

SISTEMI INTEGRATI PER IL MONITORAGGIO, L'EARLY WARNING
E LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO
LUNGO LE GRANDI VIE DI COMUNICAZIONE



investiamo nel vostro futuro

PROGETTO PON01_01503



Quaderno / parte prima
01 PON LEWIS
LINEE GUIDA PER
L'IDENTIFICAZIONE DI
SCENARI DI RISCHIO



autostrade//Tech



A cura di Francesco Muto | **DELIVERABLE WP 1.1**
Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
/ Parte prima

Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione"

Premessa

Frane e inondazioni sono un problema di grande rilevanza nel nostro Paese. Negli ultimi anni le vittime e i danni dei disastri idrogeologici hanno raggiunto livelli inaccettabili e impongono un grande e immediato impegno della comunità nazionale per cercare di mitigare il livello di rischio, utilizzando strategie articolate ed efficaci capaci di integrare, in una visione organica, interventi strutturali e non strutturali.

Su questi temi l'Università della Calabria è impegnata da anni in attività di studio e di ricerca di rilevanza nazionale e internazionale e nella diffusione e promozione della cultura della previsione e prevenzione del rischio idrogeologico. Nel 2011 insieme ad altri partner, ha promosso un progetto di ricerca triennale, "Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione", finalizzato allo sviluppo di un sistema complesso e articolato di preannuncio delle frane da impiegare per le fasi di previsione/prevenzione del rischio idrogeologico.

Il Progetto, indicato con l'acronimo LEWIS (Landslide Early Warning Integrated System), è stato svolto, nel periodo 2012-2014, nel quadro del Programma Operativo Nazionale 2007-13 "Ricerca e Competitività".

I risultati conseguiti sono descritti in questa collana di Quaderni PON LEWIS.

Il progetto è stato sviluppato dall'Università della Calabria e Autostrade Tech S.p.A. insieme ai partner industriali Strago e TDGroup, alle Università di Catania, di Reggio Calabria e di Firenze e al CINID (Consorzio Interuniversitario per l'Idrologia). Per l'Ateneo calabrese hanno partecipato diversi laboratori e gruppi di ricerca: CAMILab (con funzione di coordinamento), μ Wave, Geomatica, Nems, Geotecnica, Dipartimento di matematica.

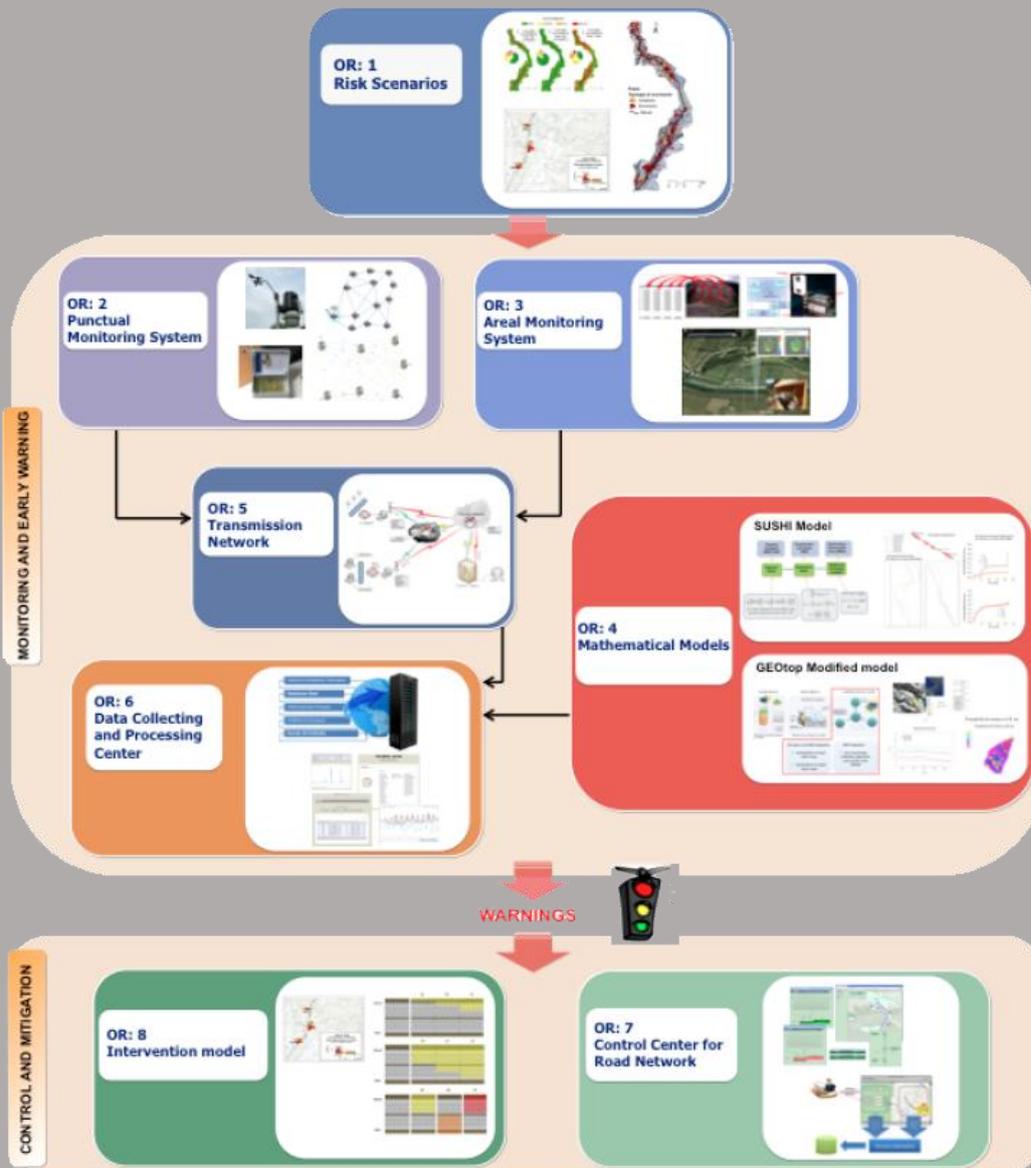


Figura 1 - Articolazione del sistema integrato di monitoraggio dei versanti e di preannuncio dei movimenti franosi

Il progetto è finalizzato allo sviluppo di un sistema di monitoraggio dei versanti e di preannuncio dei movimenti franosi che possono interessare le grandi vie di comunicazione e all'identificazione dei conseguenti interventi non strutturali di mitigazione.

Il sistema è articolato in due sottosistemi (fig. 1):

- ✓ Monitoraggio e preannuncio,
- ✓ Controllo e mitigazione,

che richiedono la preventiva individuazione degli scenari di rischio ossia dei danni che l'eventuale attivazione di una frana può produrre sugli elementi a rischio presenti (infrastruttura viaria, autoveicoli, persone). La procedura originale sviluppata nell'ambito del progetto prevede l'identificazione, lungo il tratto autostradale di interesse, delle aree soggette a movimenti franosi e la conseguente definizione dei relativi scenari di evento e di rischio.

Il sottosistema *Monitoraggio e preannuncio* è formato da diverse componenti: rete di monitoraggio "puntuale" che comprende sensori che misurano localmente l'inizio degli spostamenti superficiali o profondi; rete di monitoraggio "areale" che include sensori che controllano a distanza il fenomeno franoso con tecniche radar; modelli matematici di simulazione dell'innesco e della propagazione dei movimenti franosi. Nel progetto LEWIS sono state sviluppate numerose componenti innovative e sono state modificate e migliorate altre componenti già esistenti. In particolare tra i sensori puntuali sono stati sviluppati i sistemi SMAMID e POIS; tra quelli areali sono stati realizzati un radar in banda L, uno scatterometro, un interferometro; tra i modelli si sono sviluppati e/o migliorati: GEOtop, SUSHI, SCIDDICA.

La raccolta dei dati misurati dai sensori è affidata ad un unico sistema di trasmissione dati che trasmette anche le informazioni necessarie per il funzionamento dei modelli. Il sottosistema è completato da un Centro di acquisizione ed elaborazione dei dati (CAED) che, sulla base dei dati misurati dai sensori e delle indicazioni dei modelli, valuta la situazione di pericolo lungo il tronco autostradale emettendo i relativi livelli di criticità.

I livelli di criticità emessi dal CAED sono l'elemento di collegamento tra il sottosistema *Monitoraggio e preannuncio* e il sottosistema *Controllo e mitigazione*. Gli avvisi di criticità sono acquisiti dal Centro di comando e controllo del traffico (CCCT) che, sulla base di un modello di intervento predefinito, attiva le procedure standardizzate per la mitigazione del rischio, che vanno dalla

sorveglianza diretta del tratto di interesse da parte di squadre tecniche all'interruzione del traffico su entrambe le direzioni di marcia.

Il progetto prevede anche lo sviluppo di attività sperimentali su tre tronchi autostradali lungo la A3, la A16 e la A18, nonché l'erogazione di un Master di secondo livello denominato ESPRI (ESperto in Previsione/Prevenzione Rischio Idrogeologico).

Il progetto di ricerca è stato organizzato in Obiettivi Realizzativi (OR), ciascuno dei quali suddiviso in Work Package (WP), a loro volta articolati in Attività Elementari (AE). In totale erano previste 11 OR, 47 WP e 243 AE. In particolare le OR 1-8 riguardano la ricerca e si articolano in 26 WP e 139 AE. Le OR 9-11 sono dedicate a sperimentazione, governance e trasferimento tecnologico, integrazione e aggiornamento dell'attività di ricerca nella fase di Sviluppo Sperimentale e si articolano complessivamente in 21 WP e 104 AE.

I Quaderni che compongono questa collana sono stati costruiti con riferimento ai singoli WP, per la parte che riguarda la ricerca, e quindi ogni Quaderno contiene la descrizione dei risultati conseguiti nel WP, articolata in base alle AE previste.

Sono, inoltre, previsti altri tre Quaderni:

Quaderno 0 che contiene una descrizione di sintesi, in inglese, dei risultati conseguiti nell'ambito del progetto.

Quaderno 28 che contiene l'informazione relativa alle attività di divulgazione dei risultati scientifici.

Quaderno 29 che contiene la descrizione dei risultati conseguiti con l'attività formativa.

Il Quadro editoriale complessivo è riportato in tabella 1:

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
0	-	-	Research outcomes
01 Parte prima	1	1.1	Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
01 Parte seconda	1	1.1	Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
02	2	2.1	Monitoraggio idrogeologico
03 Parte prima	2	2.2	Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
03 Parte seconda	2	2.2	Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
04	2	2.3	Circuiti integrati a bassa potenza per sistemi di monitoraggio con unità accelerometriche
05	2	2.4	Monitoraggio con sensori puntuali di posizione e inclinazione (Sistema POIS)
06	3	3.1	Sviluppo di uno scatterometro a risoluzione variabile
07	3	3.2	Elettronica di bordo dello scatterometro ed inclinazione
08	3	3.3	Sviluppo di un radar in banda L
09	3	3.4	Tecniche di analisi e sintesi di segnali radar per la simulazione accurata di scenari complessi
10	3	3.5	Elettronica di bordo del radar in banda L

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
11	3	3.6	Sistemi interferometrici radar ad apertura sintetica basati a terra
12	4	4.1	Modello areale per il preannuncio delle frane da innesco pluviale (Modello GEOtop)
13	4	4.2	Modelli completi di versante di tipo puntuale per il preannuncio di movimenti franosi (Modello SUSHI)
14	4	4.3	Modelli di propagazione delle frane tipo colate (Modello SCIDDICA)
15	5	5.1	Rete Wireless di Telecomunicazioni: sviluppo e scelta dei parametri di progetto
16	6	6.1	CAED. Acquisizione dati: architettura del sistema
17	6	6.2	CAED. Elaborazione dei dati
18	7	7.1	CCCT. Progettazione
19	7	7.2	CCCT. Interfaccia verso il centro di acquisizione ed elaborazione dati
20	7	7.3	CCCT. Interfaccia con altre centrali operative e canali di diffusione delle notizie
21	7	7.4	CCCT. Modulo per la presentazione e convalida delle allerte
22	7	7.5	CCCT. Modulo per la gestione delle informazioni di traffico
23	7	7.6	CCCT. Integrazioni con moduli speciali

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
24	8	8.1	Definizione del modello di intervento e predisposizione del Piano di Emergenza
25	8	8.2	CCCT. Gestione delivery allerte e attivazione squadre d'intervento
26	8	8.3	CCCT. Gestione percorsi alternativi
27	9	9.1 - 9.11	Sperimentazione
28	10	10.1 - 10.2	Piano di comunicazione e diffusione
29	-	-	Master ESPRI (Esperto in Previsione/Prevenzione Rischio Idrogeologico)

Tabella 1 - Quadro editoriale complessivo della collana di Quaderni PON LEWIS

31 dicembre 2014

Il Responsabile Scientifico del progetto PON LEWIS

Pasquale Versace

INDICE

ATTIVITA' ELEMENTARE 1.1.1

1 **Definizione di frana**

- 1 **1.1.1.1 Classificazione dei fenomeni franosi**
- 12 **1.1.1.2 Tipologia del materiale coinvolto**
- 13 **1.1.1.3 Stato di attività**
- 17 **1.1.1.4 Distribuzione di attività**
- 19 **1.1.1.5 Stile di attività**

Riferimenti bibliografici

ATTIVITA' ELEMENTARE 1.1.2

22 **Metodologie di indagine**

- 22 **1.1.2.1 Metodologie di indagine per la caratterizzazione e la cartografazione dei movimenti franosi**
- 22 1.1.2.1.1 Rilevamento geologico
- 22 1.1.2.1.1.1 Rilevamento geologico di area vasta
- 25 1.1.2.1.1.2 Rilevamento geologico alla scala di versante
- 28 1.1.2.1.2 Rilevamento geologico-strutturale
- 36 1.1.2.1.3 Rilevamento litologico-tecnico
- 39 1.1.2.1.3.1 Descrizione geologico-tecnica dei terreni

41	1.1.2.1.3.2 Descrizione geologico-tecnica degli ammassi rocciosi
45	1.1.2.1.3.3 Rilevamento geologico-tecnico delle rocce deboli
45	1.1.2.1.4 Rilevamento del grado di alterazione e descrizione delle classi di alterazione di rocce
51	1.1.2.1.5 Rilevamento pedologico e descrizione dei suoli
53	1.1.2.1.6 Rilevamento geomorfologico per lo studio della franosità di una vasta area e a scala di versante
63	1.1.2.1.7 Rilievi di superficie da eseguire su un'area in frana
65	1.1.2.1.7.1 Misura dei movimenti superficiali
67	1.1.2.1.7.2 Tecnologie innovative per il rilievo di versanti in roccia
69	1.1.2.2 Metodologie di indagine per la caratterizzazione delle litologie coinvolte nei movimenti franosi
70	1.1.2.2.1 Indagini in situ
73	1.1.2.2.2 Prove di laboratorio
75	1.1.2.2.3 Indagini indirette

Riferimenti bibliografici

Definizione di frana

In letteratura esistono differenti definizioni con cui geologi, ingegneri e altri professionisti precisano il termine “frana” o “fenomeno franoso”. La diversità delle definizioni proposte negli anni è dovuta sia alla grande varietà dei fenomeni franosi (tipi e dimensioni di frane), sia alla diversa natura delle discipline che affrontano e studiano i fenomeni franosi con approcci e metodi differenti. La definizione più nota è stata proposta da Cruden (1991), che definisce la frana come “movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante” cioè movimento di versante che si realizza verso il basso o verso l'esterno del pendio, lungo la superficie, sotto l'azione della gravità e senza un vero e proprio mezzo di trasporto.

Questa descrizione è del tutto generale, poiché comprende una grande quantità di fenomeni, dagli scivolamenti lenti con velocità di qualche centimetro all'anno fino ai flussi catastrofici che possono raggiungere velocità abbastanza elevate come ad esempio 60 km/h. Inoltre, il termine frana è stato riferito sia al materiale mobilizzato (roccia, detriti di diversa dimensione) che si accumula al piede del pendio, sia al movimento del materiale lungo un versante o a un corpo di frana pre-esistente (Bosi, 1978; Cruden, 1991).

In generale si può affermare che il termine frana sia da riferire al processo piuttosto che all'oggetto, al fine di non limitare l'utilizzo della definizione agli aspetti descrittivi, ma di ampliarlo a contesti applicativi ed interpretativi.

1.1.1.1 CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI FRANOSI

Classificare una frana non è un'impresa molto facile. Infatti, a causa dei molti fattori in gioco (tipo di movimento, tipo di materiale coinvolto, dimensioni della massa instabile, velocità della massa instabile, distanza di propagazione, effetti al suolo, ecc.), i tipi di movimenti franosi possibili sono numerosi e possono essere classificati in molti modi.

Negli anni sono state proposte numerose classificazioni (Varnes; 1978; Hutchinson, 1988; Cruden & Varnes, 1996; Hungr et alii, 2001) ed ogni metodologia classificativa proposta è strettamente connessa all'impostazione scientifica dell'autore, all'ambiente geologico in cui prevalentemente opera ma soprattutto alle esigenze e alle finalità per cui la classificazione si propone. I sistemi di classificazione suggeriti tentano di raggruppare, in maniera chiara e univoca, tutti i diversi fenomeni in categorie ben distinte al fine di caratterizzare, nella maniera più soggettiva possibile, le aree in dissesto presenti in un determinato territorio. Ogni metodo di caratterizzazione si basa su parametri caratteristici del corpo di frana, selezionati in modo da essere:

- unici e omogenei;
- semplici e di facile applicazione;
- significativi e pertinenti nell'ambito di applicazione;
- osservabili o misurabili oggettivamente;
- facilmente accessibili a chi deve compiere l'analisi su di essi;
- rilevabili con buona approssimazione e con scarsi margini di incertezza.

I metodi di classificazione disponibili in letteratura generalmente considerano come parametri caratteristici del corpo di frana:

- il tipo di materiale *movimentato* e le sue proprietà meccaniche. Il tipo di materiale può essere suddiviso in: a) *roccia*, cioè aggregato naturale di minerali, cristallini e/o amorfi, particelle e solidi di vario tipo legati da elevata coesione. In genere le rocce sono interessate da piani di discontinuità che influenzano profondamente il comportamento meccanico dell'intero ammasso; b) *detrito*, cioè frammento roccioso di varia natura, forma e dimensioni, proveniente dalla disgregazione meccanica delle rocce ad opera degli agenti superficiali; c) *terra*, cioè un mezzo granulare multifase, in quanto costituito da grani minerali in contatto tra di loro;
- il tipo di cinematismo del materiale, cioè il "movimento relativo tra corpo di frana e terreno in posto". Nel caso dei fenomeni singoli, la descrizione fa riferimento al momento dell'innescò, mentre nel caso di fenomeni complessi all'evoluzione dei successivi. Generalmente per valutare il tipo di movimento assunto dal corpo in frana si stima la distribuzione degli spostamenti nello spazio e la velocità del materiale in frana;
- le cause del movimento. Le cause che predispongono e determinano i movimenti franosi possono essere predisponenti o innescanti. Le *cause*

predisponenti sono caratteristiche intrinseche del versante quali ad esempio la forma del rilievo, o la natura e la struttura del terreno. Le *cause* innescanti sono invece i fattori esterni al versante che ne influenzano l'instabilità, quali ad esempio le precipitazioni e i fenomeni di erosione

- la durata e la ripetitività dei fenomeni. Per durata di un evento franoso si intende l'arco temporale che intercorre tra l'innescamento del fenomeno franoso e la sua fine (il materiale coinvolto nella frana raggiunge la zona di accumulo). La ripetitività è legata alla frequenza con cui un fenomeno franoso può interessare le medesime zone.

Ad oggi, tra le classificazioni disponibili in letteratura, quella più comunemente adottata dalla comunità scientifica e maggiormente adatta sia alla realtà geomorfologica italiana (essa è stata infatti adottata in gran parte degli studi dei fenomeni franosi) sia agli scopi del progetto di ricerca, è quella di Varnes (1978), modificata in Cruden & Varnes (1996).

In particolare, questa classificazione (Tab. 1) suddivide i fenomeni franosi sulla base del *tipo di movimento* e sulla *natura del materiale coinvolto*.

Per quanto riguarda il *tipo di movimento*, vengono individuate cinque categorie principali:

- Crolli (falls);
- Ribaltamenti (topples);
- Scorrimenti (slides o slumps);
- Espansioni laterali (spreads);
- Colate (flows).

La *natura del materiale coinvolto* è invece suddivisa in 3 categorie principali:

- roccia (rock);
- detrito (debris);
- terra (earth).

Questa classificazione considera tutti i movimenti franosi di versante, includendo anche quei fenomeni che non sono frane in senso stretto, quali le deformazioni estremamente lente e a carattere superficiale.

TIPOLOGIA DI MOVIMENTO		MATERIALE		
		Roccia (<i>Rock</i>)	Detrito (<i>Debris</i>)	Terra (<i>Earth</i>)
Crolli (<i>Falls</i>)		Crolli di roccia (<i>Rockfalls</i>)	Crolli di detrito (<i>Debris falls</i>)	Crolli di terra (<i>Earth falls</i>)
Ribaltamenti (<i>Topples</i>)		Ribaltamenti di roccia (<i>Rock topples</i>)	Ribaltamenti di detrito (<i>Debris topples</i>)	Ribaltamenti di terra (<i>Earth topples</i>)
SCORRIMENTI	Rotazionali (<i>Slumps</i>)	Scorrimenti rotazionali di roccia (<i>Rock slumps</i>)	Scorrimenti rotazionali di detrito (<i>Debris slumps</i>)	Scorrimenti rotazionali di terra (<i>Earth slumps</i>)
	Traslazionali (<i>Slides</i>)	Scorrimenti traslativi di roccia (<i>Rock e rock block slides</i>)	Scorrimenti traslativi di detrito (<i>Debris e debris block slides</i>)	Scorrimenti traslativi di terra (<i>Earth e earth block slides</i>)
Espansioni Laterali (<i>Spreads</i>)		Espansioni laterali di roccia (<i>Rock spreads</i>)	Espansioni laterali di detrito (<i>Debris spreads</i>)	Espansioni laterali di terra (<i>Earth spreads</i>)
Colate (<i>Flows</i>)		Colate di roccia (<i>Rock flows</i>) Valanghe di roccia (<i>Rock avalanches</i>) Creep profondo (<i>Deep creep</i>)	Soliflusso e reptazione (<i>Solifluction e debris creep</i>) Colate di detrito (<i>Debris flows</i> e <i>Debris avalanches</i>)	Soliflusso e reptazione (<i>Solifluction e soil creep</i>) Colate di terra (<i>Earth flows</i>)
<p>COMPLESSA → caratterizzata dalla combinazione, in sequenza temporale, di due o più tipi di movimento (crollo, ribaltamento, scivolamento, espansione, colamento).</p> <p>COMPOSITA → caratterizzata dalla combinazione di due o più tipi di movimento (crollo, ribaltamento, scivolamento, espansione, colamento), simultaneamente in parti diverse della massa spostata.</p>				

Tabella 1- Classificazione dei fenomeni franosi (Cruden & Varnes, 1996)

Sulla base del sistema di Cruden & Varnes è possibile distinguere le seguenti classi fondamentali:

1. **crolli** – I *crolli* sono caratterizzati da caduta libera di blocchi di roccia, detrito o terra, che si distaccano da un pendio molto acclive (pareti subverticali) e successivamente precipitano al piede della scarpata muovendosi lungo il versante per salti e/o rimbalzi. Le modalità con cui avviene il movimento sono dettate dall'inclinazione del pendio, dall'altezza di caduta e dalle caratteristiche del materiale coinvolto. Questo tipo di movimento franoso, tipico delle rocce lapidee, si sviluppa con velocità abbastanza elevate e avviene, generalmente, lungo quei versanti in cui sussistono discontinuità strutturali preesistenti (faglie, fratture, piani di stratificazione e scistosità) o di neoformazione. I crolli possono essere generati dall'alternarsi di fenomeni di gelo e disgelo, da processi di scalzamento al piede dei versanti ad opera di correnti idriche e moto ondoso, da attività antropica o da attività sismica o vulcanica. In base al materiale coinvolto si possono verificare: crolli di roccia (Rock falls); crolli di detrito (Debris falls); crolli di terra (Earth falls) (Fig. 1).

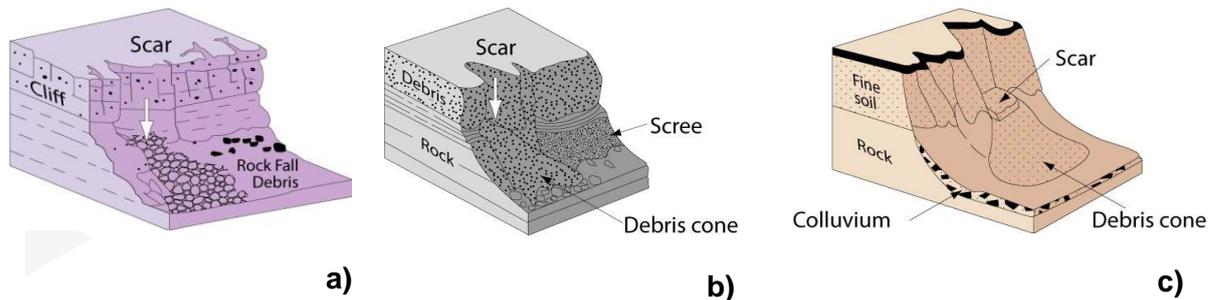


Figura 1- a) Crolli di roccia; b) Crolli di detrito; c) Crolli di terra
(Fonte: <http://www.bgs.ac.uk/>).

2. **ribaltamenti** - I *ribaltamenti* sono dei movimenti franosi molto simili ai crolli. Anche in questo caso, infatti, i materiali coinvolti sono blocchi di rocce lapidee che a causa di processi di alterazione e/o discontinuità strutturali preesistenti, si staccano dal versante ruotando rigidamente intorno ad un punto o ad un asse situato al di sotto della massa stessa.

I ribaltamenti possono essere generati dalle stesse cause descritte per i crolli ma anche dall'incremento della pressione dell'acqua presente tra le discontinuità o dall'azione degli apparati radicali della vegetazione. In base al materiale coinvolto si possono verificare: ribaltamenti di roccia (Rock topples); ribaltamenti di detrito (Debris topples); ribaltamenti di terra (Earth topples) (Fig. 2).

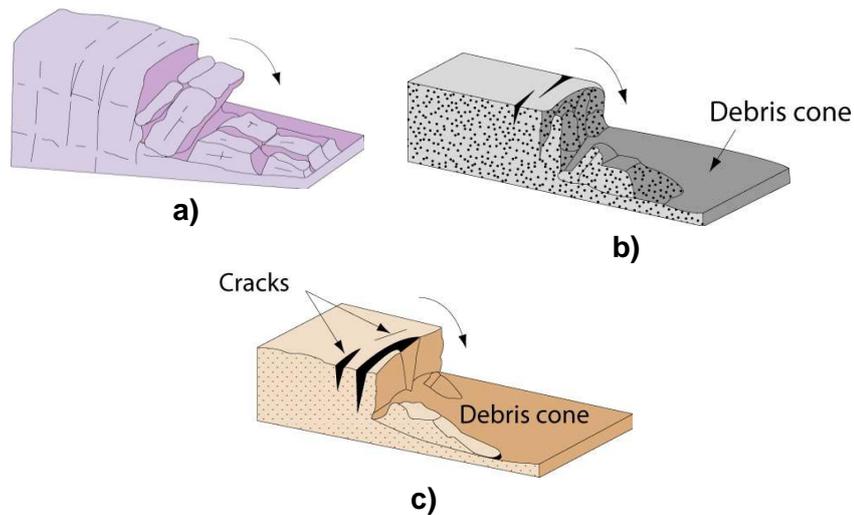


Figura 2 - a) Ribaltamenti di roccia; b) Ribaltamenti di detrito; c) Ribaltamenti di terra
- (Fonte: <http://www.bgs.ac.uk/>).

3. **scorrimenti rotazionali** - Sono movimenti di rotazione di una massa di terra o roccia in gran parte lungo una superficie di rottura o entro una fascia, relativamente sottile, di intensa deformazione di taglio, che rappresenta quindi il limite tra la zona instabile e quella stabile. La forma delle superfici di scorrimento è semicircolare con concavità rivolta verso l'alto. Questo tipo di movimento franoso avviene generalmente in terreni o rocce dotati di coesione a causa ad esempio di variazioni delle pressioni neutre o per l'attività sismica. Il fenomeno si può verificare con velocità estremamente basse, moderatamente veloci o piuttosto rapide. In base al materiale coinvolto si possono verificare: scorrimenti rotazionali di roccia (Rock slumps); scorrimenti rotazionali di detrito (Debris slumps); scorrimenti rotazionali di terra (Earth slumps) (Fig. 3).

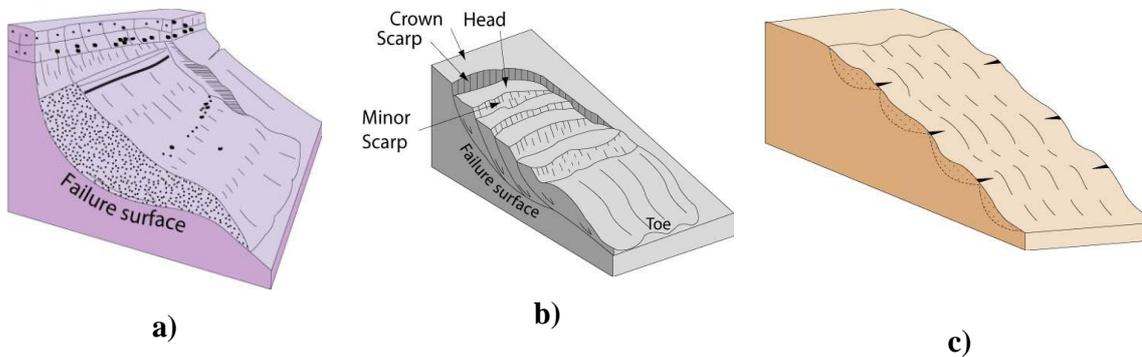


Figura 3 - a) Scorrimenti rotazionali di roccia; b) Scorrimenti rotazionali di detrito; c) Scorrimenti rotazionali di terra - (Fonte: <http://www.bgs.ac.uk/>).

4. **scorrimenti traslativi** - Sono movimenti di scivolamento verso la base del versante di una massa di terra o roccia che si sviluppano in gran parte lungo una superficie di discontinuità preesistente e di forma più o meno piana; le superfici di scorrimento corrispondono a discontinuità strutturali (faglie, fratture, piani di stratificazione e scistosità) disposte a franapoggio e con un'inclinazione uguale o minore di quella del pendio. Tali fenomeni sono frequenti in rocce stratificate o in alternanze di rocce dalle caratteristiche fisico-meccaniche differenti; essi si innescano con velocità abbastanza basse, ma possono evolversi con velocità moderate ma anche estremamente rapide. Le principali cause di questi fenomeni sono: le acque di infiltrazione, le azioni antropiche e i terremoti. In base al materiale coinvolto si possono verificare: scorrimenti traslativi di roccia (Rock e Rock block slides); scorrimenti traslativi di detrito (Debris e Debris block slides); scorrimenti traslativi di terra (Earth e Earth block slides) (Fig. 4).

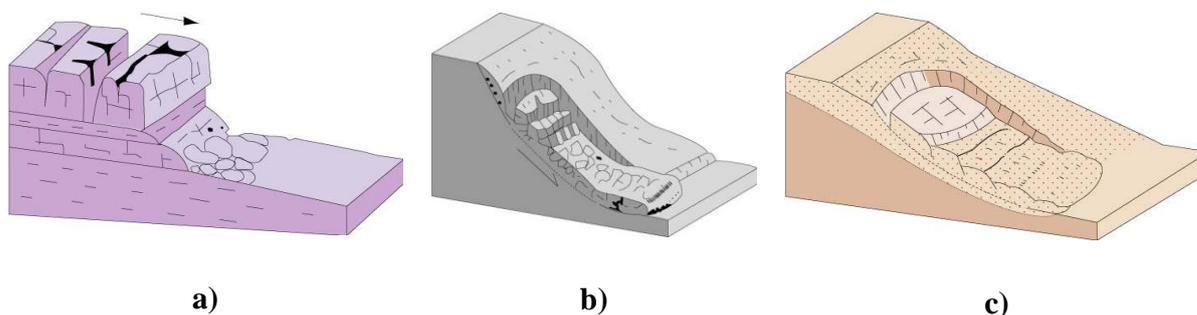


Figura 4 - a) Scorrimenti traslazionali di roccia; b) Scorrimenti traslazionali di detrito; c) Scorrimenti traslazionali di terra - (Fonte: <http://www.bgs.ac.uk/>).

5. **colate** – Sono movimenti franosi, anche molto estesi (ad esempio interi versanti), caratterizzati da un lento movimento del materiale in frana simile a quello di un fluido viscoso che si muove lungo un pendio. La superficie di scorrimento non è ben definibile e la deformazione si distribuisce all'interno di tutta la massa in movimento. Questi tipi di movimenti si verificano in terreni sciolti di varia granulometria (blocchi, ciottoli, ghiaia, sabbia) e si innescano solo quando i terreni coinvolti sono imbibiti d'acqua. Si possono verificare in zone in cui sono presenti ammassi rocciosi alterati e fratturati in aree ad alta energia di rilievo. In base al materiale coinvolto si possono verificare: flusso in roccia (*rock flow*), colate di terra (*earth flow*) fenomeni di soliflusso e reptazione; questi ultimi caratterizzati da lenti movimenti (le velocità possono variare da pochi mm al giorno a qualche decimetro all'anno) delle porzioni più superficiali dei terreni (regolite e/o rocce poco coerenti) saturate d'acqua (soliflusso) o per ripetute espansioni e contrazioni del terreno in seguito a cambiamenti di umidità o di temperatura e al gelo (*debris* e *soil creep*) (Fig. 5). Nel caso in cui i fenomeni franosi sono caratterizzati da una miscela di materiale scarsamente coesivo e acqua, in quantità variabile, che fluisce lungo il versante o lungo le linee di impluvio, essi possono essere caratterizzati da velocità elevate. Questi movimenti, si verificano quando ammassi granulari, di origine diversa (depositi di detrito e/o fango, sedimenti alluvionali, materiale vegetale, detriti derivanti da processi di erosione superficiale, ecc.) vengono mobilitati in seguito all'apporto di grandi quantità d'acqua (ad esempio dovuti a eventi piovosi di notevole intensità o repentini scioglimenti di nevai e ghiacciai). In base al materiale

coinvolto si possono verificare: colate di detrito (*debris flow*) (Fig. 6); colate di fango (*mud flow*); colate di terra (*earth flow*); valanghe di detrito (*debris avalanche*).

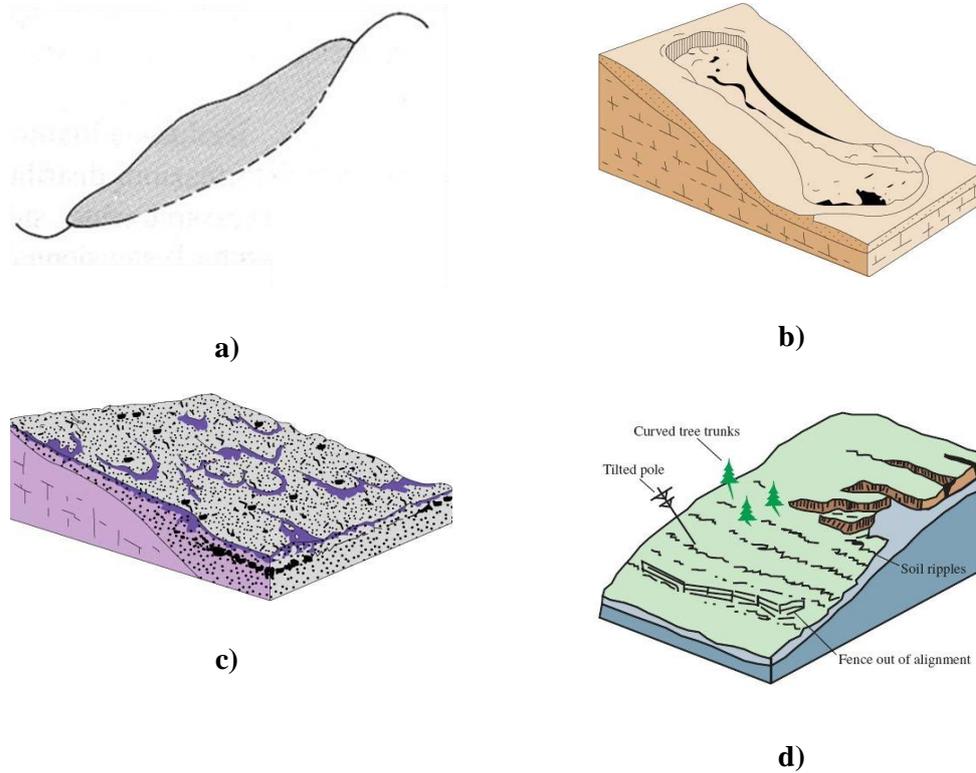


Figura 5 - a) Flusso in roccia (semplificato da Sorriso-Valvo, 1984); b) colate di terra; c) soliflusso; d) soil-creep (immagine b) e c) Fonte: <http://www.bgs.ac.uk/>.

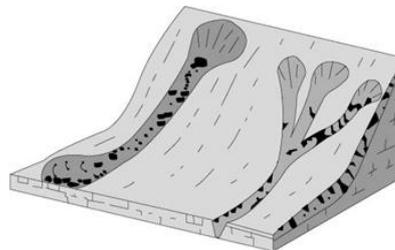


Figura 6 - Colate di detrito (Fonte: <http://www.bgs.ac.uk/>).

6. **espansioni laterali** – Sono movimenti franosi che si verificano tipicamente con velocità estremamente bassa (pochi mm/anno) quando ammassi rocciosi rigidi e fratturati (calcarei o depositi vulcanici, arenarie massive) poggiano su litotipi a comportamento duttile (argille, limi saturi di acqua, misture di sabbie e argille). Tali fenomeni si innescano quando i litotipi, a seguito di processi di plasticizzazione o fluidificazione, si mobilitano in maniera differenziale inducendo i materiali sovrastanti a processi deformativi, con movimenti laterali a prevalente componente orizzontale e verso valle. I processi deformativi avvengono lungo delle fratture preesistenti o di neoformazione e generano una separazione in blocchi degli ammassi rocciosi con progressivo allontanamento dei blocchi isolati. Le masse coinvolte in questi processi possono avere anche dimensioni e spessori notevoli. In base al materiale coinvolto si possono verificare: espansioni laterali di roccia (*rock spreads*); espansioni laterali di detrito (*debris spreads*); espansioni laterali di terra (*earth spreads*) (Fig. 7).

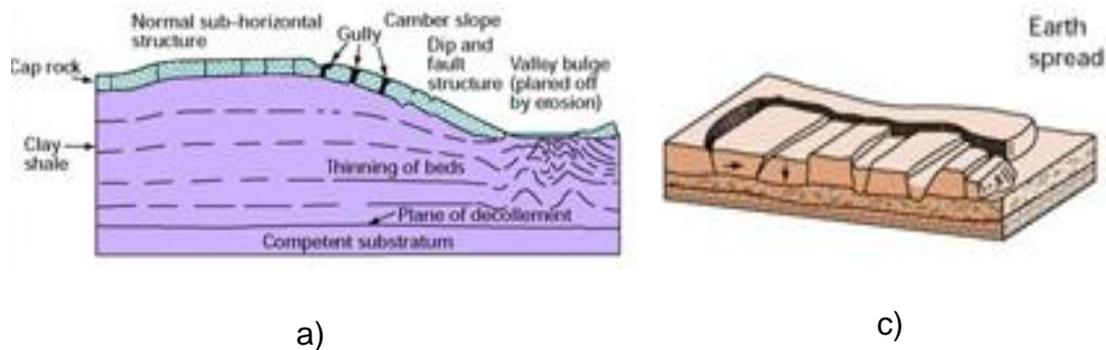


Figura 7 - a) Espansioni laterali di roccia e detrito; b) espansioni laterali di terra
(Fonte: <http://www.bgs.ac.uk/>). Questa figura andrebbe migliorata

7. deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV) – Sono movimenti di massa di grandi dimensioni che evolvono in un lasso di tempo molto esteso e coinvolgono il sistema crinale-versante-fondovalle. Una possibile definizione di D.G.P-V. può essere la seguente: fenomeni gravitativi a lungo termine (anche $>10^5$ anni) che dislocano ammassi rocciosi anche dell'ordine di km^3 lungo discontinuità preesistenti e/o di neoformazione, con effetti morfologici visibili e movimenti rilevabili strumentalmente, nell'ambito del sistema crinale-versante-fondovalle. La massa in movimento si sposta quindi verso il "basso" con velocità molto lente (dell'ordine di pochi mm/anno) e lungo superfici di discontinuità non ben definite, difficilmente individuabili e di spessori e profondità differenti. Da un punto di vista concettuale le deformazioni gravitative profonde di versante sono distinte dalle frane e considerate come classi a se stanti. Varnes (1978) e Cruden & Varnes (1996) includono nella loro classificazione le tre tipologie principali di DGPV nelle classi di *espansioni laterali* in roccia (*Lateral Spread*), negli *scorrimenti in roccia* (*Rock block slide*) e nelle *colate di roccia* (*Rock flow*).

Pertanto, questi tipi di fenomeni franosi si differenziano dagli altri per: il volume delle masse coinvolte (le DGPV interessano, infatti, volumi che possono variare da centinaia di migliaia di metri cubi a decine di milioni di metri cubi), la profondità delle deformazioni (variabili da decine a centinaia di metri), le estensioni (sia in lunghezza che in larghezza sono dell'ordine di centinaia di metri). Nel caso di fenomeni del tipo *Rock Flow*, l'ammasso roccioso in movimento subisce deformazioni plastiche di tipo differenziale, spazialmente continue e progressive, con visibili ripercussioni sull'assetto morfologico del versante. In particolare, la parte alta del versante assume un profilo concavo a causa dei processi di estensione, mentre la parte bassa del versante assume un profilo convesso generato da fenomeni di compressione (inarcamento e rigonfiamento). Negli stadi evolutivi più avanzati, quando cioè l'ammasso roccioso giunge a rottura, le DGPV possono causare delle vere e proprie frane come ad esempio crolli e scorrimenti nelle zone marginali dei versanti, movimenti franosi oppure il collasso dell'intero versante interessato.

1.1.1.2 TIPOLOGIA DEL MATERIALE COINVOLTO

Il tipo di materiale coinvolto è una delle caratteristiche fondamentali di un corpo franoso ed è spesso utilizzato per classificare e raggruppare gli eventi. Questo parametro, infatti, è abbastanza indicativo poiché influenza il comportamento del materiale interessato dal fenomeno franoso soggetto agli effetti della forza di gravità lungo i versanti. Generalmente, si fa riferimento al tipo di materiale che è coinvolto prima del movimento franoso cioè il materiale che si è mosso rispetto alla sua posizione originaria e si è depositato più a valle. E' possibile distinguere tre grandi categorie:

- **roccia** (*rock*): un aggregato naturale di minerali (di tipo cristallino e/o amorfo), particelle e solidi di vario tipo legati solidamente da elevata coesione. In genere le rocce (es. basalto, arenarie, granito, dolomie, diorite, ecc.) sono interessate da piani di discontinuità (faglie, diaclasi e giunti di discontinuità) che influenzano profondamente il comportamento meccanico dell'intero ammasso;
- **terra** (*soil*): un mezzo granulare trifase costituito da minerali, acqua e aria. I minerali sono presenti a forma di grani di diverse dimensioni e sono in contatto tra loro. La diversa dimensione dei grani genera dei pori che possono essere occupati sia da acqua che da aria. Se i pori sono completamente occupati da acqua il terreno si trova in condizioni di saturazione, se invece sono occupati solo da aria il terreno è secco. Il materiale prevalente è di tipo fine con particelle di dimensioni più piccole di 2 mm e in quantità superiori al 70-80%. Possono essere classificati come *soil* tutti i terreni che vanno dalla sabbia pulita all'argilla plastica;
- **detrito** (*debris*): un aggregato di particelle granulari prevalentemente grossolane (dimensioni maggiori di 2 mm) che possono avere dimensioni, natura, forma e gradi di cementazione differenti. Il detrito è generato dalla disgregazione meccanica delle rocce a causa degli agenti atmosferici.

1.1.1.3. STATO DI ATTIVITÀ

Lo stato di attività descrive, tramite informazioni di carattere geomorfologico e storico, l'evoluzione della frana in termini temporali e risulta particolarmente significativo da un punto di vista applicativo.

Per descrivere lo stato di attività di una frana si fa riferimento ad una solida e oramai consolidata bibliografia: le raccomandazioni del WP/WPLI (Working Party on World Landslide Inventory, 1990-1994) recentemente rivisitate dalla classificazione proposta da Cruden & Varnes (in Landslides, T.R.B., 1996). Questa classificazione, suddivide le frane in due grandi categorie: *attive* e *inattive* (Tab. 2). Si definiscono *attive* le frane in movimento all'atto dell'osservazione o mobilizzatesi nell'ultimo ciclo stagionale, mentre sono *inattive* le frane che non mostrano evidenze di movimento nel corso dell'ultimo ciclo stagionale.

Stato di attività		
Attiva	Attiva (Active)	
	Sospesa (Suspended)	
	Riattivata (Reactivated)	
Inattiva	Quiescente (Dormant)	
	Stabilizzata (Stabilized)	Naturalmente (Abandoned)
		Artificialmente (Artificially Stabilized)
		Relitta (Relict)

Tabella 2 - Stato di attività (Fonte – Cruden & Varnes, 1996).

Le *frane attive* sono ulteriormente distinte in:

- *attive*, se i fenomeni franosi sono in movimento al momento dell'osservazione. Rientrano in questa categoria sia le frane riattivate sia quelle di neoformazione;
- *sospese*, se il movimento è avvenuto nell'ultimo ciclo stagionale ma al momento dell'osservazione non sono presenti evidenze di movimenti in atto;

- *riattivate*, per frane nuovamente attive al momento dell'osservazione dopo un periodo di inattività.

Le *frane inattive* sono ulteriormente distinte in:

- *quiescenti*, se le cause che hanno originato i movimenti franosi sono ancora presenti e si ritiene possibile che le condizioni morfoclimatiche riscontrate all'atto del rilevamento possano favorirne la riattivazione;
- *stabilizzate*, se le cause originarie del movimento non possono più riattivare la frana. Se la stabilizzazione di un fenomeno franoso è legata a evoluzioni naturali, la frana si dice *stabilizzata naturalmente*, se la stabilizzazione è legata a interventi antropici la frana si dice *stabilizzata artificialmente*. Una frana può inoltre essere definita come *relitta* se l'attivazione è avvenuta in condizioni geomorfologiche o climatiche nettamente differenti dalle condizioni riscontrate all'atto del rilevamento.

La definizione dello stato di attività dei fenomeni franosi viene realizzata mediante il rilevamento dei caratteri cinematici propri di ogni frana. Il rilevamento può essere eseguito utilizzando differenti approcci metodologici. La scelta della metodologia utilizzabile è strettamente connessa al tipo di informazioni a disposizione. Se si dispone di un'adeguata strumentazione, lo stato di attività di una frana può essere ricavato utilizzando i dati strumentali del *monitoraggio* riferiti cronologicamente all'entità dei possibili movimenti. Se si dispone invece di *dati storici/archivi* (come ad esempio relazioni di sopralluoghi, dati tecnici d'archivio, memorie, segnalazioni o testimonianze visive, ecc.), è possibile reperire le informazioni delle date degli eventi franosi e della loro evoluzione con cui ripercorre la "storia" della frana e indicarne lo stato di attività. Entrambi gli approcci metodologici consentono di applicare in senso stretto le definizioni dello stato di attività riportate in letteratura. A tal proposito si può far riferimento alla frequenza delle riattivazioni e ricavare lo stato di attività sulla base delle indicazioni proposte da Del Prete et al. (1992) o quelle proposte da Bisci & Dramis (1992) e Flageollet (1994) illustrate in tabella 3.

Stato di attività	Ricorrenza	Tempo di ritorno	Ultima attivazione
ATTIVE	continue	-	in atto
	stagionali	> 1 anno	recente
	a breve termine di ricorrenza	1 - 10 anni	storia recente
QUIESCENTI	a medio termine di ricorrenza	10 - 100 anni	storia recente
	a lungo termine di ricorrenza	100 - 1000 anni	storia recente o antica
STABILIZZATE	a lunghissimo termine di ricorrenza	> 1000 anni	storia antica e preistoria

Tabella 3 - Stato di attività (Fonte: Del Prete et al., 1992 - da Bisci & Dramis - Flageollet, 1994).

Qualora non si disponga di informazioni affidabili sulla "storia" delle frane o di dati strumentati, la definizione dello stato di attività può essere eseguita utilizzando un *approccio morfologico*. L'analisi morfologica prevede il riconoscimento degli effetti indotti dalle frane nel paesaggio e delle tracce di attivazione dei dissesti mediante fotointerpretazione e rilievi speditivi di superficie. L'attività di una frana può essere, ad esempio, ricavata utilizzando i criteri morfologici proposti da Crozier (1984) e riportati in tabella 4.

Effetti indotti dalle frane	
Frane Attive	Frane inattive
Scarpate, terrazzi e fratture con bordi netti	Scarpate, terrazzi e fratture con bordi degradati
Fratture beanti e depressioni prive di riempimenti secondari	Fratture beanti e depressioni con riempimento secondario
Movimenti secondari sulle scarpate	Nessun movimento secondario sulle scarpate
Strie fresche sulla superficie di scorrimento e sui piani di taglio marginali	Strie assenti o degradate sulla superficie di scorrimento e sui piani di taglio marginali
Superfici di frattura fresche sui blocchi	Superfici di frattura degradate sui blocchi
Sistema di drenaggio modificato e irregolare, ristagni d'acqua e depressioni a drenaggio centripeto	Sistema di drenaggio regolari
Creste di pressione e cunei di espulsione al contatto con i margini di scorrimento	Fessure marginali e argini abbandonati
Assenza di indizi di alterazione sulla parte esposta della superficie di rottura	Presenza di indizi di alterazione sulla parte esposta della superficie di rottura
Presenza di vegetazione a crescita rapida	Presenza di vegetazione a crescita lenta
Differenza netta di vegetazione tra le zone interne ed esterne della frana	Nessuna differenza di vegetazione tra le zone interne ed esterne della frana
Alberi inclinati senza ricrescita verticale	Alberi inclinati con ricrescita verticale nelle porzioni successive alla parte inclinata
Strutture antropiche disarticolate con lesioni e fratture a bordi netti	Strutture antropiche disarticolati con lesioni e fratture a bordi degradati

Tabella 4 - Criteri geomorfologici per il riconoscimento in campagna dell'attività dei fenomeni franosi (Crozier, 1984, modificato).

E' da precisare che la metodologia adottata condiziona il dettaglio dell'analisi e restituisce rilevamenti differenti legati all'affidabilità dell'informazione, alla sensibilità delle strumentazioni disponibili e/o all'esperienza soggettiva del rilevatore.

1.1.1.4 DISTRIBUZIONE DI ATTIVITÀ

La distribuzione di attività di una frana (Fig. 8) descrive dove la frana si sta muovendo e permette di prevedere il tipo di evoluzione, in senso spaziale, del dissesto.

In riferimento a quanto stabilito nel Glossario Internazionale delle Frane (WP/WLI, 1993), di seguito vengono riportate le differenti tipologie di distribuzione di attività di più ampio utilizzo, con a lato le relative definizioni:

- **in avanzamento** (*advancing*): se la superficie di rottura si estende nella direzione del movimento, andando a coinvolgere aree sempre maggiori verso valle. Si realizza attraverso la formazione di superfici di scorrimento multiple o successive o per semplice avanzamento del piede;
- **retrogressiva** (*retrogressing*): se la superficie di rottura si sposta nella direzione opposta al senso del movimento. Comporta l'arretramento della scarpata di frana con conseguenti coinvolgimenti di aree sempre maggiori verso monte;
- **multi-direzionale** (*enlarging*): se la superficie di rottura si estende in più direzioni. Il movimento avviene su più piani di rottura che tendono ad omogeneizzarsi e ad incrementare il volume del materiale spostato;
- **in diminuzione** (*diminishing*): se il materiale coinvolto in una frana diminuisce di volume nel tempo, indipendentemente dalle cause che comportano tale diminuzione;
- **confinata** (*confined*): se è presente una scarpata principale ma non è visibile la superficie di scorrimento al piede della massa spostata. Al piede della frana è possibile individuare solo delle deformazioni come ad esempio semplici rigonfiamenti;
- **costante** (*moving*): se il materiale dislocato si muove con gradualità e continuità nel tempo ma senza variazioni apprezzabili del volume di materiale coinvolto e della superficie di rottura;
- **in allargamento** (*widening*): se la superficie di rottura si estende lateralmente coinvolgendo i fianchi della frana. L'ampliamento può interessare uno o entrambi i margini laterali.

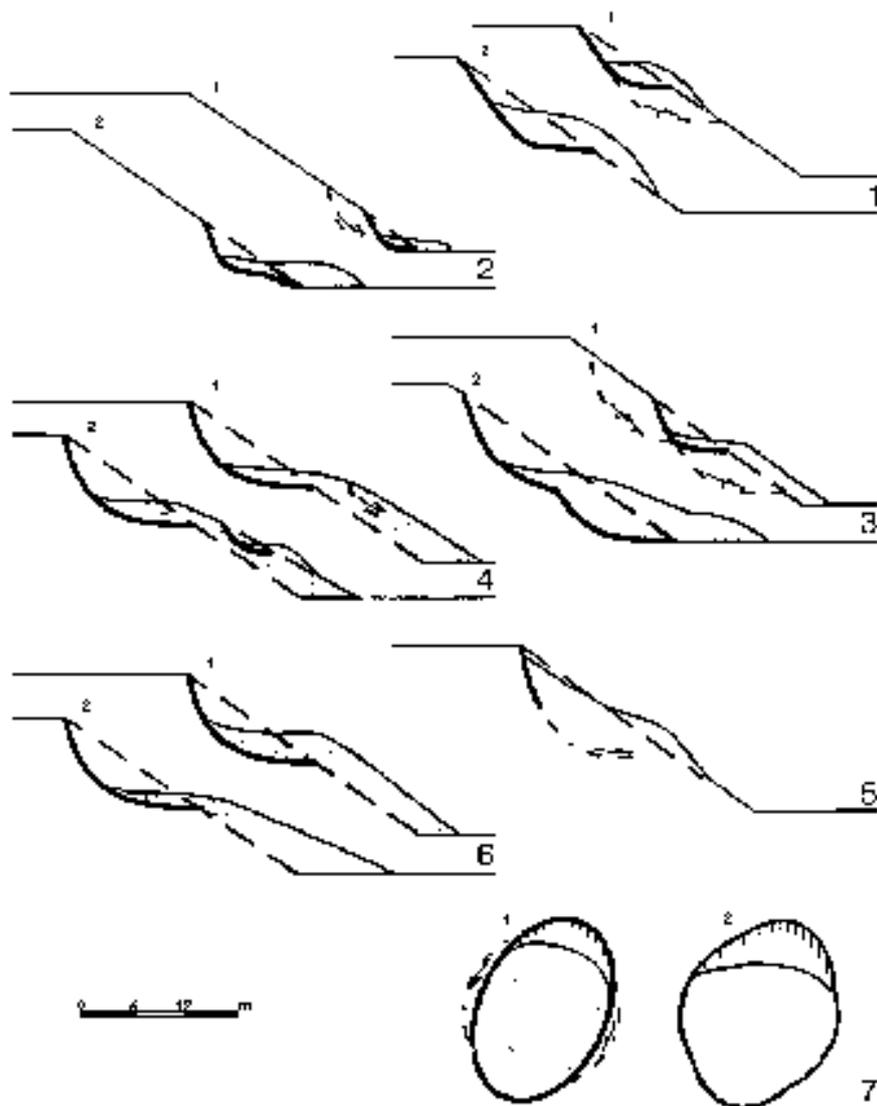


Figura 8 - Frane con diversa distribuzione di attività: 1) in avanzamento; 2) retrogressiva; 3) multidirezionale; 4) in diminuzione; 5) confinata; 6) costante; 7) in allargamento (in pianta). La sezione 2 di ogni diagramma mostra il versante dopo il movimento sulla superficie di rottura, indicata con la freccia. Il materiale spostato è retinato (grafico tratto dal "Glossario internazionale per le frane", 1993)

1.1.1.5 STILE DI ATTIVITÀ

Lo stile di attività di una frana descrive la combinazione e la ripetizione dei meccanismi di movimento che possono caratterizzare un medesimo evento franoso. In riferimento a quanto stabilito nel Glossario Internazionale delle Frane (WP/WLI, 1993), una frana può definirsi:

- **complessa** (*complex*): se la frana è caratterizzata dalla combinazione di una o più modalità di movimento (quali ad es. crollo, ribaltamento, scorrimento, espansione, colamento) che si verificano in successione temporale (ad esempio prima scorrimento e poi colata);
- **composita** (*composite*): se la frana è caratterizzata dalla combinazione di una o più modalità di movimento che avvengono contemporaneamente in parti diverse della frana;
- **successiva** (*successive*): se la frana è caratterizzata da un movimento dello stesso tipo di un fenomeno precedente e adiacente. Durante la fase di ripetizione del fenomeno le masse spostate sono differenti e non condividono la medesima superficie di rottura. I movimenti che si verificano nel tempo, seppur avvengano con modalità identiche, rimangono distinti e facilmente individuabili;
- **singola** (*single*): se la frana consiste in un'unica tipologia di movimento con mobilitazione di un ammasso unico relativamente intatto;

multipla (*multiple*): se si verifica una ripetizione della stessa modalità di movimento del fenomeno franoso lungo lo stesso versante. Le superfici di rottura si ampliano progressivamente e le nuove masse spostate coinvolgono le masse già precedentemente dislocate condividendone la superficie di rottura.

Riferimenti bibliografici

APAT (2006). *Fenomeno di dissesto geologico - idraulico sui versanti. Classificazione e simbologia*. Manuali e linee guida 39/2006, p. 177.

Bisci C. & Dramis F. (1992). *Il concetto di attività in geomorfologia: problemi e metodi di valutazione*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 14 (2), 193-199.

Bosi C. (1978). *Considerazioni e proposte metodologiche sulla elaborazione di carte della stabilità*. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, Bari, 13, 246-281.

Crozier M.J. (1984). *Field assessment of slope instability*. In: Brunsden & Prior (Eds.) *Slope Instability*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester , chp. 4, 103-142.

Cruden D.M (1991). *A simple definition of a landslide*. *Bullettin International Association of Engineering Geology* 43, 27-29.

Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*. In: Turner, K.A., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: investigation and mitigation*, Transport Research Board Special Report, vol. 247, pp. 36– 75.

Del Prete M., Giaccari E., Trisorio-Liuzzi G. (1992). *Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata*. Pubbl. n 841-GNDCl, 84 pp.

Flageollet J.C. (1994). *The time dimension in the mapping of earth movements*. In: Casale R., Fantechi R. & Flageollet J.C. (1994). *Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*. Programme EPOCH. Final Report, 1, 7-20.

Hungr O, Evans SG, Bovis MJ, Hutchnison NJ. 2001. *A review of the classification of landslides of the flow type*. *Environmental and Engineering Geoscience* 7:3 221–238.

Hutchinson, J. N. 1988. *General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*, in: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, edited by: Bonnard, C., Balkema, Rotterdam, 3–35.

Sorriso Valvo M. (1984). *Sackungen" and deep-seated rockslide\debrisflow: evolution model*. Proceed. CNR-PAN Meeting on Progress on Mass-Movement and Sediment Transport Studies, CNR-INRPI, 119-136.

Varnes D.J. (1978). *Slope movements, type and processes*. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds.), *Landslides analysis and control*. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences , WA , 11-33.

Working Party on World Landslide Inventory/WP/WLI (1993). *A suggested method for describing the activity of a landslide*. Bull. Int. Ass. Eng. Geol. 47: 53–57.

Metodologie di Indagine

1.1.2.1 METODOLOGIE DI INDAGINE PER LA CARATTERIZZAZIONE E LA CARTOGRAFAZIONE DEI MOVIMENTI FRANOSI

> 1.1.2.1.1 Rilevamento geologico

Il rilevamento geologico consiste nell'effettuare una serie di operazioni atte a fornire informazioni circa la costituzione geologica di una data zona; più precisamente, consente di definire la natura litologica delle rocce affioranti ed i loro rapporti laterali e verticali; lo scopo fondamentale è quello di produrre un elaborato cartografico, ovvero la carta geologica, in cui sono riportate tutte le informazioni raccolte sul terreno corredate di sezioni geologiche, eseguite sia alla scala del versante che a grande scala.

Nello studio dei fenomeni franosi è di fondamentale importanza la definizione del modello geologico di un'area, definito sulla base dell'assetto geologico-strutturale. Chiaramente, il livello di dettaglio del rilevamento geologico dipende dal livello di approfondimento che è necessario raggiungere e dalla scala cui eseguire lo studio (alla scala del singolo versante o di vasta area). Ad esempio, nel rilevamento di un'area vasta, si dovrà tener conto anche di strutture geologiche regionali, ben più estese, poiché esse possono generalmente condizionare i fenomeni gravitativi più profondi ed estesi; tuttavia, anche nel caso di studi alla scala del singolo versante, spesso, è opportuno ampliare l'analisi geologica, al fine di dare una visione più completa e compiuta dell'assetto geologico, che possa spiegare l'influenza geologica sui fenomeni gravitativi.

1.1.2.1.1.1 Rilevamento geologico di area vasta

La scala alla quale eseguire il rilevamento di una data area dipende dalla tipologia e dall'estensione dei fenomeni gravitativi da trattare, ma anche dalle finalità dello studio della franosità. E' noto che l'assetto stratigrafico e strutturale può avere una grande influenza sui fenomeni gravitativi.

In particolare, una carta geologica per un'area vasta deve essere opportunamente redatta attraverso le seguenti fasi:

- ✓ ricerche preliminari, atte a raccogliere il maggior numero di informazioni prima di procedere al rilevamento vero e proprio; esse comprendono il reperimento di carte topografiche, foto aeree, carte geologiche, pubblicazioni scientifiche e relazioni tecniche;
- ✓ rilevamento di campagna, finalizzato al riconoscimento delle unità geologiche da cartografare, nonché dei limiti geologici, stratigrafici e tettonici; inoltre, andranno acquisiti i dati relativi alle geometrie ed alle giaciture degli elementi geologici (Cremonini, 1973; Guida al rilevamento del Servizio Geologico Nazionale, 1996). È opportuno che il rilevamento sia preceduto e accompagnato dall'analisi fotointerpretativa (Amadesi, 1975; Panizza, 1992; Burbank & Anderson, 2001);
- ✓ fase finale di elaborazione dei dati, nell'ambito della quale si procede alla redazione della carta geologica, delle sezioni geologiche rappresentative, nonché degli schemi dei rapporti stratigrafico-strutturali tra le varie unità (Guida italiana alla rappresentazione cartografica del Servizio Geologico Nazionale, 1992; Guida italiana alla classificazione e alla terminologia stratigrafica del Servizio Geologico Nazionale, 2003).

Le carte topografiche più indicate per il rilevamento sono rappresentate dalle carte in scala 1:10.000/1:5.000, le quali consentono un grado di dettaglio geologico sufficiente, tenendo, comunque, in considerazione la finalità del lavoro richiesto, nonché il livello di precisione da raggiungere; chiaramente, carte topografiche in scala 1:25.000/1:50.000 possono essere adoperate nel caso di problematiche geologiche la cui visione più ampia si rende necessaria nello studio della distribuzione dei fenomeni gravitativi. Nella fase preliminare, oltre alle carte topografiche, è necessario reperire carte geologiche e rilevamenti eseguiti nell'area o in un intorno significativo. Le carte geologiche, in funzione della scala, possono dare informazioni sulle singole unità o su complessi geologici ad estensione regionale ed in particolare, informazioni sulla successione delle formazioni, sui rapporti stratigrafici, sugli spessori, sull'assetto strutturale; tra le carte geologiche più in uso, vi sono quelle della Carta Geologica d'Italia (con le relative Note Illustrative).

Inoltre, è opportuna la consultazione delle pubblicazioni scientifiche, che possono contribuire alla definizione del contesto geologico-strutturale di una determinata area.

Infine, il reperimento delle foto aeree deve riguardare innanzitutto i voli a scala 1:33.000, oltre ai quali è opportuno recuperare anche i voli a scale diverse (da 1:10.000 a 1:75.000).

Passando al rilevamento di campagna, quest'ultimo dovrà essere preceduto da un'accurata fase di analisi fotointerpretativa a scala sempre di maggiore dettaglio; il fine è il riconoscimento iniziale dei lineamenti tettonici principali e dei grandi fenomeni gravitativi, a cui segue la caratterizzazione morfologica di aree più limitate e da cui ottenere indicazioni geolitologiche e strutturali; infatti, il contrasto di tonalità e di forme del rilievo corrispondono spesso a caratteristiche morfologiche proprie di particolari litotipi, limiti stratigrafici o tettonici tra litologie e/o unità litostratigrafiche diverse.

Il rilevamento di campagna comprende l'insieme delle osservazioni e delle misure da effettuare direttamente sull'area da rilevare. In particolare, l'*iter* da seguire dipenderà dalla complessità geologica dell'area e dal grado di dettaglio che s'intende raggiungere (Quaderni del Servizio Geologico Nazionale, 1992).

Nel corso del rilevamento di campagna si dovrà progressivamente procedere all'individuazione delle diverse formazioni/unità geologiche affioranti, alla ricostruzione dell'assetto stratigrafico e strutturale definendo i limiti geologici tra le varie formazioni/unità geologiche individuate, i limiti stratigrafici (limiti stratigrafici per sovrapposizione, limiti stratigrafici per eteropia di *facies* o limiti per trasgressione) e i limiti tettonici; per quanto concerne la giacitura degli strati, è molto importante segnare i loro rapporti rispetto alla giacitura del pendio (strati orizzontali, a franapoggio o reggipoggio), poiché questi influenzano fortemente le condizioni di stabilità del pendio stesso (Guida alla rappresentazione cartografica del Servizio Geologico Nazionale, 1992; Guida al rilevamento del Servizio Geologico Nazionale, 1996; Guida italiana alla classificazione e alla terminologia stratigrafica, 2003).

Nel caso delle faglie, esse vanno caratterizzate distinguendole per cinematica e misurando la giacitura dei piani (direzione, inclinazione e immersione), oltre a rilevare la presenza di "brecce di frizione" o "cataclasite" e allineamenti di strati in giacitura diversa dall'originaria; le strutture la cui attività tettonica recente risulti accertata dovranno essere distinte in carta con colore o simbologia diversa rispetto alle faglie inattive.

Per le strutture plicative si dovrà descrivere la tipologia, con distinzione tra antiformali e sinformali e tra anticlinali e sinclinali e, laddove possibile, indicarne gli elementi geometrici essenziali (asse, piano assiale, ecc.). L'associazione delle strutture duttili e fragili rilevate, unitamente alla loro cronologia relativa, daranno indicazioni sulla storia deformativa del settore.

Infine, utili indicazioni atte alla ricostruzione del modello geologico-strutturale dell'area oggetto di studio possono spesso essere fornite dagli elementi geomorfologici dell'area stessa. In particolar modo, la geomorfologia può fornire preziose informazioni relative all'assetto tettonico (faccette triangolari e/o trapezoidali, elementi topografici allineati, ecc.) (Burbank & Anderson, 2001) e alla litologia. Ad esempio, vi sono i calanchi, i quali rappresentano una morfologia tipica dei versanti argillosi, mentre le forme carsiche, indicate come depressioni sulle carte topografiche, tra cui doline e inghiottitoi caratterizzano litologie soggette a processi di dissoluzione, quali gessi e calcari. Analogamente, le incisioni vallive ripide e profonde s'impongono su litologie scarsamente erodibili, mentre valli ampie con pendii più dolci sono influenzate dall'affioramento di rocce più facilmente degradabili. In definitiva, le suddette evidenze morfologiche sono utili per definire i litotipi affioranti in un'area, ma non rappresentano che elementi indicativi, in quanto l'evoluzione di lungo termine può dare indicazioni contrastanti rispetto a quanto sopra descritto.

La fase finale di elaborazione e rappresentazione dei dati è rappresentata dalla redazione della carta geologica, che può essere contemporanea o meno al rilevamento geologico; fondamentale sarà la rappresentazione dei limiti, stratigrafici e tettonici, tra le diverse unità litostratigrafiche o litologiche (Guida alla rappresentazione cartografica del Servizio Geologico Nazionale, 1992; Guida italiana alla classificazione e alla terminologia stratigrafica del Servizio Geologico Nazionale, 2003).

Per quanto riguarda i dati strutturali sarà utile fornire anche rappresentazioni grafiche, come la proiezione stereografica di piani di faglia e famiglie di faglia, nonché di giaciture di strato e assi di pieghe. Particolare attenzione va data alla legenda, nella quale dovranno essere riportate tutte le informazioni geologiche rappresentate cartograficamente; per la simbologia ci si può riferire alle linee guida del Servizio Geologico Nazionale (1992), in cui è esplicitata l'organizzazione verticale della legenda in termini cronostatigrafici e litostratigrafici.

Infine, a corredo della carta geologica dovranno essere predisposte una o più sezioni geologiche rappresentative dell'assetto stratigrafico-strutturale dell'area esaminata. In particolare, le tracce delle sezioni saranno scelte secondo un criterio geologico, basato sull'ortogonalità alle strutture geologiche principali e tenendo conto delle finalità applicative che dovrà avere la carta stessa; è consigliabile eseguire sezioni in serie con le tracce delle sezioni orientate ortogonalmente tra loro, in modo da avere un modello geologico tridimensionale completo (Buttler & Bell, 1991; Scesi et al., 2006).

In conclusione, la carta geologica di aree di elevata estensione dovrà essere un documento geologico tale da garantire successive elaborazioni geotematiche e, chiaramente, sarà la base principale per procedere allo studio di dettaglio di un'area minore, quale può essere la scala di un versante o di porzioni di questo.

1.1.2.1.1.2 Rilevamento geologico alla scala di versante

Le metodologie di rilevamento geologico per lo studio alla scala del singolo versante si basano sulla stessa procedura illustrata nel paragrafo precedente. Dunque, i concetti di base rimangono sostanzialmente gli stessi, come rimangono invariate le fasi che occorre eseguire nello svolgimento del lavoro. Chiaramente, nell'affrontare un rilevamento di dettaglio molte informazioni geologiche possono essere meglio rappresentate rispetto a quelle che rientrano nel rilevamento di area vasta; infatti, alla scala del versante, il rango delle unità litologiche o dei corpi litologici cartografabili può subire variazioni (ad esempio, a questa scala, l'accorpamento di litologie o di variazioni latero-verticali, inclusi in un'unica unità cartografabile alla scala di un'area territorialmente vasta, può essere suddivisa in unità di rango inferiore).

La scala cartografica da utilizzare alla scala di versante sarà variabile in funzione dell'estensione del versante e delle finalità di studio, ma comunque abbastanza di dettaglio (da 1:5.000 a 1:1.000).

Allo stesso modo, le fotografie aeree da utilizzare per la fase di foto interpretazione devono essere di scala adeguata a quella della rappresentazione cartografica. In particolare, per la foto interpretazione è sempre utile avere una visione più ampia dell'area (utilizzando ad esempio foto aeree alla scala 1:33.000) e passare successivamente a coperture di maggiore dettaglio, in modo da avere indicazioni più precise, ad esempio circa l'origine strutturale o gravitativa di scarpate morfologiche. Inoltre, possono essere delimitati con maggior dettaglio i limiti delle coperture, siano esse legate a movimenti in massa

o a processi di erosione idrica superficiale. Infine, è sempre opportuna ai fini del rilevamento geologico, l'osservazione di sequenze multitemporali di foto aeree in quanto il confronto risulta indispensabile per la ricostruzione dell'evoluzione dei versanti, soprattutto in aree attualmente antropizzate o in aree ad uso del suolo variabile.

Passando al lavoro di campagna, nel corso di queste ultime bisognerà raccogliere le maggiori informazioni possibili ricavate dai singoli affioramenti, per i quali va eseguita un'approfondita descrizione, al fine di acquisire, oltre alla litologia, tessitura, stratificazione (*layering* in generale) e rapporti giacitureali, anche ulteriori importanti elementi come la descrizione del grado di cementazione, dello stato di fratturazione e di alterazione della roccia affiorante. Infatti, il rilevamento geologico di campagna a scala di versante riveste un'importanza fondamentale, poiché da esso dipenderanno una serie di considerazioni che saranno strettamente connesse al modello del sottosuolo; inoltre, il modello geologico si ripercuote su quello idrogeologico, geotecnico e di stabilità del versante stesso.

A tal proposito, va tenuto debitamente in considerazione come il rilevamento geologico può essere affetto da errori di valutazione e di misura, con l'errore che può essere legato sia all'inesperienza del rilevatore, sia alla perdita di dati geologici di superficie, in seguito a mancanza di affioramenti o a causa della presenza coperture di vario tipo; chiaramente, questo *deficit* di dati può riprodursi sulle sezioni geologiche e di conseguenza, sul modello geologico che si va a costruire. Considerato ciò, poiché molto spesso le previsioni geologiche contenute negli studi sono affette da imprecisioni che pesano sulle trattazioni tematiche di un'area, la minimizzazione dell'errore geologico deve essere l'obiettivo principale del geologo rilevatore; tuttavia, in molti casi anche l'operatore più esperto ottiene un modello geologico di previsione lasciando qualche dubbio su parametri di cui non si riesce ad avere un dato oggettivo misurabile secondo i canoni del rilevamento geologico (ad esempio, mentre per le unità litostratigrafiche metamorfiche e cristalline il geologo misura delle grandezze, diventa più complicato misurare lo spessore di una copertura di una conoide non affiorante, di una superficie di scorrimento di frane più o meno profonde e quindi, del loro spessore; infatti, per quanto si può essere precisi sulle geometrie e rapporti di unità, lo si è di meno su ciò che ricopre tali unità). Alla luce di ciò, è importante che il rilevamento geologico consenta di avere e di formulare un primo modello geologico preliminare, al quale andranno aggiunte le

informazioni non ricavabili dalla superficie o che non seguono le regole geometriche del rilevamento, e attraverso le quali raggiungere il modello definitivo quanto più attendibile. In particolare, l'approfondimento e l'affinamento del modello geologico si può ottenere attraverso l'esame dei dati relativi alle indagini geognostiche programmate (delle quali si discuterà di seguito), eventualmente integrate da indagini pregresse, laddove disponibili.

La costruzione di una carta geologica alla scala del versante (o scala di dettaglio) segue tutte le indicazioni riportate nel paragrafo precedente dedicato al rilevamento a grande scala. Anche in tal caso, dunque, la rappresentazione dei dati ottenuti nel corso del rilevamento geologico, non può prescindere dalla costruzione di una serie di sezione geologiche, alla scala della carta utilizzata (1:2.000 o minori), le quali debbono essere distribuite sull'intera area investigata; in particolare, le tracce più indicative vanno orientate in modo da rappresentare al meglio i versanti e le strutture geologiche che li interessano, intersecando sezioni seriate longitudinali e trasversali al pendio, in modo ortogonale, così da ottenere una visione tridimensionale del sottosuolo, ovvero per avere un controllo 3D dell'intero versante. Inoltre, è importante che le sezioni geologiche contengano non solo tutti i dati geologici ottenuti dal rilevamento di superficie (limiti stratigrafici, faglie, fasce cataclastiche, ecc.), ma, nel caso di versanti interessati da frane, anche le informazioni ricavate dal rilevamento geomorfologico, del quale si discuterà nel relativo paragrafo.

> 1.1.2.1.2 Rilevamento geologico-strutturale

Per rilevamento geologico-strutturale s'intende l'insieme delle operazioni che prevedono il riconoscimento in *situ* delle deformazioni subite dalle rocce e la raccolta di dati inerenti alle caratteristiche geometriche (pieghe, faglie, fratture, foliazione, ecc.), cinematiche (l'analisi degli spostamenti e dei movimenti, che hanno portato alla variazione di posizione, orientazione, dimensione e/o forma degli ammassi rocciosi) (Guida al rilevamento del Servizio Geologico Nazionale, 1996; Scesi L., Papini M., Gattinoni P., 2006).

Ai fini del presente lavoro, ci si limiterà a esaminare, seguendo un criterio di tipo geometrico, le caratteristiche e i parametri riguardanti la distribuzione delle superfici di discontinuità (fratture, faglie, discontinuità, ecc.), nonché a indicare quali sono le procedure essenziali per effettuare un rilevamento geologico-strutturale.

Una volta scelte le aree o l'area sulla quale eseguire il rilevamento (il numero delle aree varia a seconda che si tratti di un rilevamento di area vasta o alla scala del versante), bisognerà eseguire, in primo luogo, l'individuazione plano-altimetrica, la misura delle dimensioni dell'affioramento e la misura della giacitura dell'affioramento.

Un affioramento roccioso risulta delimitato e suddiviso da discontinuità. Con quest'ultimo termine si indicano superfici di debolezza strutturale, che possono essere primarie (fessure da raffreddamento, giunti di strato, scistosità, ecc.) e acquisite (deformazioni tettoniche, fratture da disgregazione fisica, dissoluzione carsica, ecc.); le discontinuità sono in genere raggruppabili in sistemi o famiglie. Dunque, con il termine "ammasso roccioso" si indica l'insieme del corpo fisico costituito dal materiale roccia e dalle discontinuità che lo interessano, ovvero un mezzo discontinuo.

Detto ciò, l'insieme degli elementi da misurare nel corso del rilevamento geologico-strutturale sono i seguenti:

Descrizione geologica generale della roccia: nome formazionale, definizione petrografica, colore e composizione mineralogica, struttura dell'ammasso roccioso.

Orientazione delle discontinuità: le discontinuità presenti in un ammasso roccioso sono raggruppabili in famiglie o *set* sulla base della loro orientazione nello spazio e delle loro caratteristiche fisiche; il dato che consente di raggruppare le discontinuità in famiglie è la giacitura. L'importanza dell'orientazione nella caratterizzazione geomeccanica di un ammasso roccioso aumenta al diminuire della spaziatura delle discontinuità e al diminuire della resistenza a compressione della roccia; infatti, le intersezioni reciproche dei piani di discontinuità determinano la forma e le dimensioni dei blocchi presenti all'interno dell'ammasso roccioso.

Spaziatura delle discontinuità: è definita come la distanza fra due discontinuità parallele adiacenti, misurata in direzione perpendicolare alle discontinuità. Di norma, per un sistema di discontinuità, ci si riferisce alla spaziatura media o a quella modale. La spaziatura è molto importante nello studio della stabilità di una massa rocciosa, poiché i sistemi di giunti caratterizzati da bassa spaziatura comportano una diminuzione sostanziale della resistenza dell'ammasso roccioso nel suo insieme; al contrario, i sistemi contraddistinti da spaziature molto ampie tendono a creare condizioni d'interdipendenza tra i diversi blocchi. Nel caso di spaziature estremamente strette, l'orientazione perde di significato poiché la

rottura avviene per rotazione o rotolamento dei piccoli frammenti di roccia. Inoltre, la spaziatura ha una grande influenza sulla permeabilità e sul sistema di circolazione idrico all'interno della massa rocciosa, poiché, in linea generale, la conducibilità idraulica è inversamente proporzionale alla spaziatura dei suoi sistemi di discontinuità. Quando questo non è possibile, il valore di spaziatura misurato (S_m) andrebbe corretto in base all'angolo formato dalla rotella metrica e il sistema di giunti misurato; per ogni sistema di discontinuità, andrebbero calcolate la spaziatura modale, quella massima e quella minima. Un efficace metodo per rappresentare le distribuzioni della spaziatura all'interno di un sistema di giunti può essere quello di utilizzare degli istogrammi.

Intercetta delle discontinuità: rappresenta la distanza media delle discontinuità rispetto ad una base di misura, senza considerare l'appartenenza delle discontinuità alle varie famiglie; l'inverso dell'intercetta, ossia il numero di discontinuità per metro, viene indicata come frequenza o intensità di fratturazione.

Dimensione dei blocchi: l'ammasso roccioso, suddiviso dalle discontinuità, è costituito da elementi discreti di materiale roccia, indicati come volumi rocciosi unitari. In particolare, le dimensioni dei blocchi sono quelle delimitate da discontinuità diversamente orientate che si intersecano isolando un blocco. Le dimensioni dei blocchi solitamente sono direttamente proporzionali alla spaziatura dei sistemi di discontinuità che li isolano. L'orientazione e il numero di sistemi di discontinuità determinano la forma dei blocchi, che raramente può essere assimilata a quella di un solido regolare. La dimensione dei blocchi può essere espressa come numero di discontinuità per unità di volume di roccia (J_v). In particolare J_v è il numero volumetrico delle discontinuità ed è definito come la somma del numero di discontinuità per metro di ogni sistema di giunti presente; il numero di discontinuità per ogni sistema andrebbe conteggiato lungo la perpendicolare del relativo sistema associato. Inoltre, il numero volumetrico delle discontinuità (J_v) può essere utilizzato per dare una stima del valore del RQD, per quelle rocce di cui non si possiedono carote di sondaggio, tenendo presente che il valore del RQD sarà utilizzato durante il calcolo del SMR nelle classificazioni geomeccaniche.

Persistenza delle discontinuità (o continuità): viene definita come l'estensione di una discontinuità rispetto ad una linea di riferimento appartenente al piano su cui giace la discontinuità stessa (espressa come rapporto percentuale); in tal caso, si parla di persistenza lineare. Poiché una superficie di discontinuità può

presentarsi formata da zone di totale separazione fra le pareti e/o ponti di roccia intatta, la persistenza può anche essere definita come rapporto percentuale fra l'area di effettiva separazione fra le pareti e l'area del piano che contiene la discontinuità stessa (persistenza areale). In particolare, la misura della traccia di una discontinuità in affioramento e l'osservazione di una sua eventuale terminazione contro un'altra discontinuità sono fattori che permettono di dare una stima areale dell'estensione delle discontinuità e delle profondità che esse raggiungono. La misura della persistenza ha una notevole importanza poiché, nel caso di pendii in roccia, la persistenza dei sistemi in condizioni sfavorevoli determina la probabilità con la quale l'ammasso roccioso nel suo complesso potrebbe essere coinvolto in un'eventuale rottura. La misura della persistenza pone diverse difficoltà all'operatore, poiché raramente si osservano entrambe le terminazioni della traccia di una discontinuità affiorante. Inoltre, le superfici delle discontinuità esposte sono spesso esigue rispetto alla loro superficie reale e quindi risulta possibile dare solo una stima della loro persistenza. Infine, sarebbe utile misurare con una rotella metrica la persistenza di ogni sistema rilevato, ma quando questo non è possibile, è sufficiente indicare il tipo di terminazione. Uno schema riassuntivo delle possibili terminazioni è il seguente:

- la terminazione di una discontinuità contro un'altra discontinuità è definita di tipo (d);
- la terminazione di una discontinuità che si estende al di là della massa rocciosa visibile è definita di tipo (x);
- quella di una discontinuità che si estingue all'interno dell'ammasso roccioso integro è di tipo (r).

Infine, un sistema caratterizzato dalla prevalenza di terminazioni di tipo (x) è quindi più persistente di un sistema con terminazioni prevalenti delle discontinuità di tipo (d); generalmente le discontinuità più persistenti avranno terminazioni di tipo (r).

Numero di sistemi di discontinuità: il numero di sistemi di discontinuità definisce l'insieme delle famiglie di giunti presenti. Dunque, il numero di famiglie di giunti e i loro rapporti giacitureali definiscono forma e dimensioni dei blocchi in cui l'ammasso roccioso tende a scomporsi.

Irregolarità delle discontinuità o scabrezza: le superfici delle discontinuità possono essere planari, ondulate, seghettate o irregolari. La rugosità, misurata tramite il cosiddetto "Pettine di Burton", riduce l'effettiva apertura delle discontinuità e la sua influenza aumenta al diminuire dell'apertura stessa. La

presenza di rugosità e ondulazioni sulle pareti delle discontinuità determina contatti e ponti di roccia. In particolare, quando la rugosità presente sulla superficie dei giunti è dell'ordine di alcuni centimetri, questa contribuisce alla resistenza al taglio fra due discontinuità adiacenti, soprattutto se la loro apertura è inferiore al centimetro; la rugosità di ordine centimetrico è chiamata "a piccola scala". Se le ondulazioni presenti sulla superficie delle discontinuità hanno lunghezza d'onda maggiore di un metro, ovvero anche la loro ampiezza è maggiore di un metro, possono modificare le inclinazioni locali dei sistemi di discontinuità. L'importanza della rugosità diminuisce all'aumentare dell'apertura delle fratture, o all'aumentare dello spessore del riempimento tra due discontinuità parallele.

Apertura delle discontinuità: rappresenta la distanza fra le pareti delle discontinuità (viene misurata con un calibro). Possono essere chiuse (contatto roccia-roccia) o aperte (senza materiale di riempimento o con riempimento). Le aperture misurate in affioramento, influenzate da fattori esterni quali il rilascio tensionale e l'alterazione superficiale, sono generalmente maggiori di quelle effettivamente presenti nell'ammasso roccioso. In particolare, aperture molto ampie indicano una dislocazione dei due blocchi rispetto alla posizione originaria, oppure fenomeni di dissoluzione interessanti le pareti dei giunti e, più in generale, l'ammasso roccioso nel suo insieme. Poiché le aperture possono essere anche disturbate da locali alterazioni della roccia, una misura sufficientemente accurata delle aperture correlate ai diversi sistemi di discontinuità comporta delle difficoltà tecniche notevoli e, nella maggior parte dei casi, si può fare solo una stima di questo parametro. Le aperture visibili andrebbero misurate perpendicolarmente alla direzione delle pareti che le delimitano, mentre si dovrebbero considerare anche le aperture che presentano riempimenti secondari. L'importanza delle aperture è correlata con la rugosità dei giunti poiché essa condiziona la resistenza al taglio nei sistemi di giunti.

Materiale di riempimento: la presenza di materiale di riempimento deve essere registrata considerandone lo spessore, la composizione mineralogica, la granulometria e le condizioni di umidità. Solitamente, il riempimento ha una resistenza meccanica inferiore alla roccia primitiva. Sono tipici materiali di riempimento le argille, le sabbie e i frammenti clastici di diverse dimensioni. Il riempimento può essere anche un minerale di cristallizzazione secondaria, come per esempio calcite. La distanza fra le due pareti contenenti il riempimento è definita ampiezza. La gamma delle possibili interazioni tra il riempimento e la

roccia incassante è molto vasta, potendo comprendere una certa attività di lubrificazione che i riempimenti argillosi possono attuare sulle pareti della roccia incassante, l'influenza sulla circolazione idraulica all'interno dell'ammasso roccioso e l'attuazione di fenomeni di cementazione delle pareti dei giunti (in genere calcite). Durante la fase del rilevamento occorre specificare la natura del sedimento (detritico, argille illuviali, calcite, ecc), il suo grado d'alterazione e, quando è possibile, la sua mineralogia. Nel caso di analisi di stabilità, se si riscontrano riempimenti di tipo montmorillonitico, ovvero argille rigonfianti, è molto utile prelevare alcuni campioni, per determinarne il contenuto di H₂O e la pressione di rigonfiamento.

Filtrazione: i fenomeni di filtrazione e di elevata umidità sono spesso visibili sulla superficie delle discontinuità. Quando le osservazioni sono eseguite durante periodi di scarse precipitazioni non si noterà umidità sulle pareti dei giunti, ma in certi casi saranno visibili le tracce dei moti di filtrazione che avvengono durante la stagione umida. Quando sono presenti tracce di umidità o filtrazione, andrebbero valutati sia i dati pluviometrici sia quelli termometrici della zona. In presenza di masse permeabili per fratturazione secondaria, intercalate da formazioni impermeabili, esiste la possibilità che siano presenti falde in pressione che possono influenzare le condizioni di stabilità dei versanti. Se esistono delle faglie nella zona, si dovrebbe valutare la loro influenza sull'acquifero presente, sia come direzioni di un eventuale deflusso sotterraneo preferenziale, sia come eventuali limiti geologici dell'acquifero.

Alterazioni delle superfici dei giunti: diretta conseguenza di processi fisici e/o chimici agenti sulla roccia integra è l'alterazione della stessa. Il livello di alterazione è definito dal "grado di alterazione", il quale varia da I a VI (il primo grado si riferisce alla roccia integra, mentre, l'ultimo grado indica la massima alterazione e si riferisce in particolare ai terreni cosiddetti "residuali" o meglio suoli *strictu sensu*) (G.C.O., 1984; Cascini et al., 1992a, 1994; GSE-GWPR, 1995; Gullà & Matano, 1997).

Resistenza delle pareti: la resistenza delle pareti dei giunti viene misurata sottoponendo a prova di compressione uniassiale campioni prelevati dall'ammasso roccioso. La resistenza delle pareti è un parametro fondamentale nell'analisi di stabilità di un pendio in roccia, poiché è direttamente proporzionale alla resistenza a trazione e al taglio della roccia. Generalmente le pareti dei giunti presenteranno valori più bassi di resistenza a compressione rispetto alle parti più interne dell'ammasso roccioso, poiché, essendo più esposte all'azione degli

agenti esogeni, il loro grado di alterazione sarà più elevato, determinando, quindi, una diminuzione della resistenza meccanica dell'ammasso roccioso. Durante la fase del rilevamento è opportuno valutare qualitativamente le condizioni dell'alterazione dell'ammasso roccioso nel suo complesso e, ad una prima stima, possono essere sufficienti un'osservazione visiva ed alcuni saggi sulla roccia con il martello da geologo. Per ottenere una stima sufficientemente accurata della resistenza a compressione monoassiale C_0 , è opportuno utilizzare il Martello di Schmidt e il *Point Load Test*. In particolare, tali metodologie permettono di eseguire prove sufficientemente accurate, ma anche economiche e veloci (numerosi lavori hanno dimostrato ampiamente che, se condotte rigorosamente, queste prove forniscono risultati comparabili con quelli ottenuti con una ben più complicata e costosa prova di compressione uniassiale). La possibilità di utilizzare sia il *Point Load Test* (per la sua semplicità di utilizzo e per il fatto che può essere utilizzato anche *in situ*), che il martello di Schmidt direttamente durante la fase del rilevamento delle discontinuità, abbassa notevolmente i costi e i tempi e rende particolarmente conveniente questa tipologia d'indagine.

La raccolta dei dati inerenti le discontinuità assume grande importanza dal punto di vista applicativo, poiché queste ultime condizionano sia il comportamento tecnico sia idraulico degli ammassi rocciosi. Diventa pertanto fondamentale rappresentarle graficamente; in particolare, i metodi più utilizzati consistono nell'utilizzare le proiezioni sferiche, quali le proiezioni equiareali di Schmidt e le proiezioni equiangolari di Wulff (Hoek e Bray, 1981). Infatti, tramite la rappresentazione dei poli e dei piani delle discontinuità si riesce, in maniera molto agevole e intuitiva, sia a individuare le diverse famiglie o sistemi di discontinuità, sia a comprendere quali sono i reciproci rapporti geometrici tra di esse e rispetto al pendio, individuando dunque, la presenza di possibili superfici sfavorevoli in termini di stabilità dei pendii (chiaramente, i risultati ottenuti dall'analisi strutturale devono essere sempre integrati con altri dati, quali la presenza d'acqua, la litologia, ecc.).

In particolare, uno dei metodi più utilizzati per valutare la stabilità di un pendio tramite diagrammi strutturali è il cosiddetto *Test di Markland*, il quale consente di stabilire, considerando solo la geometria del pendio e delle discontinuità, unitamente all'angolo di attrito, la possibilità che avvengano "scivolamenti a cuneo" in un ammasso roccioso fratturato; in altre parole, è possibile identificare le "discontinuità critiche", cioè le discontinuità alle quali sono connessi potenziali

piani di scivolamento, separandole da quelle che non influiscono sulla stabilità del pendio (Hoek e Bray, 1981).

In particolare, alla luce di quanto detto finora, i fattori che influiscono in modo determinante sulla stabilità di un pendio sono:

- la giacitura delle linee di intersezione fra due piani;
- gli sforzi di taglio che si verificano sulle superfici di discontinuità;
- la geometria dei cunei che si formano dall'intersezione di due famiglie di discontinuità.

Il caso limite si ha quando il cuneo degenera in un piano, quando cioè l'immersione e l'inclinazione dei due piani sono uguali e quando le resistenze al taglio sono legate unicamente all'attrito. In queste condizioni, il fenomeno di scivolamento avviene se l'inclinazione è maggiore dell'angolo di attrito, da cui per approssimazione si può ricavare che anche la stabilità di un cuneo qualsiasi si ottiene mettendo a confronto l'inclinazione della linea di intersezione di due piani con l'angolo di attrito. Dunque, lo scivolamento lungo la linea di intersezione di due piani è possibile se l'inclinazione di tale linea è minore dell'inclinazione del versante, misurata rispetto alla direzione di scivolamento (cioè quando le discontinuità sono poste a franapoggio); di conseguenza, lo scivolamento avviene se l'inclinazione della linea di intersezione dei due piani è maggiore dell'angolo di attrito.

I dati geologico-strutturali, oltre che per la stabilità dei pendii, possono essere utilizzati anche per studiare e valutare le modalità di circolazione idrica negli ammassi rocciosi, nonché le relative condizioni di permeabilità. Infatti, nelle rocce, il sistema di vuoti che permette la circolazione idrica è rappresentato dalle discontinuità sia primarie che secondarie. Di conseguenza, per gli ammassi rocciosi, è possibile risalire indirettamente ai valori di permeabilità tramite il rilevamento geologico-strutturale, applicando diversi metodi noti in letteratura, tra cui i più noti sono quelli di Snow D.T. (1969) e Louis (1974), i quali permettono di risalire non solo al valore della conducibilità idraulica, ma anche di individuare la direzione della permeabilità stessa (si fa presente, tuttavia, che le teorie su cui si basano tali metodi presentano diversi limiti legati a diversi fattori, tra i quali: il flusso è considerato sempre laminare, l'ammasso roccioso è considerato impermeabile tranne che lungo le discontinuità, con quest'ultime che considerate piane e lisce, la loro apertura costante, ecc.).

> 1.1.2.1.3 Rilevamento litologico-tecnico

La cartografia geotematica rappresenta lo sviluppo e l'approfondimento della cartografia geologica, con l'obiettivo di fornire ulteriori informazioni, essenziali per la conoscenza delle condizioni generali di rischio e di vulnerabilità del territorio.

Chiaramente, la cartografia geologica di base è fondamentale per la conoscenza del territorio, quale elemento strategico e propedeutico alle attività di programmazione in materia di pianificazione e gestione del suolo e del sottosuolo, poiché, attraverso l'acquisizione dei dati del terreno è possibile realizzare la "fotografia" dello stato del territorio, sia superficiale che profondo, fornendo tutte le informazioni di base necessarie per ulteriori elaborazioni cartografiche. Dunque, il rilevamento litotecnico, soprattutto quello di aree di elevata estensione non può prescindere dal rilevamento geologico-strutturale e dalla carta geologica prodotta sull'area d'interesse, che, pertanto, rappresenta il punto di partenza per la redazione della carta litotecnica.

Infatti, dal punto di vista litotecnico, i tipi litologici rilevati e contenuti nella carta geologica, sono accorpabili in unità litotecniche (ULT), in virtù del comportamento meccanico indicativamente omogeneo e indipendentemente dalla loro collocazione geometrica. Indicativamente, facendo ad esempio riferimento ai terreni affioranti in Calabria, nella carta litotecnica riferita a uno studio geologico di una vasta area, potranno essere differenziate numerose ULT, tra cui ad esempio: geomateriali incoerenti a composizione eterogenea sabbioso-ghiaiosa e limosa (alluvioni, depositi colluviali, detriti di frana ecc.), geomateriali coerenti (o coesivi) granulari prevalentemente limosi ed argillosi, da soffici a sovraconsolidati (limi ed argille), ammasso roccioso granulare cementato, a grana da media a grossolana, mediamente fratturato (conglomerati ed arenarie), ammasso roccioso coerente (o coesivo) litificato (marne ed argilliti), ammasso roccioso lapideo da stratificato a massiccio, a comportamento prevalentemente fragile (calcarei e dolomie), ammasso roccioso con comportamento meccanico riferibile a una roccia tenera (cataclasiti), ecc..

Grazie a questa tipologia di informazioni, alla scala del singolo versante, la carta litologico-tecnica sarà realizzata sulla base del rilevamento geologico-tecnico appositamente effettuato in campagna, mediante osservazioni e determinazioni condotte sugli affioramenti e sulla base delle informazioni contenute nella carta geologica ed in quella geomorfologica.

Chiaramente, il rilevamento indirizzato allo studio di aree in frana deve tener conto di aspetti diversi a seconda del tipo/i di frana ed in particolare, a seconda della profondità dei fenomeni franosi stessi (superficiali, mediamente profondi, profondi) e dei litotipi coinvolti (terreni o ammassi rocciosi).

In particolare, per lo studio delle frane superficiali, nel corso del rilevamento si dovrà prestare attenzione al rilevamento delle coperture (depositi detritici, terreni colluviali, suoli *strictu sensu*, ecc.), ed in particolare degli spessori potenzialmente mobilizzabili; per la valutazione degli spessori si può far riferimento, oltre che alle osservazioni di superficie, ad eventuali indagini geognostiche (delle quali si discuterà nei successivi paragrafi).

Diversamente, quando il rilevamento litotecnico affronta problematiche relative a fenomeni franosi che coinvolgo ammassi rocciosi che possono essere affioranti o ricoperti da coltri di terreno (fenomeni mediamente profondi e profondi), l'attenzione dovrà essere focalizzata sulle rocce del substrato. Infatti, in affioramento, dovranno essere rilevate: le caratteristiche litologico-stratigrafiche delle rocce; la presenza di strutture tettoniche ad alto o basso angolo; la presenza di fasce o zone fratturate o di zone degradate e ridotte come consistenza a terreno (*fault gouge*), associate alle strutture tettoniche; le condizioni generali di fratturazione degli ammassi; le caratteristiche fisico-meccaniche (attraverso *test* qualitativi e/o semiquantitativi); la presenza di eventuali emergenze idriche. Dunque, per caratterizzare in modo completo le discontinuità che interessano un ammasso roccioso, è necessario procedere con accurate analisi geomeccaniche (delle quali si discute di seguito), eventualmente abbinate ad opportune indagini geognostiche.

In conclusione, lo scopo del rilevamento litotecnico, come già precedentemente accennato, è quello di individuare e cartografare i litotipi affioranti (ULT), sulla base delle loro caratteristiche fisico-meccaniche e di differenziare, nell'ambito di un litotipo, zone a comportamento fisico-meccanico complessivamente omogenee. Per la definizione delle ULT dovrà essere fatto riferimento oltre che al rilievo e alla caratterizzazione degli affioramenti, alle caratteristiche fisico-strutturali e a parametri geotecnici e geofisici, indipendentemente dalla loro posizione stratigrafica e dai relativi rapporti geometrici.

Dunque, il rilevamento geologico-tecnico sarà finalizzato alla descrizione geologico-tecnica dei terreni e/o alla descrizione geologico-tecnica degli ammassi

rocciosi, i cui criteri e metodologie sono descritti di seguito a parte; pertanto, i litotipi dovranno essere distinti in:

- litotipi lapidei, per i quali dovranno essere acquisite le informazioni relative alla litologia, alla stratificazione, al grado di fratturazione e di alterazione, nonché tutti gli elementi, eventualmente anche strutturali, che possono determinarne il comportamento geomeccanico, principalmente mediante l'uso di prove manuali e, laddove esistenti, integrando tali dati con i risultati di prove specifiche in sito e/o di laboratorio;
- litotipi granulari e coesivi, per i quali dovranno essere acquisite informazioni circa lo spessore (stimato su evidenze di campagna), le dimensioni e la forma dei frammenti, la presenza di frazione fine (caratteristiche tessiturali) e il grado di cementazione e/o di consistenza/addensamento.

Nella carta litologico-tecnica dovrà essere individuato il tipo di substrato presente e la copertura, evidenziandone la geometria tramite la ricostruzione delle isopache (linee di uguale spessore) della coltre; a tal fine sarà utile ubicare nella carta litologico-tecnica le eventuali indagini effettuate direttamente sull'area o recuperate presso enti vari o liberi professionisti locali.

Nei contesti dove sono ampiamente diffuse in affioramento rocce cristalline, risulta di fondamentale importanza il rilievo del grado di alterazione e la produzione di una carta del grado di alterazione corredata di profili di alterazione (del rilievo del grado alterazione e delle classi di alterazione delle rocce si discuterà approfonditamente di seguito). In tali contesti, infatti, la stabilità dei versanti e più in generale, la dinamica evolutiva degli stessi risulta fortemente condizionata dagli spessori di roccia interessati dai processi di alterazione e dall'intensità raggiunta dagli stessi. Anche ad una sommaria analisi del territorio, laddove sono presenti rocce cristalline, emerge, infatti, l'elevata concentrazione di fenomeni di instabilità (frane e DGPV), sia nelle coltri alteritiche, sia più in profondità negli ammassi alterati e degradati. La definizione di un particolare grado e di specifiche modalità di alterazione consente, infatti, di comprendere i fattori che hanno determinato l'alterazione stessa e di differenziare, nell'ambito di un determinato litotipo, zone a comportamento fisico-meccanico diverso ma complessivamente omogenee al loro interno.

È quindi evidente come la caratterizzazione delle modalità e del grado di alterazione nelle rocce cristalline rappresenti uno strumento fondamentale per la

definizione delle relazioni tra fattori predisponenti e scatenanti nella stabilità dei pendii (Deere & Patton, 1971; Hencher et al., 1984; Nishida & Aoyama, 1985; Brand, 1985; Critelli et al., 1991a; Cascini et al., 1991; Cascini et al., 1992a; Calcaterra et al., 1993; Cascini et al., 1994; Calcaterra et al., 1996; Lacerda & Santos, 2000; Gullà et al., 2004a; Calcaterra et al., 2004; Calcaterra et al., 2005; Borrelli et al., 2007; Borrelli & Gullà, 2007; Scarciglia et al., 2007; Terranova et al., 2007). La predisposizione di carte del grado di alterazione e la definizione di profili d'alterazione rappresentativi di definiti settori risultano di estrema utilità, sia per la pianificazione del territorio, sia per indirizzare più efficacemente la ricerca, gli studi e le indagini, essenziali per definire ed affrontare le problematiche che spesso interessano gli ammassi rocciosi.

In conclusione, alla luce di quanto finora esposto, al fine di caratterizzare i terreni e/o le rocce affioranti, è necessario integrare il rilevamento geologico tradizionale e il rilevamento geologico-strutturale con una serie di operazioni che prevedono:

- la descrizione geologico-tecnica dell'affioramento;
- la raccolta in *situ* di campioni da sottoporre a prove di laboratorio;
- la determinazione, tramite prove in *situ* e/o di laboratorio, dei parametri geotecnici o geomeccanici inerenti ai terreni o agli ammassi rocciosi;
- l'elaborazione e la sintesi dei dati e delle informazioni raccolte atte a classificare, da un punto di vista tecnico, gli ammassi rocciosi e/o i terreni.

1.1.2.1.3.1 Descrizione geologico-tecnica dei terreni

Quando si ha a disposizione un affioramento naturale o le cassette di un sondaggio, è opportuno eseguire un'immediata stima della granulometria, stimando visivamente le dimensioni dei granuli (tra le principali classificazioni, vi sono la "Classificazione granulometrica secondo AGI" e la "Classificazione A.S.T.M."). Infatti, la descrizione granulometrica in *situ* è importante soprattutto per la scelta dei campioni da prelevare e portare in laboratorio (ad esempio, l'analisi granulometrica non può essere eseguita se i campioni hanno dimensioni superiori a 60-75mm).

La descrizione geologico-tecnica di un terreno comprende, oltre alla granulometria, l'osservazione di altre caratteristiche, diverse a seconda che si tratti di terreni grossolani o di terreni fini.

In particolare, nei terreni grossolani, particolare attenzione dovrà essere riservata ai seguenti fattori:

- alterazione: per le frazioni granulometriche grossolane si può fare riferimento alle classificazione utilizzate per gli ammassi rocciosi.
- arrotondamento e sfericità: per confronto con immagini di granuli predefiniti, si può stabilire il grado di arrotondamento e sfericità in: molto angoloso, angoloso, subangoloso, subarrotondato, arrotondato, ben arrotondato; la forma può essere: allungata, appiattita, piatta e allungata, equidimensionale, parallelepipedica.
- litologia: spesso è utile definire la litologia dei clasti.
- grado di addensamento: un terreno può essere definito come: sciolto (se può essere facilmente scavato con una pala), addensato (se non è possibile scavarlo con una pala), mentre, mediamente addensato nei casi intermedi.
- grado di cementazione: più i clasti sono saldati tra loro, maggiore è il grado di cementazione.

Passando ai terreni a grana fine, è utile osservare le seguenti caratteristiche:

- plasticità: è la capacità di un terreno di lasciarsi plasmare senza rompersi; sulla base di ciò, un terreno può essere definito non plastico (per qualsiasi contenuto d'acqua, non è possibile modellare il materiale), di bassa plasticità, di media plasticità e di alta plasticità.
- consistenza: è la capacità di un terreno di resistere all'infissione di un penetrometro tascabile, sul quale si distingue tra terreno privo di consistenza, poco consistente, mediamente consistente, consistente, molto consistente, duro e molto duro (a seconda dei valori di KPa).
- resistenza al taglio non drenata: può essere misurata con scissometri manuali (il momento torcente necessario a far ruotare le palette), sui quali si vede direttamente sul quadrante dello strumento in KPa.
- colore: deve essere descritto considerando il campione umido.
- odore: può indicare la presenza di sostanze organiche in decomposizione o di inquinanti.
- umidità: si distingue (su un apposita tabella) tra terreno secco, terreno umido, terreno bagnato, terreno con stillicidio e terreno con venute d'acqua.
- reazione all'acido cloridrico: è utile per rilevare la presenza di carbonato di calcio nei clasti o come agente cementante.

Una volta che i terreni sono stati descritti secondo i suddetti criteri, è necessario individuare i parametri relativi alle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali tramite l'esecuzione di prove in *situ* e/o di laboratorio, per le quali si rimanda al relativo capitolo/paragrafo. Una volta fatto tutto ciò, le elaborazioni e le sintesi di tutti i dati raccolti consentono di classificare i terreni da un punto di vista geologico-tecnico. In particolare, una delle classificazioni più utilizzate è la USCS (*Unified Soil Classification System*), tramite la quale, il principale obiettivo è quello di determinare, sulla base di semplici prove di laboratorio ed in *situ*, il comportamento tecnico dei terreni in relazioni alle differenti opere di ingegneria civile.

1.1.2.1.3.2 Descrizione geologico-tecnica degli ammassi rocciosi

La descrizione degli ammassi rocciosi viene effettuata tramite l'esecuzione dei rilevamenti geologico-strutturali (precedentemente descritti), che consentono di mettere in luce gli aspetti fisici, mentre, per comprendere il comportamento meccanico dell'insieme è necessario eseguire una serie di prove in *situ* e/o di laboratorio, sia sul materiale roccioso, che sulle relative discontinuità (prova di resistenza allo sclerometro o martello di Schmidt, prove monoassiali, prove di resistenza al taglio, ecc.).

Infatti, il comportamento degli ammassi rocciosi è fortemente influenzato dalle loro condizioni strutturali (famiglie di discontinuità, persistenza, spaziatura), dalla geometria (giacitura e orientazione delle discontinuità rispetto al versante), dalle caratteristiche meccaniche (resistenza a taglio delle discontinuità, resistenza a trazione di eventuali ponti di roccia), oltre che, chiaramente, da eventuali sollecitazioni esterne (presenza di acqua in pressione nelle discontinuità, apparati radicali, ecc.).

Uno dei metodi più utilizzati per la valutazione della qualità di un ammasso roccioso è quella di Bieniawsky (Bieniawski, 1973 e successive modifiche; Cice et al., 2005), la quale consente di determinare l'influenza che alcuni parametri fisici, meccanici e geologico-strutturali esercitano sulla roccia in relazione alle sue proprietà tecniche. In particolare, una prima classificazione semiquantitativa (1973) suddivide gli ammassi in funzione della loro resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta e della spaziatura delle discontinuità, attribuendo a ciascuna delle quattro classi individuate anche un valore di coesione di attrito. Diversamente, la classificazione completa detta "*rock mass rating*" si basa su un punteggio assegnato alla roccia, ricavato dall'analisi di cinque parametri (per le

definizioni approfondite di tali parametri, si faccia riferimento al paragrafo dedicato al rilevamento geologico-strutturale):

1. Resistenza a compressione: ottenuta tramite le prove di compressione monoassiale o *point load test*.
2. RQD: rappresenta la percentuale di recupero modificata di un sondaggio; in particolare, è data dal rapporto tra la somma degli spezzoni di carote aventi lunghezza superiore a 10cm e la lunghezza totale della carota; quando non si hanno a disposizione dei sondaggi, il valore di RQD può essere stimato tramite relazioni empiriche, quali:
 - $RQD = (115 - 3,3 J_v)$, dove J_v è il numero di discontinuità per numero di volume;
 - $RQD = 100 (0,1f + 1) e^{-0,1f}$, dove f è il numero di discontinuità per metro o frequenza.
3. Spaziatura dei giunti: il valore di spaziatura utilizzato è quello modale, calcolato tra tutti quelli misurati per ognuno dei sistemi di discontinuità rilevati.
4. Condizione dei giunti: alterazione, apertura, persistenza, rugosità e riempimento; questo parametro è influenzato dal valore dell'apertura delle discontinuità, dalle condizioni idrauliche delle fratture, dalla presenza del riempimento e dalla sua natura.
5. Condizioni idrauliche: parametro espresso come rapporto tra la pressione dell'acqua nei giunti e le sollecitazioni naturali in sito, oppure, come condizioni generali.

Tramite un'apposita tabella (Tab.5) viene attribuito a ciascun parametro un valore numerico; in tal modo, la somma dei valori dei cinque parametri fornisce il punteggio qualità dell'ammasso detto RMR. In particolare, tale numero, variabile tra 0 e 100, è tanto più elevato, tanto maggiore è la qualità della roccia. Detto ciò, è possibile individuare cinque classi, per ciascuna delle quali viene riportato non solo un giudizio qualitativo (ottima-pessima), ma anche un campo di valori, entro i quali ricadono la coesione e l'angolo di attrito.

Relativamente a quanto trattato in questa sede, ovvero al caso in cui l'RMR viene calcolato per la determinazione della stabilità di un versante, l'RMR viene corretto in base all'orientazione delle discontinuità rispetto al versante.

CALCOLO RMR								
PARAMETRO		VALORI ASSUNTI						
Resistenza della roccia integra	Resistenza al point load test (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2			
	Resistenza a compressione uniassiale MPa	>250	100-200	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
PUNTEGGI		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	25		
PUNTEGGI		20	17	13	8	3		
Spaziatura (cm)		>200	60-200	20-60	6-20	<6		
PUNTEGGI		20	15	10	8	5		
Condizioni delle discontinuità		Chiuse	<1mm integra	<1mm alterata	<5mm	>5mm		
PUNTEGGI		30	25	20	10	0		

Tabella 5 - Parametri per il calcolo del RMR (Bieniawski, 1973 e successive modifiche).

Infatti, per i casi in cui si tratti la stabilità di un versante, Romana (1985) propone di apportare una correzione dell'indice RMR per tenere conto anche dell'orientazione relativa del pendio e dei sistemi di discontinuità (Tab. 6). L'indice così corretto viene denominato SMR (*Slope Mass Rating*) e viene espresso tramite la relazione $SMR = RMR - (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4$, dove:

- F1 = indice che dipende dal parallelismo tra l'immersione dei giunti e quella del pendio; il suo *range* varia da 1, quando l'immersione di una discontinuità è pressoché parallela a quella del pendio, a 0,15, quando tra le loro immersioni c'è una differenza maggiore o uguale a 30°.
- F2 = indice che considera l'inclinazione delle discontinuità; il suo *range* varia da 1, quando l'inclinazione è maggiore di 45°, a 0,15, quando è inferiore a 20°; in particolare, per i casi di *toppling* il suo indice è uguale a 1.
- F3 = indice che riflette le relazioni fra l'inclinazione dei giunti (i_d) e quella del pendio i_p ; nei casi di scivolamento, si considera la loro differenza ($i_d - i_p$); se essa è maggiore di 10°, F3 = 0, se è inferiore a -10°; F3 = -60°. Nei casi di *toppling*, si considera la loro somma ($i_d + i_p$) e se essa è inferiore a 110°, F3 = 0, se essa è maggiore di 120°, F3 = -25;

- F4= oltre ai suddetti fattori, Romana (1995) introduce un quarto fattore F4 (empirico), in base all'origine e alla tipologia della parete, variabile da 0 nel caso di parete artificiale (prodotta con l'impiego di esplosivi o mezzi meccanici) a 15 nel caso di parete naturale.

Infine, la classificazione geomeccanica così corretta prevede cinque classi, in funzione dell'indice SMR, per ciascuna delle quali si suggerisce il tipo di fatturazione più probabile, unitamente ad una stima della stabilità dell'ammasso.

In particolare, se:

- SMR è compreso tra 0 e 20, la roccia è molto scadente e il pendio assai instabile (Classe V).
- SMR è compreso tra 21 e 40, la roccia è scadente e il pendio instabile (Classe IV).
- SMR è compreso tra 41 e 60, la roccia è discreta e il pendio parzialmente stabile (Classe III).
- SMR è compreso tra 61 e 80, la roccia è buona e il pendio stabile (Classe II).
- SMR è compreso tra 81 e 100, la roccia è molto buona e il pendio completamente stabile (Classe I).

Caso		Molto favorevole	Favorevole	Normale	Sfavorevole	Molto sfavorevole
P	$ \alpha_J - \alpha_S $	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
T	$ \alpha_J - \alpha_S - 180° $					
P/T	F1	0.15	0.40	0.7	0.85	1.00
P	$ \beta_J $	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
	F2	0.15	0.40	0.7	0.85	1.00
T	F2	1	1	1	1	1
P	$\beta_J - \beta_S$	>10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	<-10°
T	$\beta_J + \beta_S$	<110°	110°-120°	>120°	--	--
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60
α_J = Direzione immersione delle discontinuità		α_S = Direzione immersione del versante		β_J = Inclinazione delle discontinuità		β_S = Inclinazione del versante

Tabella 6 - Fattori correttivi per il calcolo del SMR (Romana, 1985).

1.1.2.1.3.3 Rilevamento geologico-tecnico delle rocce deboli

In natura esistono delle rocce definite “deboli”, le quali presentano resistenza intermedia tra i terreni e le rocce propriamente dette. In particolare, vengono così definite per i seguenti motivi:

- per litologia, a causa dei legami deboli dei componenti (es. marne, argillite, gessi, ecc.);
- a causa di profondi processi di alterazione fisica e / chimica;
- a causa di fenomeni tettonici;
- per l'abbondante presenza di cavità (es. rocce carsiche, arenarie, conglomerati, ecc.).

Le rocce deboli sono spesso difficili da descrivere, da campionare e da sottoporre a prove in *situ* e di laboratorio. Secondo la *Basic Geotechnical Description* dell'ISRM, i parametri utilizzati per definire i limiti tra terreni, rocce deboli (*weack rock*) e rocce dure (*hard rock*) sono la resistenza a compressione monoassiale e la coesione. In particolare, i materiali aventi coesione inferiore a 0,3 MPa e resistenza a compressione monoassiale inferiore di 2 Mpa sono considerati terreni, i materiali con resistenza a compressione variabile tra 2 e 20 Mpa sono definiti “rocce deboli”, mentre, i materiali con resistenza a compressione monoassiale superiore a 20 Mpa sono definiti come “rocce dure”.

Una caratterizzazione tecnica preliminare di un ammasso roccioso costituito da rocce deboli può essere eseguita sulla base di un rilevamento geologico-tecnico che consente una classificazione prevalentemente qualitativa, in relazione anche alle loro caratteristiche genetiche, in particolare, utilizzando la classificazione delle rocce deboli proposta da Clerici (1992). Inoltre, per prevedere la stabilità dei versanti, è possibile utilizzare la classificazione di Beniawsky (o dell'RMR) modificata da A.M. Robertson (1998).

> 1.1.2.1.4 Rilevamento del grado di alterazione e descrizione delle classi di alterazione di rocce

Il *weathering* rappresenta il risultato dei processi fisici e chimici agenti sulle formazioni rocciose. In particolare, i processi di tipo fisico producono disgregazione della roccia per fratturazione, desquamazione, esfoliazione, crioclastismo, aloclastismo, determinando, dunque, solo cambiamenti fisici; diversamente, i processi di tipo chimico, agendo sull'equilibrio mineralogico della roccia stessa, provocano alterazione per idratazione, idrolisi, soluzione,

ossidazione, riduzione, lisciviazione e corrosione. A questi processi vanno, inoltre, aggiunti quelli legati all'azione degli organismi viventi (azioni biochimiche).

La definizione delle condizioni di *weathering* richiede, oltre che una comprensione adeguata dei fattori che le hanno determinate, una differenziazione, nell'ambito di un litotipo, di zone a comportamento fisico-meccanico complessivamente omogenee.

La caratterizzazione del grado di alterazione nelle rocce cristalline rappresenta uno strumento fondamentale per la definizione delle relazioni tra fattori predisponenti e cause innescanti le instabilità dei pendii (Deere & Patton, 1971; letto, 1975; Hencher et al., 1984; Nishida & Aoyama, 1985; Brand, 1985; Critelli et al., 1991a; Cascini et al., 1992a; Calcaterra et al., 1993; Cascini et al., 1994; Lacerda & Santos, 2000; Calcaterra & Parise, 2005; Borrelli et al., 2007; Terranova et al., 2007).

Il rilievo delle condizioni di *weathering* di un ammasso roccioso richiede come premessa la definizione di una procedura che consenta di distinguere, in maniera codificata, i diversi stadi di alterazione. Nella letteratura tecnico-scientifica sono reperibili numerose proposte di classificazione del grado di alterazione delle rocce cristalline (Dearman, 1974; Dearman, 1976a e b; Irfan & Dearman, 1978; I.A.E.G. Commission, 1981; Geotechnical Control Office, 1984; Cascini et al., 1992a; Gullà & Matano, 1994; Gullà & Matano, 1997; Le Pera et al., 2001). Gli schemi di classificazione proposti utilizzano criteri generali differenti: analisi visiva di alcune caratteristiche geologiche, stima di proprietà meccaniche tramite semplici *test*, considerazione di fattori sia geo-litologici, sia meccanici (Lee & De Freitas, 1989).

Tenendo conto delle finalità del presente lavoro/progetto di ricerca, per il rilievo del grado di alterazione può essere assunta, come riferimento generale, una procedura sviluppata e validata sulle situazioni che sono tipiche della Calabria, partendo dalle indicazioni disponibili nella letteratura internazionale (Dearman, 1974; Dearman, 1976; Irfan & Dearman, 1978; I.A.E.G Commission, 1981; Geotechnical Control Office, 1984).

Tale procedura assunta come riferimento prevede, con l'osservazione di caratteri geologici e (tessitura, decolorazione, compattezza, granulometria) e con la valutazione di semplici *test* correlabili alla resistenza meccanica della roccia (martello di Schmidt, immersione in acqua di campioni, ecc.), la distinzione di sei classi di alterazione di seguito descritte (G.C.O., 1984; Cascini et al., 1992a, 1994; GSE-GWPR, 1995; Gulla' & Matano, 1997).

La metodologia proposta per il rilievo del grado di alterazione degli ammassi rocciosi, finalizzata alla redazione della “Carta del grado di alterazione”, prevede diverse fasi di studio, rilevamento ed elaborazione.

In particolare, nel corso di una prima fase, le zone a diverso grado di alterazione possono essere delimitate preliminarmente sulla base dell’analisi di foto aeree e successivamente verificate e dettagliate attraverso controlli in campagna. Gli elementi di classificazione da utilizzare nell’analisi fotointerpretativa possono essere l’acclività e la morfologia dei versanti e dei rilievi in generale, in funzione della roccia d’origine segnalata e, inoltre, considerando le caratteristiche della copertura vegetale o la sua assenza. In tal modo, l’analisi fotointerpretativa permette di individuare e cartografare con buona affidabilità due macroclassi di alterazione, ovvero le zone riferibili indicativamente come comportamento meccanico a roccia tenera e lapidea e quelle riferibili indicativamente come comportamento meccanico a roccia sciolta (intesa come terreno “residuale” o meglio suolo in senso stretto, saprolitico, colluviale e/o detritico-colluviale).

Successivamente alla fase fotointerpretativa, anche al fine di verificare l’effettiva corrispondenza tra gli elementi distintivi assunti (acclività, morfologia, vegetazione) e le classi di alterazione direttamente riscontrate in affioramento, si procederà ad un dettagliato rilevamento di campagna del grado di alterazione (utilizzando le tecniche classiche del rilevamento geologico), basato su un’attenta analisi dei litotipi riscontrati in affioramento, attraverso l’utilizzo di criteri visivi e qualitativi. In particolare, i criteri visivi sono rappresentati da: tessitura e mesostruttura; decolorazione (rispetto alla roccia di origine); compattezza; granulometria. I criteri qualitativi (da eseguire con il martello da geologo), sono rappresentati da: suono della roccia colpita con il martello da geologo (sordo, intermedio, squillante); effetto testa del martello da geologo (facilità, difficoltà, grande difficoltà, assente); effetto punta del martello da geologo (in profondità, superficiale, scalfittura); rottura con il martello da geologo (colpo leggerissimo, colpo leggero, colpo fermo, più colpi fermi, assente); rottura con le mani (si sminuzza, si rompe, assente).

L’esame complessivo delle osservazioni e dei rilievi effettuati nella fase del rilevamento areale, riportati sulla base cartografica di riferimento, consente la redazione di una carta preliminare del grado di alterazione. Sulla base di quest’ultima, si passa all’individuazione, con il supporto della documentazione fotografica acquisita, dei fronti (siti o stazioni di verifica) che meglio si prestano

per effettuare le verifiche puntuali (qualitative e semiquantitative) del grado di alterazione, necessarie per la redazione della carta di alterazione definitiva e la ricostruzione dei profili di alterazione rappresentativi (Gullà & Matano, 1994). Tali siti sono generalmente costituiti da fronti, naturali e/o artificiali, in modo tale da permettere di trarre indicazioni preliminari anche circa lo sviluppo dei profili di alterazione in profondità; indicativamente i fronti individuati devono presentare una lunghezza di almeno 10 m e un'altezza minima dell'ordine di alcuni metri.

La procedura proposta da Gullà & Matano (1994) per lo studio di dettaglio sui fronti prevede: una caratterizzazione generale del fronte (ubicazione su carta, numero identificativo del fronte, quota, inquadramento geologico e geomorfologico, ripresa fotografica); una caratterizzazione strutturale delle discontinuità (tipo di discontinuità, immersione, persistenza, apertura, riempimento); una delimitazione preliminare delle zone a diverso grado di alterazione, attraverso i criteri visivi e qualitativi già utilizzati precedentemente per il rilevamento areale. Successivamente, sul fronte individuato, si procederà ad una verifica puntuale delle zone a diverso grado di alterazione ed all'attribuzione ad ognuna di esse del grado di alterazione definitivo che le compete, attraverso test-semiquantitativi condotti con il martello di Schmidt ed altre prove indice. In particolare, il martello di Schmidt fornisce un valore "locale" della resistenza dell'ammasso roccioso e, in particolare, delle pareti delle discontinuità; per l'assegnazione del grado di alterazione definitivo ai punti su cui vengono effettuate le osservazioni e le misure, si può far riferimento agli intervalli di variazione e campi di valori di riferimento, per le varie classi di alterazione, definiti da Gullà & Matano (1994).

Al termine delle operazioni previste dalla procedura è possibile suddividere il fronte in una serie di zone omogenee dal punto di vista dell'alterazione delle rocce, che presentano cioè un comportamento fisico-meccanico complessivamente uniforme, definito dai parametri semiquantitativi rilevati; la delimitazione delle zone a diverso grado di alterazione, permette, inoltre, di acquisire indicazioni preliminari circa lo sviluppo in profondità dell'alterazione.

Il quadro conoscitivo così delineato consente, inoltre, la definizione dei punti di prelievo di campioni rappresentativi da utilizzare per la sperimentazione, volta alla caratterizzazione geotecnica (granulometria, proprietà indici, resistenza a rottura) e petrografica (indice di decomposizione e indice micropetrografico) dei geomateriali presenti sul fronte.

In conclusione, sono riportate le suddivisioni del grado di alterazione di un profilo di alterazione di un ammasso roccioso (profilo regolitico), distinto nelle sei classi di alterazione che è possibile individuare mediante la suddetta procedura proposta e di seguito descritte:

- *Classe I – ammasso roccioso inalterato (roccia fresca)*

L'ammasso roccioso è per lo più inalterato (oltre l'80% del volume) e preserva tutte le evidenze mineralogiche, strutturali e tessiturali della roccia; deboli decolorazioni e sottili patine di alterazione possono tuttavia esser presenti, lungo le discontinuità meccaniche.

- *Classe II – ammasso roccioso debolmente alterato*

L'ammasso roccioso è prevalentemente debolmente alterato (oltre il 70% del volume); volumi limitati ed isolati dell'ammasso, in prossimità delle discontinuità, possono essere costituiti da roccia moderatamente alterata. Le caratteristiche della roccia sono prevalentemente le seguenti: stesso colore della roccia d'origine con presenza di decolorazione solo sulle discontinuità; tessitura e microstruttura della roccia d'origine integralmente preservate; resistenza confrontabile con quella della roccia d'origine (roccia lapidea); emette un suono squillante quando è colpita con la testa del martello da geologo.

- *Classe III – ammasso roccioso moderatamente alterato*

L'ammasso roccioso è prevalentemente moderatamente alterato (oltre il 70% del volume); volumi limitati e isolati dell'ammasso possono essere costituiti da roccia debolmente o altamente alterata. Le caratteristiche della roccia sono prevalentemente le seguenti: decolorazione pervasiva, con possibile presenza di zone limitate dello stesso colore della roccia fresca; tessitura e microstruttura della roccia fresca ancora ben preservate; resistenza ancora confrontabile con quella della roccia fresca (roccia lapidea); porzioni di roccia non possono essere isolate con le mani dall'ammasso; emette un suono intermedio quando è colpita con la testa del martello da geologo; si scalfisce quando è colpita con la punta del martello da geologo; si riga superficialmente con la punta di un coltello.

- *Classe IV – ammasso roccioso altamente alterato*

L'ammasso roccioso è prevalentemente altamente alterato (oltre il 70% del volume); volumi limitati ed isolati dell'ammasso possono essere costituiti da roccia moderatamente o completamente alterata. Le caratteristiche della roccia sono prevalentemente le seguenti: completa decolorazione; tessitura e microstruttura della roccia fresca ancora preservate; resistenza sostanzialmente ridotta rispetto a quella della roccia fresca (roccia tenera); la punta del martello

da geologo si indenta superficialmente nella roccia colpita e la stessa si riga con la punta di un coltello; frammenti di grosse dimensioni si rompono facilmente se colpiti con la testa del martello da geologo, emettendo un suono sordo, ma non perdono la loro forma originaria se immersi in acqua.

- *Classe V – ammasso roccioso completamente alterato (terreno saprolitico – saprolite)*

L'ammasso roccioso è prevalentemente completamente alterato (terreno saprolitico - saprolite) (oltre il 70% del volume); volumi limitati ed isolati dell'ammasso possono essere costituiti da roccia altamente alterata o da terreno residuale. Le caratteristiche della roccia sono prevalentemente le seguenti: completa decolorazione; tessitura e microstruttura della roccia fresca visibili in forma relitta; consistenza di un terreno; la punta del martello da geologo si indenta profondamente nella roccia colpita e la stessa si incide facilmente con la punta di un coltello; frammenti di grosse dimensioni si rompono con le mani e perdono la loro forma originaria se immersi in acqua; le frazioni granulometriche prevalenti sono ghiaia e sabbia.

- *Classe VI – terreni residuali, colluviali, detritico-colluviali*

L'ammasso è prevalentemente costituito da terreni residuali, colluviali, detritico-colluviali (oltre il 70% del volume); volumi limitati ed isolati dell'ammasso possono essere costituiti da roccia moderatamente o altamente alterata e/o da terreno saprolitico. Le caratteristiche della roccia sono prevalentemente le seguenti: completa decolorazione; tessitura e microstruttura della roccia fresca completamente assenti; consistenza di un terreno; frammenti di grosse dimensioni si rompono facilmente con le mani e si sgretolano in granelli fra le dita. I volumi costituiti da terreni residuali, poco rappresentati in affioramento e generalmente localizzati sulla sommità dei maggiori rilievi, hanno una granulometria caratterizzata in prevalenza dalle frazioni sabbia e limo. I volumi costituiti da terreni colluviali, localizzati generalmente sui versanti e nelle concavità morfologiche, hanno una struttura disorganizzata con le frazioni granulometriche prevalenti, costituite da sabbia e limo, che inglobano frammenti centimetrici di roccia da moderatamente ad altamente alterata, con subordinati frammenti organici. I volumi costituiti da terreni detritico-colluviali, localizzati generalmente nelle porzioni basse dei versanti, hanno una struttura disorganizzata con le frazioni granulometriche prevalenti, costituite da sabbia e ghiaia, che inglobano frammenti decimetrici di roccia da moderatamente ad altamente alterata, con subordinati frammenti organici.

> 1.1.2.1.5 Rilevamento pedologico e descrizione dei suoli

Il rilevamento litologico-tecnico delle coperture e la loro descrizione geologico-tecnica sopra sintetizzati, necessitano di un approfondimento spesso molto trascurato, ma essenziale per una più completa e corretta caratterizzazione dei manti di alterazione e dei fenomeni gravitativi che possono interessarli. Va sottolineato, infatti, che numerose frane di tipo superficiale coinvolgono il suolo *strictu sensu* piuttosto che (o insieme a) il semplice substrato roccioso più o meno alterato o i sedimenti di copertura detritico-colluviale. In proposito assume un'importanza cruciale la sovrapposizione dei diversi orizzonti pedologici di cui è intrinsecamente costituito un suolo, come risultato dei processi pedogenetici (di natura fisica, chimica e biologica) di differenziazione dalla roccia madre nel corso del tempo. Infatti, i vari orizzonti di suolo presentano generalmente caratteristiche morfologiche, fisico-chimiche e mineralogiche diverse tra di loro e dal substrato roccioso a cui sono sovrapposti e/o su cui si sono evoluti, indicendo anche un comportamento reologico differenziale all'interno dello stesso profilo di alterazione/ suolo (cfr. Cascini et al., 1992; Palacios et al., 2003; Oguchi, 2004; Pellegrino and Prestinanzi, 2007; Gullà et al., 2008). I limiti tra ciascuno di essi e con il substrato litologico potranno pertanto rappresentare discontinuità importanti soprattutto in termini di porosità (macro e micro) e permeabilità (e quindi sul comportamento idrologico del suolo) e di resistenza nei confronti degli sforzi applicati. Anche la loro disposizione spaziale assoluta e reciproca può ad esempio favorire l'infiltrazione meteorica ortogonalmente ai limiti tra orizzonti (qualora disposti orizzontalmente), con conseguente stabilità del suolo ed approfondimento del fronte di alterazione e pedogenesi, oppure lungo le superfici di contatto tra gli stessi (se inclinati rispetto all'orizzontale), che possono agire pertanto come vie preferenziali per le acque circolanti, favorendo invece il distacco e la mobilizzazione del materiale di copertura (cfr. Chigira & Yokoyama, 2005). Inoltre, la differenziazione in orizzonti può influenzare la profondità e l'intervallo di oscillazione della falda idrica sospesa (temporanea), degradando le proprietà meccaniche degli orizzonti pedologici coinvolti in funzione del grado di saturazione e del contenuto in acqua, con aumento delle pressioni di poro e riduzione della suzione e delle resistenze al taglio e conseguente formazione di una o più superfici di distacco all'interno del manto pedo-regolitico e/o al contatto con il substrato (Morton et al., 2003; Chigira & Yokoyama, 2005; Salciarini et al., 2006). Tali superfici di distacco sono spesso coincidenti con i limiti di orizzonti di

suolo caratterizzati da diversa permeabilità. In particolare, tra le principali cause responsabili di discontinuità pedogenetiche si possono segnalare: l'argillificazione di livelli più alterati per idrolisi di alluminosilicati; la presenza di orizzonti illuviali di argilla o di limo, di ossidi/idrossidi di ferro o di carbonato di calcio, ovvero legati all'accumulo di tali sostanze ad una certa profondità (per sedimentazione di particelle in sospensione o segregazione di cristalli), attraverso la migrazione per gravità delle acque di percolazione, con riduzione della porosità, progressivamente riempita dal materiale eluviato da orizzonti pedologici superiori; la diversa profondità e l'andamento della radicazione della copertura vegetale; l'apertura di fessure da disseccamento (*cracks*) legate alle proprietà vertiche (alternanza di fenomeni di espansione/contrazione in risposta a cicli di imbibizione/disseccamento) della frazione argillosa; la formazione di particolari strutture di aggregazione pedogenetica o la loro modificazione per cause antropiche; l'escavazione di cavità prodotte dall'attività della fauna terricola; l'intercalazione di materiale sedimentario o colluviale, ecc.

Rivestono un ruolo altrettanto importante la rimozione idrica di particelle fini dal suolo o dal substrato roccioso e la dissoluzione di eventuali cementi (carbonato di calcio, gesso, ecc.), con la conseguente riduzione della coesione e delle resistenze e la possibilità di generare instabilità del materiale che prima li includeva.

Alla luce di quanto esposto, una buona conoscenza della variabilità spaziale dei suoli sia a livello areale (territoriale, a scala di bacino o di versante) sia alla scala del profilo pedologico (orizzontazione) costituisce pertanto uno strumento imprescindibile per una migliore valutazione della suscettibilità delle coperture ad essere mobilizzate da fenomeni gravitativi. Tale variabilità spaziale potrà essere caratterizzata tramite un rilevamento pedologico, effettuato sia attraverso l'apertura e descrizione morfologica in campo di alcuni profili pedologici rappresentativi sia di numerose osservazioni speditive con trivellate manuali, ubicate sulla base delle principali unità di paesaggio, con l'eventuale redazione di carte tematiche del pedo-paesaggio. Queste ultime individuano porzioni del territorio in cui i suoli hanno in comune una o più caratteristiche, proprietà o processi.

Va inoltre esplorata la possibile presenza su vaste aree della Catena Costiera (sebbene non riportata nella carta pedologica dell'ARSSA, 2003) di suoli evoluti almeno in parte su cineriti vulcaniche (Scarciglia et al., 2006, 2008; Bernasconi et al., 2010; Pelle et al., 2012), che presentano molte caratteristiche morfologiche,

chimico-mineralogiche e reologiche tipiche degli Andosuoli, ovvero dei tipici suoli vulcanici (IUSS Working Group WRB, 2007; Soil Survey Staff, 2010). Tali proprietà *andiche* risultano molto peculiari e li differenziano da altre tipologie di suoli, rendendoli in particolare estremamente fragili e suscettibili all'erosione e/o a fenomeni di frana (Cinque et al., 2000; Basile et al., 2003; Terribile et al., 2007), specialmente sui versanti ad elevata acclività.

> **1.1.2.1.6 Rilevamento geomorfologico per lo studio della franosità di una vasta area e a scala di versante**

Il rilevamento geomorfologico ha come scopo quello di ottenere un quadro completo dei fenomeni franosi. Tuttavia, il lavoro non dovrà essere indirizzato esclusivamente alla realizzazione di una carta inventario dei fenomeni franosi, ma è opportuno che siano cartografati tutti quegli elementi del paesaggio che favoriscono e concorrono all'innesco dei fenomeni franosi; pertanto, il fine ultimo sarà spesso quello di realizzare una vera e propria Carta Geomorfologica.

La metodologia di studio dei fenomeni franosi su vaste aree si basa su una procedura, ormai ampiamente consolidata, che prevede l'integrazione dell'interpretazione di foto aeree e carte topografiche, e del rilievo di campagna. È ovvio che questa fase sia preceduta da ricerche preliminari volte a raccogliere il maggior numero di informazioni sull'area di interesse.

L'interpretazione congiunta delle foto aeree e delle carte topografiche è lo strumento più idoneo per le analisi geomorfologiche sia di tipo estensivo (ad es. a scala di bacino) sia di dettaglio (ad es., alla scala del versante). Questo strumento si basa soprattutto sul riconoscimento delle concavo-convessità, morfologie spesso tipiche dei fenomeni franosi ma che possono condurre ad un eccesso di individuazione di aree soggette ai fenomeni di movimento in massa a causa della "convergenza morfologica", cioè della similitudine di forme derivate da differenti processi di modellamento; per questi motivi, il controllo sul terreno potrà essere risolutivo per valutare la natura e l'assetto dei materiali coinvolti nei fenomeni deformativi, per stimare la profondità del fenomeno, per rilevare con maggiore precisione gli elementi che servono a determinare il grado di attività del fenomeno.

Tuttavia, nell'analisi cartografica e aerofotogrammetria, l'esperienza dell'operatore può essere importante nel senso che l'identificazione dei fenomeni franosi è tanto più semplice quanto maggiore è la comprensione dell'evoluzione

di lungo termine dei versanti e, quindi, del possibile riconoscimento della morfologia pre-frana. In particolare, l'analisi multitemporale dei supporti cartografici e fotogrammetrici permette di:

1. riconoscere i fenomeni e la relativa tipologia;
2. definire i limiti dei fenomeni la cui precisione è funzione della chiarezza degli elementi diagnostici e della scala di osservazione;
3. individuare i fenomeni deformativi a grande scala la cui estensione areale è di difficile definizione dal solo rilevamento di campagna. A tal proposito, i fenomeni di deformazione gravitativa profonda di versante, diffusi su tutto il territorio nazionale, rappresentano una fenomenologia molto ben individuabile dai supporti cartografici e fotogrammetrici;
4. riconoscere e caratterizzare il ruolo operato dai processi di rimodellamento dei fenomeni franosi al fine di definirne, a parità di condizioni geologiche e geomorfologiche, l'età relativa e di comprendere i ritmi dei diversi processi di modellamento.

In riferimento al punto 2 e a parità di altre condizioni, il grado di precisione dipende dalla cosiddetta "freschezza morfologica" degli elementi morfologici che permettono di riconoscere la presenza di fenomeni deformativi. Altresì, la metodologia descritta è di grande utilità per definire, ad esempio, lo stato di sviluppo del fenomeno, la sua possibile evoluzione ed estensione e l'influenza su altri processi.

Nel complesso, l'integrazione dei sistemi di analisi (cartografia, foto area e rilievo di campagna) permette di individuare e determinare, nella maggioranza dei casi, le caratteristiche del fenomeno con un soddisfacente grado di affidabilità; questo non può prescindere dalle capacità del rilevatore che sono l'elemento di maggiore indeterminatezza.

Pertanto, nell'ambito dei rilievi geomorfologici finalizzati allo studio dei fenomeni franosi a vasta scala, la **prima fase** deve prevedere l'analisi di supporti cartografici e aerofotogrammetrici multitemporali e a varia scala. E' opportuno, però, che questa fase sia preceduta e congiunta all'analisi della letteratura disponibile sull'area oggetto di indagine (carte geologiche, uso del suolo, reports, ecc.) al fine di individuare tutti quegli elementi che possono aver influenzato direttamente e/o indirettamente l'attivazione dei fenomeni deformativi.

Le fotografie aeree e la cartografia da utilizzare dovranno essere di scala adeguata alla scala di rappresentazione che, per le aree vaste, potrà prevedere la restituzione cartografica su supporti in scala 1:25.000 o 1:50.000. A tal

proposito, è opportuno utilizzare un volo d'alta quota (in scala paragonabile alla cartografia) in quanto fornisce immediatamente un quadro geomorfologico di insieme dell'area di studio e delle sue problematiche. In particolare, un volo ad alta quota permette di riconoscere bene i fenomeni franosi di grandi dimensioni (es. Grandi Frane e DGPV) e di inquadrarli nel contesto geomorfologico generale.

Ad esempio, è di estrema utilità analizzare inizialmente le foto aeree dell'IGMI in scala 1:33.000 a partire da quelle del 1954/'55, da cui è derivata gran parte della cartografia topografica italiana a varia scala utilizzata fino agli anni novanta. Tale indicazione è dettata dal fatto che le foto aeree del 1954/55 riescono a fornire un quadro abbastanza reale delle condizioni del territorio prima delle forti modificazioni indotte dall'uomo. Successive informazioni potranno essere acquisite dal confronto con le foto aeree prodotte negli anni successivi, al fine di valutare le modificazioni nel tempo dello stato del territorio. A tal proposito, oltre alle classiche immagini prodotte dall'IGMI, sono disponibili altri voli (ad es. voli S.C.A.M.E.) sia in B/N che a colori.

A prescindere dal supporto utilizzato, i fenomeni franosi e le aree propense a fenomeni di dissesto presentano alcuni elementi caratteristici talora ben distinguibili, come ad esempio andamenti anomali del reticolo di drenaggio, deviazione delle linee di drenaggio, articolazione eccessiva della superficie topografica, anomalie nella morfologia (concavità, convessità, aree in contropendenza). In particolare, nell'analisi delle foto aeree, i toni chiari possono essere riferiti ad aree in cui la vegetazione ed il drenaggio non sono stati ristabiliti, mentre i toni scuri possono indicare alti contenuti di umidità del regolite, cambiamenti nella vegetazione imputabili a variazioni di umidità del regolite, spostamenti di strutture antropiche (muri, briglie ecc.); quanto descritto permette di riconoscere quegli elementi caratteristici di particolari condizioni del terreno che spesso si associano ai fenomeni franosi.

Mediante l'analisi cartografica e delle foto aeree è possibile, quindi, riconoscere e delimitare gli elementi morfologici tipici dei corpi franosi (scarpata, area di accumulo, contropendenze ecc.) e/o individuare altri elementi geologici, morfologici e vegetazionali che sono influenzati e sono la causa diretta del fenomeno (geometria della scarpata, anomalie del reticolo idrografico e dell'umidità del suolo, scarpate di erosione fluviale, ristagni d'acqua, ecc.). Sulla base dei caratteri morfologici così definiti, è possibile poi chiarire la tipologia del movimento; a titolo di esempio, la scarpata di uno scorrimento traslativo in rocce

stratificate (alternanze arenaceo-marnose, calcareo-silico-marnose ecc.) avrà una geometria diversa in funzione della percentuale della componenti pelitica nella successione. La definizione dello stato di attività sarà ovviamente riferita alla data delle foto aeree utilizzate, a meno di un controllo di campagna; si potrà, ad esempio, definire il fenomeno franoso “recente” e/o “antico” se si osservano o meno le evidenze di movimento alla data delle foto aeree (assenza/presenza di vegetazione; assenza/presenza/scarsa definizione di scarpate, contropendenze, ecc.).

Il metodo descritto presenta comunque un errore di restituzione da imputare a cause differenti; alcuni autori (Carrara et al., 1995; van Westen, 1993; Fookes et al., 1991) ritengono che l'errore nel cartografare fenomeni franosi da foto aeree può oscillare dal 50% all'80%, con il massimo valore ottenuto quando si adottano metodi differenti.

In definitiva, diversi operatori di abilità comparabile raggiungono risultati che possono divergere sostanzialmente se ci si basa solo sulla fotointerpretazione e se si usano tecniche diverse (scala e tipo dei fotogrammi, importanza del controllo di campagna). Gli errori sono dovuti ai casi dubbi, in cui il corpo della frana è poco evidente o obliterato da vegetazione fitta o da attività antropica, mentre i fenomeni conclamati vengono cartografati ed individuati con precisione. Negli studi finalizzati all'individuazione delle aree a pericolosità elevata, i fenomeni poco evidenti sono in maggioranza quelli quiescenti o del tutto inattivi e, quindi, presentano livelli di pericolo meno elevati. L'imprecisione può essere in parte corretta sia mediante la successiva seconda fase di rilievo di campagna, sia mediante ulteriore interpretazione di nuove levate aeree.

La **seconda fase** consiste, quindi, in rilievi di campagna finalizzati alla verifica e al confronto di quanto cartografato dall'interpretazione dei supporti utilizzati con quanto osservato direttamente sul terreno. Questa fase, molto importante e necessaria, permette di chiarire casi dubbi, di delimitare in modo più preciso l'area in frana, di accertare il reale stato di attività e, quindi, di suddividere i fenomeni in “attivi” “quiescenti” e “inattivi”. Inoltre, è opportuno sottolineare che, nell'ambito dei rilievi geomorfologici finalizzati allo studio dei fenomeni franosi a vasta scala, il rilevamento di campagna dovrà essere necessariamente effettuato su aree campione.

I fenomeni così distinti saranno riportati su basi cartografiche tramite una legenda che descriverà la simbologia adottata per il rilevamento e la cartografazione dei fenomeni franosi e degli elementi ad essi collegati.

Per quanto riguarda la simbologia da utilizzare per rappresentare i fenomeni franosi, possono essere scelti differenti approcci che, in genere, dipendono dallo scopo della ricerca e dalla scala del documento cartografico. Nell'ambito dei rilievi geomorfologici finalizzati allo studio dei fenomeni franosi a vasta scala può essere utile riferirsi a varie legende proposte in letteratura finalizzate alla definizione delle aree a rischio da frana o a legende geomorfologiche ad indirizzo applicativo (Canuti et al., 1992; AA.VV., Linee guida al rilevamento geomorfologico del Servizio Geologico Nazionale, 1994; Brancaccio et al., 1994; Castiglioni et al., 1999; ISPRA, 2005; Smith et al., 2011). La restituzione cartografica degli elementi del paesaggio riconosciuti potrà essere strutturata distinguendo le forme ed i processi in base all'agente morfogenetico dominante che li ha prodotti (gravità, acque ruscellanti ecc.) e, con riferimento alle classificazioni proposte nell'AE 1.1.1, i fenomeni franosi possono essere distinti: in base alla tipologia di movimento, in base al tipo di materiale coinvolto, in base allo stato di attività ecc. (Crozier, 1984; Carrara et al., 1987; Del Prete et al., 1992; Bisci & Dramis, 1992; Cruden & Varnes, 1996).

A titolo di esempio è di seguito riportata una possibile legenda modificata a partire da quanto proposto da Canuti et al. (1992) (Tab.7-8).

AGENTE MORFODINAMICO Gravità	STATO DI ATTIVITÀ		
Tipologia di frana	Attiva	Quiescente	Inattiva
Corpo di frana per crollo o ribaltamento			
Corpo di frana per scorrimento traslativo			
Corpo di frana per scorrimento rotazionale			
Corpo di frana per espansione laterale			
Corpo di frana per colamento			

Tabella 7 - Esempio di legenda geomorfologica relativa ai movimenti franosi (modificata da Canuti et al., 1992).

AGENTE MORFODINAMICO Gravità	STATO DI ATTIVITÀ	
	Attivo	Quiescente o inattivo
Orlo di scarpata di frana e/o di degradazione		
Gradino di frana		
Detrito di versante		
Falda detritica		
Cono detritico		
Area interessata da DGPV		
Area interessata da creep		
Area interessata da soliflusso		
Area interessata da deformazioni plastiche		
Trincea		
Contropendenza di frana		

Tabella 8 - Esempio di legenda geomorfologica relativa ai processi e forme di natura gravitativa (modificata da Canuti et al., 1992).

Analogamente ai processi di versante, è possibile indicare le forme legate ai processi di ruscellamento che accompagnano, provocano e/o sono la conseguenza di fenomeni franosi (Tab.9).

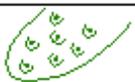
AGENTE MORFODINAMICO Acque superficiali	STATO DI ATTIVITÀ	
	Attivo	Quiescente o inattivo
Scarpata di erosione torrentizia		
Erosione di sponda		
Fosso di erosione concentrata		
Cono di deiezione		
Alluvioni mobili		
Alluvioni terrazzate recenti		
Terrazzi alluvionali antichi		
Deposito colluviale		

Tabella 9 - Esempio di legenda geomorfologica relativa ai processi e forme legati alle acque superficiali (modificata da Canuti et al., 1992).

Oltre ai due gruppi di morfotipi discussi, è spesso necessario ricorrere ad un ulteriore gruppo, all'interno del quale comprendere forme e processi misti la cui genesi è imputabile all'azione combinata di gravità ed acque correnti superficiali (Canuti et alii, 1992) (Tab.10).

AGENTE MORFODINAMICO Gravità e acque superficiali	STATO DI ATTIVITÀ	
	Attiva	Quiescente o Inattiva
Processi e forme		
Cono di origine mista		
Erosione di sponda		

Tabella 10 - Esempio di legenda geomorfologica relativa ai processi e forme di origine mista (modificata da Canuti et al., 1992).

Il dettaglio delle informazioni trasferibili dipende dalla base topografica da utilizzare. Lo studio riguardante vaste aree costituisce ovviamente un limite alla rappresentazione cartografica dei fenomeni franosi e delle forme ad essi associate (unità minima cartografabile). Per questo motivo, in funzione della scala (1:25000, 1:50.000) sarebbe opportuno rappresentare i fenomeni franosi di dimensioni tali da essere evidenti sulla carta topografica e, pertanto, di dimensioni almeno superiori a 2mm sulla base da utilizzare. Ciononostante, le frane di minori dimensioni possono essere comunque cartografate utilizzando una simbologia puntuale.

La metodologia per lo studio di frane alla scala del singolo versante, si basa sulla stessa procedura illustrata per le aree a vasta scala: lettura ed interpretazione della carte topografiche, aereo-fotointerpretazione e rilievo di campagna. I concetti di base rimangono sostanzialmente gli stessi, come rimangono invariate le fasi di lavoro da eseguire. Ovviamente, cambiando la scala dello studio, dovrà essere prevista una copertura cartografica e aerofotogrammetrica adeguata.

Anche nell'ambito dei rilievi geomorfologici finalizzati allo studio dei fenomeni franosi alla scala del singolo versante **la prima fase** consiste nell'analisi della cartografia e delle foto aeree. Questa fase, preceduta e affiancata da un'analisi della letteratura disponibile, ha lo scopo di definire le principali caratteristiche morfologiche non solo del versante oggetto dell'indagine, ma anche delle aree limitrofe possono interferire con l'area di studio.

La cartografia topografica e le fotografie aeree dovranno essere adeguate alla scala di rappresentazione (1:5.000 o 1:10.000). E' preferibile, comunque, utilizzare prima supporti a scala maggiore e in seguito voli e cartografia di maggiore dettaglio. Le foto aeree di maggiore dettaglio (1:3000-1:13000), molto utili quelle a colori, permetteranno di caratterizzare meglio il versante investigato, di dettagliare con maggior precisione i limiti e di individuare le caratteristiche geometriche dei fenomeni deformativi, nonché di rilevare dettagli importanti inerenti la geologia ed il substrato roccioso, le coperture superficiali e l'uso del suolo.

Anche in questo caso, è indispensabile acquisire maggiori informazioni analizzando foto aeree di periodi successivi per eseguirne il confronto; detto confronto, per voli compiuti a breve distanza di tempo, è di estremo aiuto per la ricostruzione dell'evoluzione spaziale di fenomeni franosi nonché per comprendere le condizioni morfologiche di innesco.

Una volta riconosciuti i fenomeni di dissesto, essi sono riportati su basi cartografiche e definiti tramite una legenda. Il dettaglio delle informazioni trasferibili dipende sempre dalla base topografica da utilizzare e, pertanto, saranno rappresentati i fenomeni franosi di dimensioni tali da essere evidenti sulla carta topografica mentre per le frane di minori dimensioni potrà essere utilizzata una simbologia puntuale.

La **seconda fase** consiste in dettagliati rilievi di campagna finalizzati alla verifica di quanto cartografato dall'interpretazione dei supporti cartografici e aerofotogrammetrici; tuttavia, questa permette di riconoscere alcune elementi che non possono essere identificati alla scala delle foto aeree, anche se di grande dettaglio. Inoltre questa fase è utile anche a verificare la natura dei materiali coinvolti, a stimare la profondità, a rilevare con maggiore precisione tutti gli indizi adatti per valutare il grado di attività.

Il rilevamento di campagna a scala di versante, come detto, riveste una grande importanza. Vi sono alcune "evidenze" sul terreno o su manufatti che sono direttamente collegabili a fenomeni franosi o ad aree interessate da

fenomeni incipienti. Cedimenti o rigonfiamenti del manto stradale, caduta di materiale dal versante sulla strada, rottura di tubazioni, lesioni a manufatti e viabilità, fratture e scarpate arcuate o rettilinee, fratture “en echelon”, emergenze e/o ristagni di acqua, danno indicazione di fenomeni in atto o di movimenti già avvenuti. Vi sono, inoltre, altre “evidenze” indirette che consentono la determinazione della tipologia di movimento. Ad esempio i crolli ed i ribaltamenti sono indirettamente riconoscibili dagli accumuli detritici alla base dei versanti, ed il cui stato di attività può essere desunto dalla presenza o assenza di vegetazione sull’accumulo e sul versante.

> 1.1.2.1.7 Rilievi di superficie da eseguire su un’area in frana

Con riferimento alle definizioni fornite nell’AE 1.1.1, nel rilevamento di una frana è necessario riconoscere subito di che tipo di frana si tratti e qual è la superficie ed il volume dell’area franosa; una cura particolare deve essere, quindi, posta nel riportare i limiti del corpo franoso (il calcolo successivo del volume di frana è molto importante e deve essere eseguito con la massima precisione, in quanto da esso deriva il calcolo delle opere di consolidamento). Per quanto riguarda il rilevamento e le misure da prendere, è consigliabile individuare innanzitutto l’asse principale della frana, la sua lunghezza ed il suo orientamento rispetto al nord (o anche rispetto a punti di riferimento identificabili con facilità); in seguito si misurano le distanze tra i confini della frana ed i vari punti dell’asse, secondo linee normali all’asse stesso; un ulteriore controllo potrà poi essere fornito dalla misurazione dell’intero perimetro di frana.

In generale, lo studio di una zona interessata da fenomeni franosi deve essere finalizzata:

- al riconoscimento e alla delimitazione dei dissesti in atto o potenziali;
- alla definizione dei cinematismi agenti ed alla loro possibile evoluzione;
- all’individuazione delle cause predisponenti e scatenanti;
- alla determinazione delle proprietà geotecniche dei materiali coinvolti.

Le indagini eseguite per la ricostruzione del modello fisico-evolutivo di una frana comprendono sia rilievi di superficie, sia indagini profonde, con queste ultime volte sia alla caratterizzazione dei litotipi coinvolti, sia alla misura dei movimenti profondi (per le indagini profonde si rimanda al capitolo/paragrafo successivo).

I rilievi superficiali hanno come primo scopo quello di definire la forma e l'estensione dei dissesti e delle strutture superficiali ad esse correlate. A tal fine è necessario realizzare un accurato rilevamento geomorfologico del corpo franoso e delle zone ad esso adiacenti (implementando dunque, il rilevamento geomorfologico precedentemente eseguito ad una più ampia scala e di cui discusso nel paragrafo precedente), così da evidenziare con precisione:

- ✓ le nicchie di distacco principali e/o secondarie, le eventuali discontinuità litologiche o pedologiche nelle aree di nicchia, gli eventuali indicatori cinematici che suggeriscono il senso del movimento (strie, gradini di calcite, ecc.);
- ✓ le fessure longitudinali e/o trasversali;
- ✓ le zone depresse;
- ✓ i segni di rigonfiamento;
- ✓ le aree di accumulo.

Inoltre, così come per il rilevamento a scala maggiore, il rilievo geomorfologico deve essere rivolto anche alla descrizione dell'idrografia superficiale (sorgenti, zone di ruscellamento diffuso /o concentrato, zone di ristagno dell'acqua, ecc.), ponendo particolare attenzione nel valutare le condizioni di equilibrio dei corsi d'acqua adiacenti ai dissesti (erosioni del fondo e/o laterali, sovralluvionamenti, ecc.). Infine, utili indicazioni sull'instabilità passata e/o potenziale di un'area si possono ricavare anche dall'osservazione della vegetazione (presenza, tipo, età delle piante ed inclinazione degli alberi).

Parallelamente, le osservazioni geomorfologiche devono essere affiancati anche da rilievi geolitologici e geologico-strutturali (per i cui criteri e modalità esecutive si rimanda a quanto riportato in precedenza), con questi ultimi che assumono un'importanza fondamentale per i dissesti che coinvolgono ammassi rocciosi (Bottino & Civita, 1988).

Infatti, il rilievo geolitologico è volto al riconoscimento della natura, dell'estensione areale e dei limiti dei litotipi presenti nell'area; è dunque importante delimitare con accuratezza l'estensione areale e lo spessore di orizzonti di debolezza strutturale (es. livelli cataclastici) e/o compositiva (es. argilliti, gessi, ecc.), nonché i limiti tra geomateriali caratterizzati da marcate differenze di permeabilità. Contemporaneamente, il rilievo geologico-strutturale ha lo scopo di riconoscere le strutture di deformazione di tipo duttile (pieghe, foliazioni, ecc.) e le strutture di deformazione di tipo fragile (faglie, fratture, ecc.), di definirne l'orientazione e l'estensione nello spazio, così da individuare, in

relazione alla giacitura del pendio, quali possono essere con maggiore probabilità, le strutture che possono dar luogo a fenomeni franosi. Inoltre, il riconoscimento delle discontinuità “pericolose” (foliazioni, giunti di stratificazioni, faglie, fratture, ecc.) consente di fare previsioni attendibili su di un’ipotetica evoluzione dei dissesti e permette di ricostruire i meccanismi di movimenti già verificatisi.

Infine, in generale, la conoscenza dei fenomeni pregressi è fondamentale nello studio di un’area in frana, in quanto la valutazione di pericolosità geologica è basata sull’assunzione che i fenomeni franosi accaduti in passato possano fornire molte informazioni utili a predire quali saranno le aree interessate da eventi franosi in futuro.

Per la valutazione del grado di pericolosità geologica dei versanti è infatti ormai accettato l’assunto: “il passato e il presente sono le chiavi per il futuro” (Lyell, C., 1833). I metodi di zonazione di pericolosità franosa non possono prescindere, dunque, dalla conoscenza dei fenomeni franosi pregressi principalmente per due motivi:

- ✓ molti dei metodi utilizzabili per la previsione della pericolosità geologica correlano la distribuzione sul territorio dei fenomeni franosi passati con i parametri che in misura maggiore o minore influiscono sulle condizioni di stabilità dei versanti, al fine di calcolare l’influenza che questi stessi parametri hanno avuto e avranno quindi in futuro sul manifestarsi degli eventi franosi.
- ✓ la distribuzione dei fenomeni franosi pregressi è utile, qualsiasi sia il metodo utilizzato, per validare e calibrare le analisi di previsione dei fenomeni franosi per il futuro.

1.1.2.1.7.1 Misura dei movimenti superficiali

Il secondo scopo dei rilievi superficiali è quello di ricostruire il cinematismo dei dissesti, attraverso la misura dell’entità della direzione del verso dei movimenti superficiali nelle diverse porzioni dei corpi di frana e di stimare l’evoluzione di tali movimenti nel tempo anche in relazione alle possibili cause scatenanti (Baldi, 1987; Calculli S., 1989; Scesi L., Papini M., Gattinoni P., 2006, Dunnicliff, 1993).

La misura dei *movimenti superficiali* viene fatta di norma utilizzando metodi geodetici-topografici. Questi ultimi si basano sulla misura di spostamenti di punti, materializzati da pilastrini (capisaldi di misura) vincolati alla superficie del terreno entro le aree dissestate, rispetto a capisaldi di movimenti posizioni fuori dalla

zona franosa. È necessario, quindi, predisporre una maglia, più o meno regolare, di capisaldi in relazione alla forma ed all'estensione della frana ed in relazione ai possibili allargamenti dei dissesti nel tempo. I movimenti verranno rappresentati, per ciascun punto di misura, mediante vettori con moduli proporzionali all'entità degli spostamenti.

Oltre ai metodi geodetici-topografici, i metodi fotogrammetrici permettono di determinare la posizione e la forma degli oggetti a partire dalle loro fotografie. In particolare, i risultati possono essere espressi in vari modi, ovvero:

- ✓ numeri, ossia coordinate di punti in oggetto, inserite in un sistema di coordinate tridimensionali dalle quali, se le coordinate sono registrate in forma digitale, è possibile ottenere un DTM (*Digital Terrain Model*);
- ✓ disegni, ossia carte topografiche a curve di livello;
- ✓ immagini (solitamente fotografie rettificate) dette ortofotopiani.

La caratteristica fondamentale della fotogrammetria è la possibilità di ricostruire oggetti e di determinarne le loro caratteristiche senza il contatto fisico con gli stessi (utile per le aree impervie o pericolose da raggiungere). Il principale problema, però, rimane la restituzione dell'oggetto, ossia il passaggio dalla prospettiva (fotogrammi) alla proiezione ortogonale (es. per la carta topografica).

Per quanto riguarda sempre la misura dei movimenti superficiali, nello studio di stabilità dei pendii in roccia, frequentemente si utilizzano estensimetri, strumenti in grado di misura sia l'apertura, sia lo scorrimento in corrispondenza di una superficie di discontinuità. In particolare, alle estremità opposte delle discontinuità vengono fissati degli ancoraggi meccanici, fra i quali è posizionato il trasduttore di misura meccanico o elettrico (esistono degli estensimetri in grado di misura l'entità delle tre componenti di spostamento).

La variazione dell'apertura delle superfici adiacenti di una discontinuità può essere misurata, inoltre, mediante distometri a nastro o distometri a filo. Tali strumenti, simili agli estensimetri, sono costituiti da due ancoraggi meccanici installati alle estremità opposte della discontinuità e collegati tra loro per mezzo di un filo o di un nastro in materiale inestensibile. Un trasduttore meccanico o elettrico misura la variazione della distanza tra i due ancoraggi; non è possibile misurare con tali strumenti l'entità degli spostamenti lungo le direzioni principali.

Infine, negli ultimi anni si sono sviluppate nuove tecniche per il controllo dei movimenti delle frane; tra queste molto utilizzata è la tecnica di rilevamento satellitare GPS (*Global Position System*). Tale tecnica permette di raggiungere, anche in tempo reale, un accurato grado di accuratezza nella risoluzione spazio-

temporale degli spostamenti ritenuti significativi nella caratterizzazione dei movimenti franosi; i vantaggi, rispetto alle tecniche tradizionali consistono nella possibilità di eseguire misure sia notturne che diurne e la non necessaria intervisibilità tra i capisaldi.

1.1.2.1.7.2 Tecnologie innovative per il rilievo di versanti in roccia

I nuovi metodi diagnostici basati su tecniche *laser* hanno trovato in questi ultimi anni sempre maggior impiego nello studio di frane ed in particolar modo, nel rilievo geomeccanico tradizionale ed in studi sulla caduta massi. Infatti, il notevole vantaggio di tali nuovi metodi diagnostici è dato sia dalla capacità di acquisire dati da grande distanza, sia dalla possibilità di rilevare superfici caratterizzate da geometrie complesse e notevolmente estese, mantenendo un elevato livello di risoluzione.

In particolare, di seguito verranno descritti il rilievo fotogrammetrico e il rilievo con tecnica *laser scanning* (Firpo et al., 2007; Teza et al., 2004; Bitelli et al., 2004).

Il rilievo fotogrammetrico

Il rilievo fotogrammetrico rappresenta un valido strumento di indagine non distruttiva, che permette l'acquisizione di dati numerici e tematici ed offre la possibilità di effettuare controlli sistematici sui versanti e sulle eventuali opere di consolidamento.

Tutte le possibilità di analisi offerte dal rilievo numerico, essendo gestite da *software* di grafica, possono essere gestite, sia a video che su supporto cartaceo, attraverso opportuni codici di riconoscimento atti a descrivere le specifiche fenomenologie.

La visione stereoscopica si ottiene dall'osservazione contemporanea di due fotogrammi dello stesso oggetto da rilevare da due punti di vista diversi, riproponendo in tal modo, nient'altro che la visione stereoscopica dell'occhio umano. In particolare, per poter ottenere quanto detto, i fotogrammi devono avere le seguenti caratteristiche:

- essere scattati a destra e a sinistra del soggetto, ovvero devono avere entrambi una parte in comune del soggetto da rilevare, in modo che la sovrapposizione del fotogramma di sinistra su quello di destra sia almeno del 60%; solo in questa porzione comune, detta "coppia stereoscopica" si potrà osservare la terza dimensione e quindi la stereoscopia;

- stessa distanza di presa, in modo che i due fotogrammi costituenti la coppia abbiano la stessa scala fotografica;
- assi della camera paralleli tra loro ed ortogonali all'oggetto, in modo che tutti gli elementi del soggetto siano ben sovrapponibili sulle due foto, al fine di ottenere una buona visione stereoscopica.

Affinché queste condizioni siano soddisfatte, in alcuni casi è necessario eseguire il rilievo fotografico da elicottero.

Il rilievo con laser scanner terrestre

Il *Laser Scanner* è uno strumento di rilievo tridimensionale ad alta precisione. In particolare, la tecnica consiste nel dirigere un raggio di luce *laser* polarizzata sulla superficie in studio; in tal modo, il "pennello" di luce scorre su tutta la superficie e ne cattura, punto per punto, le tre coordinate spaziali e le caratteristiche di colore e riflettività alla velocità di migliaia di rilevamenti al secondo.

Il dato diretto fornito da un sistema *laser* a scansione, al termine della sessione di misura, è un insieme di coordinate tridimensionali di un numero elevatissimo di punti (tutti quelli che vengono colpiti dal raggio *laser*), ovvero una 'nuvola di punti' che descrive la superficie dell'oggetto e anche di tutto ciò che compare nel campo di vista dello strumento.

All'inizio delle operazioni di rilievo, generalmente questa nuvola di punti è georeferenziata rispetto a un sistema di riferimento correlato con lo strumento.

La rappresentazione 'totale' di un oggetto, generalmente, richiede più scansioni realizzate da posizioni diverse, per coprire tutte quelle zone che, a causa della forma dell'oggetto, rischierebbero di non essere rilevate; dunque il rilievo, come nel caso di quello tradizionale, va attentamente programmato.

Una volta predeterminate le posizioni da cui effettuare le scansioni, opportunamente scelte per eliminare problemi dovuti a zone nascoste ed angolazioni eccessive, si procede al posizionamento dei "target" di riferimento che risulteranno poi utili nell'unificazione delle singole scansioni.

Si realizza così una banca dati di coordinate 3D, colore e riflettività del soggetto priva di zone d'ombra e riflessioni anomale. Il risultato è un rilievo digitale in tre dimensioni che può essere facilmente analizzato ed elaborato. Il ricalcolo automatico in tempo reale dell'immagine tridimensionale (plastico virtuale) permette, infatti, di vedere l'oggetto da ogni direzione e consente di

sezionarlo a qualunque livello e in qualunque direzione evidenziando i dettagli morfologici più piccoli.

La maglia di scansione può essere impostata con un lato di 1 cm ad una distanza di 100 metri, con una precisione di 3 mm nella localizzazione su un piano ortogonale alla linea (precisione che diminuisce linearmente all'aumentare della distanza del bersaglio) e di 3 mm in profondità (valore non dipendente dalla distanza). La mole di dati acquisiti è ingente, in quanto possono ottenersi nuvole di milioni di punti, con precisione notevole, pur con tempi di acquisizione molto brevi (Teza et al., 2004; Bitelli et al., 2004).

1.1.2.2 METODOLOGIE DI INDAGINE PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE LITOLOGIE COINVOLTE NEI MOVIMENTI FRANOSI

Il tipo, il numero e l'ubicazione delle indagini geognostiche dirette (in *situ* ed in laboratorio) ed indirette necessarie per la caratterizzazione dei litotipi coinvolti nei movimenti franosi devono essere decisi successivamente ed in base ai dati emersi dai rilievi superficiali. Esse sono finalizzate al riconoscimento della natura e delle proprietà geotecniche/geomeccaniche dei geomateriali coinvolti nel movimento e alla stima del volume degli stessi, attraverso il riconoscimento della superficie/i di movimento (Baldi, 1987; Cestari, 1992; Scesi L., Papini M., Gattinoni P., 2006; Favaretti & Mazzucato, 1996; Tanzini, 2002; Regogliosi et al., 2005). Consentono, inoltre, di misurare l'entità, la direzione e il verso dei movimenti dell'ammasso in frana alle varie profondità, nel corso del tempo ed inoltre, di determinare le pressioni interstiziali (Dunnicliff, 1993).

Detto ciò, la pianificazione delle indagini geognostiche va eseguita esclusivamente da coloro che hanno condotto il rilevamento geologico e geomorfologico, avendo essi stessi definito un modello geologico-tecnico preliminare e conoscendo, dunque, i dati aggiuntivi da ricercare per approfondire e affinare tale modello, in modo da renderlo corretto e completo. Inoltre, va debitamente tenuto in considerazione che le indagini geognostiche hanno dei costi (talora significativi) e pertanto, prima di arrivare alla scelta delle stesse, per colmare il *deficit* di dati di superficie, è chiaro come si debba avere il maggior numero di informazioni dalla superficie stessa; ciò, dunque, al fine di evitare che un errore di valutazione possa comportare un dispendio economico in indagini non finalizzate o distribuite sul territorio laddove le informazioni possono risultare

ripetitive o superflue ai fini della tematica affrontata. Pertanto, è opportuno che la redazione del piano di indagini avvenga solo dopo aver effettuato un rilevamento geologico-geomorfologico preliminare, alla luce del quale costruire una serie di sezioni indicative, sulle quali dovranno essere concentrate le indagini idonee per la verifica degli elementi geologici ricavati dalla superficie (secondo le linee guida esposti nei paragrafi precedenti); solo in tal modo, tutti i dati che si andranno ad ottenere mediante le suddette indagini renderanno reale e definitivo sia il modello geologico, sia il modello geologico-tecnico e quello idrogeologico dell'area studiata.

> 1.1.2.2.1 Indagini in situ

La natura, l'estensione areale e lo spessore dei materiali coinvolti in un movimento franoso possono essere accuratamente determinati mediante l'esecuzione di sondaggi meccanici, il cui numero, ubicazione e profondità dipendono dalla presunta estensione e del volume della frana stessa. Chiaramente, è possibile ottenere maggiori informazioni tramite i sondaggi a carotaggio continuo, i quali permettano una dettagliata ricostruzione litostratigrafica lungo la verticale indagata, altrimenti, da definire attraverso l'esame dei *cuttings* e da diagrafie dell'energia di perforazione nel caso dei sondaggi a distruzione. Inoltre, il prelievo di campioni (indisturbati o rimaneggiati) da sottoporre a prove di laboratorio permette di definire con adeguata precisione i parametri di resistenza al taglio dei materiali (attrito e coesione), da integrare ai dati ottenuti mediante l'esecuzione delle prove in foro (in *situ*). La profondità indagata deve essere chiaramente maggiore rispetto a quella della presunta superficie di scorrimento, in corrispondenza della quale, solitamente, si ha un maggiore contenuto in acqua e/o sono presenti orizzonti argillosi. Inoltre, in frane in roccia, la superficie di scorrimento può corrispondere ad un orizzonte caratterizzato da un elevato grado di fratturazione e/o alterazione e dalla presenza di indicatori cinematici (strie, gradini di calcite, ecc.).

In alcuni casi, può essere utile anche seguire dei sondaggi geognostici anche al di fuori dell'area franosa, al fine di eseguire eventualmente dei confronti tra i risultati emersi dall'esecuzione delle prove in foro e di laboratorio e comunque, per meglio definire la successione litostratigrafica dell'area d'interesse.

Nel caso di geomateriali il cui comportamento sia assimilabile a quello dei terreni sciolti, tra le prove da eseguire nel corso delle perforazioni di sondaggio,

molto utili sono le prove penetrometriche, le prove pressiometriche e le prove scissometriche. In particolare, le prove penetrometriche dinamiche (Decourt, 1990; Lunne et al., 1997; Robertson & Campanella, 1983) in foro permettono di risalire indirettamente ai parametri di resistenza al taglio (angolo di attrito per i terreni non coesivi drenati e per i terreni coesivi drenati, coesione non drenata e densità relativa), attraverso la misura della resistenza alla penetrazione di un utensile lungo la verticale (collegato alle aste di perforazione ed infisso sotto il peso di un maglio) e mediante correlazioni note in letteratura; in particolare, le prove possono essere eseguite sia tramite penetrometro campionario tipo Raymond (prove SPT), sia tramite penetrometri a punta conica (prove SCPT). Ulteriori prove in foro molto utili sono: le prove pressiometriche, che consentono di risalire ai parametri di deformabilità, attraverso la misurazione delle deformazioni radiali, indotte sulla parete del foro da una sonda cilindrica dilatante (Menard, 1963); le prove scissometriche, che consentono di stimare indirettamente la coesione non drenata in terreni coesivi e saturi soffici (coesione inferiore a 0,1Mpa), attraverso la misurazione del momento torcente applicato per la rotazione di 4 lame a croce, fino a rottura del terreno.

Passando alla determinazione delle caratteristiche idrauliche dei geomateriali, utili per interpretare correttamente le misure piezometriche (da eseguire mediante piezometri, descritti di seguito) è necessaria, oltre alla ricostruzione stratigrafica, anche la distribuzione dei valori dei permeabilità, i quali possono essere misurati tramite prove di permeabilità in foro di sondaggio, tra le quali prove Lefranc (particolarmente utili in terreni sciolti) e prove Lugeon (particolarmente utili in ammassi rocciosi, per i quali è possibile risalire indirettamente al loro grado di fratturazione/fessurazione).

Passando alle strumentazioni geotecniche da installare all'interno dei fori di sondaggio (Baldi, 1987; Dunncliff, 1993), molto utili sono gli inclinometri, costituiti da tubi in alluminio a sezione circolare, dotati di quattro scanalature, le quali fungono da guida per la sonda inclinometrica, la quale rileva le entità e profondità delle deformazioni nel tubo causate da deformazioni nel terreno (Mikkelsen, 2003); più precisamente, la sonda inclinometrica misura le deviazioni rispetto alla verticale dell'asse del tubo inclinometrico (chiaramente la tubazione deve trovarsi oltre la superficie di scorrimento). Dunque, tali strumenti permettono di misurare l'entità, la direzione e il verso dei movimenti del corpo di frana alle varie profondità (a differenza, dunque, delle strumentazioni descritte in precedenza, nell'ambito dei rilievi di superficie); inoltre, se le misure sono ripetute, è possibile

valutare l'andamento degli spostamenti nel tempo e dunque, l'evoluzione spazio-temporale del corpo franoso.

Infine, più inclinometri collegati tra loro mediante un cavo d'acciaio costituiscono una batteria inclinometrica e tali strumenti possono essere eventualmente dotati di un avvisatore acustico detto *frane allarm*, che avvisa qualora venga superata una variazione di inclinazione che superi la soglia limite.

Ai fini di una corretta analisi di stabilità ed ai fini di un'accurata scelta, dimensionamento e posizione delle opere di drenaggio superficiali e profonde (necessarie alla stabilizzazione di corpi franosi) è importante ricostruire con precisione l'andamento della superficie piezometrica, nonché le sue variazioni nel tempo. A tale scopo, tra le attrezzature geotecniche da foro di sondaggio, molto utili e pratici sono i tubi piezometrici, che consentono la misura del livello di falda mediante un'apposita sonda elettrica detta *freatimetro* (da utilizzare anche durante le varie fasi della perforazione). In particolare, tra i piezometri, i più semplici sono quelli idraulici "a tubo aperto" e di "Casagrande" (questi ultimi permettono di isolare la misura a un particolare livello), utilizzati per lo più in terreni permeabili, ai quali si aggiungono quelli più complessi, ovvero i "piezometri elettrici", "elettropneumatici" e "pneumatici" (particolarmente utili in terreni coesivi), che consentono di misurare la pressione interstiziale in terreni coesivi o per la misura della pressione interstiziale e del livello della tavola d'acqua in terreni porosi.

Congiuntamente ai sondaggi geognostici e subordinatamente ad essi, altre indagini che consentono di stimare indirettamente la stratigrafia ed i parametri di resistenza al taglio dei terreni sono le prove penetrometriche continue sia dinamiche che statiche, il cui principio di funzionamento è analogo a quello delle prove penetrometriche in foro, ma in tal caso, la misura della resistenza alla penetrazione viene eseguita lungo l'intera verticale indagata; in particolare, l'infissione avviene sotto il peso di un maglio nel caso delle prove penetrometriche dinamiche, mentre, le prove penetrometriche statiche dette CPT, consistono nell'infingere nel terreno a pressione, tramite un martinetto idraulico, uno strumento costituito da un'asta a punta conica.

Infine, in aggiunta o in alternativa ai sondaggi geognostici, soprattutto nel caso di indagini di limitata profondità, risulta molto utile l'utilizzo di mezzi meccanici, mediante i quali realizzare scavi, trincee, camini e gallerie; infatti, tale metodologia offre il vantaggio di consentire un accesso diretto ad uno spaccato stratigrafico, presso il quale è, inoltre, possibile prelevare campioni poco

disturbati (sia campioni di terreno, sia campioni rocciosi) ed eseguire prove speditive.

In particolare, tra queste ultime, le prove in *situ* sui materiali rocciosi, che possono essere realizzate anche su affioramenti naturali, permettono di ottenere i valori delle resistenze meccaniche lungo le superfici di discontinuità e in generale, la qualità geomeccanica degli ammassi rocciosi. In particolare, tra le due tipologie di prove più in uso, vi è quella eseguita con il Martello di Schimdt o sclerometro, utilizzato per stimare la resistenza a compressione della superficie rocciosa e di conseguenza il grado di alterazione, misurando il rimbalzo elastico di un pistoncino battente sulla roccia e facendo riferimento a un apposito diagramma (Clerici, 1993) (lo strumento è costituito da una massa battente proiettata da una molla contro un'asta metallica appoggiata direttamente sulla roccia); inoltre, se la prova è eseguita su una superficie rocciosa poco alterata, la resistenza a compressione apparente è circa uguale alla resistenza a compressione calcolata tramite prove monoassiali (*point load test*). Molto utile è anche la prova di resistenza al taglio lungo le discontinuità, nel corso della quale, dei trasduttori meccanici ed elettrici misurano gli spostamenti provocati dalle sollecitazioni indotte da martinetti.

> 1.1.2.2 Prove di laboratorio

Lo scopo delle indagini di laboratorio (Raviolo, 1993) è quello di determinare le caratteristiche meccaniche e le proprietà fisiche di campioni di terreno o di roccia, risalendo in tal modo ai parametri geotecnici/geomeccanici, da confrontare con quelli ottenuti mediante le prove in *situ* (Fabbri et al., 2007; Favaretti & Mazzucato, 1996). Il campionamento può avvenire sia nel corso delle perforazioni di sondaggio, mediante appositi campionatori, ognuno adatto ai diversi tipi di geomateriali (es. Shelby, Mazier, Denison, ecc.), sia all'interno di scavi, trincee, camini, gallerie, sia direttamente lungo gli affioramenti. Sebbene molto spesso trascurato, sarebbe opportuno e necessario tenere conto della variabilità litologica e pedologica dei materiali, prelevando campioni da ciascuno dei diversi litotipi, livelli di alterazione e orizzonti pedogenetici identificati negli eventuali profili di suolo e di alterazione, o almeno da livelli rappresentativi di ciascuno dei suddetti materiali coinvolti.

Iniziando con le prove sulle terre, una volta determinate le caratteristiche fisiche generali (analisi granulometrica, determinazione del contenuto d'acqua,

determinazione dei Limiti di Atterberg, ecc.), è importante procedere con prove finalizzate alla determinazione dei parametri di resistenza meccanica, tra le quali sono di frequente utilizzo le prove di taglio diretto e le prove triassiali. In particolare, le prime vengono solitamente eseguite con la scatola di Casagrande, tramite la quale, previa consolidazione del provino, si porta il campione a rottura mediante l'applicazione di uno sforzo normale e di uno sforzo tangenziale, risalendo così al valore della coesione drenata e dell'angolo di attrito. Diversamente, la prova triassiale, realizzata mediante una cella sulla quale si applica uno sforzo idrostatico, può essere eseguita, oltre che in condizioni consolidate drenate (prova CD) in condizioni non consolidate non drenate (prova UU) e consolidate non drenate (prova CU), ottenendo in tal modo il valore della coesione non drenata, di fondamentale importanza nel caso di movimenti franosi che coinvolgono materiali coesivi. Inoltre, il valore della coesione non drenata, nel caso di terreni coesivi e saturi, può essere ottenuto mediante la prova *Vane Test*, nel corso della quale si porta il materiale a rottura attraverso l'applicazione di un momento torcente, applicato attraverso la rotazione di una piccola paletta (la prova è simile a quella in *situ*). Infine, molto spesso può essere opportuna l'esecuzione di prove edometriche, poiché mediante quest'ultime è possibile risalire non solo alle caratteristiche di deformabilità, ma indirettamente anche al valore del coefficiente di permeabilità.

Passando alle prove sulle rocce, ai fini della caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi (Beniawsky, 1973 e 1989), è frequentemente utilizzata la prova *Point Load Strength Test*, un particolare tipo di prova monoassiale per la quale non occorre preparare e sagomare il provino; tale prova consiste nel comprimere un campione di roccia tra due punte coniche, comandate da un sistema idraulico a pressione, fino a provocarne la rottura e risalendo all'indice alla resistenza a compressione monoassiale del materiale. Passando alla prova di resistenza al taglio, mediante sollecitazioni di taglio accoppiate ad una sollecitazione di compressione, è possibile ottenere i parametri di resistenza al taglio lungo le superfici di discontinuità (analogamente alla relativa prova in *situ*).

Infine, su alcuni degli analoghi campioni (ovvero appartenenti agli stessi livelli di substrato e profili di alterazione e di suolo prelevati per l'esecuzione delle suddette prove geotecniche tradizionali) potrà essere opportuno condurre ulteriori analisi di laboratorio di tipo pedologico. Ciò consentirà un confronto dei risultati ottenuti dall'integrazione delle varie indagini per una più approfondita e realistica interpretazione dei meccanismi d'innescio e sviluppo dei fenomeni gravitativi

studiati. In particolare, si potranno effettuare: analisi chimiche, tra cui la misura dei sali solubili tramite cromatografia ionica e l'eventuale determinazione di indici di dispersività delle argille (ad es. il noto SAR – *Sodium Adsorption Ratio*), proprietà in grado di favorire la mobilitazione di materiali argillosi; analisi mineralogiche, soprattutto volte all'identificazione qualitativa ed eventualmente semiquantitativa tramite diffrazione ai raggi X (XRD) dei principali minerali argillosi, particolarmente soggetti a fenomeni di plasticizzazione, liquefazione, dispersione, contrazione/espansione, ecc.; analisi micromorfologiche in microscopia ottica su sezioni sottili ottenute da campioni di suolo indisturbati, volte all'identificazione di possibili discontinuità e linee di debolezza strutturale alla microscala, primarie o indotte da deformazioni meccaniche, alterazione o pedogenesi, che, spesso, si propagano anche almeno fino alla mesoscala, inducendo una progressiva perdita delle caratteristiche di resistenza del substrato originario e fino alla sua possibile completa rottura; analisi idrologiche tramite infiltrometro a disco o a tensione (Perroux & White, 1988), per la misura di alcune proprietà idrologiche del suolo, quali conducibilità idraulica, lunghezza macroscopica capillare e dimensione media dei pori in condizioni di potenziale prossime alla saturazione (White & Sully, 1987; Jarvis & Messing, 1995).

> 1.1.2.2.3 Indagini indirette

A integrazione delle indagini dirette, di notevole utilità sono le prospezioni geofisiche (Norinelli, 1996). Infatti, le misure geofisiche della velocità di propagazione delle onde sismiche, della resistività e dei potenziali spontanei permettono di ricostruire l'assetto geologico-stratigrafico, l'andamento dei corpi di frana in profondità e di conseguenza, della superficie di scorrimento ed inoltre, di individuare la superficie piezometrica.

Per quanto concerne i metodi sismici (sismica a rifrazione e riflessione) (Carrara *et al.*, 1999), il funzionamento consiste nell'energizzazione del terreno (mediante un'esplosione o la caduta di un grave), che genera onde elastiche, le quali vengono ricevute in superficie, captate da piccoli sismometri detti geofoni, collegati ad un dispositivo di registrazione; in tal modo, dallo studio ed elaborazione di questi dati, è possibile risalire alla velocità sismica delle formazioni ed alla profondità ed all'inclinazione dei vari orizzonti investigati (Hebeler *et al.*, 2001). Relativamente alle tematiche trattate nel corso del presente lavoro/progetto di ricerca, trova grande applicazione il metodo sismico a

rifrazione (Di Francesco *et al.*, 2003), adatto a studi di piccola e media profondità (massimo dell'ordine 50-60m), il quale, in associazione alla geoelettrica, permette:

- l'identificazione e la ricostruzione della morfologia del tetto di un substrato roccioso ad alta velocità sepolto sotto una coltre di terreni sciolti o debolmente coerenti;
- l'identificazione e la ricostruzione dell'andamento dello spessore di alterazione delle rocce cristalline;
- la differenziazione delle caratteristiche elastiche di una massa rocciosa con la profondità;
- l'individuazione di livelli singolari profondi ad alta velocità;
- la definizione dello spessore allentato e decompresso di formazioni sciolte o rocciose (ovvero coltri detritiche e di frana);
- la definizione del volume di una massa in frana, oltre all'individuazione della relativa superficie di scorrimento del suo andamento.

Diversamente, il metodo sismico a riflessione trova minore applicazione, anche se, in alcuni casi, può essere utile ricorrervi per una ricostruzione dell'assetto geologico-stratigrafico-strutturale a grande scala (es. individuazione di faglie, *thrust*, ecc.); infatti, a grandi profondità il metodo sismico a rifrazione necessita di grandi quantità di esplosivi e di lunghezze notevoli degli stendimenti (diventando così antieconomico). In altri casi, poiché il metodo sismico a rifrazione richiede un progressivo aumento di velocità delle onde sismiche verso il basso che non sempre si verifica, in alcuni casi, in associazione all'esecuzione dei classici stendimenti sismici di superficie, può essere utile ricorrere a prospezioni sismiche in foro di sondaggio (*dow-hole*, *up-hole* e *cross-hole*), le permettono, peraltro, una più dettagliata ricostruzione litostratigrafica.

Per quanto riguarda i metodi geoelettrici, questi ultimi (da eseguire solitamente in abbinamento ai metodi sismici a rifrazione) permettono in primo luogo di individuare la profondità della superficie piezometrica ed in generale, di determinare l'assetto idrogeologico del sottosuolo, ma anche di definire l'andamento della superficie di scorrimento (in particolar modo i carotaggi elettrici). Tra i metodi elettrici trovano applicazione i sondaggi elettrici verticali (SEV) e i sondaggi elettrici orizzontali (SEO), la cui tecnica consiste nella misura della resistenza specifica delle formazioni al passaggio di una corrente. In particolare, la tecnica più usata è quella dei cosiddetti sondaggi elettrici, che consiste nello studiare la distribuzione del potenziale al variare della distanza fra

gli elettrodi, attraverso i quali si immette la corrente nel terreno; analogamente, i carotaggi elettrici consistono nella registrazione della resistività delle formazioni del sottosuolo e nella registrazione dei “potenziali spontanei” generati nel foro di sondaggio (diagrafia elettrica).

Infine, utili indicazioni nella definizione dei volumi coinvolti e dell’andamento della superficie di scorrimento sono fornite dai rilievi gravimetrici di precisione, tramite i quali vengono rilevate le anomalie del campo gravimetrico provocate dalla distribuzione di masse sepolte con densità diversa da quella delle formazioni incassanti.

Riferimenti bibliografici

Amadesi E., *Fotointerpretazione e aerofotogrammetria*, 1975. Pitagora Editrice, Bologna.

ARSSA (Agenzia Regionale per lo Sviluppo e per i Servizi in Agricoltura), 2003. *I suoli della Calabria. Carta dei suoli in scala 1:250000 della Regione Calabria*. Monografia divulgativa. Programma Interregionale Agricoltura-Qualità - Misura 5, ARSSA, Servizio Agropedologia, Rubbettino Ed., Soveria Mannelli, Catanzaro, Italy, 387 pp.

Baldi G., 1987. *Il sistema di monitoraggio e di controllo dei versanti della Val Pola in Valtellina Workshop su "Applicazioni di tecnologie nella conoscenza, nella previsione e nel pronto intervento in caso di movimenti franosi"*. IROE-CNR, Firenze, 5, 6 novembre 1987.

Basile A., Mele G., Terribile F., 2003. *Soil hydraulic behaviour of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998*. Geoderma 117 (3-4), 331-346.

Bernasconi M.P., Chiocci F. L., Critelli S., La Russa M.F., Marozzo S., Martorelli E., Natali E., Pelle T., Robustelli G., Russo Ermolli E., Scarciglia F., Tiné V., 2010. *Multi-proxy reconstruction of Late Pleistocene to Holocene paleoenvironmental changes in SW Calabria (southern Italy) from marine and continental records*. Il Quaternario – Italian Journal of Quaternary Sciences 23(2), 249-256.

Bieniawski Z.T., 1973. *Engineering classification of jointed rock masses*. Trans S. Afr.Inst. Civ. Engrs 15, 335-344.

Bisci C. & Dramis F., 1992. *Il concetto di attività in geomorfologia: problemi e metodi di valutazione*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 14 (2), 193-199.

Bitelli G., Girelli V.A., Tini M.A., Vittuari L., 2004. *Utilizzo di un sistema non convenzionale di fotogrammetria aerea per la produzione di ortofoto a grande*

scala in ambito archeologico. Atti 8° Conferenza Nazionale ASITA, Volume 1, pp. 443-448, Roma.

Borrelli L., Greco R., Gullà G., 2007. *Weathering grade of rock masses as a predisposing factor to slope instabilities: Reconnaissance and control procedures. Geomorphology, 87, 158–175.*

Borrelli L., Gullà G., 2007. *Validation of the geologicaltechnical model of a great landslide in weathered and degraded rocks: Serra di Buda landslide (Calabria, Southern Italy). Poster: European Geosciences Union, General Assembly 2007. Vienna Austria, 15 -20 April 2007.*

Brand, S., 1985. *Whole Earth Software Catalog for 1986, "2.0 edition" of above title.*

Brancaccio L., Castiglioni G. B., Chiarnini E., Cortemiglia G., D'orefice M., Dramis F., Graciotti, R., La Posta E., Lupia Palmieri E., Onorati G., Panizza M., Pannuzi L., Papasodaro F., Pellegrini G. B., 1994. *Carta Geomorfologica d'Italia - 1:50.000. Guida al rilevamento, In Quaderni del Servizio Geologico Nazionale, Serie iii, Vol. 4, pp. 42.*

Burbank D.W., Anderson R.S., 2001. *Tectonic Geomorphology. Blackwell Science, 274 pp.*

Buttler B. C. M. & Bell J. D., 1991. *Lettura e interpretazione delle carte geologiche. Ed. Zanichelli, pp. 307.*

Calcaterra D., Ietto A., Dattola L., 1993. *Aspetti geomeccanici ed idrogeologici di ammassi granitoidi (Serre calabresi), Boll. Soc. Geol. It., 112: 395-422.*

Calcaterra D., Parise M., Dattola L., 1996. *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., De Riso R., Evangelista A., Nicotera M. V., Santo A., Scotto Di Santolo A., 2004 a. *Slope instabilities in the pyroclastic deposits of the carbonate*

Apennine and the phlegrean district (Campania, Italy), Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfills, Sorrento, 61-75.

Calcaterra D., Bruno D. E., Parise M., Silvestri F., Critelli S., Capparelli G., 2004 b. *Effects of weathering on slope instability in gneissic rocks at Luzzi*, In: Lacerda A., Ehrlich M., Fontoura S. A. B. & Sayao A. S. F. (Eds), *Landslides: evaluation e stabilization*, 2: 1233-1239.

Calcaterra D., Parise M., 2005. *Landslide types and their relationships whit weathering in a Calabrian basin, southern Italy*, Bull. Eng. Geol. Environ, 64: 193-207.

Calculli S., 1979. *Determinazione dei movimenti dei corpi franosi*. Estratto da *Geologica Applicata e Idrologia - Volume XIV parte III*. Bari.

Canuti P., Dramis F., Esu F., 1992. *Le condizioni di instabilità dei pendii nei centri abitati. Principi e criteri generali ad uso degli Uffici Tecnici di Enti Pubblici*. Pubbl. CNR-GNDCI n. 544.

Carrara A., D'Elia B. e Semenza E., 1987. *Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi*. Geol. Appl. E Idrogeol., Bari, 20, 2, 1985, pp 223-242.

Carrara E., Rampolla A., Roberti N., 1999. *Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici*. Liguori Editore.

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichembach P., 1995. *GIS technology in mapping landslide hazard*. – in: Carrara A. and Guzzetti F. (eds.): *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, p. 135-175, Kluwer Academic Publ.

Cascini L., Critelli S., Di Nocera S., Gullà G., 1991a. *Osservazioni preliminari sulla franosità del comprensorio di San Pietro in Guarano*, Studi trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica, 68: 135-153.

Cascini L., Critelli S., Di Nocera S., Gullà G., 1991b. *Carta del grado di alterazione degli gneiss di San Pietro in Guarano (CS), scala 1:5.000*, SO.ME.A.Z.A (Ed.).

Cascini L., Critelli S., Di Nocera S., Gullà G., 1992a. *A methodological approach to landslide hazard assessment: a case history*, In: Bell D. H. (Eds.), The Vith International Symposium on Landslide, New Zealand, 2: 899-904.

Cascini L., Critelli S., Di Nocera S., Gullà G., Matano F., 1992. *Grado di alterazione e franosità negli gneiss del massiccio silano: l'area di S. Pietro in Guarano (CS)*. *Geologia Applicata e Idrogeologia* 27, 49-76.

Cascini L., Critelli S., Di Nocera S., Gullà G., Matano F., 1994. *Weathering and landsliding in Sila Massif gneiss (Northern Calabria, Italy)*. Proceedings of the 7th International IAEG Congress, Lisbona, Portugal, pp. 1613-1622.

Castiglioni G. B., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G., Elmi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C. 1999. *Geomorphological Map of the Po Plain, Italy, at a scale of 1:250000*, *Earth Surface Processes & Landforms*, 24, 1115–1120.

Cestari F., 1992. *Prove geotecniche in sito*. Edizioni Geograph, III edizione, 2005.

Cice M., Marino E., Romano M., 2005. *Rilievo geostrutturale del Monte Saretto Commissariato di Governo per l'Emergenza Idrogeologica in Campania – Relazione inedita*.

Cinque A., Robustelli G., Scarciglia F., Terribile F., 2000. *The dramatic cluster of pyroclastic debris flows which occurred on 5th and 6th May 1998 on the Sarno Mountains (Vesuvius region, Southern Italy): a geomorphological perspective*. In: Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L. (Eds.), *Landslides in Research, Theory and Practice*, 1. Thomas Telford Ltd, London, pp. 273-278.

Chigira M., Yokoyama O., 2005. *Weathering profile of non-welded ignimbrite and the water infiltration behavior within it in relation to the generation of shallow landslides*. *Engineering Geology* 78, 187-207.

Clerici A., 1992. *La determinazione indiretta del modulo elastico dell'ammasso roccioso: un caso reale. Seminari di Geologia Applicata e discipline affini, comunic. Orale, Politecnico di Milano.*

Cremonini, G., 1973. Rilevamento Geologico Bologna, Pitagora Editrice. 1-422

Critelli S., Di Nocera S., Le Pera E., 1991. *Approccio metodologico alla valutazione petrografica del grado di alterazione degli gneiss del Massiccio silano (Calabria Settentrionale).* Geol. Appl. Idrogeol., 26: 41-70.

Crozier M.J., 1984. *Field assessment of slope instability.* In: Brunsten & Prior (Eds.) Slope Instability, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, chp. 4, 103-142.

Cruden D.M. & Varnes D.J., 1996. *Landslide types and processes.* In: Turner, K.A., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: investigation and mitigation, Transport Research Board Special Report, vol. 247, pp. 36– 75.

Dearman W.R., 1974. *Weathering classification in the characterisation of rock for engineering purposes in British practice,* Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 9: 33-42.

Dearman W.R., 1976. *Weathering classification in the characterisation of rock: a revision,* Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 13: 123-127.

Decourt L., 1990. *Standard Penetration Test - State of the Art.* Report Norwegian Geotechnical Institute.

Deere D.U., Patton F.D., 1971. *Slope stability in residual soils,* Fourth Panam. Conf. SMFE, San Juan, Puerto Rico, 1, 87–170.

Del Prete M., Giaccari E., Trisorio-Liuzzi G., 1992. *Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata.* Pubbl. n 841-GNDCI, 84 pp.

Di Francesco R., Labagnara R., Siena M., 2003. *Il ruolo della sismica a rifrazione nelle indagini geognostiche: alcune case histories basate su un nuovo*

modello interpretativo. 1° Convegno Nazionale di Geologia Applicata e Ambientale, Università di Chieti.

Dunnicliff J., 1993. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons.

Fabbri M., Garbin F., Lanzini M., Scarapazzi M., 2007. *Interpretazione dei parametri geotecnici di laboratorio*. Di Virgilio Editore.

Favaretti M. e Mazzuccato A., 1996. *Prove geotecniche di laboratorio ed in sito*. Cluep Editore.

Firpo G., Salvini R., Carmignani L., Fantozzi P.L., Massa G., Bonciani F., Mancini S., Aiello E, Corniani M., Lapini M. e Cocca P., 2007. *Fotogrammetria digitale terrestre, Laser Scanner e rilievi geomeccanici per lo studio della frana avvenuta il 27-28/02/2007 presso l'abitato di Guadine (Comune di Massa)(2007)*. Giornale di Geologia Applicata, 6, 111 - 112.

Fookes P. G., Dale S. G., Land J. M., 1991. *Some observations on a comparative aerial photography interpretation of a landslipped area*. Quart. Journ. Engin. Geol., 24, 249-265.

Geological Society Engineering Group Working Party Report 1995. *The description and classification of weathered rocks for engineering purposes*. Quaterly Journal of Engineering Geology, 28, 206-242.

Geotechnical Control Office (1984). *Geotechnical Manual for Slopes (second edition)*. Geotechnical Control Office, Hong Kong, 295 p.

Gullà G., Matano F., 1994. *Proposta di una procedura per il rilievo del grado di alterazione di gneiss su fronti rocciosi*, Geologica Romana, 30, 227-238.

Gullà G., Matano F., 1997. *Surveys of weathering profile on gneiss cut-slopes in Norther Calabria, Italy. Proceedings International Symposium of Engineering Geology and the Environment, Athens, Greece, 23-27 June 1997, 133-138*.

Gullà G., Aceto L., Antronico L., Cilento M., Niceforo D., Perna E., Terranova O., 2004. *Failure and post failure conditions of a landslide involving weathered*

and degraded rocks. In: Lacerda A., Ehrlich M., Fontoura S. A. B. & Sayao A. S.F. (Eds), *Landslides: evaluation e stabilization*, 2, 1241-1252.

Gullà G., Aceto L., Critelli S., Perri F., 2008. *Geotechnical and mineralogical characterization of fine grained soils affected by soil slips*. In: Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F., Ho, K. (Eds.), *Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes - From the Past to the Future*, June 30 - July 4, 2008, Xi'an, China. CRC Press, Taylor and Francis Group, London, 373-379.

Hebeler g., Lai C.G., Orozco C., Rix G., Roma V., 2001. *Recent advances in Surface Wave methods for Geotechnical Site Characterization*, XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul.

Hencher S.R., Massey J.B., Brand E. W., 1984. *Application of back-analysis to some Hong Kong landslides*, Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, 631–638.

Hoek E., Bray J.W., 1981. *Rock Slope Engineering: Third edition*. Institution of mining and metallurgy. London.

I.A.E.G Commission, 1981. *Rock and soils description and classification for engineering geological mapping*. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. Bull. Of the IAGE. Earth Sciences,15. The Unesco Press.

ISPRA (2005) – Progetto IFFI: *Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* – Allegato Tecnico, Versione 0.4.

IUSS Working Group WRB, 2007. *World Reference Base for Soil Resources 2006 – A framework for international classification, correlation and communication, First update 2007*. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome, 116 pp.

Infan T.Y., Dearman W.R., 1978. *Engineering classification and index properties of a weathered granite*. Bulletin of International Association of Engineering Geology, 17, 79-90.

Jarvis N.J., Messing I., 1995. *Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers*. Soil Science Society of America Journal. 59, 27-34.

Lambe T.W., 1985. *The First Terzaghi Oration: Amuay landslides*. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume, pp 137-158.

Marchetti M., 2000. *Geomorfologia fluviale*. Pitagora Editrice, Bologna.

Menard L., 1963. *Calcul de la force portante des fondations sur la base des resultants des essais pressiometriques*. Sols-Soils, 5, 9-24.

Mikkelsen P.E. (2003). *Advances in inclinometer data analysis*. 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, Norway, 15-18 September 2003, pp. 555-567.

Lacerda W.A., Santos J. R., 2000. *Water table fluctuation -a cause of slide initiation in residual and colluvial soils in tropical regions*. Proc. 8th Intern. Symp. on Landslides. Cardiff, Wales, pp. 877–880.

Lyell C., 1830-1833. *Principles of Geology*, 3 volumes.

Lunne T., Powell J., Robertson P.K., (1997) – *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. E & Spon.

Morton D.M., Alvarez R.M., Campbell R.H., 2003. *Preliminary Soil-Slip Susceptibility Maps, Southwestern California*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 03-17, 46 pp.

Nishidav K., Aoyama C., 1985. *Physical properties and shear strength of decomposed granite soil*. In: First International Conference on Geomechanics intropical Lateritic and Saprolitic Soils.

Norinelli A., 1996. *Elementi di geofisica applicata*. Pàtron editore.

Oguchi C.T., 2004. *A porosity-related diffusion model of weathering-rind development*. Catena 58, 65-75.

Palacios D., García R., Rubio V., Vigil R., 2003. *Debris flows in a weathered granitic massif: Sierra de Gredos, Spain*. Catena 51, 115-140.

Panizza M., 1992. *Geomorfologia*, Bologna, Pitagora Editrice.

Pelle, T., Scarciglia, F., Allevato, E., Di Pasquale, G., La Russa, M. F., Marino, D., Natali, E.

Robustelli G., Tiné V., 2012. *Reconstruction of Holocene environmental changes in two archaeological sites of Calabria (Southern Italy) using an integrated pedological and anthracological approach*. Quaternary International, in press.

Pellegrino A., Prestininzi A., 2007. *Impact of weathering on the geomechanical properties of rocks along thermal-metamorphic contact belts and morpho-evolutionary processes: the deep-seated gravitational slope deformations of Mt. Granieri-Salincriti (Calabria-Italy)*. Geomorphology 87 (3), 176-195.

Perroux K.M., White I., 1988. *Designs for disc permeameters*. Soil Science Society of America Journal 52, 1205-1215.

Raviolo P.L., 1993. *Il laboratorio geotecnico*. Editrice Controls.

Regoliosi P., Storoni Ridolfi S., 2005. *Introduzione alla geotecnica*. Dario Flaccovio Editore.

Robertson P.K., Campanella R.G., 1983. *Interpretation of Cone Penetration Test*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 20, n. 4.

Romana M., (1985) - *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics. Zacatecas. 49-53.

Salciarini D., Godt J.W., Savage W.Z., Conversini R., Baum R.L., Michael J.A., 2006. *Modelling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy*. Landslides 3, 181-194.

Scarciglia F., Pulice I., Robustelli G., Vecchio G., 2006. *Soil chronosequences on Quaternary marine terraces along the northwestern coast of Calabria (Southern Italy)*. Quaternary International 156-157, 133-155.

Scarciglia F., Le Pera E., Critelli S., 2007. *The onset of the sedimentary cycle in a mid-latitude upland environment: weathering, pedogenesis and geomorphic processes on plutonic rocks (Sila Massif, Calabria)*. In: Arribas, J., Critelli, S., Johnsson, M.J. (Eds.), *Sedimentary provenance and petrogenesis: Perspectives from petrography and geochemistry*. Geological Society of America Special Paper 420, 149-166.

Scarciglia F., De Rosa R., Vecchio G., Apollaro C., Robustelli G., Terrasi F., 2008. *Volcanic soil formation in Calabria (southern Italy): the Cecita Lake geosol in the late Quaternary geomorphological evolution of the Sila uplands*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 177 (1), 101-117.

Scesi L., Papini M., Gattinoni P., 2006. *Geologia applicata 1 (Il rilevamento geologico-tecnico)*. Casa Editrice Ambrosiana.

Servizio Geologico Nazionale, 1992. *Guida alla rappresentazione cartografica*, Quaderni serie III, vol. 2.

Servizio Geologico Nazionale, 1994. *Carta geomorfologica d'Italia 1:50.000 - Guida al rilevamento (1994)*, Quaderni, serie III, n. 4

Servizio Geologico Nazionale, 1996. *Guida al rilevamento*, Quaderni serie III, vol. 1, pp. 203.

Servizio Geologico Nazionale, 2003. *Guida italiana alla classificazione e alla terminologia stratigrafica*, Quaderni serie III, vol. 9, pp. 155

Servizio geologico d'Italia – ISPRA, 2009 *Indicazioni per il rilevamento del Quaternario continentale*. Quaderni, serie III, 12 (3), 54 pp.

Smith M.J., Paron P., Griffiths J.S. (2011). *Geomorphological mapping - Methods and applications*. Developments in Earth Surface Processes, 15, ELSEVIER, pp.612.

Soil Survey Staff, 2010. *Keys to Soil Taxonomy, 11th edit.*, United States Department of Agriculture (USDA) – *Natural Resources Conservation Service (NRCS)*, Washington DC, 338 pp.

Tanzini M., 2002. *L'indagine geotecnica*. Dario Flaccovio Editore.

Terranova O., Antronico L., Gullà G., 2007. *Landslide triggering scenarios in homogeneous geological contexts: The area surrounding Acri (Calabria, Italy)*. *Geomorphology*, 87, 250–267.

Terribile F., Basile A., De Mascellis R., Iamarino M., Magliulo P., Pepe S., Vingiani S., 2007. *Landslide processes and Andosols: the case study of the Campania region, Italy*. In: Arnalds, Ó., Bartoli, F., Buurman, P., Óskarsson, H., Stoops, G., García-Rodeja, E. (Eds.), *Soils of volcanic regions in Europe*. Springer, Berlin, pp. 545-563.

Teza G., Galgaro A., Genevois R., Rocca M., Squarzoni C., 2004. *Integrazione di dati da laser scanner e metodi tradizionali per la misura delle deformazioni della frana di Perarolo do Cadore (BI)*. In atti dell'8° Conferenza Nazionale Asita, pp.1881-1886.

White I., Sully M.J., 1987. *Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration*. *Water Resources. Research* 23, 1514-1522.

Van Westen C. J., 1993. *Application of Geographic Information Systems to landslide hazard zonation*. – I.T.C. Publ. N. 15, ITC Enschede, 245 pp.

