abbondantemente rappresentate a meno di 600 m di quota) e i principali elementi tettonici e, ancora, tra i sistemi subverticali circa NS e le scarpate di trincea. I sistemi secondari $N45^{\circ}W \pm 5^{\circ}$ e $N30^{\circ}E \pm 5^{\circ}$ con immersione di $40^{\circ} \div 50^{\circ}$ a sud possono essere ritenuti coniugati ai precedenti.

Inoltre, dal prelievo di diversi campioni di calcare orientati sono state ottenute carote orientate, secondo tre direzioni tra loro ortogonali per un totale di 765 cm. L'analisi in laboratorio delle carote orientate ha permesso di ricostruire il reticolo di fratture esistente: è stato così possibile individuare 7 sistemi principali di fratture, caratterizzati mediante i valori modali di spaziatura, apertura, indice di rugosità e tipo di riempimento (MARTINO et alii, 2001).

Il confronto con i dati del rilevamento geomeccanico effettuato sugli affioramenti del versante ha permesso di riconoscere, anche alla scala del materiale campionato, i sistemi di fratture subverticali $EW \pm 5^{\circ}$, $NS \pm 5^{\circ}$ e $N45^{\circ}E \pm 5^{\circ}$, già individuati a scala di versante. Dalle misure di giacitura nei campioni e nei provini, risulta, inoltre, ben evidente

la presenza di un sistema di fratture suborizzontale e di un sistema di fratture concordante con la giacitura degli strati, orientato circa EW e immergente a nord di $33^\circ \div 37^\circ$, al quale si associano piani coniugati.

Nel complesso, dunque, esiste una buona corrispondenza tra i risultati dell'analisi geomeccanica alle diverse scale considerate (versante, campione, carota), ben correlabile con l'esistenza sul versante degli elementi geomorfologici e strutturali precedentemente illustrati.

Nel loro insieme, inoltre, i sistemi di discontinuità riconosciuti alle diverse scale possono essere riferiti ad un "sistema cinematico" costituito da superfici di taglio (shear planes) subvertivali, superfici di scorrimento suborizzontali e/o parallele alla stratificazione (opening planes) e superfici complementari a queste ultime. Inoltre, alcune significative evidenze legate alla cinematica delle superfici di rottura presenti nella roccia ed alla cronologia relativa delle loro reciproche dislocazioni come nel caso di discontinuità aperte che appaiono dislocate da successive superfici di taglio consentono di relazionare ad una deformazione pervasiva per mass rock creep (MRC) in ammassi da intensamente fratturati a brecciati in cui le fratture aperte (openings) sono perlopiù coniugate ai piani di taglio (shear plains) (CHIGIRA, 1992).

A supporto delle evidenze geologico-tecniche relative alle forme ed ai processi attivi nel versante sono stati utilizzati dati ottenuti da misure relative all'intervallo 1998-2001 mediante un sistema di monitoraggio tenso-deformativo che ha sfruttato le gallerie del sistema di captazione delle Sorgenti del Peschiera (MARTINO et alii, 2004). L'analisi dei dati di monitoraggio dimostra come l'entità delle deformazioni misurate nei diversi settori all'interno del versante sia correlabile allo stadio di attività dei processi rilevati in superficie e come la concentrazione di deformazioni in zone o fasce di fratturazione all'interno delle gallerie corrisponda alla presenza di importanti elementi in superficie, ed in particolare a fratture di trazione e scarpate. Ciò appare molto evidente nel settore orientale dove gli elevati valori di velocità media (fino ad un massimo di 2.16 mm/anno), di spostamento totale risultante (fino ad un massimo di 8 mm) e di ciclicità delle deformazioni (fino al 70% dello spostamento totale) dimostrano una spiccata deformabilità dell'ammasso ben relazionabile, in questo caso, alla presenza delle scarpate e delle trincee rilevate in superficie.

3. MODELLO GEOLOGICO-EVOLUTIVO ED ANALISI TENSO-DEFORMATIVA

Con l'obiettivo di verificare l'influenza della circolazione sotterranea sull'evoluzione del versante in esame è stata studiata la filtrazione al suo all'interno attraverso la ricostruzione di un modello idrogeologico ed una sua simulazione numerica. L'intero versante studiato è contraddistinto da una condizione idrogeologica molto particolare, poiché costituisce il settore di recapito dell'importante acquifero carbonatico che drena il gruppo Nuria-Velino-Fucino occidentale e Marsica occidentale, appartenente al sistema del Nuria-Velino (BONI et alii, 1986; BONI et alii, 1995). Le principali emergenze di tale acquifero sono concentrate all'interno della Piana di S.Vittorino nel gruppo di sorgenti Peschiera-Canetra, la cui portata complessiva misurata varia da 18 a 21 m³/s circa (BONI et alii, 1986); le sole Sorgenti del Peschiera, localizzate alla base del versante studiato, hanno una portata media di 18 m³/s originariamente restituita lungo un fronte di emergenza lineare di circa 2 km.

Il modello di filtrazione è stato ottenuto mediante un programma di calcolo che utilizza un codice alle differenze finite (ASMWIN 6.0) in grado di ricostruire modelli di acquifero 2D e modelli tridimensionali di acquiferi monostrato (CHIANG et alii, 1997).

Il modello del flusso è stato sempre calibrato con valori piezometrici e di portata connessi con l'esercizio delle opere di captazione (ACEA S.p.A. – comunicazioni personali).

In particolare, gli scarti tra i singoli valori delle portate di taratura e di quelle simulate sono inferiori a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (errore $< 3\%$), mentre gli scarti tra i valori piezometrici di taratura e quelli simulati sono inferiori a 5 m (errore $< 2\%$) (MAFFEI et alii, 2004). La superficie piezometrica ricostruita con la modellazione evidenzia la convergenza del flusso da SE a NW verso un settore di versante esteso per circa 200m ad ovest del "canalone".

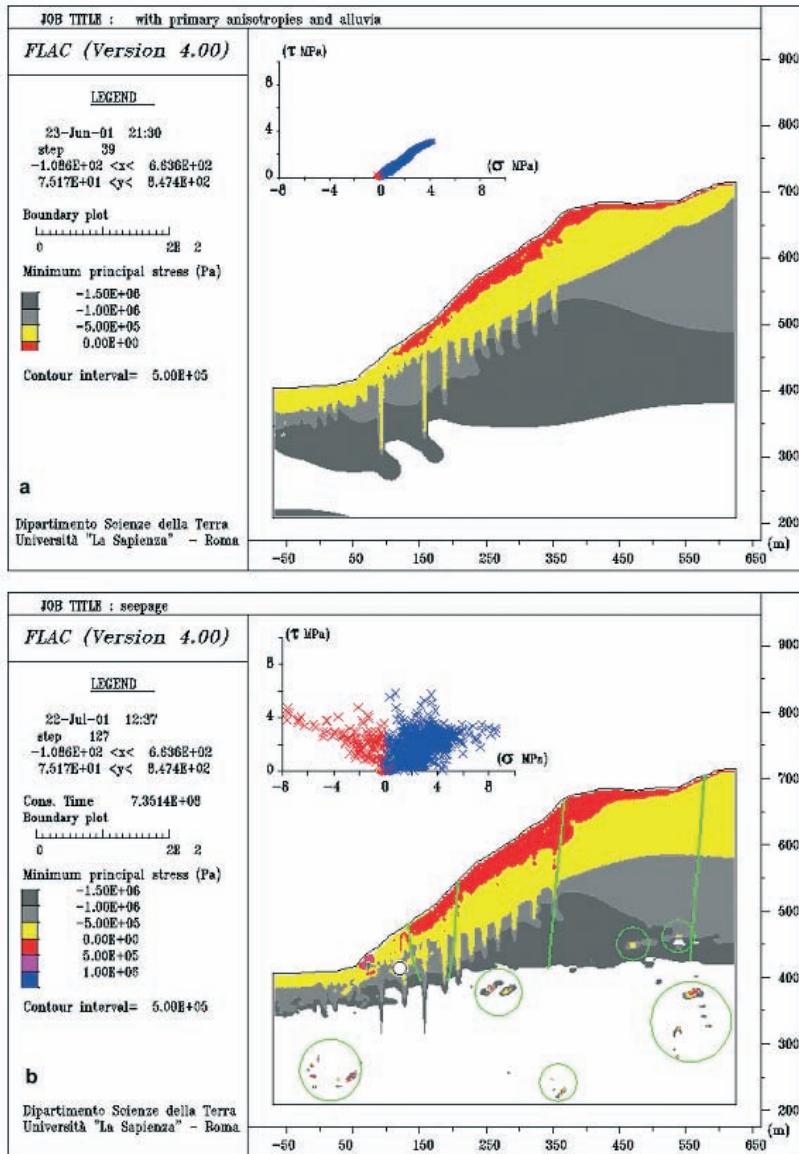


Fig. 7 – Analisi numerica tenso-deformativa lungo la traccia AA' di Figura 3 in assenza (a) ed in presenza (b) di filtrazione; le sollecitazioni di trazione sono positive nella legenda del FLAC e negative sul piano di Mohr; in verde: con le linee sono localizzate le principali scarpate osservabili sul versante, con i cerchi sono circoscritti i settori di enucleazione delle sollecitazioni di trazione sotto falda.

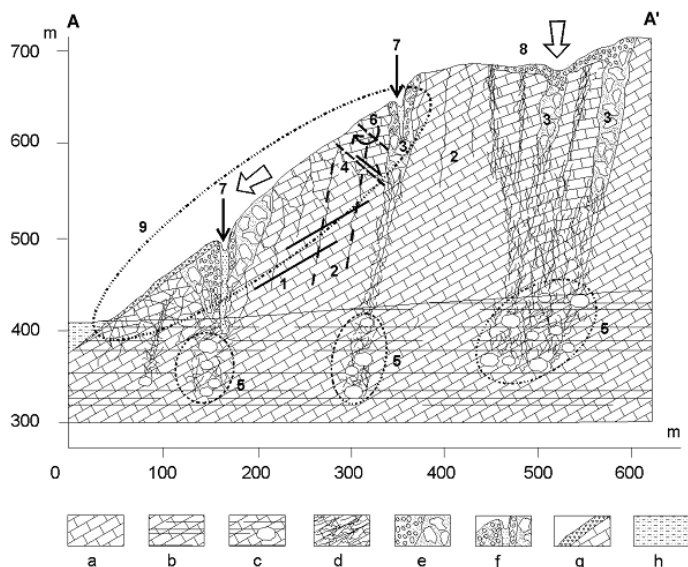


Fig. 9 – Schematizzazione del modello geologico-evolutivo ricostruito per il versante a nord di Pendenza lungo il profilo AA' di Figura 3: la preesistenza di anisotropie primarie (1) nell'ammasso, sotto l'effetto della gravità, porta all'individuazione di fasce di detensionamento subverticali che ereditano anisotropie subverticali secondarie (2) portando progressivamente alla formazione di scarpate trasversali e trincee longitudinali (3); la formazione di piani di taglio coniugati (4) ed i crolli di cavità ipogee sotto falda, la cui formazione per dissoluzione carsica risulta favorita in corrispondenza delle fasce di detensionamento (5), porta all'attivazione di meccanismi di insaccamento a valle delle principali scarpate trasversali (6) in corrispondenza dei quali si vanno a localizzare depressioni che evolvono in sinkholes (7). L'effetto risultante da tali processi è l'intercomunicazione idraulica tra i circuiti di acqua di infiltrazione e l'acquifero carsico con asportazione dei riempimenti più fini dalle depressioni superficiali all'aumentare del loro approfondimento (8). La propagazione dei sistemi di discontinuità subverticali e dei piani coniugati all'interno dell'ammasso comporta una sua mobilizzazione secondo un meccanismo definibile come deformazione di ammasso in blocchi (rock block mass deformation) che vede un incremento delle componenti orizzontali degli spostamenti rispetto alle fasi precedenti della deformazione perlopiù controllate da spostamenti verticali per compensazione superficiale di collassi ipogei (9). Legenda dei simboli: a) calcare, b) calcare sotto falda, c) cavità ipogea sotto falda, d) calcare intensamente fratturato, e) detrito di colmamento di trincee e depressioni, f) sinkhole, g) detrito di versante, h) depositi alluvionali. (modificata da Martino et alii, 2004)

La genesi dell'insaccamento ed i meccanismi di deformazione ad esso associati risultano, dunque, dall'interazione tra discontinuità primarie (piani di strato) e secondarie (piani subverticali), quando quest'ultime assumono un carattere pervasivo all'interno dell'ammasso e non solamente concentrato in corrispondenza delle scarpate trasversali o delle trincee.

Il modello geologico-evolutivo deducibile dall'insieme delle evidenze e delle analisi tenso-deformative (MARTINO et alii, 2004) (Figura 9) si riferisce ad un processo di DGPV per mass rock creep che inizialmente si configura come sackung (ZISCHINSKY, 1969; SAVAGE & VARNES, 1987) ed evolve dapprima in lateral spread e quindi in un processo deformativo definibile come rock-block mass deformation (deformazione di ammasso in blocchi di roccia). Nelle fasi iniziali del processo gravitativo l'ammasso si deforma secondo meccanismi guidati dalle anisotropie primarie e dalla geometria delle forme del versante che,

dall'analisi di profili digitali di inclinazione, risultano marcatamente convesse in corrispondenza dei settori a minore evoluzione dei processi deformativi. La progressiva evoluzione porta alla formazione di fasce subverticali di detensionamento (stress relief) lungo le quali si concentrano sollecitazioni trattive responsabili della formazione di tension cracks, seguite da vere e proprie fratture beanti ed, infine, da scarpate trasversali e trincee longitudinali ("trenches multipli trasversali"). L'approfondimento delle trincee e delle scarpate è connesso alla compensazione in superficie di perdite di volume conseguenti a collassi di vuoti e cavità carsiche profonde, la cui origine è da ricondurre all'interazione tra l'attività dissolutiva delle acque di falda e la concentrazione di sollecitazioni trattive sotto falda in corrispondenza delle fasce di detensionamento dell'ammasso. Come conseguenza di tali processi si giustificano l'origine e l'evoluzione delle depressioni superficiali e dei pozzi di crollo (sinkholes), perlopiù localizzati a valle delle scarpate trasversali o in corrispondenza delle trincee.

CONCLUSIONI

L'insieme degli elementi conoscitivi acquisiti per lo studio della deformazione gravitativa profonda che coinvolge l'intero sistema di versante a nord dell'abitato di Pendenza (Rieti) ha consentito la ricostruzione di dinamiche e cinematismi dei processi agenti sul versante ed ha reso possibile la trasposizione spazio-temporale dei fenomeni agenti in diverse porzioni del versante e riferibili a differenti stadi evolutivi. Una modellazione numerica alle differenze finite è stata impostata secondo criteri simulativi che tengono in particolare considerazione aspetti geologici sia per ciò che riguarda la riproduzione delle disomogenità dell'ammasso (anisotropie e fasce a diverso stato di fratturazione) sia per ciò che riguarda scelta, modalità di attribuzione e valori di parametri geomeccanici.

La ricostruzione del modello geologico-evolutivo del versante e del modello geologico-tecnico, nonché l'impostazione di un significativo modello numerico, si sono rese indispensabili per analizzare gli stretti rapporti esistenti tra assetto strutturale, forme, processi evolutivi e stati tenso-deformativi dell'ammasso in riferimento ai fenomeni di deformazione gravitativa profonda presi in esame.

Inoltre, l'uso congiunto di un modello di filtrazione con restituzione tridimensionale della rete di flusso e di un modello numerico di analisi tenso-deformativa si è rivelato di essenziale importanza nella ricostruzione delle interazioni esistenti tra condizioni di flusso e stati tensionali indotti all'interno dell'ammasso, consentendo, peraltro, la loro distribuzione all'interno del versante ed il confronto con le forme ed i processi rilevati in superficie. Nel caso specifico, la simulazione numerica ha verificato la congruenza del rapporto causa-effetto esistente tra enucleazione di sollecitazioni trattive all'interno dell'ammasso e presenza di flusso, come anche tra diffusione di tali nuclei trattivi nell'ammasso e regimi di filtrazione. Sembra dunque ragionevole che azioni di dissoluzione carsica possano concentrarsi in corrispondenza dei suddetti nuclei di trattivi e che le cavità ipogee, così prodotte, possano costituire volumi di compensazione profonda delle perdite di volume superficiali osservabili in corrispondenza di depressioni e sinkholes; del resto, la localizzazione dei nuclei trattivi ottenuta con l'analisi numerica trova una buona corrispondenza con la localizzazione di trincee trasversali e sinkholes rilevate in superficie.

Analoga ricerca è in corso di svolgimento sulla porzione di piana ove numerosi sono i casi di "pozzi di collasso".

BIBLIOGRAFIA

- AMADEI B., SWOLFS H.S. & SAVAGE W.Z. (1988) – Gravity-induced stresses in stratified rock masses. *Rock Mech. Rock Eng.*, **21**, 1-20.
- BERTINI T., BOSI C., MESSINA P. & SPOSATO A. (1986) – Elementi di tettonica compressiva miocenica nella zona di Borgo S. Pietro (RI) – *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**, 547-553.
- BIGI S. & COSTA PISANI P. (2002) – Structural setting of the Cicolano-M. Calvo area (Central Apennines, Italy). *Boll. Soc. Geol. It., Spec. Vol.*, **1 (2002)**, 141-149.
- BONI C.F., BONO P. & CAPELLI G. (1986) – Schema idrogeologico dell'Italia Centrale. *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**, 991-1012.
- BONI C.F., CAPELLI G. & PETITTA M. (1995) – Carta idrogeologica dell'alta e media Valle del F. Velino - Elaborazione cartografica e stampa SystemCart, Roma.
- BOSI C. (1975) – Osservazioni preliminari su faglie probabilmente attive nell'Appennino Centrale – *Boll. Soc. Geol. It.*, **94**, 827-859.
- BRUNAMONTE F., PRESTININZI A. & ROMAGNOLI C. (1994) – Geomorfologia e caratteri geotecnici dei depositi di terre rosse nelle aree carsiche degli Aurunci Orientali (Lazio Meridionale, Italia) – *Geologica Romana*, **30**, 465-478.
- CAPOTORTI F. & MARIOTTI G. (1991) – Le strutture sabine e della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese nell'area del lago del Salto (RI) – *Studi Geol. Camerti*, vol. spec. 1991/2, CROP 11, 27-31.
- CAPOTORTI F., FUMANTI F. & MARIOTTI G. (1995) – Evoluzione tettonico-sedimentaria e strutturazione del settore di piattaforma carbonatica laziale-abruzzese nell'alta Valle del F. Velino – *Studi Geol. Camerti*, vol. spec. 1995/2, 101-111.
- CAVALLIN A., CRESCENTI U., DRAMIS F., PRESTININZI A. & SORRISO-VALVO M. (1987) – Tipologia e diffusione delle deformazioni gravitative profonde di versante in Italia : prime valutazioni. *Mem. Soc. Geol. It.*, **37**, 241-525.
- CHIANG W., KINZELBACH W., RAUSCH R. (1997) – ASMWIN 6.0: Acquifer Simulation Model for Windows - user manual.
- CHIGIRA M. (1992) – Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep. *Engineering Geology*, **32**, 157-184.
- CIOTOLI G., DI FILIPPO M., NISIO S. & ROMAGNOLI C. (2001) – La Piana di S.Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimici. *Mem. Soc. Geol. It.*, **56**, 297-308.
- CRESCENTI U., DRAMIS F., PRESTININZI A. & SORRISO-VALVO M. (1994) – Deep-seated gravitational slope deformations and large-scale landslides in Italy. Special Volume, International Congress IAEG, Lisbona.
- CROSTA G. (1996) – Landslide, spreading, deep seated gravitational deformation: analysis, examples, problems and proposal. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **19**, 297-313.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICIELLO R. & LOMBARDI S. (1993) – Tectonic setting and sinkholes features: case histories from Western Central Italy. *Quaternary Proceedings*, **3**, 47-56.
- GUERRICCHIO A. (1983) – Carsogenesi e movimenti gravitativi nelle formazioni carbonatiche dell'Appennino Meridionale - *Geol. Appl. Idrogeol.*, **XVII**, II, 161-185.
- HUTCHINSON J.N. (1988) - General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: C. BONNARD (Ed.), *Proc. of the 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne (July 1988)*, Balkema, Rotterdam.
- ITASCA (2000) – FLAC 4.0: Manuale d'uso. Itasca Consulting Group. (licenza: DST – "La Sapienza", Roma - serial number: 213-039-0127-16143).
- MAFFEI A., MARTINO S. & PRESTININZI A. (2004 – in press) – From the geological to the numerical model in the analysis of gravity-induced slope deformations: an example from the Central Apennines (Italy). *Engineering Geology*.
- MARTINO S., PRESTININZI A. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (2001) – Deep seated gravitational

deformations: parameter from laboratory testing for analogical and numerical modelling – Rock Mechanics, a challenge for society (EUROCK 2001 , Espoo - Finland), Balkema ed., 137-142.

MARTINO S., PRESTININZI A. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (2004) – Geological-evolutionary model of a gravity-induced slope deformation in the carbonate central apennines (Italy). Quarterly Journal of Eng. Geol and Hydrog, **37**, 31-47.

PRESTININZI A. (2000) – La valutazione del rischio di frana: metodologie ed applicazioni al territorio della Regione Lazio – Dipartimento di Scienze della Terra “La Sapienza”, Roma, pp. 54.

SAVAGE W.Z. & VARNES D.J. (1987) – Mechanism of gravitational spreading of steep-sided ridges (“sackung”) – Bull. Inter. Ass. Engin. Geol., **35**, 31-36.

SCARSELLA F. (1951) – Sulla zona d’incontro dell’Umbria e dell’Abruzzo – Boll. Soc. Geol. It., **71**, 155-165.

ZISCHINSKY U. (1969) – Uber Sackungen. Rock Mechanics, **1**, 30-52.