

**COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO IN AMMASSI CRISTALLINO-METAMORFICI AFFETTI DA INTENSI PROCESSI DI ALTERAZIONE:
UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEI BACINI DELLE F.RE ALLARO ED AMUSA
(MASSICCO DELLE SERRE, CALABRIA)**

**CONSTRUCTION OF ENGINEERING-GEOLOGY MODEL OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCK MASSES EXPERIENCING DEEP WEATHERING PROCESSES:
EXAMPLE OF APPLICATION
TO THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIF, CALABRIA, ITALY)**

ANNAMARIA PELLEGRINO(*), ALBERTO PRESTININZI(**) & GABRIELE SCARASCIA MUGNOZZA(**)

(*) Autorità di Bacino, Regione Calabria - Via F. Crispi 33, Catanzaro (Italy) - e-mail: an.pellegrino@regcal.it

(**) Dipartimento di Scienze della Terra - Sapienza Università di Roma - P.le A. Moro 5 - 00185 Roma - e-mail: alberto.prestininzi@uniroma1.it; gabriele.scarasciamugnozza@uniroma1.it

RIASSUNTO

Lo studio della morfodinamica dei versanti naturali costituisce un argomento di enorme complessità soprattutto per i differenti aspetti coinvolti, che vanno dall'assetto litologico-strutturale allo stato e tipo di attività di forme e processi, dalla circolazione d'acqua superficiale e profonda alle condizioni climatiche, al comportamento reologico dell'ammasso roccioso coinvolto anche in relazione ai processi di alterazione.

La presente ricerca è finalizzata allo studio della morfodinamica dei versanti in relazione alla presenza di ammassi rocciosi fratturati ed alterati, marcati da una forte anisotropia degli aspetti geomeccanici. Il lavoro è concentrato su un'area situata nella parte sud-orientale della Calabria (Massiccio delle Serre); il sito è localizzato in una vasta area comprensiva del Bacino delle Fiumare Allaro ed Amusa. L'assetto geologico e geomorfologico-strutturale di questa parte della regione è caratterizzato da tre differenti settori dalla linea di costa fino all'entroterra: il settore costiero (depositi plio-pleistocenici), intermedio (terreni Mio-Pliocenici) e quello montano (rocce cristallino-metamorfiche, Paleozoico). In quest'ultimo, graniti e granodioriti vengono a contatto con scisti biotitici e filladici attraverso un'aureola termometamorfica. La morfogenesi dei versanti e le frane superficiali e profonde sono fortemente controllati dal grado di alterazione degli ammassi rocciosi. In particolare, lungo le fasce di contatto termometamorfico, l'intensa alterazione chimica condiziona la morfodinamica dei versanti attraverso profondi processi di argillificazione delle rocce; essi contribuiscono allo sviluppo di Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV).

Il lavoro affronta nella prima parte gli aspetti geologico-strutturali e geomorfologici, lo studio dei profili di alterazione del substrato, nonché la distribuzione areale del grado di alterazione degli ammassi rocciosi. La seconda parte affronta gli aspetti morfologici della DGPV di M. Granieri-Salincriti, le proprietà geomeccaniche delle rocce cristalline in relazione all'influenza di profondi processi geochimici. Inoltre, sono discussi i risultati di un'attività di monitoraggio avviata al fine di definire i cinatismi del fenomeno di DGPV e la franosità attiva e quiescente ad esso associata, e per validare il "modello geologico-evolutivo" del versante.

PAROLE CHIAVE: profondi processi di alterazione, modello geologico-evolutivo, monitoraggio

ABSTRACT

The study of natural slope morphodynamic represents a complex topic involving many different features, among which geological and structural settings, kinds of landform and process activity, groundwater seepage, climatic conditions and rheological behaviour of involved rock masses also related to weathering processes.

Paper deals with an area located in the south-east side of Calabria (Serre Massif); in an area inclusive of Allaro and Amusa Fiumare (RC). The geological and morpho-tectonic sketch of this area is characterized by three different belts from the coastline toward inland: the coastal one (plio-pleistocenec deposits), the medium (Mio-Pliocene terrain) and the mountain one (crystalline-metamorphic rocks, Palaeozoic). In the last one, granite-granodiorite are into contact, through a thermometamorphic aureole, with biotitic schist and phyllitic unit. Slope morphogenesis, shallow and deep landslides are strongly controlled by weathered rock masses. In particular, along the thermometamorphic contact belts, deep chemical alteration has a rule on slope morphodynamic through deeply argillification processes of rocks; they contribute to Deep Seated Gravitational Slope Deformation (DSGD) phenomena.

In the first part, paper deals with local geological-structural and geomorphological aspects, substratum weathering profiles, as well as areal distribution of rock mass weathering degree. The second part deals with morphological features of M. Granieri-Salincriti DSGD, geomechanical properties of crystalline rocks according to influence of deep geochemical processes. Moreover a slope monitoring was started to define DSGD phenomenon and combined active and/or quiescent landslides, as well as to validate the "geological-evolutionary slope model".

KEY WORDS: deep weathering processes, geological evolutionary model, monitoring

INTRODUZIONE

Uno degli scopi dell'applicazione di metodologie relative alla caratterizzazione di ammassi cristallino-metamorfici vulnerabili ai processi di alterazione è quello di contribuire alla comprensione dei meccanismi evolutivi dei movimenti franosi e/o di versante. I processi di alterazione chimico-fisica ed il conseguente decadimento delle proprietà geomeccaniche degli ammassi rocciosi rappresentano, infatti, alcune delle cause connesse allo sviluppo di fenomeni d'instabilità di versante (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; CALCATERRA *et alii*, 1996a; 1996b; CASCINI *et alii* 1992). Tali fenomeni, se inseriti in un contesto geologico caratterizzato da peculiari assetti tettono-stratigrafici, strutturali e idrogeologici, nonché da intensi e profondi processi di alterazione fisico-chimica, possono raggiungere dimensioni e profondità notevoli e coinvolgere interi versanti, attraverso un processo continuo e lento di creep profondo. Considerando la loro evoluzione complessiva, essi possono essere riconducibili almeno per le prime fasi a Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV).

Al fine di definire uno schema metodologico volto alla caratterizzazione di ammassi cristallino-metamorfici affetti da processi di alterazione e di degradazione, costruendo al tempo stesso il modello geologico-tecnico atto ad individuare le relazioni esistenti tra i suddetti processi ed i movimenti di massa, le ricerche hanno interessato un'area campione ricadente all'interno del Bacino delle Fiumare Allaro ed Amusa (RC). In tale area, infatti, l'assetto geologico-strutturale ed i processi geomorfologici attivi costituiscono i due elementi di prioritario interesse. Il primo è relativo alla presenza di un basamento cristallino-metamorfico (Paleozoico) variamente alterato, il cui assetto geomeccanico risulta condizionato dagli eventi geologici anche recenti, mentre il secondo, esplica la sua azione attraverso il sollevamento quaternario e l'incremento dell'energia di rilievo. Tali condizioni contribuiscono allo sviluppo di diffusi fenomeni gravitativi sia superficiali che profondi. I dati raccolti risultano validi ed estrapolabili poiché l'areale rilevato è rappresentativo di un contesto geologico ampiamente diffuso lungo l'Arco Calabro e nella struttura Austro-Alpina.

Nel presente lavoro sono riportati i risultati dei rilievi geologico-tecnici di dettaglio principalmente mirati sia alla definizione di una scala di suscettibilità dei diversi litotipi affioranti, rispetto ai processi di alterazione per cause intrinseche, sia all'individuazione della distribuzione spaziale degli orizzonti e dei profili di alterazione, mediante la suddivisione dell'ammasso in Unità litotecniche o Classi di alterazione (ANON, 1981; GCO, 1984; GSEGWPR, 1995). Pertanto, stabiliti gli stadi di alterazione caratteristici dei diversi litotipi affioranti (GCO, 1984), essenzialmente condizionati sia da fattori ambientali che dalla natura della roccia madre, si è cercato di individuare le tipologie dei fenomeni di dissesto più diffuse.

In particolare, in corrispondenza di un fenomeno di DGPV, evolutivo in "large landslide" e storicamente documentato (M. Granieri-Salincriti, GENEVOIS & PRESTININZI, 1979b), è stata svolta una valutazione più circostanziata dell'incidenza sul comportamento geomeccanico e sulla morfodinamica del versante dei profondi processi di

INTRODUCTION

Characterisation of weathered crystalline-metamorphic rocks is aimed, among others, at gaining greater insight into the evolutionary processes of landsliding and/or slope movements. Indeed, physico-chemical weathering and consequent deterioration of the geomechanical properties of rock masses are among the causal factors of slope instability (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; CALCATERRA *et alii*, 1996a; 1996b; CASCINI *et alii*, 1992). If such phenomena take place in geological settings with particular tectono-stratigraphic and hydrogeological features, as well as deep physico-chemical weathering, they may reach considerable size and depth and affect entire slopes with a continuous and slow deep-creep process. Based on their overall evolution, these phenomena may be defined as Deep-Seated Gravitational Slope Deformations (DSGSDs).

The study reported in this paper was intended to: i) work out a methodological approach for characterising weathered crystalline-metamorphic rock masses; ii) develop an engineering-geology model, and iii) pinpoint the relations between the above-mentioned processes and mass movements. The study was focused on a site located in the Allaro and Amusa river basin (Reggio Calabria). This choice was based on strictly geological-structural and geomorphological criteria, i.e.: i) a variably weathered crystalline-metamorphic basement (Palaeozoic), whose geomechanical behaviour was affected by prior geological processes in the study area, and ii) Quaternary uplift and increasing relief. These factors have favoured the development of diffuse shallow and deep landslides. The collected data are valid and extrapolatable to other areas, since the study area is representative of a geological setting that is common along the Calabrian Arc and in the Austro-Alpine structure.

The paper deals with results from detailed engineering-geology surveys. The principal goals of these surveys were: i) developing a scale of susceptibility of the outcropping lithotypes to weathering processes due to intrinsic causes, and ii) identifying the spatial distribution of horizons and weathering profiles, by dividing the rock mass into Lithotechnical Units or Weathering Classes (ANON, 1981; GCO, 1984; GSEGWPR, 1995). Therefore, the study first determined the weathering degrees of the various outcropping lithotypes (mainly dependent on environmental factors and on the nature of the parent rock; GCO, 1984) and then attempted to identify the most widespread instability phenomena.

In particular, in the area of a historically documented DSGSD (Mt. Granieri-Salincriti), a more thorough assessment was made of the impact that deep geochemical weathering (closely related to a thermal-metamorphic contact belt) had on the geomechanical behaviour of rocks and on slope morphodynamics.

Subsoil investigations and monitoring surveys were also started with a view to: i) testing the evolutionary assumptions adopted in the reference geological model of the slope, and ii) establishing

alterazione geochimica, strettamente legati alla presenza di un contatto termometamorfico.

Al fine di verificare le ipotesi evolutive definite mediante il modello geologico di versante di riferimento, nonché i rapporti tra i profili di alterazione, il processo deformativo profondo in atto e la franosità attiva e/o quiescente, è stata avviata una campagna d'indagini di sottosuolo e di monitoraggio di cui sono illustrati i primi risultati.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'area oggetto di studio, situata sul versante ionico delle Serre calabre, Sud Italia, ricade nel medio-alto bacino delle Fiumare Allaro ed Amusa (Fig. 1) ed è caratterizzata dalla presenza delle unità cristalline calabridi (Unità di Stilo Paleozoico; AMODIO-MORELLI, 1976), costituite da Graniti biotitici localmente con muscovite ed associate granodioriti di età tardo-ercinica (circa 250 Ma), da Scisti quarzoso-biotitici e biotitico-granatiferi e Scisti filladici e/o filladi, con spessore intorno ai 1000 m.

Gli Scisti quarzoso-biotitici e biotitico-granatiferi presentano un'ondulazione anticlinale e sinclinale, mascherata a luoghi dalle filladi che spesso arrivano al di sotto dell'attuale livello di erosione; le filladi seguono le ondulazioni dei sottostanti Scisti e, talvolta, sono direttamente a contatto con i termini a più elevato grado di metamorfismo per erosione di quelli intermedi. Il passaggio tra le plutoniti e le rocce metamorfiche avviene tramite una fascia di Aureola Metamorfica con andamento NE-SW, composta da Scisti biotitici e filladici termometamorfosati. L'Aureola Metamorfica presenta un grado molto elevato di termometamorfismo nelle immediate vicinanze delle magmatiti, mentre è già piuttosto basso a poche decine di metri di distanza.

Procedendo verso est, sull'unità cristallino-metamorfiche poggiano direttamente, in discordanza, i depositi dei cicli sedimentari miocenici (spessore di 600 m, formazione di Stilo-Capo d'Orlando, Aquitaniano-Burdigaliano; BONARDI *et alii*, 1980) e, a luoghi, alcuni lembi di rocce carbonatiche mesozoiche. I termini miocenici costituiscono il riempimento di canyons sottomarini ed i corrispondenti depositi di scarpata e di tracimazione ricoperti dalla coltre alloctona delle Argille varicolori (Langhiano-Serravalliano), con inclusi di successioni quarzoarenitiche, lembi della formazione Gessoso-solfifera e termini arenacei e marnosi.

L'orografia dell'area in studio possiede uno scenario variabile man mano che si procede da N-NW verso S-SE ed è fortemente influenzata dal generale assetto strutturale, dalla natura dei vari termini litologici, nonché dagli intensi processi di alterazione del substrato cristallino-metamorfico.

L'area presenta infatti un paesaggio piuttosto accidentato ed è caratterizzata da serie discontinue di rilievi profondamente incisi, spesso alternate a balze e pianori. Il trend morfologico prevalente, NW-SE, è dato dalla presenza di alti-morfologici ereditati dai versanti di faglia, con rigetti dell'ordine di alcune centinaia di metri.

the relations among weathering profiles, ongoing deep deformational process and associated active and/or dormant landsliding. The paper reports the preliminary findings from these investigations.

GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL SETTING

The study area, lying on the Ionian side of the Serre Massif of Calabria (Southern Italy), makes part of the middle-upper basin of the Allaro and Amusa rivers (Fig. 1).

The area has crystalline units of the Calabrides complex (Stilo Unit, Palaeozoic; AMODIO-MORELLI, 1976); these units are made up of biotitic granites, locally with muscovite, and associated granodiorites of late Hercynian age (about 250 Ma), quartzose-biotitic and biotitic-garnetiferous schists and phyllitic schists and/or phyllites, with a thickness of about 1,000 m.

The quartzose-biotitic and biotitic-garnetiferous schists have an anticlinal and synclinal undulation, which is in places masked by phyllites, often extending beneath the present erosion level. The phyllites follow the undulations of the underlying schists and are at times in direct contact with terms of higher-grade metamorphism by erosion of intermediate terms. Transition from plutonites to metamorphic rocks is via a NE-SW-trending metamorphic aureole, composed of thermo-metamorphosed biotitic and phyllitic schists. The metamorphic aureole has thermo-metamorphism of high grade in the immediate vicinity of magmatites and of low grade a few tens of metres away from them.

Proceeding eastward, the crystalline-metamorphic rocks are unconformably overlain by Miocene sedimentary deposits (thickness 600 m, Stilo-Capo d'Orlando formation, Aquitanian-Burdigalian; BONARDI *et alii*, 1980) and, in places, by limbs of Mesozoic carbonate rocks. Miocene terms fill submarine canyons and corresponding talus and overflow deposits; these deposits are capped by the allochthonous cover of Argille varicolori (Langhian-Serravallian), embedding quartz-arenaceous sequences, limbs of the gypsiferous-sulphiferous formation and arenaceous and marly terms.

The orography of the study area is variable proceeding from N-NW to S-SE and strongly influenced by its general structural setting, by the nature and variability of outcropping lithotypes, as well as by intense weathering of the crystalline-metamorphic bedrock.

The landscape is rough, with discontinuous sets of deeply incised reliefs, often alternating with crags and plateaus. The prevalent morphological trend (NW-SE) is given by morphological highs, inherited from fault slopes and with throws of a few hundreds of metres.

The major tectonic lines control the hydrographic network. This dense and deepening network consists of two main rivers (Fiumare

I maggiori lineamenti tettonici controllano il reticolo idrografico il quale, fitto ed in approfondimento, è rappresentato da due aste principali (F.re Allaro ed Amusa), in corrispondenza delle quali le linee d'impluvio sono prevalentemente parallele tra di loro ed ortogonali all'asse principale. In particolare, l'idrografia presenta un pattern angolato con alveo del torrente stretto e ben definito e valloni laterali che incidono profondamente i versanti con sezioni a "V".

Il continuo e generale ringiovanimento, connesso al forte tasso di sollevamento quaternario a scala regionale, favorisce l'attività erosiva come testimonia la presenza di valli pensili, di profonde incisioni vallive, nonché fenomeni di cattura fluviale, come quello tra le F.re Allaro e Precariti attraverso la retrogressione del bacino torrentizio del V.ne Calatria (Fig. 1). Le due profonde incisioni dell'Allaro ed Amusa, con andamento subparallelo, hanno il tipico aspetto delle fiumare, le quali sono interessate da lunghi periodi di magra in cui gli alvei sono praticamente secchi mentre, in concomitanza con piogge autunnali ed invernali, le stesse sono soggette a brevi e violenti eventi di piena. Esse sono caratterizzate: nel settore a monte, da valloni profondamente incisi; nel settore mediano, da versanti molto ripidi e scoscesi; nella fascia pianeggiante di fondovalle l'alveo assume una certa ampiezza ed il corso d'acqua tende a divagare con un andamento meandriforme. L'ampiezza della fascia di fondovalle tende ad aumentare man mano che l'alveo si imposta nei termini sedimentari più erodibili e si approssima alla foce.

ASSETTO STRUTTURALE ED EVOLUZIONE TETTONO-SEDIMENTARIA

L'analisi strutturale è stata condotta in due fasi distinte e consequenziali. Nella prima fase, mediante la fotointerpretazione, sono stati individuati i lineamenti morfologico-strutturali più significativi su un areale di circa 100 km², relativamente ai quali i risultati hanno evidenziato l'esistenza di almeno 4 sistemi prevalenti (Tav. 1). Nella fase successiva è stato effettuato uno studio alla mesoscala nel medio-alto corso delle F.re Allaro ed Amusa tramite indagini di campagna e rilevamento delle discontinuità che caratterizzano i termini cristallino-metamorfici, tenendo conto del profondo grado di alterazione e degradazione che caratterizza tali litotipi. L'analisi ha comportato circa 150 misure, da cui sono risultati per ogni singola stazione in media i seguenti sistemi preferenziali: prevalentemente NE-SW, con associato E-W, e subordinatamente NW-SE e NS. Tale quadro di fratturazione è legato agli eventi tettonici succedutisi a partire dal Miocene inferiore fino al Pliocene-Calabrian. In particolare, il sollevamento è evidenziato dagli elevati gradienti di pendio e da un assetto morfologico giovanile. Le discontinuità per faglia regolano gran parte dei contatti tra i differenti litotipi e costituiscono degli indicatori dell'elevato grado di fratturazione di tutte le litologie a comportamento rigido come i Graniti, gli Scisti, i calcari e le marne e le arenarie mioceniche.

Le più importanti linee tettoniche, con trend NE-SW (Fig. 1), sono responsabili del sollevamento lungo queste direttrici, caratterizzate da superfici ad elevato angolo. Le zone poste a meridione risultano ribassate di diverse decine di metri.

Allaro and Amusa) and numerous streams which are mostly parallel among them and orthogonal to the main axis. In particular, streams have an angular and incised pattern, with narrow and well-defined streambeds and deep valleys which make V-shaped cuts into the slopes.

The continuous and general rejuvenation of erosional activity, which is related to fast Quaternary uplift rates at regional scale, is testified by hanging valleys, deeply incised valleys, as well as by basin capture phenomena, such as that operating between the Allaro and Precariti rivers via retrogression of the Vallone Calatria stream basin (Fig. 1). The two deep and subparallel incisions of the Allaro and Amusa rivers have the typical appearance of the ephemeral streams ("fiumare") of Calabria, experiencing long low-water periods in which their beds are practically dry. Upon rainfall in Autumn and Winter, these rivers are prone to flash floods. From top to bottom, the river landscape has deeply incised valleys, very steep and rough slopes and fairly wide and flat valley floors, where streambeds take on a meandering pattern. The width of the valley floors tends to increase as the rivers flow over more erodible sedimentary terms and approach their mouths.

STRUCTURAL SETTING AND TECTONO-SEDIMENTARY EVOLUTION

Structural analysis was conducted in two separate and sequential steps. In the first step, the most significant morpho-structural lines over an area of about 100 km² were identified through photo interpretation. Results indicated the existence of at least three prevailing systems (Plate 1). In the following step, a meso-scale study of the middle-upper reach of the Allaro and Amusa Fiumare was carried out through field surveys and identification of discontinuities in the crystalline-metamorphic rocks, taking into account their deeply weathered state. Approximately 150 measurements were made, yielding the following preferential systems for each station: dominantly NE-SW system, with associated E-W and subordinately NW-SE and NS systems. This jointing pattern derives from tectonic events which occurred from lower Miocene to Pliocene-Calabrian. In particular, tectonic uplift, which has been active from Miocene to present time, is evidenced by steep slopes and juvenile morphology. Discontinuities by faulting control most of the contacts among the various lithotypes and are indicative of the dense jointing of stiff-behaviour rocks, such as granites, schists, limestones, marlstones and sandstones of Miocene age.

The most important tectonic lines (NE-SW, Fig. 1), testified by fast rates of still active uplift and consequent erosion, especially by the two main rivers, are responsible for longitudinal uplift. Along these lines with high-angle surfaces, southern zones are downthrown by several tens of metres.

CONSTRUCTION OF ENGINEERING-GEOLOGY MODEL OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCK MASSES EXPERIENCING DEEP WEATHERING PROCESSES: EXAMPLE OF APPLICATION TO THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIE, CALABRIA, ITALY)

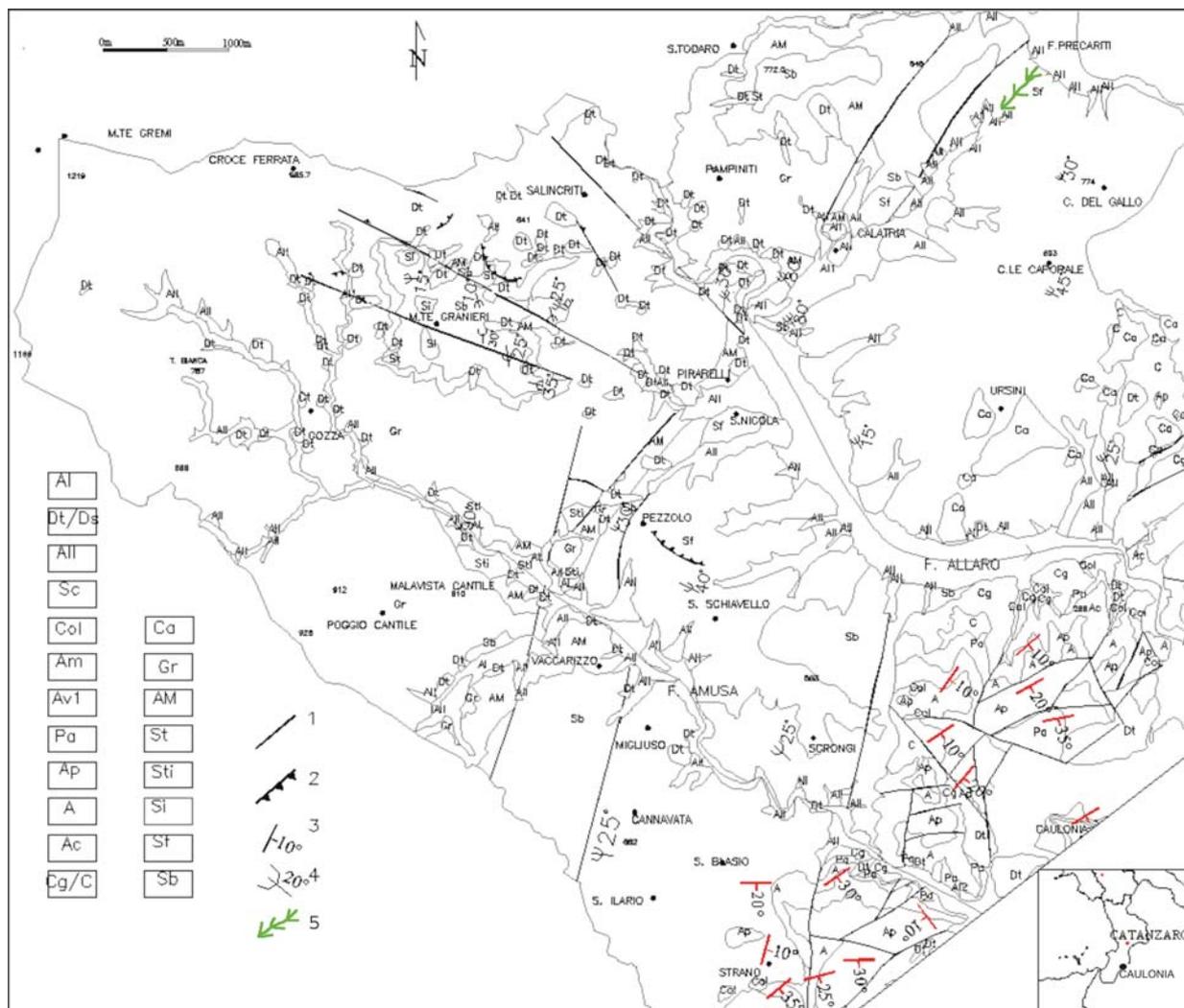


Fig. 1 - Assetto geologico-strutturale (Olocene)-Al: Alluvioni; Dt: Detrito di frana (stabilizzato, Ds); All: Depositi di conoide; Col: Depositi di riporto; Am: Arenarie (Miocene s.l.); (Langhiano) -Av1: Argille Varicolori, contenenti inclusi differenti, tra cui lembi di Gessoso-Solfifera (Gs). Maggiore concentrazione di intercalazioni litoidi eterogenee (Av2). (Aquitano-Burdigaliano sup.); Pa: Torbiditi pelitico-arenacee; Ap: Torbiditi arenaceo-pelitiche con $A/P > 1$; A: Torbiditi arenacee con $A/P >> 1$ od indefinito; Ac: Arenarie grossolane con intercalazioni conglomeratiche; Cg: Conglomerati; C: Conglomerato poligenico alterato; Ca: Calcari grigi e nocciola (Giurassico); Paleozoico - Gr: Rocce ignee a composizione acida; AM: Scisti biotitici termometamorfosati; St: Scisti biotitici termometamorfosati con intrusioni; Sti: Scisti biotitici termometamorfosati con intrusioni felsitiche; Si: Scisti biotitici con intrusioni; Sf: Scisti filladici; Sb: Scisti biotitici; 1: Faglia; 2: Faglia inversa; 3: Giacitura; 4: Piani di scistosità; 5: cattura fluviale

- Geological-structural setting (Holocene)-Al: Alluvial deposits; Dt: Landslide debris (stabilised, Ds); All: Alluvial fan; Col: Fill deposits; Am: Arenaceous rocks (Miocene s.l.); (Langhian)-Av1: Argille Varicolori clays with different inclusions, including Gessoso-Solfifera terms (Gs). Higher concentration of heterogeneous lithoid terms (Av2) (Aquitano-Burdigaliano sup.); Pa: Pelitic-arenaceous turbidites; Ap: Pelitic-arenaceous turbidites with $A/P > 1$; A: Arenaceous turbidites with $A/P >> 1$; Ac: Coarse sandstones with interbedded conglomerates; Cg: Conglomerates; C: Altered polygenic conglomerates; Ca: Grey-hazel limestone (Jurassic); Palaeozoic- Gr: Acidic igneous rocks; AM: Thermo-metamorphosed Biotitic Schists; St: Thermo-metamorphosed Biotitic Schists with intrusions; Sti: Thermo-metamorphosed Biotitic Schists with felsitic intrusions; Si: Biotitic Schists with intrusions; Sf: Phyllitic Schists; Sb: Biotitic Schists; 1: Fault; 2: Reverse fault; 3: Dip direction; 4: Schistosity; 5: Basin capture

Le direttrici con trend NW-SE, WNW-ESE ed E-W (Fig. 1) sono responsabili, invece, delle strutture depressionarie trasversali. Si tratta di sistemi di faglie trascorrenti-sinistre con debole componente distensiva (trend N120°) a cui risultano associate faglie trascorrenti e/o distensive con trend E-W. Tra queste direttrici, evidenziate dal fitto

NW-SE-, WNW-ESE- and E-W-trending tectonic lines (Fig. 1) are instead responsible for transversal depressions: these are weakly-extensional sinistral transcurrent fault systems (N120°) that combine with E-W-trending strike-slip and/or extensional faults. Evident among the latter faults are those which gave rise to

quadro fessurativo rilevato soprattutto in corrispondenza dei depositi conglomeratici miocenici, sono evidenti quelle che hanno dato origine alle depressioni occupate dalle due fiumare. Tali lineamenti tettonici hanno contribuito alla separazione dell'area in blocchi a differenti inclinazione con basculamento da SW verso NE, come testimonia l'andamento delle superfici relitte dei terrazzi plio-quadernari.

ASPETTI LITOLOGICI

Il substrato cristallino-metamorfoico è stato suddiviso in diversi litotipi in funzione della petrogenesi, della tessitura, struttura, composizione mineralogica, nonché della suscettibilità ai processi di alterazione. Sono stati così distinti: un complesso di rocce intrusive a composizione acida; rocce metamorfiche di medio-alto grado e rocce metamorfiche di basso-medio grado. Le rocce intrusive (Gr) sono rappresentate da termini granitici, ascrivibili ai Graniti e alle Granodioriti tipo "Le Serre" (HEIKE & LORENZONI, 1972; Fig. 2). I costituenti principali sono quarzo, albite, k-feldspato (microclino) e biotite; le concentrazioni femiche aumentano in corrispondenza del contatto metamorfoico, dove i termini granitici possono essere anche migmatitici (granodiorite-monzonite) microcristallini e intrusi nelle metamorfite di contatto (Cornubianiti). Lungo il contatto sono presenti, inoltre, filoni aplitici e pegmatitici che aumentano, sotto forma di filoni granitici microcristallini e/o idrotermali, negli Scisti termometamorfosati con numerose mineralizzazioni a solfuri (Cu, Mb, Fe, Zn etc.; BONARDI *et alii*, 1982), per poi diramarsi negli Scisti (Fig. 3a).

Le rocce metamorfiche di medio-alto grado, accorpate in un unico litotipo, sono costituite principalmente da Scisti biotitici (SB) e secondariamente da Scisti biotitico-graniferi (SBG) passanti a nuclei di gneiss biotitici. I costituenti principali degli SB sono quarzo, albite, biotite, muscovite e sporadicamente sanidino di bassa termalità in corrispondenza delle intrusioni felsitiche, a luoghi anche orneblenda, granati e tracce di zeoliti (BARRESE *et alii*, 2006). La prima paragenesi metamorfica (Fig. 4) è ampiamente diffusa in tutta l'area in studio, mentre la seconda affiora lungo la F.ra Amusa (M. San Blasio, Serra Schiavello). Gli SB, nei pressi dell'Aureola Metamorfica, diventano inoltre più leucocratici per introduzione di materiale felsitico (feldspati, feldspatoidi e quarzo) fino ad avere un comportamento migmatitico. I termini cornubianitici (Aureola Metamorfica, AM; Fig. 5), caratterizzati da un metamorfismo di contatto generalmente di basso grado, presentano un'associazione mineralogica costituita prevalentemente da quarzo, miche, albite, tracce di microclino, orneblenda e zeoliti (BARRESE *et alii*, 2006). L'estensione dell'Aureola metamorfica, piuttosto variabile, non è facilmente determinabile a causa della presenza di numerosi corpi di frana e di detrito che ne rendono i limiti confusi, ma sostanzialmente possiede dimensioni modeste e segue strettamente il margine del granito.

L'Aureola Metamorfica ed i termini intrusivi prossimi al contatto costituiscono la fascia di Aureola Metamorfica e/o di contatto termo-metamorfoico lungo la quale per effetto di processi geochimici, legati principalmente all'interazione tra l'acqua di falda profonda

the depressions occupied by the two rivers; these faults are signalled by a dense jointing pattern, especially near conglomeratic deposits of Miocene age. These tectonic lines contributed to separating the area into blocks with different inclination and tilting from SW to NE, as evidenced by the trend of relic surfaces of Plio-Quaternary terraces.

LITHOLOGICAL ASPECTS

The crystalline-metamorphic bedrock was divided into different lithotypes, according to petrogenesis, texture, structure, mineralogical composition, as well as weathering susceptibility. The following lithotypes were distinguished: an acidic intrusive rocks complex; metamorphic rocks of medium-high grade; metamorphic rocks of low-medium grade.

The intrusive complex (Gr) is represented by granitic terms, which may be ascribed to the granites and granodiorites of "Le Serre" type (HEIKE & LORENZONI, 1972; Fig. 2). Its main constituents are: quartz, albite, K-feldspar (microcline) and biotite; femic concentrations rise near the metamorphic contact, where granitic terms may also be migmatitic (granodiorite-monzonite), microcrystalline and intruded into the contact metamorphites (cornubianites). Along the contact, also aplitic and pegmatitic dykes are encountered; these dykes increase (and evolve into microcrystalline and/or hydrothermal granitic dykes) in thermo-metamorphosed schists with numerous sulphide mineralisations (Cu, Mb, Fe, Zn, etc.; BONARDI *et alii*, 1982) and then ramify into the schists (Fig. 3a).

Metamorphic rocks of medium-high grade (grouped here under a single lithotype) mainly consist of biotitic schists (SB) and, secondarily, of biotitic-garnetiferous schists (SBG), evolving into biotitic gneiss nuclei. The key constituents of the SB are quartz, albite, biotite, muscovite and sporadically sanidine of low thermal stability (near felsitic intrusions), occasional hornblende, garnets and traces of zeolites (BARRESE *et alii*, 2006). The first metamorphic paragenesis (Fig. 4) is widespread throughout the study area, whereas the second one outcrops along the Amusa river (Mt. San Blasio, Serra Schiavello). Moreover, near the metamorphic aureole (AM), the SB become more leucocratic owing to the input of felsitic material (feldspars, feldspathoids and quartz), until they become migmatitic. Cornubianitic terms (metamorphic aureole, AM; Fig. 5) generally have a low-grade contact metamorphism; their mineralogical assemblage mainly comprises quartz, micas, albite, traces of microcline, hornblende and zeolites (BARRESE *et alii*, 2006). The extent of the metamorphic aureole is fairly variable and cannot be easily determined, in that numerous landslide bodies and debris blur its boundaries; however, it is small-sized and closely follows the granite boundary.

The AM and intrusive terms near the contact represent the metamorphic aureole belt and/or the thermal-metamorphic contact belt. Along this contact, chemical processes, especially interaction between groundwater (and subordinately seepage water) and the sulphides contained in the above-mentioned intrusions, trigger intense chemical weathering (PRESTININZI, 1984; BARRESE *et alii*, 2006).

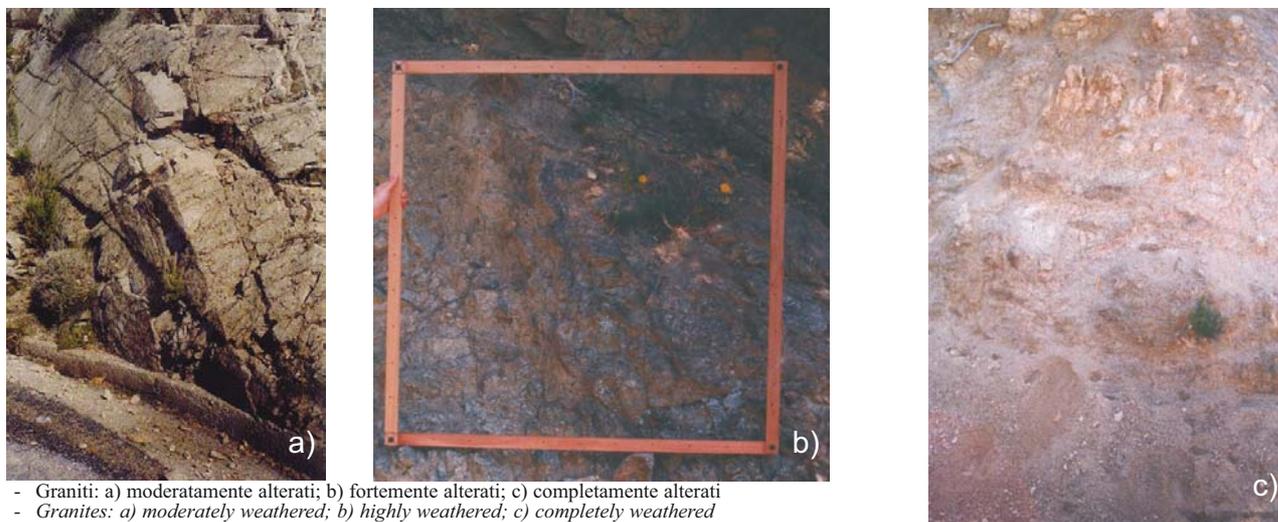


Fig. 2 - Graniti: a) moderatamente alterati; b) fortemente alterati; c) completamente alterati
 - *Granites: a) moderately weathered; b) highly weathered; c) completely weathered*



Fig. 3 - a) Scisti biotitici altamente e completamente alterati con numerose intrusioni; b) Graniti profondamente alterati in prossimità della fascia di Aureola metamorfica, dove gli indici minero-petrografici e chimici e un dettagliato rilievo geologico-tecnico mostrano un incremento di minerali argillosi
 - *a) Highly and completely weathered Biotitic Schists with numerous intrusions; b) Strongly and/or completely weathered granites near the thermal-metamorphic contact belt, where chemical and minero-petrographic indexes and detailed geological-engineering surveys indicate an increase of clayey minerals*

(secondariamente di infiltrazione) ed i solfuri presenti nelle intrusioni di cui sopra, si innescano intensi fenomeni di alterazione chimico-fisica (PRESTININZI, 1984; BARRESE *et alii*, 2006).

Le rocce metamorfiche di basso-medio grado sono rappresentate da Scisti filladici grigio-scuro (SF; Fig. 6) costituiti da una serie di arenarie, di argilliti sabbiose, nonché da argilliti nerastre laminate con un grado di metamorfismo piuttosto basso (località Pezzolo, San Nicola, Fosso Calatria). Numerose intercalazioni di lenti e noduli di quarzo, generalmente paralleli alla scistosità, e di quarziti verdastre irregolari si rinven-gono all'interno dell'ammasso roccioso. Gli SF presentano, inoltre, lenti e sottili orizzonti carboniosi (carboni di basso tenore, località Ursini) e calcari cristallini arenacei non fossiliferi. La foliazione ed i piani di scistosità sono legati all'originaria stratificazione e sono intensamente deformati ed intersecati da molte superfici di discontinuità (diaciasi e fratture). I minerali principali sono quarzo, biotite, albite e clorite, poca muscovite ed occasionali sericite e k-feldspato (BARRESE *et alii*, 2006).

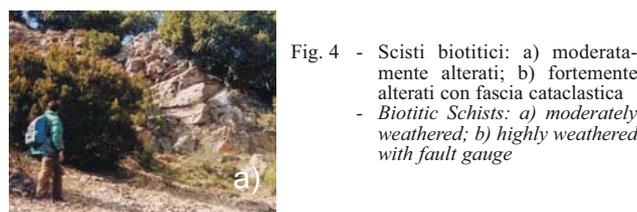


Fig. 4 - Scisti biotitici: a) moderatamente alterati; b) fortemente alterati con fascia cataclastica
 - *Biotitic Schists: a) moderately weathered; b) highly weathered with fault gauge*



Metamorphic rocks of low-medium grade are represented by dark gray phyllitic schists (SF; Fig. 6). These schists are made up of a series of sandstones, hard sandy argillites, as well as blackish laminated argillites with a rather low grade of metamorphism (at Pezzolo, San Nicola and Fosso Calatria). Numerous intercalations of quartz lenses and nodules, generally parallel to schistosity, and of irregular greenish quartzites are found inside the rock mass. The SF also accommodate thin low-carbon horizons and lenses (at Ursini) and non-fossiliferous arenaceous crystalline limestones. Foliation and schistosity planes are related to the original bedding and intensely deformed and intersected by many discontinuity surfaces (joints and fractures). Main minerals are quartz, biotite, albite and chlorite, poor muscovite and occasional sericite and K-feldspar (BARRESE *et alii*, 2006).



Fig. 5 - Aureola metamorfica: a) altamente alterata con depositi di woodwardite; b) completamente alterata con una maggiore concentrazione di intrusioni
- *Metamorphic Aureole: a) moderately weathered with woodwardite deposits; b) completely weathered with higher concentration of intrusions*

FASCIA DI AUREOLA METAMORFICA: ASPETTI GENERALI DEL VERSANTE M. GRANIERI-SALINCRI

L'analisi di dettaglio dei cambiamenti morfostrutturali connessi alle fasce di contatto termometamorfico, di cui il versante M. Granieri-Salincriti è un valido esempio, è stata affrontata attraverso un approccio multidisciplinare. I risultati di seguito esposti costituiscono una sintesi di un'ampia ricerca finalizzata all'individuazione delle relazioni esistenti tra i processi di alterazione chimica profonda, la reologia dei materiali e gli aspetti morfoevolutivi del versante (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; BARRESE *et alii*, 2006; MARTINO *et alii*, 2004; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

L'area di M. Granieri-Salincriti (Fig. 7), ubicata in destra idrografica della F. Allaro, è caratterizzata dalla presenza di un alto morfologico (950 m s.l.m.), dove affiorano termini cristallini nella porzione medio-inferiore e metamorfici (spessore di circa 300 m) in quella superiore; quest'ultimi sono costituiti da Scisti biotitici, termometamorfosati al contatto con i Graniti (Aureola Metamorfica, 20-50 m). I rapporti stratigrafici tra le unità cristallino-metamorfiche sono a luoghi disturbati dai lineamenti tettonici, con trend NW-SE e movimento prevalente trascorrente sinistro con debole componente distensiva (pitch $\Sigma 20^\circ$). L'assetto geologico del versante genera una debole variazione di pendenza legata al differente grado di erodibilità e di alterazione dei litotipi affioranti.

In corrispondenza delle emergenze d'acqua, tutte esclusivamente di tipo lineare, i valori del pH (tra 4,5 e 5 lungo il contatto e <4 nei Graniti alterati; Fig. 7), la presenza di livelli di caolinite nelle fratture dell'ammasso roccioso, di silice amorfa e di minerali di neoformazione (woodwardite, Fig. 3b, 5a; PRESTININZI, 1984; BARRESE *et alii*, 2006) hanno confermato l'esistenza di intensi processi di alterazione chimico-fisica legati alla interazione tra l'acqua d'infiltrazione, principalmente di falda profonda stabile, ed i solfuri presenti nelle intrusioni posizionate lungo l'Aureola Metamorfica e a luoghi anche negli Scisti biotitici.



Fig. 6 - Scisti filladici da altamente a completamente alterati
- *Highly to completely weathered Phyllitic Schists*

THERMAL-METAMORPHIC CONTACT BELT: GENERAL ASPECTS OF THE MT. GRANIERI-SALINCRI SLOPE

Detailed analysis of morpho-structural changes related to thermal-metamorphic contact belts, of which the Mt. Granieri-Salincriti slope is a case in point, was based on a multi-disciplinary approach. The results described hereafter summarise a wide-ranging research project, which had the purpose of singling out the relations among deep chemical weathering, rheology of materials and morpho-evolution of the slope (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; BARRESE *et alii*, 2006; MARTINO *et alii*, 2004; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

The Mt. Granieri-Salincriti area (Fig. 7), lying on the right bank of the Allaro river, has a morphological high (950 m a.s.l.) with outcrops of crystalline terms in its middle-lower portion and of metamorphic ones (about 300 m-thick) in its upper portion; the metamorphic terms consist of biotitic schists, which are thermo-metamorphosed at their contact with granites (AM, 20-50 m). Stratigraphic relations between the crystalline-metamorphic units are in places disturbed by NW-SE-trending tectonic lines with weakly extensional, dominant sinistral transcurrent movement (pitch $\Sigma 20^\circ$). The geology of the slope generates a perceptible change in its gradient, which is due to the different erodibility and weathering of its outcropping lithotypes.

The values of pH near the (all linear) springs (4.5 to 5 along the contact, < 4 in weathered granites; Fig. 7), the occurrence of kaolinite levels in rock mass joints, of amorphous silica and of woodwardite (Figs. 3b, 5a; PRESTININZI, 1984; BARRESE *et alii*, 2006) confirmed intense weathering processes. These processes are related to the interaction between seepage water (mostly coming from a stable deep aquifer) and the sulphides contained in the intrusions, which occur especially along the AM and in places extending into the biotitic schists.

A survey of springs made it possible to reconstruct the hydroge-

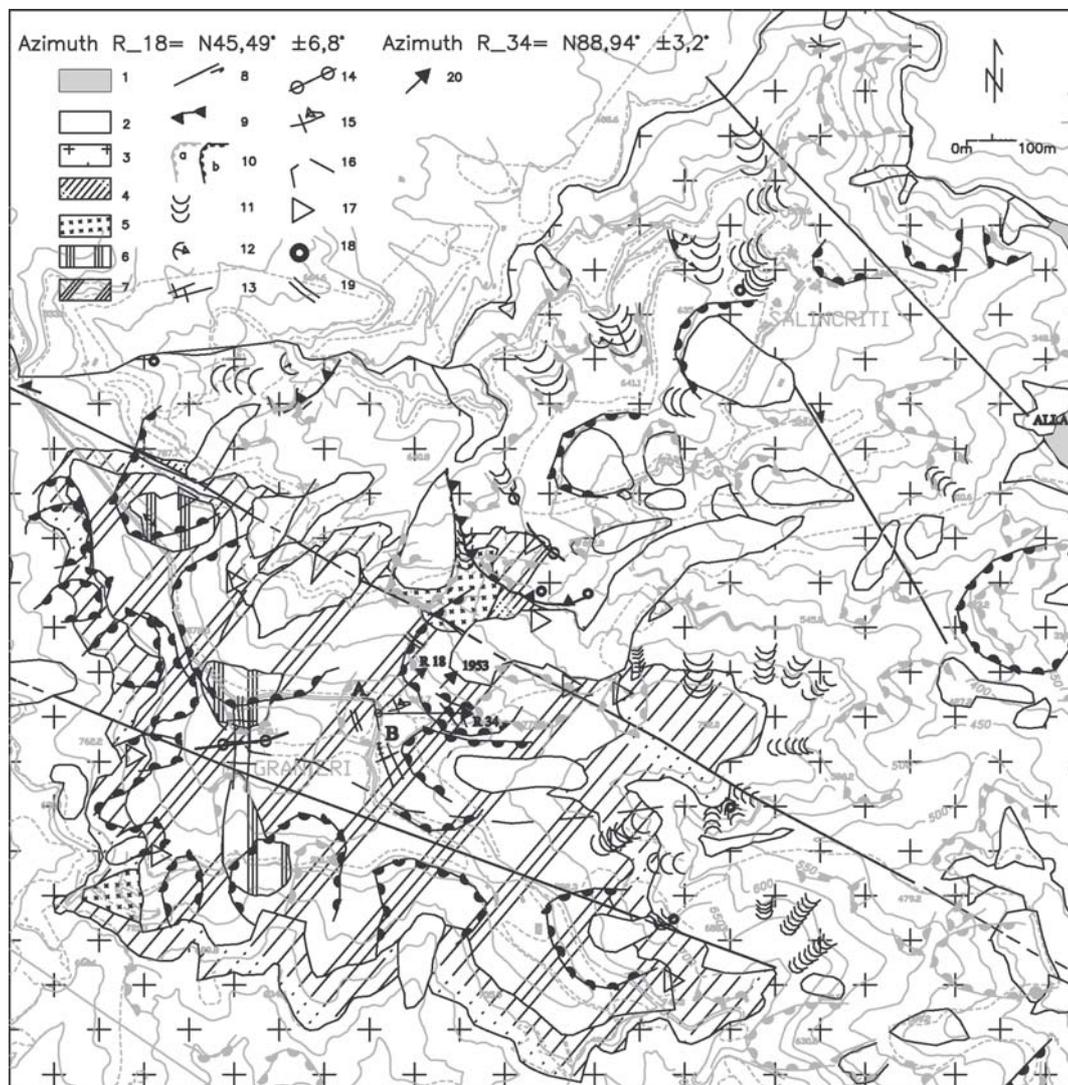


Fig. 7 - Località M. Granieri-Salincriti: 1) Alluvioni; 2) Detrito di frana e/o depositi di conoidi; 3) Graniti; 4) Scisti biotitici termometamorfosati; 5) Cornubianiti con concentrazioni di intrusioni; 6) Scisti biotitici con intrusioni; 7) Scisti biotitici; 8) Faglia trascorrente con debole componente distensiva; 9) Faglia inversa; 10) Scarpata di frana (a-attiva; b-quiescente); 11) Vallecola a conca; 12) Frana non cartografabile; 13) Trincea; 14) Doppia cresta; 15) Contropendenza; 16) DGPV; 17) Sorgente con $4,5 < pH < 5$; 18) Sorgente con $pH < 4$; 19) Zona di fratturazione; 20) Monitoraggio inclinometrico

- Mt. Granieri-Salincriti: 1) Alluvia; 2) Landslide debris/debris fan; 3) Granites; 4) Thermo-metamorphosed Biotitic Schists; 5) Cornubianites with concentration of intrusions; 6) Biotitic Schists with intrusions; 7) Biotitic Schists; 8) Strike-slip fault with weak extensional component; 9) Reverse fault; 10) Landslide scarp (a-active; b-dormant); 11) Conca valley; 12) Minor landslide; 13) Trench; 14) Double crest; 15) Counterslope terrace; 16) DSGSD; 17) Spring with $4,5 < pH < 5$; 18) Spring with $pH < 4$; 19) Jointed zone; 20) Inclinometric monitoring

Il censimento delle sorgenti ha consentito di ricostruire l'assetto idrogeologico del versante in studio. Sono stati individuati due sistemi di circolazione idrica: il primo, localizzato nelle metamorfite, permeabili per fratturazione, è rappresentato sia da piccole falde sospese negli scisti degradati sia da una falda ubicata sopra il contatto termometamorfico; il secondo sistema, presente nei Graniti, è rappresentato da piccole falde sospese sia nella roccia completamente alterata e dotata di una discreta permeabilità dell'ammasso fratturato.

ological model of the investigated slope. Two water circulation systems, depending on seasonal events, were identified. The first, located in the metamorphites (permeable by jointing), consists of small perched aquifers inside the degraded schists, as well as of an aquifer lying above the thermal-metamorphic contact. The second system, lying in the granites, consists of small perched aquifers; these aquifers were found both in completely weathered schists (with good primary permeability) and in jointed rock masses.

VALUTAZIONE DEL GRADO DI ALTERAZIONE ED ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEI PROFILI DI ALTERAZIONE

Al fine di stimare la suscettibilità ai processi di alterazione del substrato cristallino-metamorfico, nonché il grado e/o l'intensità dei suddetti processi, in relazione alle diverse litologie, è stato condotto su 150 fronti, opportunamente scelti, un dettagliato rilievo geomeccanico mirato alla caratterizzazione fisica degli orizzonti e dei peculiari profili di alterazione dei litotipi affioranti.

Definita la loro distribuzione spaziale, le variabili adottate nel corso dell'analisi geomeccanica (Tab. 1; DEARMAN, 1995; ANON, 1981; GSEGWPR, 1995) sono state sia di tipo qualitativo (descrizione macroscopica dell'alterazione, modalità di rottura, aspetto geometrico dell'ammasso in funzione dell'andamento delle discontinuità) sia di tipo quantitativo (percentuale terreno/m², RQD, orientazione, spaziatura, numero di famiglie e materiale di riempimento delle discontinuità, rugosità o scabrezza delle superfici (JRC), resistenza dei giunti, valore del rimbalzo del "martello di Schmidt" (RSH), JCS).

La combinazione ed il confronto dei parametri geomeccanici, congiuntamente con i dati mineralogico-petrografici macroscopici e microscopici (BARRESE *et alii*, 2006), hanno permesso di determinare per ogni singola sezione naturale il grado di alterazione (fase analitica). La successiva elaborazione ed integrazione dei risultati (fase di sintesi) ha condotto alla suddivisione, su base geomeccanica, dell'intero ammasso in Classi e/o Unità Litotecniche (GCO, 1984).

Lo sviluppo della metodologia usata per l'acquisizione dei dati e per il calcolo della percentuale terreno/m², inteso come materiale derivante dalla disgregazione fisica e decomposizione dell'ammasso, ha suggerito l'utilizzo, in corrispondenza di ogni sezione naturale, di una griglia con dimensione di 1m², divisa a sua volta in sottomaglie maglie di 1dm². L'elaborazione dei dati ottenuti dall'analisi della fotografia dell'affioramento è stata eseguita nel seguente modo: a) gestione al computer dell'immagine fotografica, mirata all'eliminazione delle distorsioni e con lo scopo di estrarre una superficie campione il più possibile piana e di dimensioni standard; b) calcolo, per ogni m² di affioramento, della % di terreno e sua descrizione; stima del range della % terreno/m² per ciascuna classe di alterazione. L'analisi, in particolare, è consistita nell'individuazione di maglie da 1 dm² (n; Fig. 8) contenenti materiale di alterazione e nel calcolo della percentuale relativa di terreno (X_i).

La relazione $\% \text{ soil/m}^2 = \sum_{i=1}^n X_i * 100$ ha consentito di valutare la quantità di terreno presente per ogni m² di roccia affiorante.

Nei casi in cui è stata osservata una prevalenza di prodotti di alterazione (roccia molto alterata), la percentuale (%) terreno/m² è stata determinata delimitando e calcolando le porzioni di maglia da 1 m² contenenti terreno e successivamente sommando e riportando quest'ultime alla superficie unitaria di riferimento di 1 m².

Per il calcolo dell'indice R.Q.D., le osservazioni di campagna hanno consentito il conteggio del numero di discontinuità misurate per uno stendimento di lunghezza predefinita (*5 m) e nel calcolo

ASSESSMENT OF WEATHERING DEGREE AND ANALYSIS OF SPATIAL DISTRIBUTION OF WEATHERING PROFILES

A detailed geomechanical survey was carried out to estimate the crystalline-metamorphic bedrock susceptibility to weathering and the degree and/or intensity of weathering in the different lithotypes. Geomechanical surveys, which were intended to physically characterise the horizons and the particular weathering profiles of the outcropping lithotypes, were conducted on about 150 fronts.

After defining the distribution of the investigated lithotypes, qualitative and quantitative variables were adopted for geomechanical analysis (Tab. 1; DEARMAN, 1995; ANON, 1981; GSEGWPR, 1995). Qualitative variables included macroscopic description of weathering, modes of rupture, geometry of the rock mass vs. trend of discontinuities; quantitative ones included % soil/m², RQD, orientation, conditions, spacing, number of families, filling material, surface roughness, JRC, joint strength, Schmidt hammer rebound value (SHR), JCS.

Geomechanical parameters were combined and compared with macroscopic and microscopic mineralogical-petrographic indexes (BARRESE *et alii*, 2006). From the results of this comparison, the weathering degree of each natural section (stage of analysis) was determined. Subsequent processing and integration of results (stage of synthesis) enabled to assess the trend of the geomechanical characteristics of the various weathering degrees into which the rock mass was divided (Lithotechnical Classes and/or Units; GCO, 1984).

As mentioned above, reliance was made, among others, on computation of the percentage of soil per m² (% soil/m²), i.e. of the percentage of material resulting from physical disgregation and decomposition of the rock mass (both along outcrops and in joints). For such computation, use was made of a 1 m² grid, divided into 1 dm² meshes, for each natural section. The data obtained from the analysis of outcrop photographs were processed as follows: a) computer processing of photo images, with the goal of eliminating distortions and extracting a sample surface as flat as possible and of standard size; b) for each m² of outcrop, computation of % soil and its description; c) estimation of the % soil/m² range for each weathering class. In particular, the analysis consisted in identifying 1 dm² meshes (n; Fig. 8) containing weathered material and in computing the related percentage of soil (X_i).

Assessment of relative percentages yielded the real % of soil/m² through the following relation: $\% \text{ soil/m}^2 = \sum_{i=1}^n X_i * 100$

In the cases where the weathered material was predominant (highly weathered rock), the % soil/m² was determined by delimiting and calculating the 1 m² mesh portions that contained soil and then by summing and relating such portions to the reference unit surface of 1 m².

For computing the RQD index, field surveys were based on counting of the number of discontinuities, measured over a pre-defined length (*5 m), and on computing their average frequency. Rock strength along joints (SHR) was analysed by processing individual

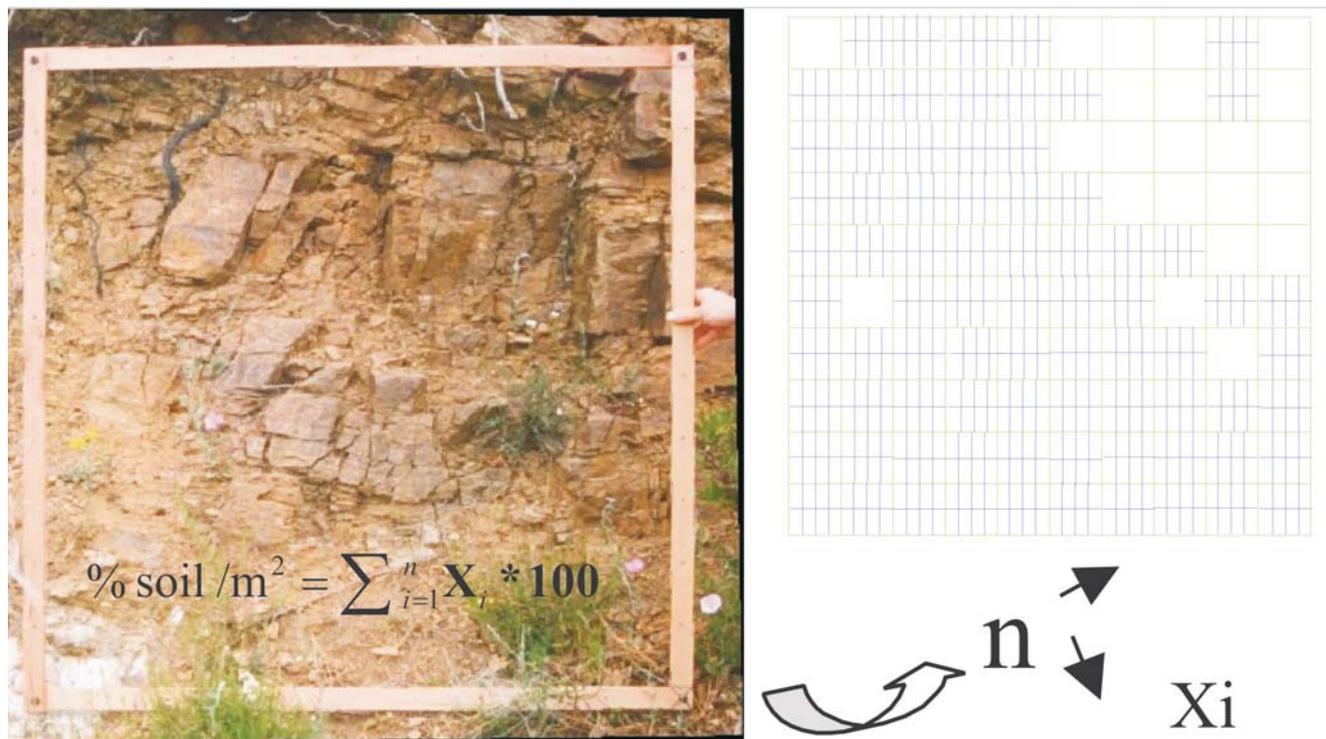


Fig. 8 - Esempio di applicazione della maglia da 1 m² per la valutazione delle % di terreno; maglie da 1 dm² (n) contenenti materiale di alterazione e calcolo per ognuna di esse della percentuale relativa di terreno (Xi)
 - 1 m² mesh for evaluating the % soil; 1 dm² meshes (n) containing weathered material and related % soil estimation (Xi)

della loro frequenza media. L'analisi della resistenza lungo i giunti (RSH) ha riguardato i singoli affioramenti ed è stata gestita ed elaborata in due fasi distinte: fase analitica, fase di sintesi.

Nella fase analitica sono stati elaborati i dati relativi ai singoli affioramenti, opportunamente suddivisi in funzione della roccia madre e del corrispettivo grado di alterazione. L'applicazione di tale metodologia ha consentito di misurare, per ogni affioramento, la dispersione dei dati e quindi la maggiore variabilità del valore JCS legata a fattori geologici, quali fasce cataclastiche, zone franose e/o caratterizzate da un'alterazione chimica spinta, che possono influenzare negativamente il comportamento geomeccanico dell'ammasso roccioso. Nella fase sintetica i dati ottenuti per ogni singolo affioramento sono stati integrati al fine di fornire il range di oscillazione della resistenza dei giunti per ciascuno stadio di alterazione (Tab. 1; Fig. 9).

Classi di alterazione

I termini affioranti sono stati suddivisi in sei classi di alterazione e/o unità litotecniche a comportamento omogeneo (GCO, 1984), sebbene nel territorio rilevato i processi erosivi ne abbiano favorito solo un parziale affioramento di cui è stata definita la distribuzione areale (Tab. 1, Tav. 1).

Procedendo dalla costa verso l'entroterra, i termini residuali degli SF (Classe VI), con spessore massimo di qualche metro, sono

outcrop data in two separate stages: stage of analysis and stage of synthesis.

In the stage of analysis, individual outcrops were grouped by parent rock and corresponding weathering degree and the resulting data were processed. For each outcrop, the data scatter and thus the higher variability of the JCS value were measured. In this connection, it is worth noting that JCS variability depends on geological factors, such as cataclastic belts, landsliding and/or zones with advanced chemical weathering, which may have a negative impact on the geo-mechanical behaviour of the rock mass.

In the stage of synthesis, individual outcrop data were integrated so as to obtain the joint strength range for each weathering degree (Tab. 1; Fig. 9).

Weathering classes

Outcropping lithotypes were divided into six weathering classes and/or lithotechnical units with homogeneous behaviour (GCO, 1984). However, in the study area, erosional processes favoured only their partial outcropping, whose areal distribution was defined (Tab. 1, Plate 1).

Proceeding from the coast to the hinterland, the residual terms of the PSs (Class VI), with a maximum thickness of few metres, occur

**COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO IN AMMASSI CRISTALLINO-METAMORFICI AFFETTI DA INTENSI PROCESSI DI ALTERAZIONE:
UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEI BACINI DELLE FRE ALLARO ED AMUSA (MASSICCIO DELLE SERRE, CALABRIA)**

a) WEATHERING CLASS		SPACING (cm)	APERTURE (mm)	JRC MIN	JRC MAX	RQD (%)	%SOIL/m ²	INFILL	SHR	JCS (MPa)		
IV	The dark-greyish soft rock is disintegrated and decomposed within moderately altered terms and some argillified face. Rock mass quality ranges from poor to fair. Rock mass is divided in tabular blocks. Cores crumble in the hands.	14	14	7	43	13	16	Centimetre-scale embedding layer in silty-clayey groundmass	18	26	mean	
		12	12	0,5	1	12	6		8	std dev		
		40	35	5	8	50	18		32	37	max	
		5	0	4	6	20	5		0	18	min	
V	The brown-greyish saprolite is completely decomposed, discoloured and disintegrated to centimetre-scale embedding sheet, silt and schist nuclei embedded in a silty-clayey groundmass. Rock mass quality is highly poor. Saprolite disintegrates in water.					0	100					mean
										std dev		
										max		
										min		
VI	Residual soil consists of embedding sheet material in a silty-arenaceous groundmass with organic matter. The structure and fabric of the rock mass are destroyed with disappearance of its original texture.											

b) WEATHERING CLASS		SPACING (cm)	APERTURE (mm)	JRC MIN	JRC MAX	RQD %	%SOIL/m ²	INFILL	SHR	JCS (MPa)	
III	The dark-grey soft rock mass is fractured along schistosity planes and discontinuities (transversal with respect to schistosity planes). The rock consists of equidimensional or prismatic blocks. Rock mass quality ranges from fairly good to excellent. The rock can be broken with a hammer.	28	5	3	6	69	3	Narrow centimetre-scale embedding layers	36	39	mean
		13	5	2	3	12	3		9	std dev	
		50	15	6	8	85	9		49	50	max
		10	0	0	0	50	0		18	29	min
IV	The red-brown soft rock is highly discoloured, decomposed and disintegrated within moderately weathered terms and limonite layers. Rock mass quality ranges from poor to fair. Feldspars and biotite are decomposed. Cores break in the hands. Widespread argillification phenomena are concentrated along major intrusion zones.	14	12	7	9	49	31	Centimetre-scale rock blocks. Along major intrusion zones, they are constituted by sand and silt with centimetre-scale embedding layer in a silty-clayey groundmass.	25	39	mean
		5	7	2	2	10	14		9	std dev	
		30	25	10	12	60	50		36	50	max
		10	3	4	7	25	1		15	29	min
V	The saprolised rock is completely decomposed, discoloured and disintegrated to sand, gravel and schist nuclei embedded in a silty-clayey groundmass. Rock mass quality is very poor. The grey-reddish saprolite disintegrates in water. Feldspars and biotite are decomposed. Many schist nuclei are embedded in a silty-clay groundmass.										
VI	Residual soil is constituted by silty-arenaceous terms and conglomerates embedded in an arenaceous groundmass with organic material. The mass structure and material fabric are destroyed, with no sign of original texture.										

Tab. 1 - Schema della classificazione adottata per la valutazione del grado di alterazione dell'ammasso roccioso e sintesi delle principali proprietà geomeccaniche: a) Scisti filladici; b) Scisti biotitici; c) Aureola Metamorfica; d) Complesso intrusivo
- Classification of rock mass weathering degree and summary of main geomechanical parameters. a) Phyllitic Schists; b) Biotitic Schists; c) Thermo-metamorphosed Biotitic Schists; d) Granites

CONSTRUCTION OF ENGINEERING-GEOLOGY MODEL OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCK MASSES EXPERIENCING DEEP WEATHERING PROCESSES: EXAMPLE OF APPLICATION TO THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIE, CALABRIA, ITALY)

c)	WEATHERING CLASS	SPACING (cm)	APERTURE (mm)	JRC MIN	JRC MAX	RQD %	%SOIL/m ²	INFILL	RSH	JCS (MPa)	
III	The brown-reddish soft rock mass is fractured along schistosity planes and discontinuities (transversal to the schistosity planes). The rock consists of prismatic blocks. Rock mass quality is fairly good. The rock can be broken with a hammer. Biotite oxidation phenomena are evident.	23	2	4	6	83	2	Centimetre-scale embedding layer, clayey groundmass.	35	66	mean
		18	2	5	5	5	2		33,01	std dev	
		50	5	10	12	90	4		47	93	max
		5	0	0	2	80	1		15	29	min
IV	The greyish and beige-reddish soft rock is highly discoloured, disintegrated and decomposed within moderately weathered terms and some argillified facies. Rock mass quality is very poor. Feldspars and biotite are decomposed. Cores crumble in the hands. Widespread argillification phenomena are concentrated along major intrusion zones.	7	8	8	12	35	40	Centimetre-scale embedding layer, sand in silty-clayey groundmass.	19	29	mean
		3	5	4	2	10	21		4	std dev	
		13	15	12	14	50	80		35	31	max
		5	5	6	8	15	9		2	26	min
V	The saprolised rock is completely decomposed, discoloured and disintegrated to sand, centimetre-scale embedding layer, silt with schist nuclei embedded in a silty-clayey groundmass. Rock mass quality is extremely poor. The beige and red-greyish saprolite disintegrates in water. Feldspars and biotite are decomposed.					17	76				mean
						10	13		std dev		
						30	100		max		
						0	50		min		
VI	Residual soil consists of heterogeneous embedding material, silt, arenaceous terms and conglomerates embedded in an arenaceous groundmass and organic material. The structure and fabric of the rock mass are destroyed with disappearance of its original texture.										

d)	WEATHERING CLASS	SPACING (cm)	APERTURE (mm)	JRC MIN	JRC MAX	RQD (%)	%SOIL/m ²	INFILL	SHR	JCS (MPa)	
III	The grey soft rock mass consists of equidimensional or prismatic blocks. Rock mass quality ranges from fairly good to excellent. The rock can be broken with a hammer.	23	11	7	9	66	3	Scarce silt and sand with centimetre-scale embedding layer. Clay along thermo-metamorphic contact belt.	31	59	mean
		8	6	2	2	12	2		23	std dev	
		100	30	10	12	90	10		45	100	max
		10	0	4	6	50	1		15	30	min
IV	The red-brown and greyish soft rock is highly discoloured, disintegrated and decomposed within moderately altered terms. Rock mass quality ranges from poor to fair. Feldspars are decomposed. Cores crumble in the hands.	56	11	8	11	47	16	Sand in silty-clayey groundmass. Clay along thermo-metamorphic contact belt.	16	19	mean
		38	20	2	1	9	14		5	std dev	
		125	75	10	12	70	70		35	28	max
		25	2	4	6	30	2		0	14	min
V	The saprolite is completely decomposed, discoloured and disintegrated to sand embedded in a centimetre-scale materials with less weathered nuclei. Rock mass quality is very poor. The yellow-reddish and greenish saprolite disintegrates in water. Feldspars and biotite are decomposed.					20	81				mean
							5		std dev		
						30	100		max		
						10	50		min		
VI	The brown-reddish residual soil consists of heterogeneous embedding material in a silty-arenaceous groundmass with organic matter. The structure and fabric of the rock mass are destroyed with disappearance of its original texture.										

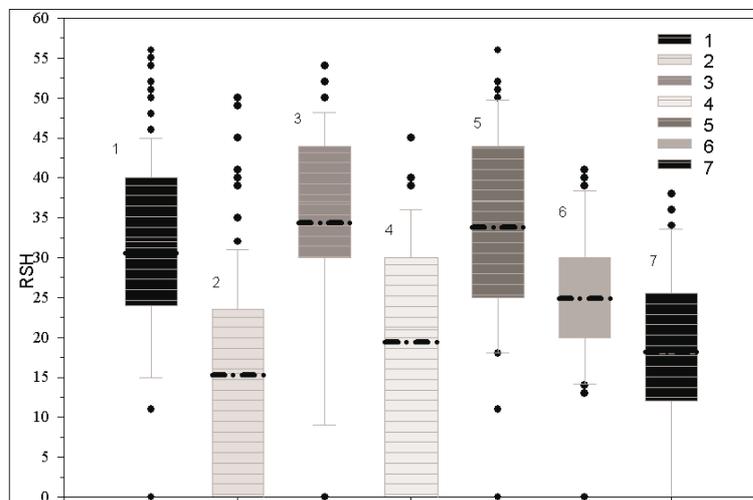


Fig. 9 - Range e valori medi di RSH, stimati nelle classi di moderata ed elevata alterazione (III, IV). Graniti - 1) Classe III; 2) Classe IV. Aureola metamorfica - 3) Classe III; 4) Classe IV. Scisti biotitici - 5) Classe III; 6) Classe IV. Scisti filladici - 7) Classe IV
- SHR (Schmidt Hammer Rebound) range and mean values estimated in moderately and highly weathered Classes (III, IV). Granites - 1) Class III; 2) Class IV. Metamorphic Aureole - 3) Class III; 4) Class IV. Biotitic Schists - 5) Class III; 6) Class IV. Phyllitic Schists - 7) Class IV

diffusi sulla sommità dei versanti e costituiscono zone non ancora coinvolte nel ringiovanimento erosivo regionale in atto. Gli stadi completamente alterati (Classe V; Fig. 6), che insieme ai precedenti rappresentano l'orizzonte più superficiale, sono ampiamente distribuiti sui fianchi dei pendii con spessore da qualche metro a qualche decina di metri; la roccia tenera altamente alterata (Classe IV) affiora, invece, lungo le incisioni vallive e nelle aree profondamente denudate. L'ammasso è caratterizzato sia da piani di foliazione e discontinuità suborizzontali con trend $N20^{\circ}-60^{\circ}$ e subordinatamente NW-SE (Tav. 1), sia da superfici di discontinuità subverticali con trend preferenziale NE-SW e subordinatamente NW-SE.

La Classe IV presenta una qualità dell'ammasso tendenzialmente scadente, dove il contenuto più elevato del materiale di disgregazione ed alterazione è stato registrato in corrispondenza di fasce interessate da un'intensa fratturazione, soprattutto per la presenza di strutture tettoniche. I valori di RSH, relativamente bassi (Tab. 1; Fig. 9), corrispondono ad un'altrettanta bassa resistenza delle superfici dei giunti (Fig. 10) caratterizzati da un profilo da planare scabro ad ondulato levigato. Al peggiorare delle condizioni di alterazione, è stata misurata una tendenza alla completa disgregazione della roccia (Classe V, saprolite) oramai caratterizzata da fenomeni spinti di argillificazione e da un notevole incremento della percentuale di terreno/ m^2 (100%). In relazione alle modalità di rottura tramite prove di indice manuale (ISRM, 1978), l'ammasso è riconducibile ad un'argilla consistente. La figura 11 illustra come, col procedere dell'alterazione, ad un notevole incremento della percentuale di terreno/ m^2 corrisponde un netto abbattimento dell'RQD.

Gli SB (Tab. 1) affiorano nel loro stato meno disturbato sotto forma di roccia tenera moderatamente alterata (Classe III, Fig. 4a); l'ammasso presenta superfici dei giunti di tipo planare scabro e materiale di riempimento generalmente grossolano e granulare. I termini

at the top of slopes and represent zones not yet involved in the ongoing regional erosion rejuvenation. Completely weathered rock (Class V; Fig. 6), representing the shallower horizon together with the previous ones, are widely distributed along the sides of slopes and have a thickness from a few metres to some tens of metres. Conversely, highly weathered soft rock (Class IV) outcrops along valleys and in highly denudated zones. The rock mass displays foliation planes and subhorizontal discontinuities ($N20^{\circ}-60^{\circ}$ and subordinately NW-SE; Plate 1), as well as subvertical discontinuity surfaces (preferentially NE-SW and subordinately NW-SE). Nevertheless, given the considerable brittleness of these lithotypes, the relevant data were scattered.

Class IV has a usually poor quality of the rock mass; in this class, the highest content of material from disgregation and weathering was recorded near highly jointed belts, due above all to the occurrence of tectonic bodies. The relatively low JCS values (Tab. 1; Fig. 9) correspond to an equally low joint surface strength (Fig. 10); joints have a planar rough to undulated smooth profile. With the advance of weathering, the rock mass tends to disgregate completely (Class V, saprolite), to become highly argillified and to have a sharp increase in its % soil/ m^2 (100%). Based on manual index tests (ISRM, 1978) for determining modes of rupture, the rock mass can be defined as consistent clay. Figure 11 shows that, with the advance of weathering, a sharp increase in % soil/ m^2 matches a sharp drop in the RQD.

The least disturbed outcrops of the SB (Tab. 1) appear as moderately weathered soft rock (Class III, Fig. 4a); the rock mass has planar rough joint surfaces and generally coarse and granular filling material. The geomechanical properties of highly weathered terms (Class IV, Fig. 4b) tend to worsen (Figs. 9, 11); joints have tendentially undulated-rough surface and relatively low strength (Fig. 10). Finally, Class V includes saprolitic terms with % soil/ m^2 >40%,

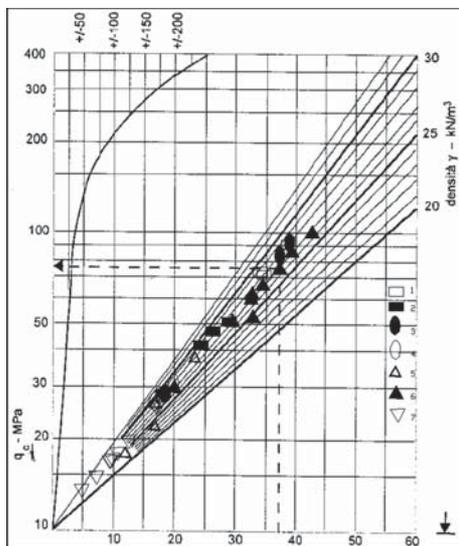


Fig. 10 - Valori di JCS: Scisti biotitici - 1) Class III; 2) Class IV; Aureola metamorfica - 3) Class III; 4) Class IV; 5) Scisti filladici alterati; Graniti - 6) Class III; 7) Class IV
 - JCS values: Biotitic Schists - 1) Class III; 2) Class IV; Metamorphic aureole - 3) Class III; 4) Class IV; 5) weathered Phyllitic Schists; Granites - 6) Class III; 7) Class IV

altamente alterati (Classe IV, Fig. 4b) sono soggetti ad un peggioramento delle proprietà geomeccaniche come si evince dalle figure 9 e 11; i giunti possiedono una superficie tendenzialmente ondulata-scabra e valori della resistenza relativamente bassi (Fig. 10). Infine la Classe V è caratterizzata da termini saprolitici con una percentuale di terreno/m² > 40%, con incremento della frazione fine, e da una qualità dell'ammasso molto scadente (Fig. 11). In tali litotipi, i termini residuali e saprolitici (orizzonte più superficiale), con spessore massimo rispettivamente di qualche metro e qualche decina di metri, affiorano in corrispondenza della sommità dei versanti. I termini altamente alterati risultano, inoltre, uniformemente distribuiti e a luoghi intercalati nei termini saprolitici, mentre gli stadi moderatamente alterati, messi a nudo dai fenomeni di erosione e/o gravitativi, emergono lungo le incisioni vallive e in prossimità della sommità degli alti morfologici. Le metamorfite sono caratterizzate da piani di scistosità variamente inclinati e sistemi di discontinuità subverticali (Tav. 1). Il peggiorare delle condizioni di alterazione comporta una dispersione dell'originario quadro fessurativo man mano che si procede verso i termini più alterati.

Lungo l'AM i rapporti esistenti tra i vari stadi di alterazione sono tendenzialmente simili a quelli individuati per gli Scisti biotitici, sebbene influenzati da situazioni geologiche locali come l'incremento di intrusioni di varia natura ed i profondi fenomeni di alterazione chimica ad essi legati. Tale assetto favorisce una parziale o completa inversione dei profili di alterazione, piuttosto discontinui con la profondità e lateralmente. L'ammasso roccioso è caratterizzato da piani di discontinuità subverticali, a luoghi suborizzontali (Tav. 1), e da una notevole dispersione dei dati, soprattutto nei termini altamente alterati.

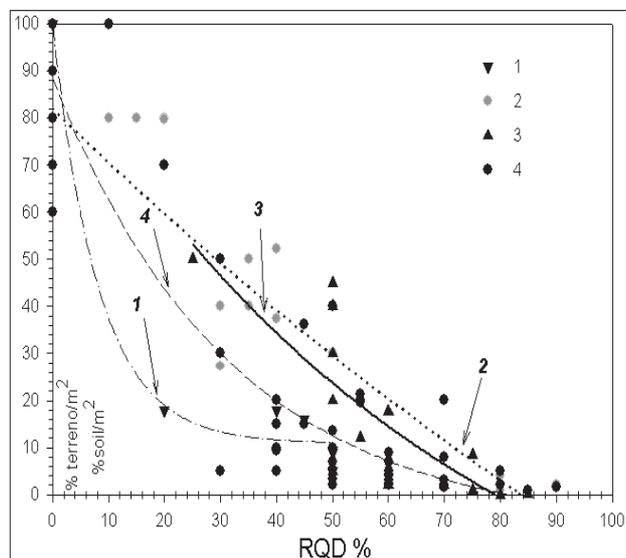


Fig. 11 - Relazione sperimentale tra % terreno/m² e RQD (%), con il progredire dell'alterazione. 1) Scisti filladici; 2) Scisti termometamorfosati; 3) Scisti biotitici; 4) Graniti
 - Experimental relation between % soil/m² and RQD (%) with the advance of weathering. 1) Phyllitic Schists; 2) Thermo-metamorphosed Biotitic Schists; 3) Biotitic Schists; 4) Granites

increasing fine fraction, very poor quality of the rock mass (Fig. 11). In these lithotypes, residual and saprolitic classes (shallower horizon, with maximum thickness of some metres and some tens of metres, respectively) are exposed at the top of slopes. Furthermore, highly weathered rocks are evenly distributed and in places interbedded into saprolitic terms. Conversely, moderately weathered rocks, which are denudated by erosional and/or gravitational processes, outcrop along valleys and near the top of morphological highs. Metamorphites have variably inclined schistosity planes and subvertical discontinuity systems, Plate 1). The worsening of weathering conditions causes dispersion of the original jointing pattern when proceeding towards the more weathered terms.

Along the AM, relations between the various weathering stages tend to be similar to those identified for the SB, although they are affected by local geological conditions, such as the increase of intrusions of various nature and associated deep chemical decomposition. This setting favours partial or total reversal of weathering profiles, which are fairly discontinuous with depth and laterally. The rock mass has subvertical and occasionally subhorizontal discontinuity planes (Plate 1) and considerable data scatter, especially in highly weathered terms. Under moderate weathering conditions, (Class III; Fig. 5a), the AM has fair and sometimes good strength and planar rough joint surface profiles (Tab. 1). The progress of weathering (Class IV) is signalled by decreasing SHR and JCS values (Figs. 9, 10) and significantly rising % soil/m², corresponding to declining RQD (Fig. 11). Completely weathered terms (Class V) display a generalised decrease in their geomechanical parameters and % soil/m² >

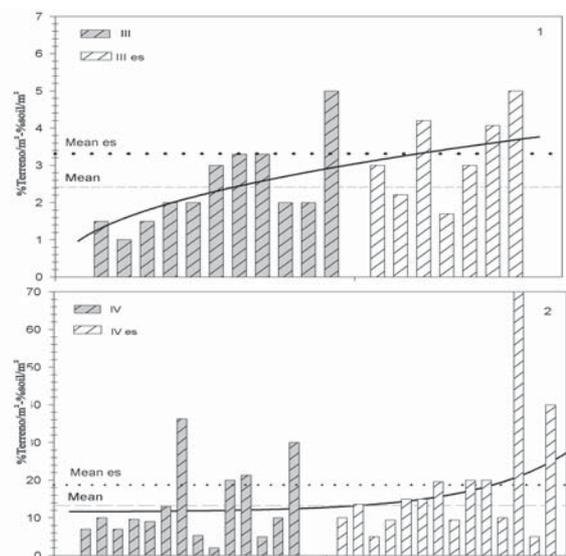


Fig. 12a - Trend della % terreno/m² nei Graniti moderatamente (1) ed altamente (2) alterati, a parità di stadio di alterazione ma in condizioni di diversa esposizione. Il termine "es" indica l'ammasso roccioso esposto
- % soil /m² in (1) moderately and (2) highly weathered Granites, weathering degree remaining equal but under different exposure conditions. The word "es" denotes deep geochemical weathering-exposed rock mass

L'AM nelle condizioni di moderata alterazione (Fig. 5a, Classe III) possiede una discreta, a luoghi buona, resistenza e profili delle superfici dei giunti di tipo planare rugosi (Tab. 1). Il procedere dell'alterazione (Classe IV) è evidenziato sia da un decremento dei valori di RSH e dell'indice JCS (Figg. 9, 10), sia da un notevole incremento della percentuale di terreno/m² a cui corrisponde una diminuzione di RQD (Fig. 11). I termini completamente alterati (Classe V) presentano, invece, un generale decremento dei parametri geomeccanici ed una percentuale di terreno/m² > 50% (Figg. 5b, 11; Tav. 1).

Nel complesso intrusivo, infine, i depositi residuali, con spessore massimo di qualche metro, affiorano prevalentemente sulla sommità dei versanti. I termini saprolitici, con spessore da qualche metro a qualche decina di metri, e quelli di elevata alterazione, con spessori fino a qualche decina di metri, sono distribuiti sia sulla sommità che sui fianchi dei pendii (Fig. 2c). La roccia moderatamente e molto alterata (Classe III e IV, Figg. 2a, b), messa a nudo dai fenomeni di erosione e/o gravitativi, affiora invece lungo le scarpate di origine fluviale e le incisioni vallive. I termini moderatamente alterati (Tav. 1) risultano fratturati secondo piani suborizzontali e verticali, con trend N50°-60°E e subverticali N300°-330°; nelle rocce completamente alterate sono presenti anche piani suborizzontali con direzione N30-40°. Nel substrato intrusivo granitico il passaggio tra la Classe III e IV (Tab.1) è segnato da un decadimento dei valori di RSH, JCS (Figg. 9, 10), nonché di RQD a cui corrisponde un incremento della percentuale di terreno/m² (Fig. 11). In particolare, nella Classe mode-

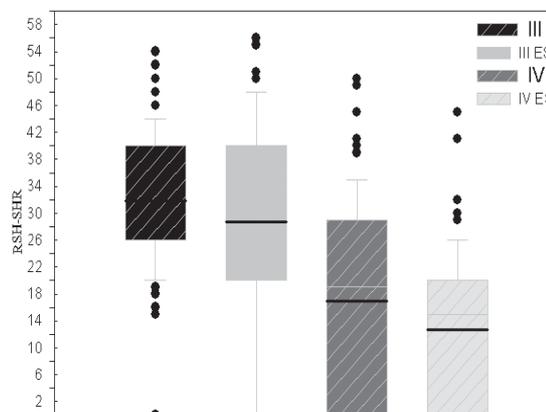


Fig. 12b - Range di RSH a parità di grado di alterazione ma in condizioni di diversa esposizione; si registra una sensibile diminuzione ed una maggiore variabilità evidente nelle classi moderatamente alterate ed esposte (III es)
- SHR range, weathering degree remaining equal but under different geochemical weathering exposure conditions; the range shows a appreciable drop and a higher variability in the moderately weathered class affected by deep geochemical processes (III es)

50% (Figs. 5b, 11; Plate 1).

Finally, in the intrusive body, residual deposits (with a maximum thickness of some metres) dominantly outcrop at the top of slopes. Saprolitic terms (with a thickness of a few metres to some tens of metres) and highly weathered terms (with a thickness of up to some tens of metres) are distributed both at the top and on the sides of slopes (Fig. 2c). Moderately and highly weathered rock (Classes III and IV, Figs. 2a, b), denudated by erosional and/or gravitational processes, outcrops instead along fluvial scarps and valleys. Moderately weathered rocks (Plate 1) are jointed along subhorizontal and vertical planes (N50°-60°E) as well as along subvertical ones (N300°-330°). Completely weathered terms also exhibit subhorizontal planes (N30-40° and N330°-340°). In the intrusive bedrock, transition from Class III to IV (Tab. 1) is marked by a drop in SHR, JCS (Figs. 9, 10) and RQD values and by rising % soil/m² (Fig. 11). In particular, the moderately weathered class has undulated smooth JRCs and average values of % soil/m² of about 3%, except in zones lying close to cataclastic belts. Filling material, where present, is generally coarse-grained and dominantly clayey near the thermal-metamorphic contact. Under complete weathering conditions, the % soil/m² is above 50% (Fig. 11) and rock quality is very poor, in spite of occasional nuclei of fractured and discoloured rock.

In the Mt. Granieri-Salincriti area, especially along the thermal-metamorphic contact belt (e.g. at S. Todaro and along the Amusa river), detailed surveys and analysis of local factors indicated a substantial change in the geomechanical behaviour of the crystalline-metamorphic rocks, due to intense chemical weathering. Having defined the weathering classes, meticulous analysis of some parame-

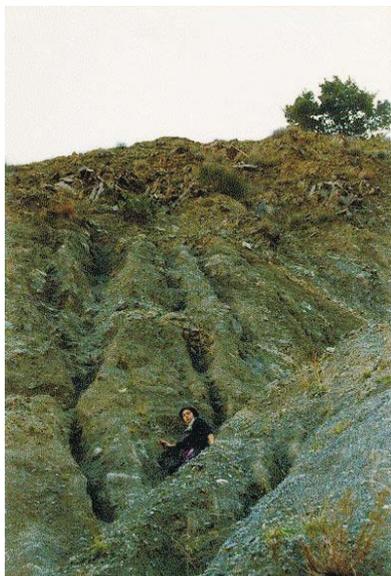


Fig. 13 - Termini metamorfici completamente alterati coinvolti nel fenomeno di rock avalanche di Salincriti
- *Completely weathered metamorphic rocks involved in the Salincriti rock avalanche*

ratamente alterata si hanno JRC di tipo ondulato liscio e valori medi della percentuale di terreno/m² intorno al 3%. Il materiale di riempimento, quando presente, è generalmente caratterizzato da frazioni grossolane, ma in corrispondenza del contatto termometamorfico questo risulta di tipo prevalentemente argilloso. In condizioni di completa alterazione la percentuale di terreno/m² è sempre maggiore del 50% (Fig. 11) e la qualità dell'ammasso, a cui si associano spesso nuclei di roccia fratturata e decolorata, è molto scadente.

Lungo la fascia di Aureola Metamorfica (come in località S. Todaro e lungo la F.ra Amusa), congiuntamente ad un'analisi dei fattori locali in gioco, il rilievo di dettaglio ha evidenziato una sensibile variazione degli aspetti geomeccanici degli ammassi cristallino-metamorfici, come effetto degli intensi processi di alterazione chimico-fisica. Definite le classi di alterazione, a parità di classe e/o stadio raggiunto dall'alterazione stessa, l'analisi minuziosa di alcuni parametri ha evidenziato importanti anomalie connesse alla diversa esposizione agli intensi processi geochimici, tali da condurre ad un'ulteriore separazione in gruppi (PELLEGRINO, 2000; BARRESE *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

Tali effetti sono evidenziati dalla presenza di Graniti biotitici sotto forma di roccia altamente e/o completamente alterata (Fig. 3b), caratterizzata da una maggiore percentuale di terreno/m²; a parità di stadio di alterazione raggiunto. Il confronto con i dati relativi alle zone distali dalla fascia di Aureola (Fig. 12a), o quanto meno non esposte ai suddetti processi, evidenzia un netto incremento con prevalenza della frazione argillosa sia nell'ammasso sia all'interno delle fratture (BARRESE *et alii*, 2006). A quest'ultimo aspetto è attribuibile la riduzione della resistenza lungo le discontinuità, nonché la sensibile diminuzione del range di RSH (Fig. 12b). In corrispondenza del contatto sono state osservate, inoltre, una maggiore apertura e una dispersione della spaziatura, dovute ai cambiamenti mineralogici e volumetrici,

ters revealed a number of anomalies, weathering class or degree remaining equal. Such anomalies suggested a further separation into groups of the observed weathering classes of the investigated lithotypes, depending on different exposure to intense geochemical processes (PELLEGRINO, 2000; BARRESE *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

In particular, these effects are recorded by highly and/or completely weathered biotitic granites, appearing as highly and/or completely weathered rock (Fig. 3b) with higher % soil/m². For the same weathering degree, comparison with data concerning zones distal from the thermo-metamorphic belt (Fig. 12a) or at least non-exposed to the above processes, showed a sharp increase and dominance of the clayey fraction in the rock mass and of clayey material inside joints (BARRESE *et alii*, 2006). This finding may justify the recorded decrease in frictional strength along discontinuities, as well as a perceivable drop in the SHR range (Fig. 12b), very clear in highly weathered terms. Near the contact, greater opening and spacing dispersion of joints were also observed; these phenomena are the result of mineralogical, volumetric and physical changes (porosity, strength), as well as geomechanical and rheological changes which occur within the rock mass under conditions of incipient collapse. This fact explains the masking of the original trend of discontinuities, as demonstrated by intense and chaotic jointing. Under conditions of exposure to the geochemical processes, also deformability and strength parameters are affected (PELLEGRINO, 2000; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

Additionally, intense geochemical phenomena were identified in the thermo-metamorphosed schists (Fig. 14), displaying a horizontal and vertical sequence of non-linear weathering profiles. These profiles are strictly dependent on groundwater circulation and on the occurrence of a localised aquifer above the thermal-metamorphic

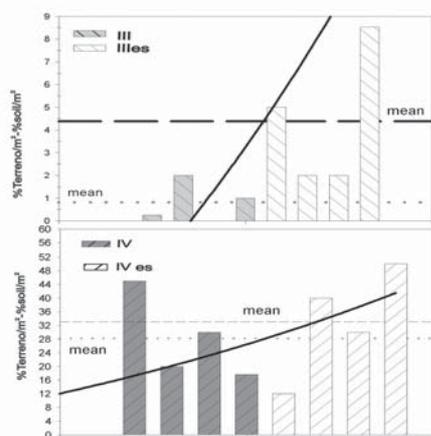


Fig. 14a - Trend della % terreno/m² negli Scisti biotitici moderatamente (1) ed altamente (2) alterati in condizioni di diversa esposizione. Il termine "es" indica l'ammasso roccioso esposto
- a) Trend of % soil /m² in (1) moderately and (2) highly weathered Biotitic Schists, considering "affected" (III es-IV es) and "unaffected" rocks (III-IV) with the same weathering degree

con effetti sul comportamento geomeccanico e reologico (PELLEGRINO, 2000; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

Intensi fenomeni geochimici negli Scisti termometamorfosati, caratterizzati da una sequenza sia orizzontale sia verticale dei profili di alterazione (Fig. 14), sono strettamente condizionati dalla circolazione idrica sotterranea, con particolare riferimento alla presenza di un acquifero localizzato proprio in corrispondenza del contatto termometamorfico (BARRESE *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006). Nelle Cornubianiti "sotto falda" sono presenti, infatti, diffusi volumi di roccia sciolta con immersi nuclei meno alterati (spessore da 10 a 50 m), di colore bruno-rossastro o avana-verdastro, molto alterati con patine di ossidazione, struttura saprolitica ed intensi processi di argillificazione (Fig. 4b; BARRESE *et alii*, 2006). Tale assetto è presente nelle metamorfiti già coinvolte nel fenomeno di rock-avalanche dove si alternano rocce completamente alterate con rocce tenere (Fig. 13). Nella Tabella 1 sono riassunti i dati che hanno condotto alla classificazione in relazione al complesso dei parametri adottati.

EVOLUZIONE GEOMORFOLOGICA E PROCESSI DI ALTERAZIONE

I caratteri geomorfologici dell'area esaminata (Tav. 1) sono molto articolati e complessi. Si tratta di forme e processi che si generano in un contesto climatico morfodinamico attivo (mediterraneo ad alta sismicità). Un'attenta analisi del territorio ha messo in evidenza una franosità diffusa, legata all'interazione di molti fattori.

Movimenti di versante e profili di alterazione

Le analisi condotte hanno permesso di definire per i litotipi coin-

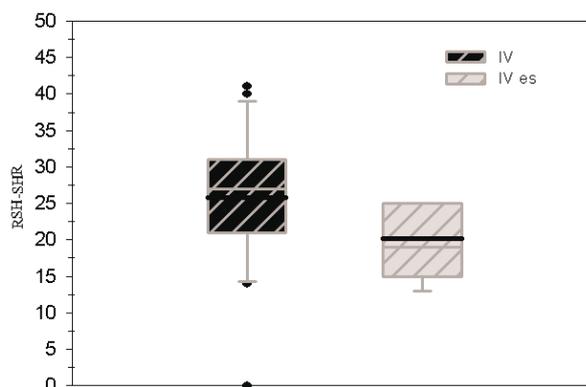


Fig. 14b - Range di RSH negli Scisti biotitici a parità di grado di alterazione ma in condizioni di diversa esposizione
- SHR range in Biotitic Schists, weathering degree remaining equal but under different geochemical weathering exposure conditions

contact (BARRESE *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006). Indeed, "below-aquifer" cornubianites have diffuse and continuous volumes of loose rock, incorporating less weathered nuclei (10 to 50 m-thick); this highly weathered rock of brown-reddish or havana brown-greenish colour has oxidation patinae, saprolitic structure and intense argillification (Fig. 4b; BARRESE *et alii*, 2006). These characters are corroborated by alternations of completely weathered rocks with soft rocks in metamorphites previously involved in rock avalanches (Fig. 13). Moreover, under conditions of exposure to the aforesaid geochemical processes, a general and considerable increase was noted in the amount of soil/m² when passing from moderately to highly weathered terms (Tab. 1).

GEOMORFOLOGICAL EVOLUTION AND WEATHERING

The geomorphology of the study area (Plate 1) is extremely diversified and complex, owing to the variety of the local lithotypes, considering that they occur in a geodynamic active setting, with Mediterranean climate, high seismicity, strong uplift and consequent erosion. Thorough analysis of the study area and of its surroundings highlighted that active and/or quiescent landsliding (WP/WLI, 1993) is common and that it stems from the interaction of multiple factors.

Slope movements and weathering profiles

The analyses conducted as part of this study made it possible to

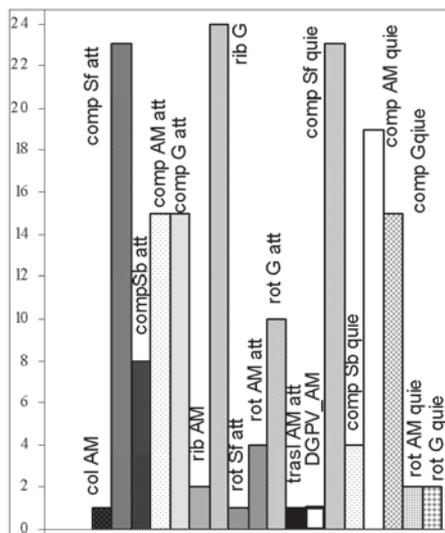


Fig. 15a - Movimenti franosi rilevati, suddivisi per litotipo principale coinvolto, per tipologia di movimento e stato di attività; G) Graniti; AM) fascia di Aureola metamorfica (Graniti e Scisti termometamorfosati); Sb) Scisti biotitici; Sf) Scisti filladici; col) colata; comp) complessa; rib) ribaltamento/crollo; rot) movimento rotazionale; trasl) movimento traslazionale; DGPV) Deformazione Gravitativa Profonda di Versante; att) attivo; quie) quiescente

- Identified landslides (main lithotype, type of movement and state of activity); G) Granites; AM) Thermal-metamorphic contact belt (Granites and thermo-metamorphosed Schists); Sb) Biotitic Schists; Sf) Phyllitic Schists; col) flow; comp) complex; rib) top-ple/collapse; rot) rotational movement; trasl) translational movement; DSGSD) Deep-seated gravitational slope deformation; att) active; quie) dormant

volti la distribuzione, il tipo, lo stato di attività, le geometrie dei movimenti in massa, nonché lo stile e l'evoluzione in senso spaziale dei meccanismi di movimento (Tav. 1; VARNES, 1978; WP/WLI, 1993; CRUDEN & VARNES, 1996). L'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito, altresì, di definire il "modello geologico evolutivo dei versanti" e la stima dell'incidenza dei processi di alterazione sulla evoluzione dei pendii.

Le numerose indagini condotte in questa area hanno consentito di realizzare una banca dati con l'utilizzo di tecnologie SIT. Tenuto conto dell'estensione areale di ciascun litotipo, sono stati, successivamente, quantificati i movimenti in massa, misurate le aree in frana rispetto all'affioramento totale ed individuate le tipologie di dissesto predominanti (Figg. 15a, b).

Negli SF la presenza di ampie coltri di argille prodotte dall'alterazione, talora con spessori di alcune decine di metri, costituisce un fattore predisponente ai dissesti, frequentemente di tipo complesso (Figg. 15a, b). Tali fenomeni, ubicati nella porzione sommitale dei versanti, si sviluppano nell'orizzonte più superficiale (Classe V) attraverso soil-slip e debris earth slide con componente rotazionale, capaci di coinvolgere successivamente le porzioni meno alterate (Classe IV), condizionate dalle discontinuità, dai piani di foliazione, di fratturazione e dalla presenza di nuclei isolati di alterazione nell'ammasso. I movi-

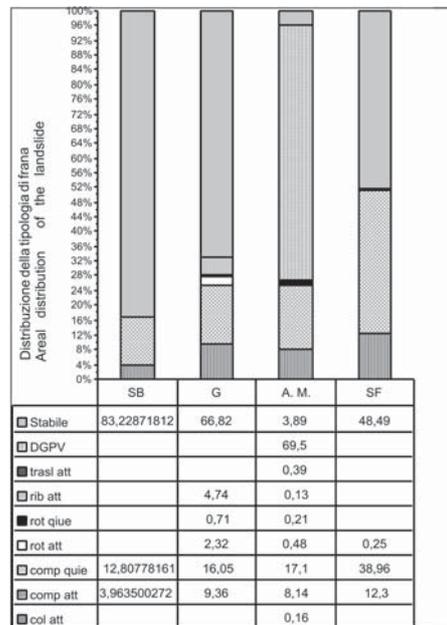


Fig. 15b - Medio-basso Bacino delle F. Allaro ed Amusa: distribuzione delle tipologia di frana per ciascun litotipo analizzato, espressa in % rispetto all'area di affioramento totale. G) Graniti; AM) fascia di Aureola metamorfica; Sb) Scisti biotitici; Sf) Scisti filladici

- Middle-lower basin of the Allaro and Amusa rivers: areal distribution of landslide type for each of the investigated lithotypes, expressed in % of total outcropping area. G) Granites; AM) Thermal-metamorphic contact belt SB) Biotitic Schists; SF) Phyllitic Schists

define, for the lithotypes involved, location, type, state of activity and geometry of mass movements, as well as style of activity and distribution (spatial evolution) of movement mechanisms (Plate 1; VARNES, 1978; WP/WLI, 1993; CRUDEN & VARNES, 1996). Processing of the resulting data enabled to characterise the main "geological-evolutionary models of the slope" and to estimate the impact of weathering on recent slope evolution.

The starting point of these investigations was a GIS database. Subsequently, taking into account the areal extent of each lithotype, mass movements were quantified, landsliding areas vs. total outcrops were measured and the dominant types of mass movements were identified (Figs. 15a, b); however, landsliding areas were surveyed by default, after analysing the types of movements of higher activity and extent.

In the SF, the occurrence of wide weathered clay covers, at times reaching a thickness of some tens of metres, is a predisposing factor for slope instability, often of complex style (Fig. 15a, b). These phenomena, located in the top part of slopes, correspond to soil slips and debris-earth slides, with rotational and occasionally translational mechanisms in the shallower horizons (Class V). Subsequently, they involve less weathered horizons (Class IV) and are conditioned by discontinuities, prevailing subhorizontal foliation planes, jointed

menti con componente retrogressiva e tendenti a coinvolgere larghe porzioni di versante, si evolvono in modo piuttosto repentino in debris-flow che alimentano le sottostanti conoidi (Fig. 16a). Le aree ed i canali di alimentazione coinvolgono talvolta piccole porzioni di versante con la tendenza a diffondere nei bacini di ordine superiore, attraverso i canali tributari, grandi quantità di materiale costituito da roccia moderatamente e/o fortemente alterata. Relativamente alle conoidi, indipendentemente dal litotipo coinvolto, il limite frontale può essere non-confinato e/o incanalato mentre quello laterale risulta spesso confinato. La maggior parte delle conoidi è, comunque, caratterizzata da un'alternanza di fasi di costruzione e di demolizione ad opera dell'attività erosiva che si sviluppa tra due eventi di piena successivi.

Nei litotipi Scisti Biotitici ed in quelli Granitici è stata rilevata una similitudine nella dinamica dei versanti: crolli, soil slip, movimenti complessi (Figg. 15a, b). I crolli sono frequenti nell'ammasso fratturato (Classi III-IV), mentre i soil slip nelle classi V completamente alterate e nei termini residuali. Le frane di tipo complesso si esplicano, invece, attraverso crolli e movimenti repentini del tipo rock block e debris avalanche, con una ripresa del movimento del detrito che, canalizzato, va ad alimentare le sottostanti conoidi; si tratta di fenomeni che coinvolgono la parte posta a quote più basse del versante, ampiamente diffusi nella Classe III ed, in particolare, lungo le scarpate che bordano le Fiumare Amusa ed Allaro (Fig. 16b, 16c).

Alcuni movimenti complessi, molto frequenti nei termini granitici intrusivi, presentano una dinamica molto simile a quella riscontrata negli Scisti filladici (Fig. 16a). Soil slip e debris earth slide, nei termini residuali e saprolitici, si sviluppano mediante movimenti complessi, che interessano le Classi IV e III.

In occasione di significativi eventi meteorici il materiale si muove verso il principale canale di drenaggio del bacino con le caratteristiche di un flusso di detrito. Lungo la fascia che comprende l'Aureola Metamorfica (Figg. 15a, b), comprensiva sia dei termini cornubianitici sia di quelli granitici, sono state individuate diverse zone franose. Sono, inoltre, presenti alcune "large landslide", rappresentative della fase terminale di deformazioni gravitative profonde di versante. Queste coinvolgono anche i termini cristallino-metamorfici profondamente alterati.

In corrispondenza delle aree ove gli stadi evolutivi dei processi di alterazione assumono una distribuzione discontinua, (Fre Allaro, località S. Todaro), si individuano due cinematismi principali (Fig. 16c). Si tratta di rock block slide che si esplicano attraverso superfici di scorrimento roto-traslative in avanzamento. A tali movimenti, relativamente profondi, si associano nell'orizzonte più superficiale altre forme d'instabilità. Tali dissesti possono coinvolgere successivamente le porzioni più profonde dell'ammasso (Classe IV) attraverso crolli, rock block e debris slide e/o debris avalanche.

M. GRANIERI-SALINCRITI: ALTERAZIONE E MORFODINAMICA DEL VERSANTE

Nell'area di M. Granieri Salincriti, le evidenze geomorfologiche

planes and deeply weathered rock mass nuclei. These landslides, with retrogressive and enlarging distribution of movements, may rapidly evolve into debris flows, feeding the underlying fans (Fig. 16a) where the material has a medium-fine grain size. The areas and channels supplying these fans may involve small portions of slopes and entire basins connected to tributary channels where moderately and/or highly weathered rock is denudated by intense erosion. With regard to these fans, whatever the lithotype involved, their frontal boundary may be unconfined and/or channelised, while their lateral boundary may be confined and/or unconfined. Nevertheless, most of the fans experience alternating periods of construction and erosion.

In the SB and Gr lithotypes, a similar slope dynamics was recorded: rock-block falls, soil slips, complex movements (Fig. 15a, b). Rock-block falls are frequent in jointed rock masses (Classes III-IV), whereas soil slips are common in completely weathered classes and in residual rocks. In contrast, complex landslides are expressed by rock-block falls and sudden movements of rock-block and debris-avalanche type, with associated remobilised and channelised debris which feed the underlying fans. These are enlarging and successive-style phenomena, very widespread in Class III and namely along the scarps bordering the Amusa and Allaro rivers (Figg. 16b, 16c).

The dynamics of some complex movements, very frequent in intrusive terms, is comparable to the one of phyllitic schists (Fig. 16a) soil slips and debris-earth slides, involving saprolitic and residual terms, are coeval (composite movements) with falls, topples and rock-block slides which develop in Classes IV and III. Upon severe weather events, this material flows into the main drainage channel of the basin through debris torrents. Various landsliding zones were identified along the AM (Figs. 15a, b) which, in the morpho-evolutionary setting of the slopes, comprises both cornubianitic and granitic terms. Some complex movements and large landslides were also observed; these movements often represent the terminal stages of deep slope deformations which affect deeply weathered crystalline-metamorphic rocks. Two main coeval mass movements, of successive style and multi-directional distribution (Fig. 16c), were found to occur in areas characterised by complex phenomena (Allaro and Amusa rivers at S. Todaro) as a result of the discontinuous distribution and of the considerable anisotropies of weathering degrees. These movements may be defined as rock-block slides, i.e. advancing roto-translational surfaces which develop along the thermal-metamorphic contact belt, where deeply weathered portions of rock are present. In the shallow horizon, other coeval and tendentially multi-directional landslides occur. From the most weathered terms, they subsequently involve the deepest portions of the rock mass (Class IV), causing falls, rock block and debris slides and/or debris avalanches.

MT. GRANIERI-SALINCRITI: WEATHERING AND SLOPE MORPHODYNAMICS

The Mt. Granieri-Salincriti area has geomorphological evidence

CONSTRUCTION OF ENGINEERING- GEOLOGY MODEL OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCK MASSES EXPERIENCING DEEP WEATHERING PROCESSES: EXAMPLE OF APPLICATION TO THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIE, CALABRIA, ITALY)

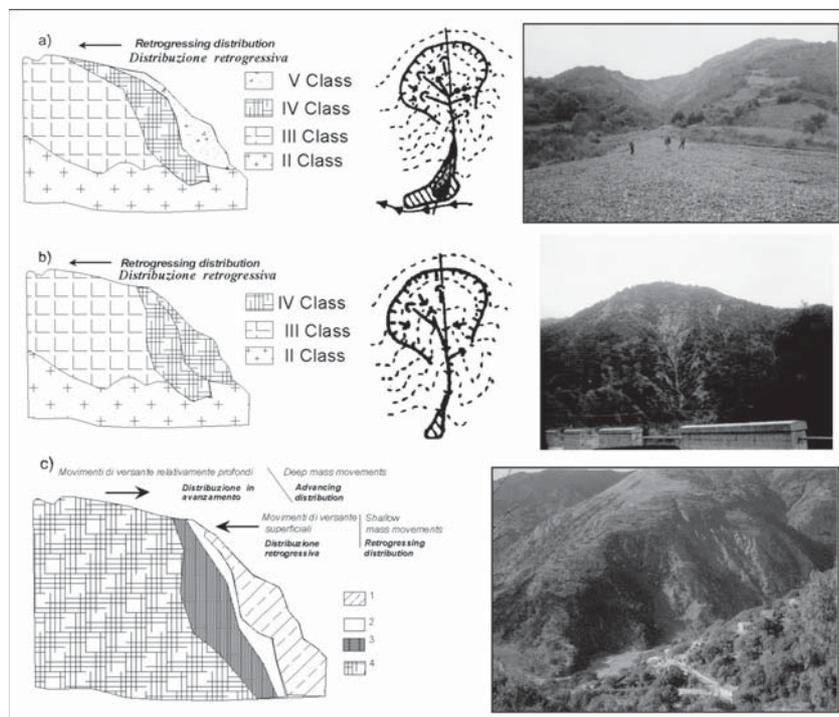


Fig. 16 - Modelli geologico-evolutivi dei versanti nelle F. Allaro ed Amusa, basati sulla tipologia del movimento, sullo stile di attività e sull'evoluzione spaziale del dissesto (distribuzione), in relazione alle litologie coinvolte ed ai relativi stadi di alterazione. a) frane complesse e debris flow; b) frane complesse e torrenti di detrito; c) frane complesse lungo la fascia di contatto termo-metamorfico - Legenda: 1) Scisti biotitici da moderatamente ad altamente alterati, con nuclei completamente alterati lungo le fasce di intrusioni; 2) Aureola metamorfica altamente alterata; 3) Fascia di Aureola metamorfica da altamente a completamente alterata; 4) Complesso intrusivo da debolmente ad altamente alterato

- Geological-evolutionary models of slopes in the Allaro and Amusa river basins, based on type of movement, style of activity and spatial evolution of instability (distribution) vs. lithotypes weathering degrees. a) complex landslides and debris flow; b) complex landslides and debris torrent; c) complex landslides along the thermal-metamorphic contact belt-Legend: 1) Moderately to highly weathered Biotitic Schists, with completely weathered nuclei along intrusion belts. 2) Highly weathered Metamorphic Aureole; 3) Highly to completely weathered thermal-metamorphic contact belt; 4) Weakly to highly weathered intrusive complex

attribuibili all'esistenza di una deformazione profonda sono rappresentate dall'insaccamento nella zona sommitale (ZISCHINSKY, 1969) con la formazione di una doppia cresta e di una trincea, mentre a mezza costa da scarpate, da terrazzi in contropendenza, da zone di fratturazione per concentrazione di sforzi di taglio, da zone convesse non riconducibili ad accumuli di frana, da numerose scarpate, dirupi, balze, increspature nel terreno, profili concavo-convessi, nonché da un corredo di piccole-medio frane attive e/o quiescenti (Fig. 7; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979b; PRESTININZI, 1984). Il rock avalanche del 1953 (circa 2Mm³ di roccia) ha rappresentato la più evidente evoluzione parossistica della DGPV in "large landslide" accelerata da eventi alluvionali a carattere eccezionale. Pur interessando quasi interamente l'Aureola Metamorfica ed i sovrastanti Scisti biotitici, il fenomeno è stato fortemente condizionato dai termini di alterazione lungo la fascia di contatto termometamorfico. Sebbene le superfici di scorrimento non corrispondano interamente ed esclusivamente ai soli sistemi di fratturazione, la massa franata è stata comunque delimitata dai due sistemi di fratturazione principali con una direzione di movimento di circa N40° e pendenza uguale a quella dell'attuale superficie topografica. Successivi processi erosivi hanno rapidamente smantellato il materiale che ha alimentato il sottostante debris-flow conoide.

In accordo con i modelli evolutivi di tipo sackung (HUTCHINSON, 1988) e con la conoscenza pregressa del pendio in esame, gli indicatori cinematici presenti lungo il tratto superiore del versante evidenziano la presenza di superfici di taglio ed un complesso cinematismo delle masse in movimento che presentano superfici di rottura connes-

of a deep sackung-type movement (ZISCHINSKY *sensu*, 1969): top-slope sackung with formation of a double crest and of a trench, mid-slope morpho-structural scarps, counterslope terraces, jointed zones due to shearing stress concentration, convex zones not ascribable to landslide material, numerous scarps, cliffs, crags, wrinkled soil, concave-convex profiles, as well as location of associated active and/or quiescent landslides (Fig. 7). Indeed, various phenomena have been accompanying the deep deformation process, partially evolving into rock avalanche-debris flow episodes (Plate 1; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979b; PRESTININZI, 1984). The 1953 rock avalanche (about 2 Mm³ of rock) was the most patent evidence of paroxysmal evolution of the DSGSD, accelerated by short-lasting and heavy rainfall. Although involving the AM and overlying BS (with oriented discontinuities, Plate1) almost entirely, the rock avalanche was strongly influenced by weathered terms along the thermal-metamorphic contact belt. Even if the sliding surfaces do not match joint systems entirely and solely, the mobilised mass was bounded by the two main joint systems with a direction of movement of about N40° and a gradient equal to the one of the present topographic surface. Subsequently, the collapsed material was rapidly eroded, thereby generating a debris fan.

Up-slope kinematic indicators are consistent with sackung-type evolutionary models (HUTCHINSON, 1988) and with prior slope evolution. They show the occurrence of confined shearing surfaces with multi-directional distribution and multiple repetitions of the same movement in which the mobilised masses do not share rupture sur-

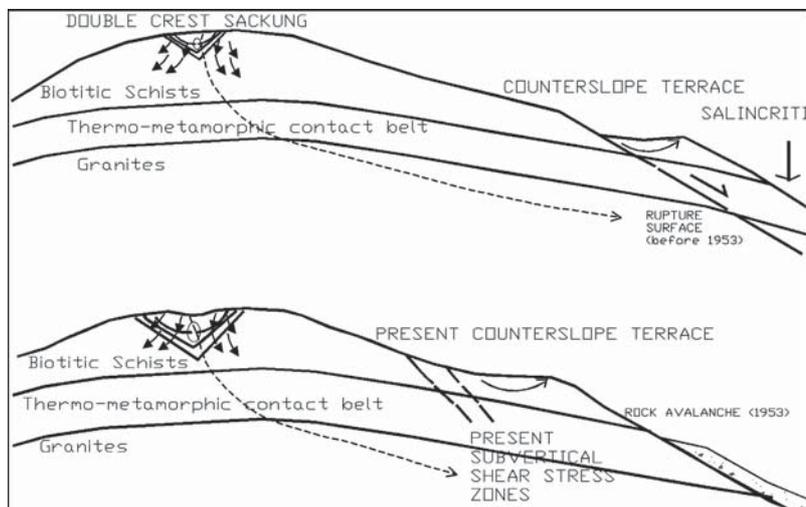


Fig. 17 - Profilo geomorfologico del tratto medio-alto di M. Granieri-Salincriti (NE-SW): a) prima del 1953; b) oggi. Le superfici di taglio, determinanti nell'attivazione dei fenomeni di rock avalanche, possiedono uno stile successivo; ogni singola superficie di scorrimento ha, inoltre, una distribuzione multidirezionale (allargamento e prevalentemente avanzante)
- *Geomorphological profile of the middle-upper portion of Mt. Granieri-Salincriti (NE-SW): a) before 1953; b) today. The shearing surfaces, triggering rock avalanche phenomena, have a successive style; each shearing surface has a multi-directional distribution (enlarging and prevalently advancing)*

se a direzioni di spostamento differenti ("stile successivo"; Fig. 17).

A partire dagli elementi conoscitivi complessivamente acquisiti è stato così possibile definire un corretto modello geologico-evolutivo di riferimento (Fig. 18).

Gli intensi fenomeni di alterazione presenti inducono un generale decadimento delle caratteristiche geomeccaniche e reologiche dell'ammasso, principalmente lungo la Fascia di Aureola Metamorfica, che assumono un comportamento tendenzialmente visco-plastico (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006). Tale condizione produce, verosimilmente, zone di rottura localizzata lungo le fasce di debolezza con distribuzione non lineare delle sollecitazioni e concentrazione degli sforzi di taglio sulla sommità del pendio.

INDAGINI DI SOTTOSUOLO

Per meglio definire i fenomeni in atto è stata avviata una campagna di indagini di sottosuolo e di monitoraggio, progettata sulla base del modello geologico di versante dedotto mediante l'approccio multidisciplinare descritto.

Sulla sommità del pendio (località Piana M. Granieri) l'attività del fenomeno analizzato, ed in particolare le associate frane (che rappresentano i più chiari e pericolosi effetti di superficie del creep profondo), è evidenziata da avvallamenti ed increspature del terreno, nonché da fratture di tensione con rigetto verticale, lungo la Strada Provinciale Caulonia-Nardodipace, rispettivamente di circa 6 ed 8 cm (velocità di deformazione qualche cm/anno). Tali evidenze, presenti a monte della scarpata principale del fenomeno del 1953 (fratture di tensione, ecc.), testimoniano l'ulteriore retrogressione dello stesso e l'incipiente attivazione di una nuova rock avalanche.

Sono state condotte prospezioni sismiche a riflessione (Figg. 7; 19), i cui risultati hanno evidenziato la presenza di una prima discontinuità intorno ai 28 m dal p.c, ed una seconda posta intorno a 38 m dal p.c.

Nella stessa località è stato eseguito un sondaggio a rotazione a carotaggio continuo negli Scisti biotitici, fino alla profondità di 40m

faces (successive style; Fig. 17).

Based on the collected data, a correct reference geological-evolutionary model was built (Fig. 18). Ongoing intense geochemical processes deteriorate the geomechanical and rheological properties of the rock mass, especially along the thermal-metamorphic contact belt, which has tendentially visco-plastic behaviour (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006). This setting is likely to induce weak belts with non-linear and discontinuous distribution inside the slope, as well as concentrated shearing stresses at the top of slopes.

SUBSOIL INVESTIGATIONS

To understand the dynamics of the Mt. Granieri-Salincriti slope, a subsoil investigation and monitoring programme was initiated. The programme was designed on the basis of the slope model obtained with the above-described multi-disciplinary approach.

At the top of the slope (Mt. Granieri plain), the activity of the investigated deep creep phenomenon and particularly of the associated shallower mass movements (representing the most evident and hazardous effects of deep creep) is witnessed by soil depressions and folds and by horizontal and vertical deformations along the Caulonia-Nardodipace provincial road by about 6 and 8 cm (strain rate: few centimeters/year), respectively. This evidence and various kinematic indicators upslope of the 1953 event scarp, are to be ascribed to the occurrence of shearing surfaces and/or weak belts, with potential future collapse.

Seismic reflection surveys were also carried out (Figs. 7, 19) which revealed two discontinuities respectively at 28 and 38 m b.g.l.

In the same site, holes were drilled (rotary drilling and continuous coring) into the SB down to a depth of 40 m (Figs. 7, 19); stratigraphic analysis of the drillhole and corehole data indicated an alter-

CONSTRUCTION OF ENGINEERING- GEOLOGY MODEL OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCK MASSES EXPERIENCING DEEP WEATHERING PROCESSES: EXAMPLE OF APPLICATION TO THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIE, CALABRIA, ITALY)

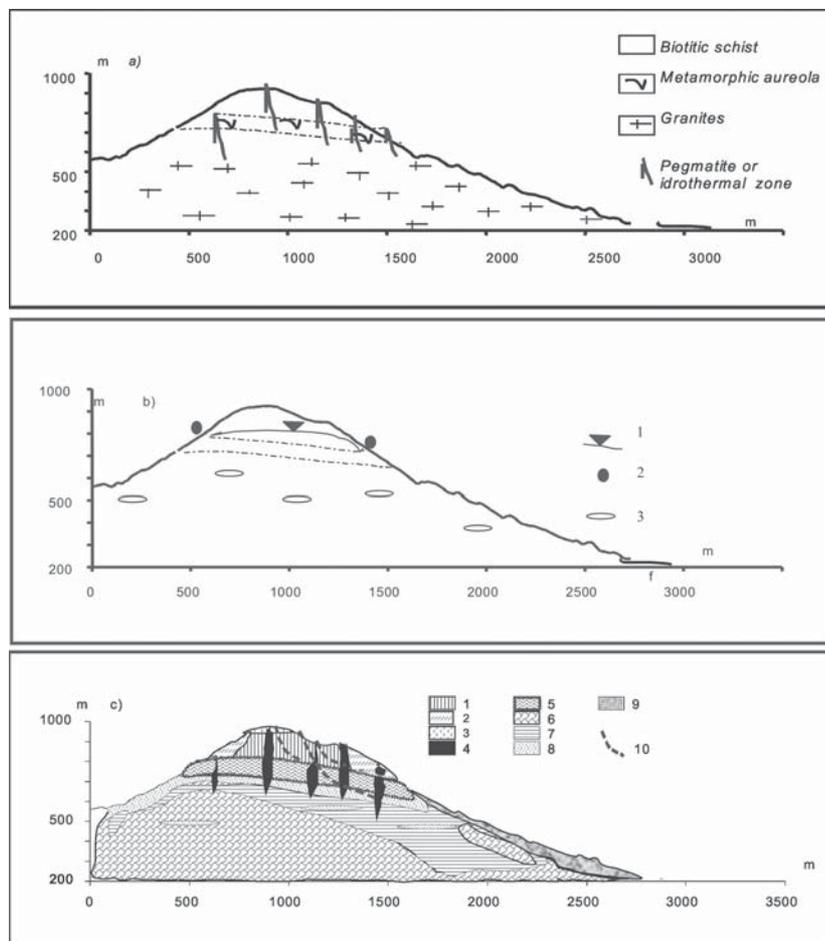


Fig. 18

Schema relativo alla relazione Fenomeno-Causa-Effetto:

- a) Assetto geologico-strutturale.
- b) Infiltrazione e circolazione profonda con sviluppo di reazioni geochemiche (fenomeni); 1) Falda localizzata nelle metamorfiti; 2) Emergenze rilevate lungo il contatto termometamorfico; 3) Falde sospese nei graniti alterati.
- c) Schematizzazione dei profili di alterazione nei termini cristallino-metamorfici, dove lo sviluppo di fasce di debolezza e/o la concentrazione di sforzi di taglio (causa) favorisce l'innescio di processi gravitativi (effetti). Scisti biotitici 1) moderatamente alterati; 2) altamente alterati; 3) completamente alterati; 4) fasce completamente alterate, legate a zone di intrusione; Aureola metamorfica 5) da altamente a completamente alterata; Graniti 6) moderatamente alterati; 7) altamente alterati; 8) completamente alterati; 9) rock avalanche-debris flow; 10) shear zones confinate connesse al fenomeno di creep profondo

- Phenomenon-cause-effect relation

a) Geological-structural setting.

b) Seepage and groundwater conditions with development of geochemical processes (phenomena): 1) aquifer contained in the metamorphites; 2) springs identified along the thermal-metamorphic contact; 3) perched aquifers in the weathered granites.

c) Schematic profiles in the crystalline-metamorphic terms, where weak belts and/or concentrated shear zones (cause) produce slope instabilities (effects). Biotitic Schists 1) moderately weathered; 2) highly weathered; 3) completely weathered; 4) completely weathered belts related to intrusion zones; Metamorphic Aureole; 5) highly to completely weathered; Granites 6) moderately weathered; 7) highly weathered; 8) completely weathered; 9) rock avalanche-debris flow; 10) confined shear zones connected to deep-creep phenomenon

(Fig. 7; 19). L'esame della stratigrafia ha evidenziato un'alternanza di terreni variamente alterati. Le esplorazioni hanno, inoltre, rilevato la presenza di due fasce di discontinuità confinate nella porzione sommitale del versante, alla profondità di 17-18 m e 34,1-36,2 m., da ricondurre a zone di fratturazione confinate nella zona "attiva" del versante (PELEGRINO & PRESTININZI, 2006).

Monitoraggio

Il controllo dell'entità e direzione degli eventuali spostamenti è stato programmato attraverso l'installazione in foro di due sonde inclinometriche, proprio alle profondità di 18 m e 34 m (Fig. 7, 19). I risultati ottenuti hanno evidenziato spostamenti differenti alle due diverse profondità esaminate (Fig. 20). L'analisi dettagliata dei dati ha evidenziato che gli spostamenti presenti nelle due zone assumono anche direzione differente: N44°-N46° a 18 metri di profondità e N87°-90° a 34 m (Fig. 7, 19). I movimenti delle masse registrati a 34 metri possiedono una velocità degli spostamenti piuttosto costante nel tempo, a testimonianza di deformazioni associate a processi quasi-stazionari di creep profondo (stick-slip mechanism; PELEGRINO &

nation of variably weathered terms.

Investigations also identified two confined discontinuity belts at the top of the slope, at a depth of 17-18 m and 34.1-36.2 m, to be attributed to jointed zones in the "active" zone of the slope (PELEGRINO & PRESTININZI, 2006).

Monitoring

For the monitoring survey in the Mt. Granieri plain, two in-hole inclinometric probes were installed at depths of 18 m and 34 m (Figs. 7, 19), considering the shallower mass movements associated with deep creep. Results showed centimetre-scale deformations, which were more pronounced near the 34 m-deep probe (Fig. 20). Careful analysis of the data evidenced that the deformations along the two jointed zones have differential displacements with directions of approximately N44°-N46° and N87°-90°, at 18 m and 34 m, respectively (Figs. 7, 19). The movements recorded at 34 m have a strain rate which is tendentially constant over time; this finding infers that quasi-stationary deep creep processes operate at depth with repetitive

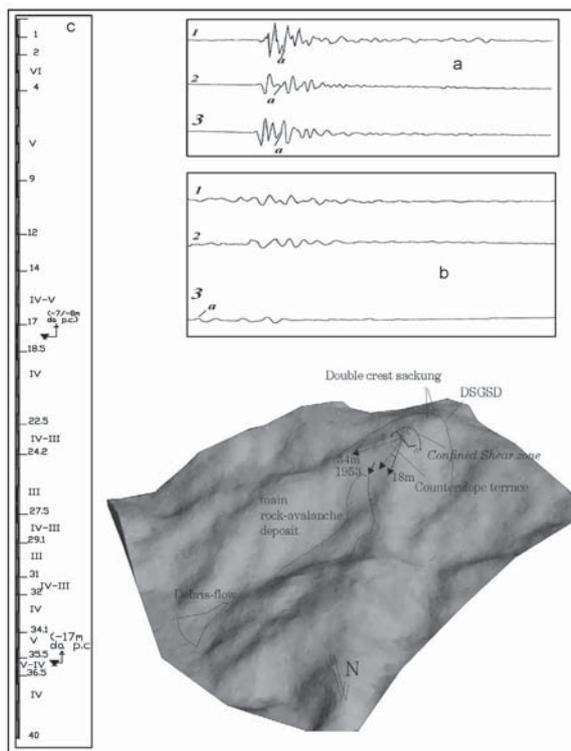


Fig. 19 - Quadro sintetico dei principali aspetti cinematici del versante M. Granieri Salincriti; risultati delle prospezioni sismiche a) stendimento A; b) stendimento B; c) stratigrafia del sondaggio
- Summary of main kinematic characters of Mt. Granieri Salincriti slope; seismic survey findings a) scanline A; b) scanline B; c) borehole stratigraphy

PRESTININZI, 2006). Gli spostamenti connessi alla profondità di 18 metri mostrano invece notevole variabilità (Figg. 20 e 21). Tale comportamento è dovuto sia ad una rilevante sensibilità dei livelli superiori di terreno verso gli eventi pluviometrici sia agli effetti generati dalle deformazioni che avvengono a maggiore profondità, che assumono velocità di spostamento piuttosto costanti in profondità.

Il confronto tra la dinamica degli spostamenti nel tempo ed i relativi eventi pluviometrici evidenzia che, soprattutto nei livelli superiori, in corrispondenza di eventi piovosi si verificano evidenti variazioni delle deformazioni (Figg. 20 e 21). Si rileva altresì che le precipitazioni controllano sia il trend delle deformazioni e sia le velocità di spostamento. Sulla base delle analisi effettuate sono state definite due diverse tendenze evolutive delle profondità investigate come risposta sia ad eventi piovosi intensi sia ad eventi diffusi e di lunga durata. In particolare, gli spostamenti a 18 m hanno mostrato notevoli variazioni delle velocità di deformazione caratterizzate da sequenze di accelerazioni e decelerazioni con velocità di deformazioni tendenti a zero. Gli spostamenti a 34 m hanno evidenziato solo un loro regolare incremento senza apprezzabili influenze delle variazioni di pressioni neutre, registrate nelle parti più superficiale del versante (Figg. 20 e 21).

I dati acquisiti consentono inoltre di rilevare come in occasione dell'evento dell'8-10 settembre 2000, prolungato e di particolare intensità, entrambe le sonde hanno registrato un aumento delle velocità degli spostamenti (Fig. 21). Gli spostamenti cumulati della sonda posta a 18 metri hanno evidenziato anche un notevole spostamento della componente

incremental deformation movements (stick-slip mechanism; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006). By contrast, the deformations at 18 m are notably discontinuous (Figs. 20 and 21). This trend is due to the major susceptibility of the upper levels to rainfall and to the repercussions of deformations at greater depth.

A comparison of the evolution of the deformations over time, of their strain rates and of rainfall data highlighted that clear changes in the deformations and a higher frequency of change in the daily strain rate vs. the normal trend take place, especially in the upper levels and upon rainfall events (Figs. 20 and 21). On rainy days and on the following ones of the considered period, precipitation controls the trend of the deformations, strain rates and displacements. Hence, two different evolutionary trends of the investigated depths were defined, in response to both short-lasting and heavy rainfall and long-lasting rainfall. In particular, the displacements at 18 m showed significant changes in their strain rates, with an acceleration-deceleration sequence, as well as strain rates tending to zero. Conversely, the deformational effects at 34 m had perceivable increases which however resumed their constant trend after the influence of neutral pressures had ceased (Figs. 20 and 21).

Upon short-lasting and heavy precipitation (e.g. the event of 8-10 September 2000), both probes recorded clear accelerations (Fig. 21), which were subsequently influenced also by the less intense event of 1-9 October. The cumulated deformations recorded by the shallower probe also indicated a major vertical displacement in response to

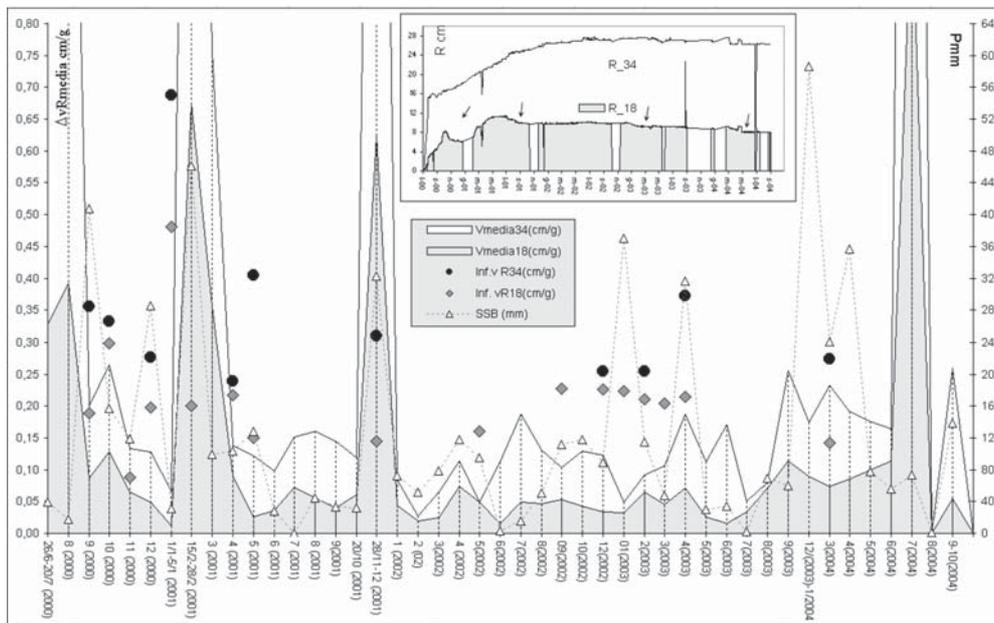


Fig. 20 - Sintesi del confronto tra il quadro evolutivo delle deformazioni misurate in loc. Piana M. Granieri-Salincriti (velocità medie registrate in un mese, DvR_{media}) e le precipitazioni mensili (P, St. Serra S. Bruno); per "inf. vR" si intendono le sensibili variazioni delle velocità medie di deformazione, rispetto a quelle mensili, dovute sia ad eventi intensi e concentrati, sia ad eventi pluviometrici di lunga durata. In alto a destra è raffigurato il trend delle deformazioni per tutto il periodo del monitoraggio; le frecce indicano i periodi in cui si ha una prevalenza della componente verticale delle deformazioni, i cui effetti corrispondono ad una diminuzione della risultante sul piano XY

- Evolution of deformations measured at Mt. Granieri-Salincriti (average rate of displacement recorded in a single month, $DvR_{average}$) vs. monthly rainfall (P, St. Serra S. Bruno); the expression "inf. vR" denotes perceivable variations in average rates of displacement vs. monthly rates, due short-lasting and heavy as well as long-lasting rainfall. The upper right box shows the deformational trend throughout the monitoring period; the arrows indicate the periods with dominant vertical deformations, whose effects correspond to a decrease of the resulting deformation on the XY plane

verticale, come risposta agli eventi eccezionali (Fig. 13b; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2004). I livelli più profondi, invece, hanno mostrato una minore sensibilità agli eventi dell'1-9 ottobre 2000. Nonostante i quantitativi di pioggia siano stati dello stesso ordine di grandezza di quelli del 1953 e del 1972-73, le deformazioni dell'evento del settembre 2000 non hanno assunto il carattere parossistico dei fenomeni registrati in quelle date. Ciò conferma che il collasso di importanti porzioni di versante è dato dalla combinazione di più fattori, in cui lo stadio evolutivo del creep profondo è da considerare essenziale per il raggiungimento del collasso. E' in queste condizioni che alti e prolungati livelli di piovosità, o eventi sismici di particolare intensità, possono avviare il versante verso le alte deformazioni e l'innescio di rock-avalanche.

Considerando gli eventi di minore intensità, gli spostamenti sono da connettere agli episodi diffusi e di lunga durata (Fig. 20 e 21), capaci di portare l'ammasso roccioso ad un grado di saturazione prossimo al 100%, come mostrano gli spostamenti rilevati dalla sonda più superficiale nel periodo dicembre 2000-maggio 2001. In tali condizioni, anche la componente verticale degli spostamenti risulta importante (Fig. 21) (PELLEGRINO & PRESTININZI, 2004). Nello stesso intervallo di tempo, sebbene siano state registrate alcune variazioni delle velocità degli spostamenti per la sonda posta a 34 m, la deformazione complessiva cumulata risulta piuttosto regolare.

exceptional weather events (Fig. 13b; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2004). On the contrary, the deeper levels appeared to have been unaffected or poorly affected by rain events. Even if rainfall amounts were of the same order of magnitude, the deformations in response to the September 2000 event cannot be compared to those in response to the floods of 1953 and 1972-1973, which triggered and reactivated rock avalanches along the Mt. Granieri-Salincriti slope, respectively. The flood in 2000 took place at the end of the dry season; consequently, incomplete saturation of rock masses at great depth prevented the triggering of major landslides.

In the following years of monitoring, the deformations only responded to long-lasting precipitation (cumulated diffuse and prolonged events), even if of lower intensity (Fig. 20 and 21), thus capable of increasing the saturation of the rock mass at depth as shown by the measured deformations from December 2000 to May 2001, in the shallower probe. Furthermore, the cumulated deformations (Fig. 21) inferred a considerable vertical displacement, as confirmed by detailed analysis of the spatial displacement vector (PELLEGRINO & PRESTININZI, 2004). Though the probe at 34 m recorded perceivable strain rate variations in response to prolonged rainfall, it generally measured a constant increase throughout the period from December 2000 to August 2001.

**Costruzione del modello geologico-tecnico in ammassi cristallino-metamorfici affetti da intensi processi di alterazione:
Un esempio di applicazione nei bacini delle Fre Allaro ed Amusa (Massiccio delle Serre, Calabria)**

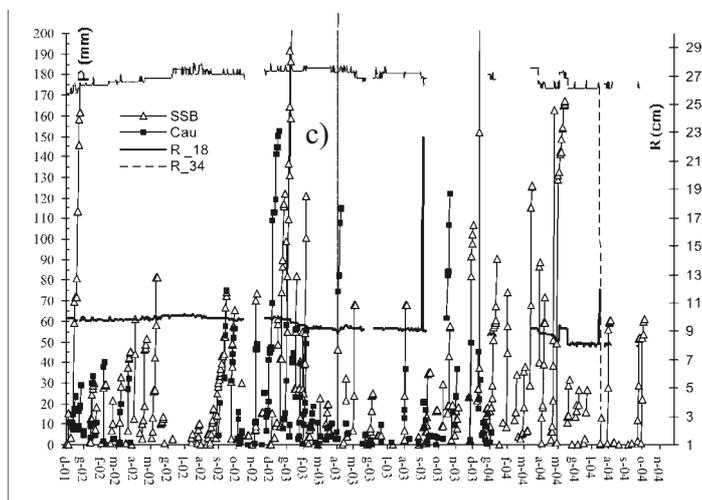
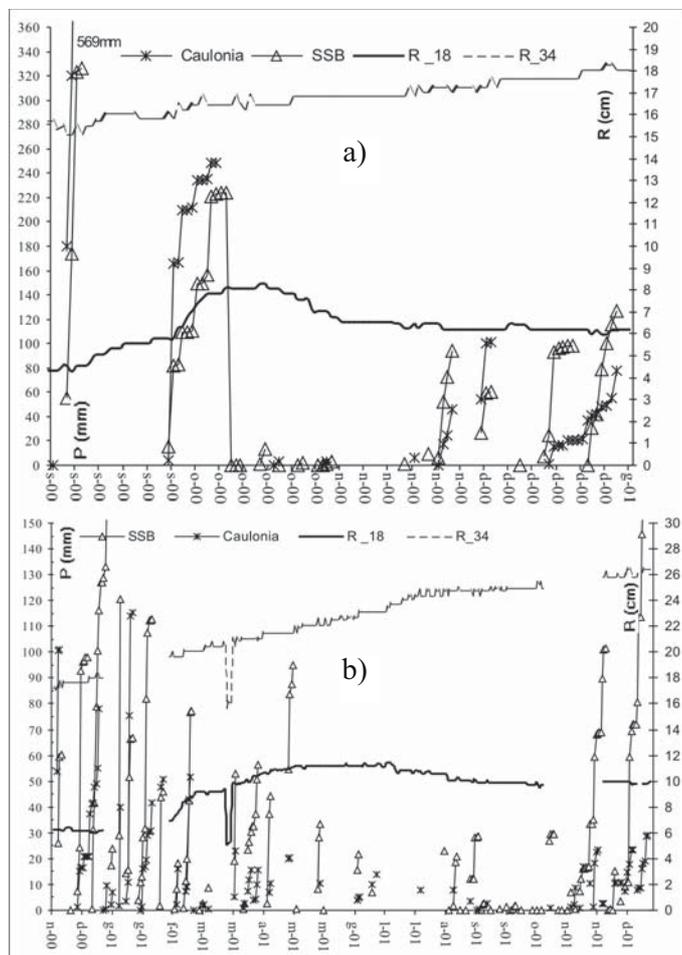


Fig. 21 - Dettaglio del quadro deformativo riferito alle profondità investigate in relazione agli eventi pluviometrici, registrati nelle stazioni meteo di Serra S. Bruno (SSB, 1200 m s.l.m.) e di Caulonia (300 m s.l.m.): a) 2000; b) 2001; c) 2002/2003/2004
- Detail of deformational trend at the investigated depths vs. rainfall recorded at the weather stations of Serra S. Bruno (SSB, 1200 m a.s.l.) and Caulonia (300 m a.s.l.): a) 2000; b) 2001; c) 2002/2003/2004

CONCLUSIONI

L'area esaminata è caratterizzata da un assetto geologico complesso inserito in un contesto geodinamico attivo. I rilievi effettuati hanno evidenziato profili di alterazione complessi e, a volte, complicati da bruschi passaggi ad opera delle condizioni strutturali presenti (esistenza di cataclasi da faglie normali ad alto angolo con notevoli spessori di detensionamento superficiale). L'approccio metodologico adottato ha fornito interessanti spunti per la definizione delle Classi di alterazione caratteristiche delle litologie affioranti. L'elaborazione e l'interpretazione dei risultati hanno consentito di definire l'iter degli studi necessari per ricostruire la geometria dei vari livelli d'alterazione dell'ammasso. I criteri utilizzati, integrati da nuove procedure di rilievo e di analisi, hanno permesso di ridurre i margini di discrezionalità nel definire le condizioni di "confine" tra i vari stadi di alterazione, stabilendone le corrispondenti relazioni sia in termini qualitativi che quantitativi.

Relativamente alla morfodinamica e ai modelli evolutivi di versante, i dati ottenuti evidenziano la mancanza di una stretta relazione

CONCLUSIONS

The investigated area has heterogeneous geological features framed within an active geodynamic context. The investigations conducted in this study indicate complex weathering profiles, which may suddenly change as a result of particular boundary conditions and geochemical processes (cataclases due to high-angle normal faults with shallow stress-relieved belts of considerable thickness). The methodological approach adopted for the study provided interesting insights for defining the weathering classes that are typical of the outcropping lithotypes. Processing and interpretation of results enabled to determine the sequence of studies which was needed to reconstruct the trends of the various weathered levels of the rock mass. The criteria of the study, integrated with new procedures of investigation and analysis, made it possible to reduce the margin of discretion concerning the boundary conditions between the various weathering degrees and to establish their relations in both qualitative and quantitative terms.

The morpho-dynamic processes and the reconstructed evolu-

tra una tipologia di dissesto ed una singola classe di alterazione, nonché l'esistenza di diverse modalità di risposta dei singoli versanti all'irregolare distribuzione delle classi di alterazione. Al tempo stesso si rileva che i fenomeni d'instabilità presentano una maggiore diffusione nei termini più alterati, anche se successivamente mostrano la tendenza a coinvolgere anche le litologie limitrofe mediamente e moderatamente alterate.

Lungo la fascia di Aureola Metamorfica, i versanti sono caratterizzati da due dinamiche differenti: le DGPV e le grandi frane. In particolare, nel caso delle DGPV, come il fenomeno di M. Granieri-Salincriti, la morfodinamica è fortemente guidata dalla geometria e dalla distribuzione lungo il pendio di litologie caratterizzate da differenti profili di alterazione. Tali fasce, poste anche a notevole profondità, interessando notevoli volumi di terreno e consentono lo sviluppo di deformazioni costanti nel tempo in funzione del solo carico litostatico. Nel contesto del quadro deformativo dei versanti, sottoposti a questi processi, si inseriscono quindi gli effetti climatici e le condizioni geometriche dei pendii caratterizzate da elevate energie di rilievo.

Le grandi frane, come le rock avalanche, i debris flow e le frane complesse presenti sui versanti esaminati, sono quindi il risultato finale della complessa sequenza che, partendo dalla condizione geologica, porta ai processi di alterazione, allo sviluppo di DGPV e, successivamente, al collasso di porzioni di versante di volume più o meno importante.

Il complesso degli studi svolti è stato orientato alla costruzione del modello geologico di riferimento del versante (MARTINO *et alii*, 2004). Le verifiche e le analisi successive hanno confermato la validità del modello geologico proposto, come testimoniano i dati acquisiti dalle indagini eseguite e dalle successive attività di monitoraggio.

L'inserimento dei dati di monitoraggio nel modello geologico proposto, insieme alla lettura dei processi geomorfologici in atto, consente di prevedere per il versante M. Granieri-Salincriti una ulteriore evoluzione che porterà nel tempo all'innescarsi di una nuova rock avalanche con coinvolgimento della parte alta del versante e della strada provinciale di collegamento tra i centri abitati di Caulonia e Fabbrizia.

tionary models of the slope failed to show a close correlation between a given type of slope instability and an individual weathering class; nonetheless, they suggested that the individual slopes have different modes of response to the irregular distribution of the weathering classes. The slope instabilities generally start in the most weathered terms and then involve averagely and moderately weathered ones.

In particular, along the thermal-metamorphic contact belt, the slopes have two different dynamics: complex landsliding and DSGSDs. In the case of the DSGSDs (e.g. at Mt. Granieri-Salincriti), morpho-dynamics is driven by the geometry and distribution of lithotypes along the slope, which have different and sometimes inconsistent moduli, geomechanical properties and weathering profiles.

This setting implies different volumes of the rock mass that are prone to deep chemical weathering, presence of powerful and wide weak belts with frequent changes in the geomechanical and rheological properties of their materials, discontinuous sequences of weathering profiles. Hence, all this generates different unstable masses off the slope, as well as a morpho-dynamics different from complex landsliding phenomena.

These belts involve large volumes of rock mass and allow the development of constant rate deformation over time as a function of the overburden pressure. Climatic events further influence such a slope evolutionary scenario. Massive slope failures, i.e. rock avalanche, debris flow and complex landslide, are the final stage of the complex time sequence which starts from the initial geological setting and leads to weathering processes, development of DSGSDs and, eventually, to more or less large slope failures. The study has been focused on the validation of the slope reference geological model (MARTINO *et alii*, 2004), through the results of site investigations and monitoring activities. Such results, together with the "reading" of current geomorphological processes, allow us to predict an evolution of Mt. Granieri-Salincriti slope which shall lead to further rock-avalanche events involving the upper slope section and the provincial road between Caulonia and Fabbrizia towns.

OPERE CITATE / REFERENCES

- AMODIO MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARETTA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI E. & ZUPPETTA A. (1976) - *L'arco Calabro-Peleoritano nell'orogene appenninico-maghrebide*. Mem. Soc. Geol. It., **17**: 1-60.
- ANON (1981) - *Rock and soil description and classification for engineering geological mapping*. Bulletin of IAEG, **24**: 253-274.
- BARRESE E., PELLEGRINO A. & PRESTININZI A. (2005) - *Weathering of Crystalline-Metamorphic Rocks in the Allaro and Amusa River Basin (Serre Massif, Calabria): General Aspects and Effects of Thermal-Metamorphic Contact Belts*. Italian Journal of Engineering Geology And Environment, **1**, 2006.
- BONARDI G., GIUNTA G., PERRONE V., RUSSO M., ZUPPETTA A. & CIAMPO G. (1980) - *Osservazioni sull'evoluzione dell'arco calabro peleoritano nel Miocene inferiore: la Formazione di Stilo-Capo d'Orlando*. Boll. Soc. Geol. It. **99**: 365-393.
- BONARDI G., DE VIVO B., GIUNTA G., LIMA A., PERRONE V. & ZUPPETTA A. (1982) - *Mineralizzazioni dell'Arco Calabro Peleoritano. Ipotesi genetiche e quadro evolutivo*. Boll. Soc. Geol. It., **101**: 141-155.
- CALCATERRA D., PARISE M. & DATTOLA L. (1996a) - *Caratteristiche dell'alterazione e franosità di rocce granitoidi nel bacino del torrente Alaco (Massiccio della Serre, Calabria)*. Boll. Soc. Geol. It., **115**: 3-28.
- CALCATERRA D., PARISE M. & DATTOLA L. (1996b) - *Debris flow in deeply weathered granitoids (Serre Massif-Calabria, Southern Italy)*. Landslides, Senneset Balkema, Rotterdam: 171-176.

**Costruzione del modello geologico-tecnico in ammassi cristallino-metamorfici affetti da intensi processi di alterazione:
un esempio di applicazione nei bacini delle Fre Allaro ed Amusa (Massiccio delle Serre, Calabria)**

- CASCINI L., CRITELLI S., DI NÓCERA S., GULLA' G. & MATANO F. (1992)- *Grado di alterazione e franosità negli gneiss del Massiccio Silano: l'area di San Pietro in Guarano (CS)*. Geol. Appl. Idrogeol., **XXVIIb**: 49-76.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslide types and processes*. Landslides investigation and mitigation. Transportation Research Board, Special report Washington D.C.. In Turner A.K. and Schuster R.L (eds.), **247**: 36-75,
- DEARMAN W.R. (1995) - *Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the bs5930: 1981 proposals*. Quarterly Journal of Engineering Geology, **28**: 267-276.
- DRAMIS F. & SORRISO-VALVO M. (1994) - *Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics*. Engineering Geology, **38**: 231-243.
- GENEVOIS R. & PRESTININZI A. (1979a) - *Time dependent behaviour of granitic rocks related to their alteration grade*. Rock Mechanics, Proc. Int. Congr., Montreaux: 153-159.
- GENEVOIS R. & PRESTININZI A. (1979b) - *Analisi tridimensionale della stabilità di versanti rocciosi: la frana di Salincriti*. Geol. Appl. Idrogeol., **XXIV**: 367-387.
- GSEGWPR (GEOLOGICAL SOCIETY ENGINEERING GROUP WORKING PARTY REPORT) (1995) - *The description and classification of weathered rocks for engineering purposes*. Quarterly Journal of Engineering Geology, **28**: 206-242.
- GEOTECHNICAL CONTROL OFFICE (1984) - *Geotechnical manual for slopes*. Geotechnical Control Office, Engineering Development Department. Hong Kong, 295 pp.
- HEIKE MERLIN O. & LORENZONI S. (1972) - *Il Massiccio "granitico" della Serre*. Calabria.
- HUTCHINSON J.N. (1988) - *General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proceedings of the 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **1**: 3-35.
- ISRM (1978) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. Journ. of Rock Mechanics And Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **15(6)**: 319-368.
- MARTINO S., PELLEGRINO A., PRESTININZI A. & SCARASCIA MUGNOZZA (2004) - *The Impact of alterations on deep-seated gravitational deformations: the case of Mt. Granieri-Salincriti (Calabria, Italy)*. Proc. 9th Int. Symp. Landslides, Balkema, Rotterdam.
- PELLEGRINO A. (2000) - *Aspetti metodologici nella caratterizzazione geomeccanica degli ammassi costituiti da rocce cristalline vulnerabili ai processi di alterazione e possibili implicazioni nella genesi dei fenomeni franosi e delle deformazioni gravitative profonde di versante, applicazione in alcune aree situate all'interno dei bacini dei F. Amusa e Allaro (RC), Calabria*. PhD, XIII Cycle in Earth Science, Faculty of Mathematical, Physical and Natural Sciences of University "La Sapienza", Rome.
- PELLEGRINO A. & PRESTININZI A. (2004) - *Monitoring of hazardous large landslide based on different techniques: the Mt. Granieri-Salincriti Deep-Seated Gravitational Deformation (Serre Massif, Calabria Region- Italy)*. Proc 32nd International Geological Conference, Florence 2004.
- PELLEGRINO A. & PRESTININZI A. (2006) - *Weathering conditioning the geomechanical property along thermal-metamorphic contact belts: the case of Mt. Granieri-Salincriti DSGSD (Calabria - Italy)*. Proc First EGU 2004, General Assembly Nice, Geomorphology, Special Issue, 2006.
- PRESTININZI A. (1984) - *Deformazioni gravitative profonde: aspetti cinematici ed analisi dei rapporti con alcuni processi alterativi*. Boll. Soc. Geol. It., **103**: 707-716.
- WP/WLI (1993) - *A suggested method for describing the activity of a landslide*. Bulletin of IAEG, **47**: 53-57.
- VARNES D.J (1978) - *Slope movements types and processes*. In: R.L. SCHUSTER & R.J. KRIZEK - *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board, Special Report **176**: 11-33, National Academy of Science, Washington.
- ZISCHINSKY U. (1969) - *Über sackungen*. Rock Mech., **1**: 30-52.

Received July 2007 - Accepted January 2008