

XIX Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino
“Stabilità e Consolidamento dei Pendii”

OPERE DI PROTEZIONE PER I FENOMENI DI COLATA

Autori: Leonardo CASCINI, Giuseppe SORBINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

1. INTRODUZIONE

Con il termine colata si suole indicare una moltitudine di fenomeni franosi che possono coinvolgere depositi, naturali ed artificiali, dalle proprietà fisico-meccaniche molto variabili, quali gli ammassi rocciosi, i depositi ghiaiosi e sabbiosi, le coltri di origine vulcanica, i loess, i terreni residuali, le formazioni argillose, i materiali di discarica e quelli costituenti i rilevati artificiali, e così via.

Non devono, pertanto, sorprendere le notevoli differenze che si riscontrano, sul piano fenomenologico, all'interno di tale classe di fenomeni e che possono riguardare i fattori predisponenti e le cause innescanti i fenomeni di primo distacco, i volumi mobilitati, le loro modalità di evoluzione verso valle e le massime velocità raggiunte. Con riferimento, per esempio, a quest'ultimo aspetto, si osserva che le colate possono ricadere all'interno di una qualsiasi delle sette classi di velocità definite da Cruden e Varnes (1996) per valutare le conseguenze indotte dalle diverse tipologie di movimenti franosi sulle popolazioni e sui beni esposti.

Risultando proibitiva una trattazione esaustiva dell'argomento, la presente nota si concentrerà sulle fenomenologie che hanno sede nelle rocce sciolte e che sono caratterizzate dalle velocità più elevate. Bisogna, al riguardo osservare che detti fenomeni, ampiamente diffusi sul territorio nazionale oltre che in molti altri paesi quali, per esempio, il Canada ed il Giappone, sono quelli dalle conseguenze più catastrofiche, sia in termini di perdita di vite umane che di danni economici, nonostante i limitati spessori di terreno coinvolti nei fenomeni di primo distacco che, quasi sempre, sono caratterizzati da deboli segnali premonitori non individuabili in assenza di idonea strumentazione di monitoraggio.

Successivamente alla fase di innesco – che può coinvolgere molteplici formazioni naturali, nella quasi totalità dei casi caratterizzate da un grado di saturazione inferiore all'unità se non addirittura nullo – fa seguito una rapida evoluzione verso valle dei volumi mobilitati essenzialmente causata da un significativo decadimento della resistenza a taglio dei terreni rispetto a quella mobilitata durante la fase di innesco. Molto spesso i flussi si incanalano lungo profonde incisioni dove erodono i depositi ivi presenti che contribuiscono ad incrementare ulteriormente il volume della massa in movimento. Anche in assenza di incisioni, analoghi fenomeni erosivi possono manifestarsi lungo i versanti con dinamiche simili alle valanghe di neve.

Segue, infine, la fase di deposizione dove le velocità, che possono raggiungere valori anche di decine di metri al secondo, si riducono drasticamente per varie cause, quali la diminuzione delle pendenze, la dissipazione delle pressioni neutre, l'impatto con ostacoli naturali e/o artificiali, etc..

Da queste brevi considerazioni scaturisce che lo studio delle colate rapide richiede l'acquisizione di approfondite conoscenze sulle aree potenzialmente sede dei fenomeni di primo distacco, sulle proprietà meccaniche dei terreni in posto, sul regime delle pressioni neutre, sulle proprietà reologiche delle masse in movimento, sulla morfologia dei luoghi, sulla vulnerabilità dell'assetto urbanistico e così via.

Nella presente nota, si passano preliminarmente in rassegna gli aspetti salienti delle fenomenologie oggetto di interesse, si illustrano poi le principali tipologie di intervento e le loro differenti finalità. Successivamente si forniscono esempi applicativi con riferimento, rispettivamente, ad un caso di consolidamento definitivo e ad uno di mitigazione del rischio con interventi sia strutturali che non strutturali. Si svolgono, infine, alcune considerazioni in merito a quei territori che, per la loro ampiezza e per il livello di rischio presente, richiedono approfondite considerazioni sulle strategie da porre in essere per una reale tutela delle popolazioni residenti.

2. LE FENOMENOLOGIE ED I TERRENI COINVOLTI

Dal punto di vista puramente fenomenologico, le colate rapide si manifestano essenzialmente come movimenti che avvengono nella fase di post-rottura e, in tal senso, ad essi possono attribuirsi proprietà comuni indipendentemente dai meccanismi che determinano il raggiungimento delle condizioni di instabilità. In particolare, l'elemento fondamentale che contraddistingue tale classe di fenomeni (Varnes, 1978) è rappresentato dal fatto che il materiale coinvolto nel dissesto non offre sufficiente resistenza alle distorsioni conseguenti allo stato tensionale tangenziale agente e, pertanto, il movimento assume le caratteristiche tipiche dello scorrimento di un fluido viscoso (Skempton e Hutchinson, 1969; Hutchinson, 1988). Nella stragrande maggioranza dei casi, tale peculiarità conferisce al dissesto una mobilità superiore a quella delle altre tipologie di frana e si traduce nella capacità, da parte dei volumi di materiale coinvolti, di coprire considerevoli distanze rispetto alle aree di innesco con traiettorie, di norma, fortemente influenzate dall'assetto morfologico sia del versante che delle zone vallive (Hutchinson, 1988).

Sebbene gli elementi sin qui richiamati siano da considerarsi fattori comuni ai quali ricondurre i fenomeni di colata rapida esistono, tuttavia, notevoli differenze, ancora sul piano fenomenologico, che ne caratterizzano il comportamento. Si pensi, ad esempio, ai caratteri cinematici che, in funzione delle diverse modalità di innesco, delle condizioni morfologiche e dell'ampia variabilità delle proprietà reologiche dei materiali coinvolti, possono dar luogo a velocità dei movimenti contenuti in una qualsiasi delle ultime tre classi (V, VI e VII di Tab. 2.1) della classifica proposta da Cruden e Varnes (1996).

Con riferimento agli aspetti cinematici, significative differenze si rilevano, inoltre, dall'osservazione dei caratteri evolutivi che tali fenomeni possono manifestare durante il loro sviluppo, dalla fase di innesco sino a quella di arresto.

La varietà dei meccanismi che presiedono alle fasi suddette, insieme con l'ampia variabilità dei materiali coinvolti fanno sì che, per i fenomeni in questione, non è disponibile ancora oggi, un quadro di riferimento unitario; circostanza, questa, che spesso si riflette sulla terminologia utilizzata, anche prendendo a riferimento le classifiche più accreditate in campo internazionale, quali quelle proposte da Varnes (1978), Hutchinson (1988) e Cruden e Varnes (1996).

Ad esempio, termini quali *mudslide* (Hutchinson, 1988) ed *earthflow* (Varnes, 1978) sono di sovente utilizzati per descrivere lo stesso fenomeno, a seconda che si voglia mettere in evidenza la

Tab. 2.1: Classifica delle scale di velocità dei fenomeni franosi con relativi danni (da Cruden e Varnes, 1996; modificata).

Classe	Descrizione	Danni osservabili	Velocità
VII	Estremam. rapida	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	5 m/s
VI	Molto rapida	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	3 m/min
V	Rapida	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	1.8 m/hr
IV	Moderata	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	13 m/month
III	Lenta	Possibilità di eseguire lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	1.6 m/year
II	Molto lenta	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	16 mm/year
I	Estremam. lenta	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio.	<16 mm/year

Tab. 2.2: Materiali coinvolti nei fenomeni franosi tipo flusso (da Hungr et al., 2001; modificata).

<i>Origine</i>	<i>Carattere</i>	<i>Condizione¹</i>	<i>Nome</i>
ASSORTITO (marino, lacustre, fluviale, eolico, vulcanico, antropogenico)	Non plastico ($I_p < 5\%$)	Asciutto o saturo	Ghiaia Sabbia Limo
	Plastico ($I_p > 5\%$)	- Consistenza plastica ($I_L < 0,5$) - Consistenza fluida ($I_L > 0,5$)	Argille Argille sensitive
NON ASSORTITO (residuale, colluviale, glaciale, vulcanico, antropogenico)	Non plastico ($I_p < 5\%$)	Asciutto o saturo	Detrito ²
	Plastico ($I_p > 5\%$)	- Consistenza plastica ($I_L < 0,5$) - Consistenza fluida ($I_L > 0,5$)	Terra Mud
TORBE	Organico	Saturo	Torba
ROCCE	Frammentato	Asciutto o saturo	Roccia

¹ Riferito al materiale in prossimità della superficie di scorrimento. In molti casi, la condizione del materiale può essere desunta dal comportamento della frana e, soprattutto, dalla sua velocità.

² I detriti possono contenere una considerevole porzione di materiale organico.

natura del materiale (mudslide), oppure i caratteri del movimento nella fase di post-rottura (earthflow).

Un tentativo di superare le ambiguità rilevate in letteratura nell'uso di questi ed altri termini (quali, ad esempio: flowslide, mudflow, sturzstrom, lahar, etc.) è stato recentemente fornito da Hungr et al. (2001) che propongono una classifica dedicata ai soli fenomeni di colata.

In detta classifica, l'elemento primario fondamentale è rappresentato dal tipo di materiale coinvolto nel dissesto, in accordo con le classifiche precedenti (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden e Varnes, 1996). A differenza di queste ultime, tuttavia, i materiali vengono distinti sulla base della loro genesi, piuttosto che dei loro caratteri granulometrici.

In particolare, essi vengono ripartiti in quattro gruppi fondamentali, in funzione della loro origine, della caratteristica fisica o meccanica dominante e del grado di saturazione (Tab. 2.2).

Un primo gruppo riguarda i cosiddetti materiali assortiti prodotti da processi fluviali, lacustri, marini, eolici e vulcanici (ad. es. ceneri) o derivanti da depositi di origine antropica; un secondo gruppo è costituito da materiali poco assortiti o non assortiti, che possono derivare da processi di trasporto di massa (colluvioni), di alterazione (terreni residuali), da attività vulcaniche di tipo esplosivo (pomici), oltre che da depositi artificialmente costituiti, quali le discariche minerarie; gli ultimi due gruppi comprendono, infine, le torbe e le rocce.

Sulla base dei gruppi così definiti, Hungr et al. (2001) pervengono alla classifica illustrata in Tab. 2.3, nella quale i fenomeni di colata vengono identificati in funzione di ulteriori caratteristiche, rappresentate dal contenuto d'acqua, dalla presenza o meno di sovrappressioni neutre o di fenomeni di liquefazione che ne determinano l'innesco, dalla esistenza o meno di incisioni e/o di conoidi che ne influenzano le traiettorie dalle aree di innesco alle zone di deposito ed, infine, dalle velocità del movimento.

Per quanto concerne quest'ultimo aspetto, gli Autori forniscono, sulla base dei dati reperiti in letteratura, le velocità delle tipologie di colata da essi definite, pervenendo al diagramma di Fig. 2.1.

Il diagramma in questione, insieme con la Tab. 2.1, che fornisce una descrizione dell'entità dei possibili danni provocati in funzione delle classi di velocità, consente di svolgere alcune

Tab. 2.3: Classificazione delle colate rapide (da Hungr et al., 2001; modificata).

Materiale	Contenuto d'acqua	Condizioni particolari	Velocità	Nome
<i>Limi, sabbie, ghiaie, detriti (talus)</i>	Asciutto, umido o saturo	- assenza di sovrappressioni interstiziali - volumi contenuti	Varie	<i>Dry (or non-liquified) sand (silt, gravel, debris) flow</i>
<i>Limi, sabbie, detriti, rocce tenere</i>	Saturo	- materiale liquefacibile - contenuto d'acqua costante	Estr. rapide	<i>Sand (silt, debris, rock) flow slide</i>
<i>Argille sensitive</i>	Pari o superiore al limite liquido	- liquefazione in sito - contenuto d'acqua costante	Estr. rapide	<i>Clay flow slide</i>
<i>Torbe</i>	Saturo	- Presenza di sovrappressioni neutre	Da lente a molto rapide	<i>Peat flow</i>
<i>Argille o terre</i>	Prossimo al limite plastico	- Movimenti lenti - Plug flow (scorrimenti)	< rapide	<i>Earth flow</i>
<i>Detriti</i>	saturo	- Canali stabiliti - Incremento del contenuto d'acqua	Estr. rapide	<i>Debris flow</i>
<i>Mud</i>	Pari o superiore al limite liquido	- Flussi di detriti a granulometria fine	> molto rapide	<i>Mud flow</i>
<i>Detriti</i>	Presente acqua libera	- Inondazioni	Estr. rapide	<i>Debris flood</i>
<i>Detriti</i>	Saturo o parzialmente saturo	- Assenza di canali stabiliti - Relativamente superficiali, sorgente ripida	Estr. rapide	<i>Debris avalanche</i>
<i>Frammenti di roccia</i>	Vario, principalmente asciutto	- Roccia intatta alla sorgente - Grandi volumi	Estr. rapide	<i>Rock avalanche</i>

considerazioni utili per l'analisi di tali fenomeni e, di conseguenza, per una razionale individuazione degli interventi da realizzare per la mitigazione del rischio ad essi connesso.

In primo luogo (Fig. 2.1), si rileva che la maggior parte delle tipologie di colata si colloca in un campo di velocità da rapide ad estremamente rapide nell'ambito del quale ricadono materiali caratterizzati quasi esclusivamente da una granulometria grossolana. Se a tale circostanza si associano le considerazioni svolte in precedenza riguardo i caratteri evolutivi che caratterizzano la vita di tali fenomeni, ne consegue che le analisi geotecniche a supporto della progettazione degli interventi di mitigazione devono, nella stragrande maggioranza dei casi, essere rivolte necessariamente alla previsione dei meccanismi (innesco, trasformazione in flusso, propagazione ed arresto) che caratterizzano una colata.

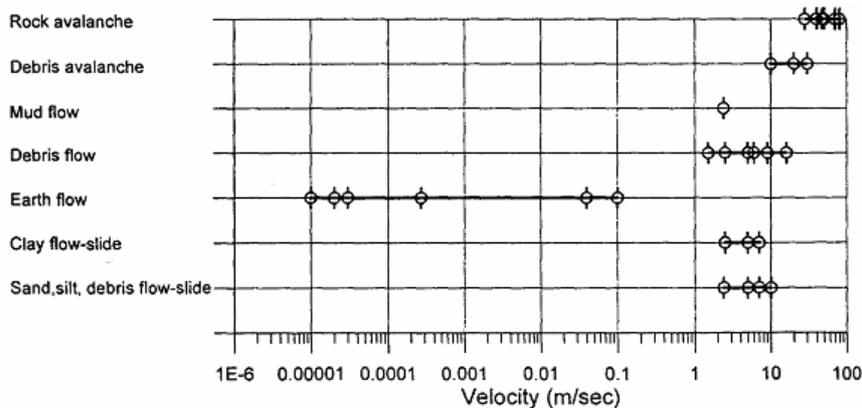


Fig. 2.1: Velocità di alcune tipologie di colata (da Hungr et al., 2001).

Le analisi dei fenomeni di colata rapida pongono quindi, problemi di rilevante portata, la cui risoluzione non può che perseguirsi attraverso l'adozione di strategie che vedano coinvolti, oltre all'ingegneria geotecnica, settori disciplinari afferenti alle scienze geologiche (Fell et al., 2000). Queste ultime si rendono necessarie in

quanto ad esse è demandato il compito di individuare, su aree di notevole estensione, le zone suscettibili alla franosità. A tal fine è, particolarmente utile, nella stragrande maggioranza dei casi, la messa a punto di un modello geomorfologico di evoluzione dei versanti che, nell'ambito di un contesto geoambientale omogeneo, consenta di inquadrare organicamente i fenomeni franosi recenti e passati sulla base di una oculata intersezione degli aspetti geologici, litostratigrafici, geomorfologici ed idrogeologici caratteristici di quel contesto.

Esempi significativi, che testimoniano le notevoli potenzialità di tale approccio nella definizione degli scenari di franosità su area vasta, si ritrovano in letteratura con riferimento a numerosi contesti geoambientali, come quelli che caratterizzano il territorio di Hong Kong (Malone, 1998; Sun, 1998), il comprensorio di S. Francisco (Ellen e Wieczorek, 1988) e dell'Oregon (Pierson, 1977) negli Stati Uniti, nonché quelli che comprendono, in Italia, alcune aree dell'Appennino Meridionale, nelle quali si ritrovano terreni di alterazione di origine gneissica (Cascini et al., 1994), depositi argillosi a struttura complessa (Guida e Iaccarino, 1991), coltri di copertura di origine piroclastica (Cascini et al., 2000; Guida, 2003).

Una volta definiti, con il contributo delle scienze geologiche, gli scenari di franosità comprensivi delle zone di innesco, transito e deposito dei potenziali fenomeni di instabilità (Cascini, 2003a) (Fig. 2.2), è precipuo compito dell'ingegneria geotecnica procedere alla modellazione dei fenomeni attesi, elemento, quest'ultimo, indispensabile per l'individuazione e progettazione dei più idonei interventi di mitigazione del rischio.

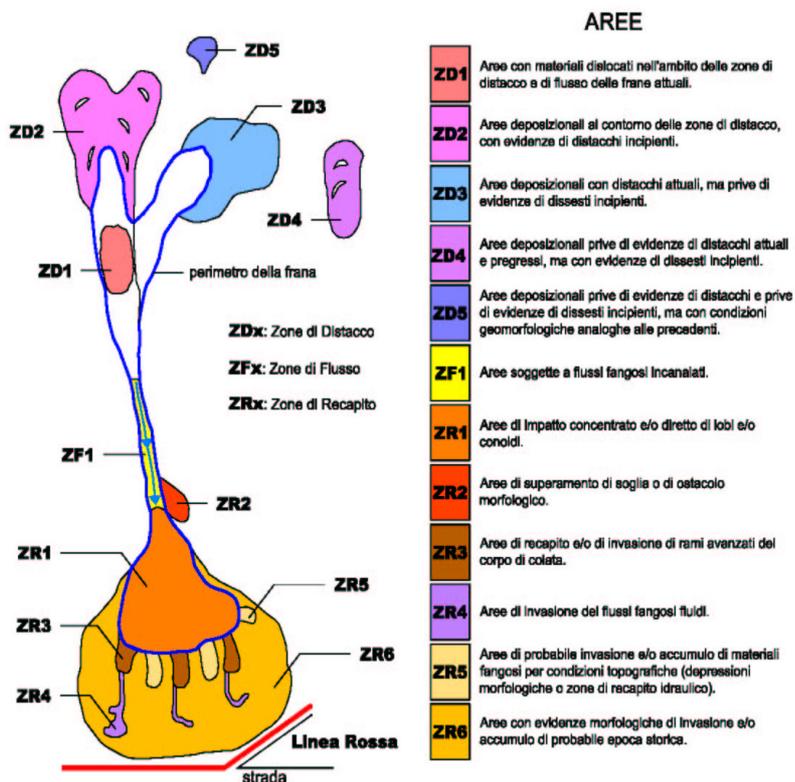


Fig. 2.2: Zonazione delle aree di innesco, transito e deposito operata per le colate rapide di fango della Regione Campania (da Cascini, 2003a; modificata).

letteratura attualmente disponibile sull'argomento, che non esistono modelli in grado di tradurre il fenomeno nel suo complesso, dall'origine del movimento sino al completo arresto (Musso, 1997; Cascini, 2003b; Pastor et al, 2003); sono disponibili, invece, modelli parziali, orientati alle varie fasi

Come è noto, la modellazione ingegneristica dei fenomeni suddetti passa attraverso la costruzione di uno schema (il modello, appunto) il cui scopo è quello di tradurre la complessa situazione reale in uno schema semplificato sottoponibile ad analisi; formalmente, un modello siffatto risulta costituito da un sistema di equazioni, di norma differenziali, la cui integrazione mediante le opportune condizioni al contorno ed iniziali deve consentire di riprodurre i fenomeni osservati. Tale ultima condizione, ampiamente utilizzata in ingegneria geotecnica, risulta essenziale affinché il modello individuato possa considerarsi un "buon" modello e, pertanto, deputato ad essere impiegato quale utile strumento di previsione per fenomeni analoghi.

Nell'ambito dei movimenti franosi tipo colata, si può certamente ammettere, considerando la

(innesco, trasformazione in colata, propagazione ed arresto) in cui il fenomeno può concettualmente immaginarsi scomposto.

Per ciascuna delle fasi elencate si ritrovano in letteratura approcci estremamente diversificati cui fanno seguito una vasta molteplicità di modelli disponibili. Tale diversità è certamente imputabile all'intrinseca complessità dei fenomeni, ma anche alla non immediata connotazione disciplinare delle metodologie storicamente deputate allo studio di alcune tra le fasi descritte; ad esempio, mentre i fenomeni di innesco e di trasformazione in colata sono certamente inquadrabili nell'ambito degli studi propri dell'ingegneria geotecnica, le successive fasi di evoluzione possono presentare caratteri intermedi tra quelli dei movimenti di versante e del trasporto di massa, collocandosi in un campo intermedio tra l'ingegneria geotecnica e l'ingegneria idraulica (Leroueil et al., 1996; D'Elia et al., 1998; Cascini, 2003b; Pastor et al., 2003).

La illustrazione dei modelli disponibili esula dagli scopi della presente nota ed il lettore può utilmente riferirsi ai lavori di Fell et al. (2000), Pastor et al. (2003), Picarelli et al. (2003). In questa sede, appare, tuttavia, opportuno enucleare, indipendentemente dai settori disciplinari coinvolti e dai conseguenti diversi approcci metodologici impiegati, alcuni ingredienti comuni che i modelli devono contenere affinché, almeno dal punto di vista dell'impianto formale, possano considerarsi attendibili. Tralasciando i fenomeni di trasformazione in colata e quelli di deposizione nelle zone finali di recapito, argomenti, tra l'altro, ancora fortemente dibattuti in seno alla Comunità scientifica internazionale (Iverson et al., 1997; Picarelli ed Olivares, 2001, Hungr, 2003) e riferendosi, pertanto, ai soli fenomeni di innesco e di propagazione delle colate, tali ingredienti sono costituiti da: una adeguata definizione dell'assetto stratigrafico del sottosuolo; una appropriata caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni, con particolare riferimento alle proprietà di permeabilità e resistenza, in condizioni sia di parziale che di totale saturazione, ed alle proprietà reologiche; una chiara visione dell'evoluzione, nello spazio e nel tempo, del regime delle pressioni neutre conseguenti agli eventi meteorici; una fedele rappresentazione delle aree di innesco, di transito e di deposizione.

3. IL RISCHIO E LE OPERE DI PROTEZIONE

La assenza di evidenti segnali premonitori nei riguardi dei fenomeni di primo distacco, laddove non si disponga di adeguato monitoraggio, e le caratteristiche cinematiche delle masse instabilizzate concorrono a rendere particolarmente elevato il rischio da colate rapide sia per le popolazioni residenti che per i beni esposti. Considerazioni su tali aspetti e sui rilevanti sforzi che le Autorità competenti e gli addetti ai lavori stanno compiendo per mitigarne gli effetti sono forniti in Cascini (2003b), che passa in rassegna le diverse teorie del rischio presenti nella letteratura, approfondendo le problematiche connesse con la valutazione dei numerosi fattori che concorrono alla sua valutazione.

Facendo riferimento, nella presente nota, a quella che l'Autore considera la più semplice tra le molteplici formulazioni del rischio, si osserva che Varnes (1984) definisce quest'ultimo attraverso la seguente relazione:

$$R = P \times E \times V \quad (1)$$

dove i termini assumono il seguente significato:

- *R (Rischio)*: rappresenta il numero atteso di vittime, persone ferite, danni a proprietà, distruzione o interruzione di attività economiche, in conseguenza di un fenomeno naturale di assegnata intensità;

- *P* (*Pericolosità*): è definita come la probabilità di accadimento, all'interno di una certa area e in un certo intervallo di tempo, di un fenomeno naturale di assegnata intensità;
- *E* (*Elementi a rischio*): rappresenta le persone e/o beni (abitazioni, strutture, infrastrutture, ecc.) e/o attività (economiche, sociali, ecc.) esposte "a rischio" in una certa area;
- *V* (*Vulnerabilità*): è il grado di perdita di un certo elemento o insiemi di elementi esposti "a rischio", derivante dal verificarsi di un fenomeno naturale di assegnata intensità, espresso in una scala che va da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale).

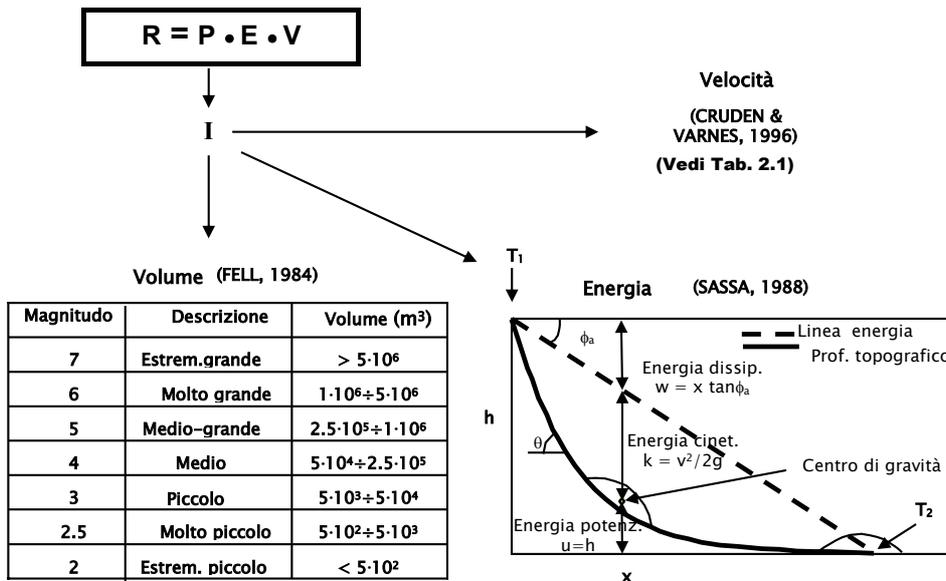


Fig. 3.1: Possibili definizioni della intensità di un fenomeno franoso (da Cascini, 2003b; modificata).

essa posseduta (Sassa, 1988).

Nella letteratura scientifica sono presenti ulteriori definizioni di intensità, anche se si deve osservare che ciascuna di esse presenta vantaggi e svantaggi da un punto di vista teorico e/o pratico (Hungry, 1981; DRM, 1990; Morgenstern, 1985). Per esempio, l'approccio proposto da Cruden e Varnes è molto utile per distinguere le differenti tipologie di fenomeni naturali all'interno di aree estese, soprattutto quando si fa riferimento alla velocità dei fenomeni nella fase di post rottura.



a)



b)

Fig. 3.2: Area di invasione da parte di a) fenomeni tipo scorrimento e b) fenomeni tipo colata.

Dalla definizione del rischio e dei fattori che concorrono alla sua valutazione si osserva che un elemento fondamentale è rappresentato dall'intensità del fenomeno franoso la cui valutazione comporta non poche difficoltà. Non sorprendono, quindi, le molteplici definizioni (Fig. 3.1) che legano detta intensità, rispettivamente, alla velocità della massa instabile (Cruden e Varnes, 1996), al suo volume (Fell, 1994), all'energia cinetica da

Tuttavia, l'utilità di tale approccio si riduce drasticamente in presenza esclusivamente di fenomeni rapidi, per le difficoltà insite in una loro differenziazione sulla base della sola velocità (Cascini, 2003b). D'altra parte, la metodologia proposta da Fell (1994), probabilmente la più valida sul piano teorico, richiede una profonda conoscenza della storia

del movimento franoso, da conseguirsi con indagini geologiche e geotecniche, sia a piccola che a grande scala, da supportare adeguatamente con modelli di evoluzione dei versanti e con reti di monitoraggio, non sempre disponibili soprattutto in presenza di aree particolarmente estese, oltre che di rilevante complessità.

Analoghe difficoltà possono, infine, sorgere anche quando si fa riferimento al criterio di Sassa (1988) che, di semplice utilizzo in alcuni casi (Fig. 3.2a), può richiedere conoscenze di estremo dettaglio sui fattori in grado di influenzare le distanze percorse dalle masse instabili (Fig. 3.2b).

Indipendentemente dalle diverse possibilità di definire la intensità di un fenomeno franoso, è evidente che le opere di protezione dalle colate rapide devono perseguire lo scopo di una riduzione del rischio per i beni esposti che, come si è detto, comprendono sia la popolazione che le strutture ed infrastrutture. Alla luce, pertanto, delle finalità perseguite, sono qui di seguito analizzati i principali interventi che possono essere sia di tipo strutturale che non strutturale. I primi sono finalizzati ad una riduzione della intensità dei fenomeni franosi – attraverso il consolidamento delle masse potenzialmente instabili (interventi attivi) o ad una riduzione di energia dei volumi in movimento (interventi passivi) – o perseguono lo scopo di ridurre la vulnerabilità dei beni esposti. I secondi si pongono, viceversa, l'obiettivo di ridurre, nelle aree a rischio, i beni esposti intesi in senso lato o come popolazione residente.

Rientrano negli interventi strutturali di tipo attivo una grande varietà di opere orientate, in toto o in parte, ad impedire lo sviluppo dei fenomeni di innesco nelle aree sorgenti e/o la loro trasformazione in colata. Esse possono essere collocate nelle zone sommitali dei versanti, ed in tal caso si configurano come sistemazioni di tipo estensivo, oppure negli impluvi, assumendo un carattere spiccatamente puntuale.

Nell'ambito della prima categoria di opere, certamente quelle più antiche e consolidate (Maione, 1998) sono rappresentate dagli interventi di regimentazione delle acque superficiali che, come è noto, consistono in canali artificiali, rivestiti in pietra o calcestruzzo, la cui precipua finalità è quella di rendere più agevole l'allontanamento delle acque meteoriche limitandone, così, sia l'infiltrazione nei sottostanti strati di terreno che la capacità erosiva. La loro disposizione in pianta segue di solito geometrie concepite per massimizzare le aree di influenza dei vari tratti, il cui

dimensionamento è subordinato ad un accurato studio dei deflussi superficiali, fortemente dipendenti dalla morfologia dei luoghi, oltre che dalla natura dei terreni. In genere, lo sviluppo lineare di tali opere, soprattutto in presenza di forti dislivelli, assume valori particolarmente elevati; di conseguenza, è buona norma prevedere, contestualmente alla loro progettazione, un accurato piano di manutenzione, rivolto ad assicurare la loro efficienza nel tempo.

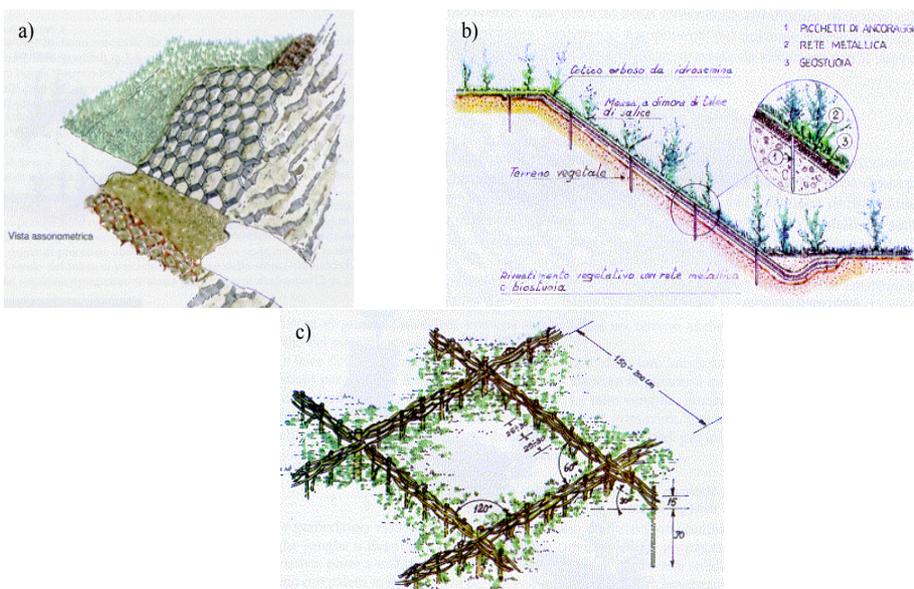


Fig. 3.3: Alcune tecniche vegetali per la sistemazione superficiale dei versanti: a) rivestimenti con geocelle e georeti; b) geostuoie; c) graticciate o viminate (da Maione, 1998; modificata).

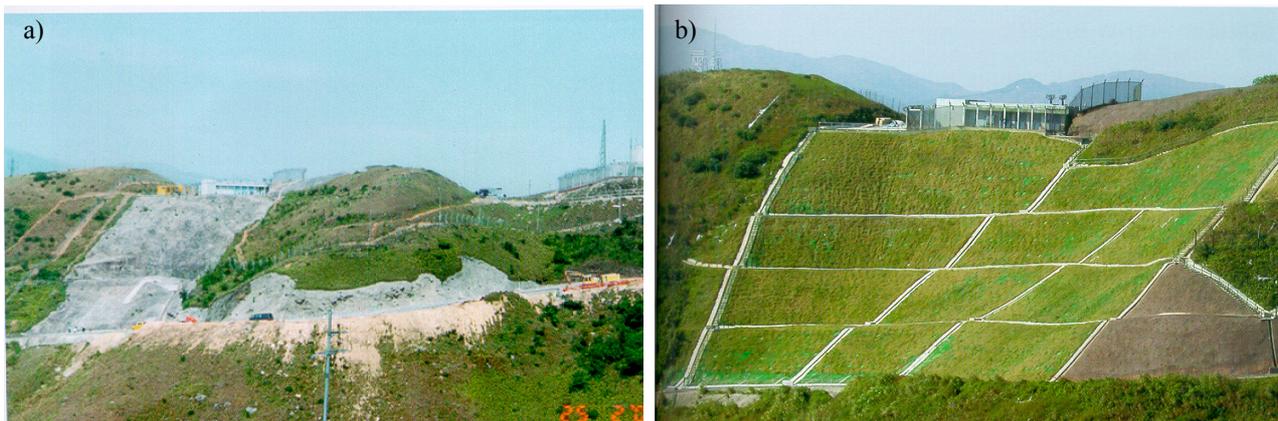
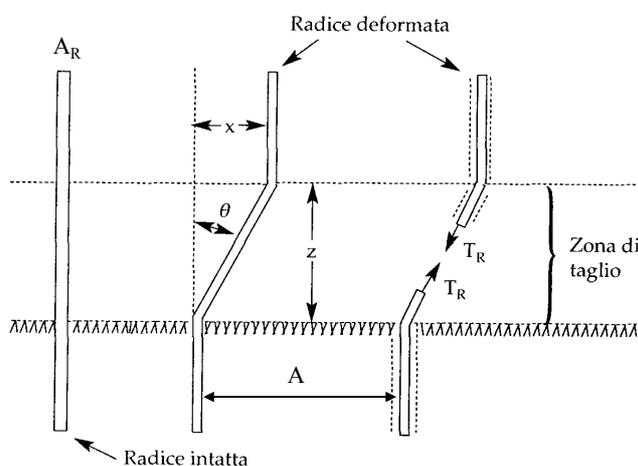


Fig. 3.4: Esempio di sistemazione di un pendio (Hong Kong) con interventi di drenaggio ed idrosemina (da GEO, 2002; modificata).

Alle opere di regimentazione delle acque superficiali sono frequentemente associati altri tipi di interventi che, di norma, rientrano in un più ampio piano di sistemazione idraulico-forestale dell'intero versante giudicato potenzialmente instabile (Wu, 1994; Greenway, 1987). In tale contesto, un ruolo rilevante è assunto dall'impiego di essenze vegetali la cui funzione può essere semplicemente di supporto alle opere di regimentazione idraulica, oppure orientata all'incremento delle condizioni di stabilità del versante. Nel primo caso, esse assolvono il compito di estendere la riduzione dell'infiltrazione delle acque meteoriche e del loro potere erosivo ad aree più ampie di quelle conseguibili con le sole opere di regimentazione. A tal fine (Fig. 3.3), sono disponibili numerose tecniche e metodologie che vanno dal semplice uso di materiali naturali (graticciate, fascinate, viminate) all'utilizzo combinato di materiali naturali ed artificiali (gabbioni, materassi, geogriglie, geostuoie, idrosemina); nella Fig. 3.4 è, ad esempio, illustrata una brillante applicazione di tecniche di idrosemina associate ad interventi di drenaggio per un pendio collocato nel centro abitato di Hong Kong (GEO, 2002).



z =spessore della radice lungo la zona di taglio;
 x =spostamento della radice lungo la zona di taglio;
 θ =distorsione della radice lungo la zona di taglio;

T_R =resistenza media unitaria delle radici lungo la zona di taglio;
 A_R/A =rapporto areale

$$\tau = c' + \left[T_R A_R / A (\cos \theta \tan \varphi' + \sin \theta) \right] + \sigma_n' \tan \varphi'$$

Fig. 3.5: Modello per la determinazione della resistenza a taglio del complesso radici-terreno (da Gray e Leiser, 1982; modificata).

Laddove le essenze vengano utilizzate ai fini della stabilità, ad esse viene demandato il compito di incrementare le resistenze del terreno attraverso due contributi rappresentati, rispettivamente, dall'azione di rinforzo delle radici e dall'incremento della suzione. La definizione di tali contributi in campo ingegneristico risulta alquanto impegnativa, dal momento che essa richiede la modellazione geotecnica di un mezzo parzialmente saturo all'interno del quale si trovano elementi resistenti (le radici) la cui configurazione geometrica non è sempre definibile con sufficiente accuratezza. In letteratura si ritrovano numerosi lavori, a carattere sia sperimentale che teorico, rivolti alla determinazione della resistenza al taglio del complesso terreno – apparato radicale (Wu ed Erb, 1988; Misra, 1997;

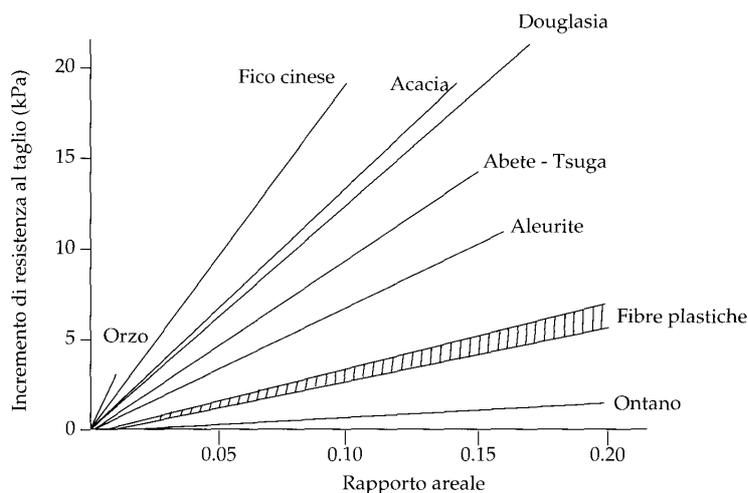


Fig. 3.6: Incrementi di resistenza al taglio prodotti dalle radici di alcune essenze vegetali (da Puglisi, 1999; modificata).

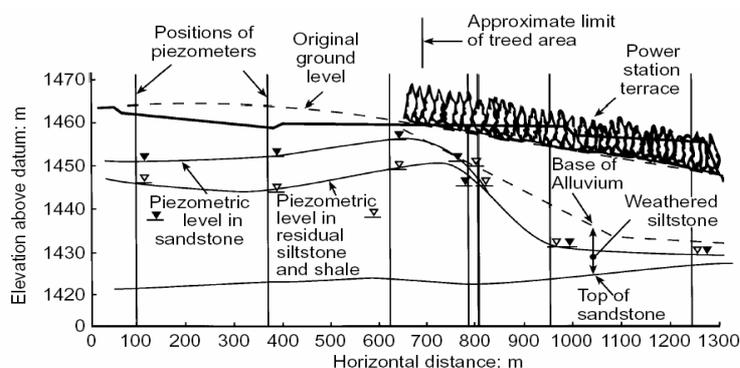


Fig. 3.7: Abbattimento del livello di falda prodotto dalla piantumazione di eucalipti (da Blight, 1987).

intervento, anch'esso associato alle tipologie prima descritte, è rappresentato dal rimodellamento più o meno spinto dei versanti, la cui ben nota funzione è quella di ridurre le forze agenti sulla potenziale superficie di scorrimento essenzialmente attraverso scavi, associati o meno a rinterri al piede. Rientrano in tale tipologia di intervento le coltivazioni a banchine, i terrazzamenti, le gradonature, e così via. Bisogna, comunque, osservare che la realizzazione di tali opere comporta una sostanziale modifica del profilo naturale del versante e, pertanto, la sua reale efficacia non può prescindere da una accurata conoscenza del contesto geomorfologico in cui il versante medesimo è

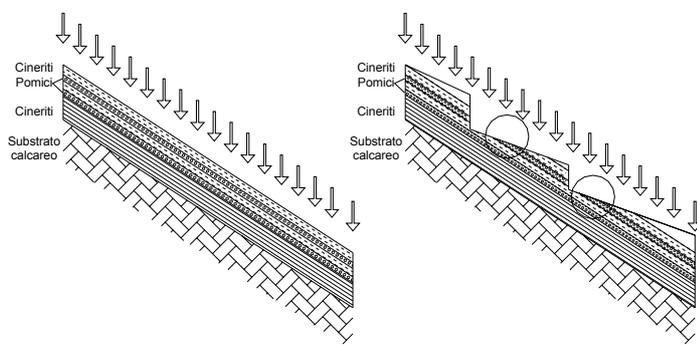


Fig. 3.8: Problematiche connesse con i terrazzamenti.

Watson et al., 1999; Operstain e Frydman, 2000). Un semplice schema è quello proposto da Gray e Leiser (1982) (Fig. 3.5) che consente di determinare tale valore in funzione della resistenza media a trazione delle radici stesse e di alcune grandezze geometriche; un esempio di incremento di resistenza conseguibile con la messa a dimora di varie specie arboree è illustrato in Fig. 3.6.

Per quanto concerne l'incremento della suzione, alcune significative applicazioni sono fornite con riferimento a numerosi contesti geoambientali; tra questi, in Fig. 3.7 è riportato il caso di un pendio in terreni di alterazione del SudAfrica (Blight, 1987), dove la piantumazione di eucalipti ha consentito di conseguire notevoli abbassamenti del livello di falda. A fronte delle numerosi applicazioni, i contributi teorici appaiono alquanto limitati, per le notevoli difficoltà che si incontrano nella modellazione dei complessi fenomeni idrologici da considerare nelle analisi (Greenway, 1987; Blight, 1997; Tarantino et al., 2002). Altro

intervento, anch'esso associato alle tipologie prima descritte, è rappresentato dal rimodellamento più o meno spinto dei versanti, la cui ben nota funzione è quella di ridurre le forze agenti sulla potenziale superficie di scorrimento essenzialmente attraverso scavi, associati o meno a rinterri al piede. Rientrano in tale tipologia di intervento le coltivazioni a banchine, i terrazzamenti, le gradonature, e così via. Bisogna, comunque, osservare che la realizzazione di tali opere comporta una sostanziale modifica del profilo naturale del versante e, pertanto, la sua reale efficacia non può prescindere da una accurata conoscenza del contesto geomorfologico in cui il versante medesimo è inserito; appare inoltre, doveroso sottolineare la necessità di attente considerazioni sull'assetto stratigrafico dei luoghi oltre che delle acque sotterranee e delle eventuali modifiche che tale intervento comporta sul loro regime. Con riferimento a quest'ultimo aspetto, la realizzazione di tali interventi potrebbe, infatti, comportare la messa a giorno di orizzonti a permeabilità superiore a quella degli strati più superficiali, con conseguente sviluppo di vie preferenziali



Fig. 3.9: Muri tirantati su un pendio del Comune di Pagani (SA).

di drenaggio. Situazioni stratigrafiche di tal tipo sono, in genere, presenti nelle coltri piroclastiche della Regione Campania, dove si osserva spesso una alternanza di strati, con giacitura parallela al piano campagna, formati da cineriti e pomici, queste ultime caratterizzate da valori della permeabilità satura notevolmente superiore rispetto ai primi (Fig. 3.8).

In questa, o in situazioni similari, la riprofilatura del versante deve essere valutata con estrema attenzione ed, eventualmente, associata ad altri interventi come nel caso di Fig. 3.9, dove si è fatto ricorso all'impiego di muri tirantati nonostante la limitata altezza (< 3.0 m) delle opere di sostegno.

Altre opere estensive di tipo attivo sono rappresentate dagli interventi di drenaggio sub-superficiale che riducono l'entità delle pressioni neutre nel sottosuolo incrementando la resistenza al taglio dei terreni. Le tipologie relative a tali interventi sono numerosissime (Fig. 3.10) e possono raggrupparsi, a seconda delle profondità raggiunte, in superficiali (trincee) e profonde (setti drenanti, dreni orizzontali, pozzi, gallerie). La scelta della tipologia più appropriata viene, in genere dettata da numerosi fattori, i più importanti dei quali sono rappresentati dalla profondità della superficie di scorrimento critica, dall'andamento plano-altimetrico dell'area da stabilizzare e dalle condizioni di accesso ai luoghi.

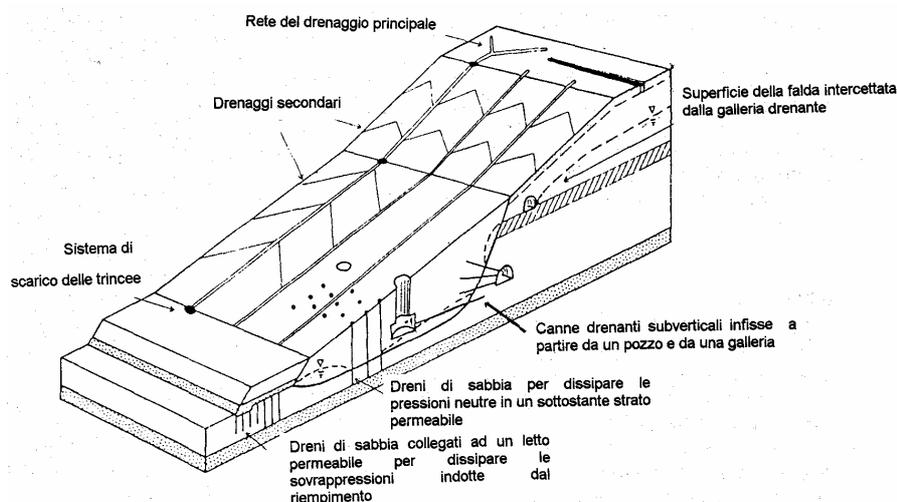


Fig. 3.10: Schemi di drenaggi nei pendii naturali (da Evangelista, 1997).

Per il loro dimensionamento, è necessaria un'analisi del processo di filtrazione oppure di consolidazione indotto dalla variazione del regime delle pressioni neutre. Al riguardo, esistono in letteratura numerose trattazioni teoriche con riferimento ad un mezzo saturo, omogeneo ed isotropo (Hutchinson, 1977; Kenney et al., 1977; Nonveller, 1981; Burghignoli e Desideri,

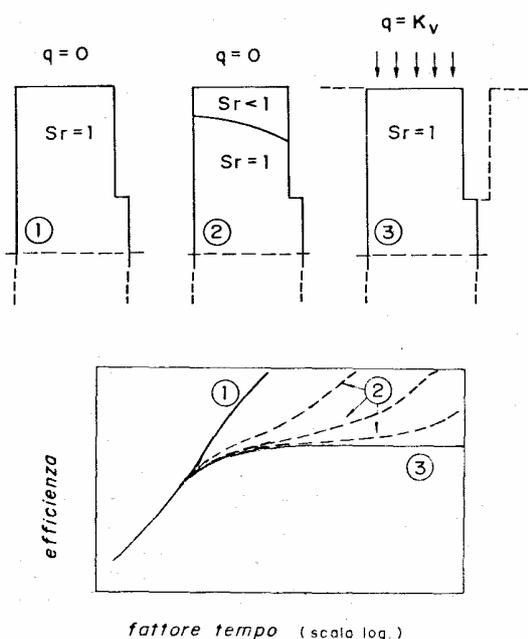


Fig. 3.11: Influenza delle condizioni di parziale saturazione sull'efficienza nel tempo di un sistema di trincee drenanti (da Burghignoli e Desideri, 1986).

1983; Valore e Speciale, 1986; Di Maio e Viggiani, 1987; Di Maio et al., 1988; Airò Farulla e Valore, 1994), che hanno consentito di mettere in evidenza il ruolo assunto dalle varie grandezze in gioco, ed i cui risultati sono forniti in schemi e diagrammi di sintesi che possono utilmente essere presi a riferimento per le pratiche applicazioni. Le difficoltà maggiori in sede progettuale derivano, in realtà, da una adeguata caratterizzazione idraulica del sottosuolo, per il quale le ipotesi di omogeneità ed isotropia costituiscono l'eccezione piuttosto che la regola, e che richiede, sovente, un impegno sperimentale particolarmente elevato anche in presenza di condizioni stratigrafiche non eccessivamente complesse (Cascini, 1994). Vi sono, d'altra parte, numerosi casi in cui i depositi costituenti le aree di innesco sono caratterizzati per l'intero spessore, o per una porzione di esso, da condizioni di parziale saturazione. In tal caso, l'analisi dei moti filtranti orientata al loro dimensionamento è resa particolarmente complessa dalla necessità di dover portare in conto le proprietà idrauliche del terreno nel campo delle pressioni neutre negative (o suzioni).

L'importanza del ruolo giocato dalla presenza di una

zona di parziale saturazione sul dimensionamento di tali interventi è stata messa in luce da Burghignoli e Desideri (1986) che hanno condotto uno studio sull'efficienza di alcuni sistemi drenanti (trincee e dreni orizzontali) contemplando le condizioni di parziale saturazione del mezzo. I risultati conseguiti (Fig. 3.11) evidenziano come tali condizioni comportino valori dell'efficienza che si discostano notevolmente da quelli calcolati nell'ipotesi di completa saturazione del mezzo. Analisi numeriche sull'efficacia dei tubi drenanti all'interno di pendii parzialmente saturi sono state condotte da Rahardjo e Leong (2002), con l'ausilio di un codice di calcolo ad elementi finiti. I

risultati conseguiti hanno mostrato che tale sistema consente un mantenimento delle condizioni di stabilità del pendio solo nel caso di risalita della superficie libera della falda, la cui escursione viene controllata dalla quota dei dreni; viceversa, la presenza o meno dei dreni appare irrilevante nei riguardi della variazione del regime delle pressioni neutre conseguente all'infiltrazione delle acque meteoriche. Un ruolo rilevante potrebbe, quindi, essere giocato da tali sistemi laddove l'innesco dei fenomeni di

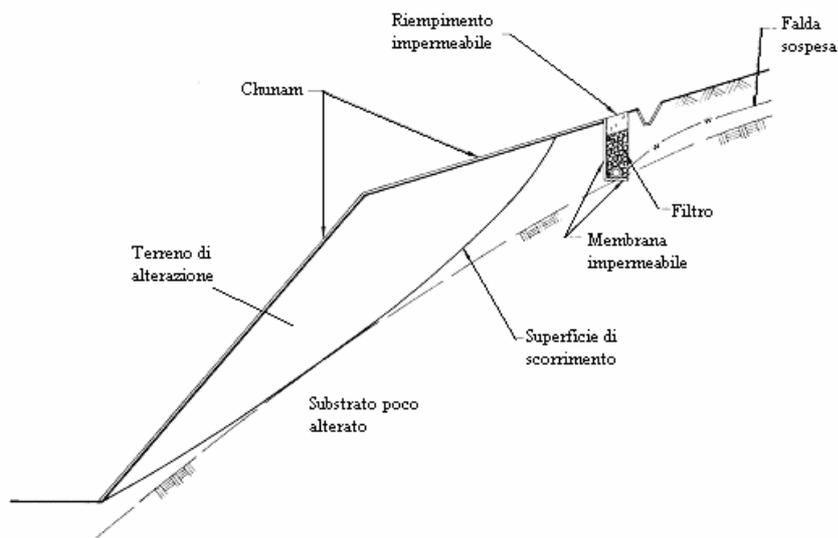


Fig. 3.12: Trincee drenanti realizzate nei pendii artificiali di Hong Kong per l'intercettazione di falde sospese (da GCO, 1984, modificata).

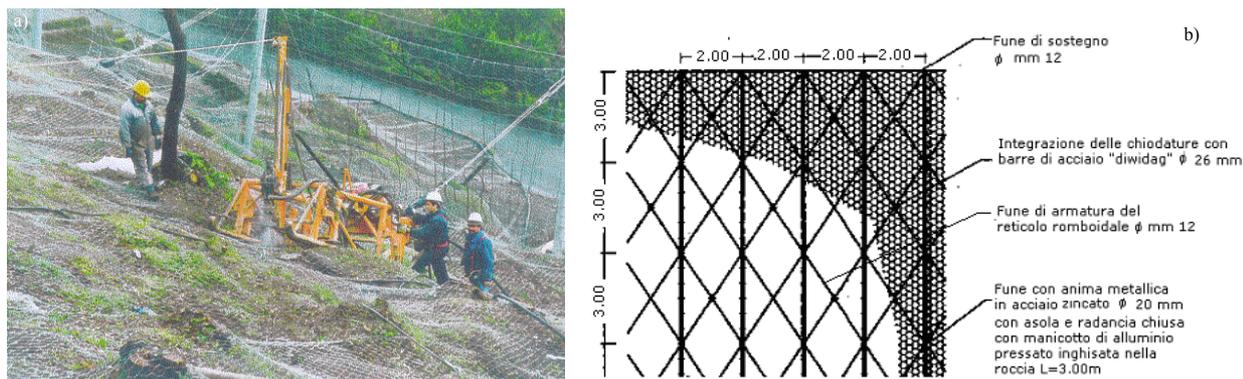


Fig. 3.13: Micropali realizzati nel Comune di Pagani (SA) per la stabilizzazione delle coltri piroclastiche: a) fase esecutiva; b) schema dell'intervento.

primo distacco fosse condizionato, in tutto o in parte, da immissioni idriche concentrate alla base dei depositi di copertura, come avviene nelle già citate coltri piroclastiche della Regione Campania che poggiano sui rilievi carbonatici, oppure nelle coltri di alterazione di origine granitica e/o vulcanica del territorio di Hong Kong. In quest'ultimo contesto risulta, infatti, alquanto diffuso il ricorso a trincee drenanti ubicate alla sommità del pendio (Fig. 3.12), la cui funzione è quella di intercettare le falde sospese, temporanee o permanenti, che si formano al contatto tra terreni di alterazione e substrato meno alterato, a seguito di intensi eventi meteorici (Lumb, 1975; Anderson e Howes 1985; GCO, 1984).

Ulteriori opere che si configurano sia a carattere estensivo che puntuale sono rappresentate dalle strutture di sostegno, che consentono di incrementare i margini di sicurezza del pendio esplicando forze di contenimento sulla massa potenzialmente instabile. Esse possono essere costituite da strutture rigide (pali, paratie), flessibili (micropali) oppure da strutture ad inerzia trascurabile (ancoraggi, soil nails). Un rigoroso dimensionamento di tali opere è, di norma, subordinato all'analisi delle complesse interazioni che si sviluppano tra struttura e terreno in posto e che solo in alcuni casi può trovare riscontro nelle pratiche applicazioni. Normalmente, il loro dimensionamento è perseguito ricorrendo ai metodi dell'equilibrio limite che non richiedono l'analisi tensio-deformativa dell'intero pendio. Un'ampia disamina dei vari metodi disponibili insieme con alcune utili indicazioni progettuali sono forniti da Evangelista (1997), mentre un esempio di utilizzo di opere di contenimento rigide verrà fornito nel prossimo paragrafo.

Per quanto concerne le opere flessibili, o ad inerzia trascurabile, si osserva che il loro utilizzo appare sempre più diffuso, probabilmente per il più agevole impiego dei mezzi d'opera nelle zone di innesco caratterizzate, di norma, da sfavorevoli condizioni di accesso. Un interessante esempio di applicazione di micropali per la mitigazione dei fenomeni di innesco è stato realizzato nel già citato territorio di Pagani dove (Fig. 3.13), su di un'area di circa 50.000 m² si sono eseguiti micropali del diametro di 0.10 m, ammortati nel substrato carbonatico e solidarizzati da funi metalliche disposte



Fig. 3.14: Rilevato artificiale nel territorio di Hong Kong stabilizzato con l'impiego di soil nails (da GEO, 2003; modificata).

secondo lo schema riportato nella stessa Fig. 3.13. Nel territorio di Hong Kong, particolarmente frequenti sono gli interventi di stabilizzazione eseguiti mediante l'impiego di soil nails (barre metalliche opportunamente protette dalla corrosione) su imponenti rilevati artificiali (Fig. 3.14) la cui principale

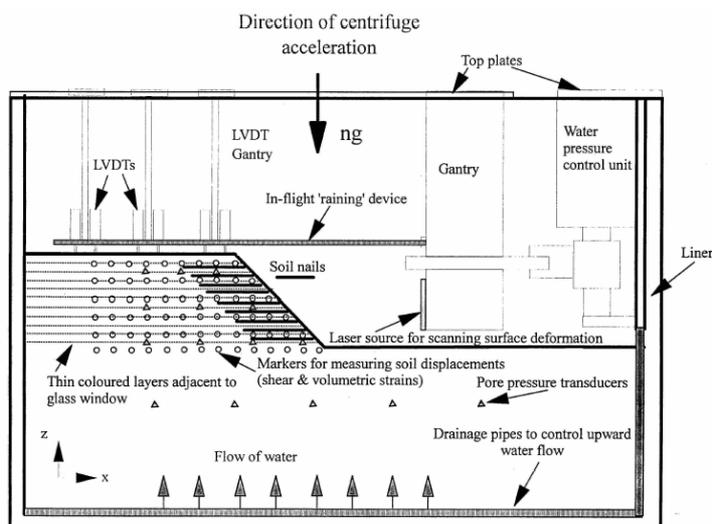
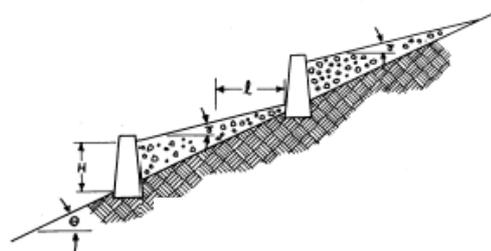


Fig. 3.15: Prove in centrifuga su modello fisico per la valutazione dell'efficacia degli interventi di stabilizzazione con soil nails (da GEO, 2003; modificata).

causa di instabilità viene attribuita a fenomeni di liquefazione statica (Sun, 1998). Per tali opere, in GED-HKIE (2003) vengono forniti rilevanti indicazioni progettuali, adeguatamente supportate da analisi numeriche e da osservazioni su modello fisico in centrifuga (Fig. 3.15). Ulteriori interventi di tipo attivo ma a carattere puntuale, sono rappresentati dalle opere posizionate all'interno degli impluvi, che assolvono la funzione di impedire l'eventuale erosione dei depositi ivi presenti. A tale scopo, sono diffusamente impiegate le briglie, disposte trasversalmente all'impluvio (Fig. 3.16), che consentono di regolarizzare il profilo altimetrico trattenendo i sedimenti trasportati dalle acque ruscellanti. Tali opere, che possono realizzarsi in vari materiali (calcestruzzo, pietrame, legno, etc.), cui sono associate altrettante tecniche costruttive, vengono posizionate lungo l'alveo in funzione del profilo da conseguirsi rispetto a quello preesistente (Fig. 3.17). Il dimensionamento di tali opere segue le classiche metodologie utilizzate per le usuali opere di sostegno, cui si associano le necessarie verifiche riguardo i fenomeni di sifonamento e la predisposizione di adeguati accorgimenti per evitare fenomeni di erosione concentrata lungo le sponde.



- θ Pendenza originaria dell'alveo
 H Altezza della briglia
 γ Angolo di deposizione del materiale a tergo delle briglie
 L Ampiezza del tratto di potenziale erosione
- $$\text{Spazio minimo tra le briglie} \geq 2l \geq \frac{H}{\tan \theta - \tan \gamma}$$

Fig. 3.17: Posizionamento tipico di briglie per la regolarizzazione del profilo di fondo.

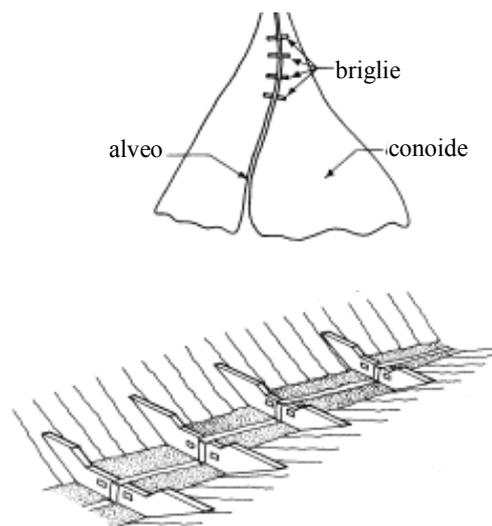


Fig. 3.16: Posizionamento tipico di briglie per la regolarizzazione del profilo altimetrico dell'alveo.

Ben altro impegno progettuale è richiesto quando a queste opere viene affidato il compito di ridurre l'energia delle masse in movimento e si configurano, quindi, come uno dei possibili interventi di difesa passiva. In tal caso, il loro dimensionamento – sia che si tratti di briglie, bacini di dissipazione, opere di protezione dei beni esposti etc. (Fig. 3.18) – è subordinato alla definizione della colata di progetto ed, in particolare, alla determinazione di alcune sue grandezze caratteristiche, quali: il volume, la portata e la velocità, la distanza di arresto rispetto alla zona di innesco.

Tali grandezze possono determinarsi con l'ausilio di modelli matematici, di vario grado e complessità (Savage e Hutter, 1986; Norem et al., 1990; Hungr, 1995; Pastor et al., 2003), che considerano il materiale di colata come una miscela bifase, il cui comportamento reologico tiene conto, in diversa misura, dell'effetto combinato dei fenomeni di natura attritiva e viscosa. Come evidenziato da Fell et al.

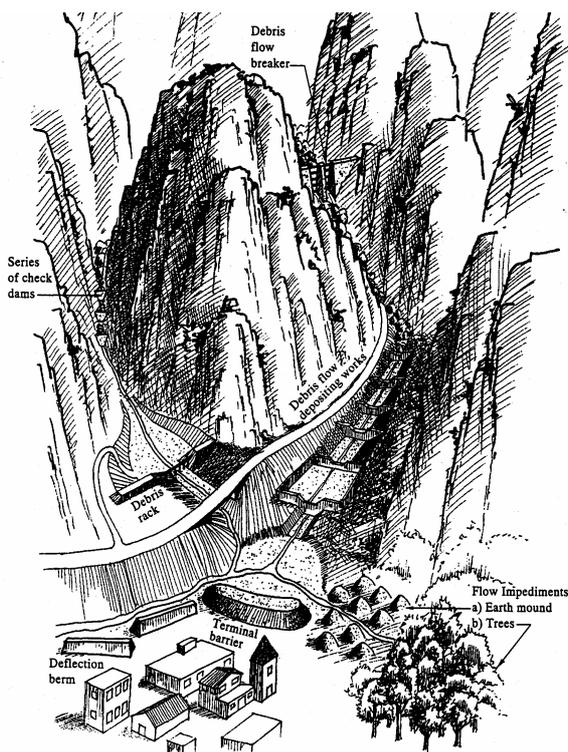


Fig. 3.18: Illustrazione schematica di alcuni interventi di difesa passiva (da Lo, 2000).

ben interpreta i movimenti caratterizzati da volumi superiori a $10^3 \div 10^4 \text{ m}^3$, per i quali i fattori locali (presenza di ostacoli, irregolarità topografiche, etc.) giocano un ruolo di secondaria importanza. Si deve, tuttavia, osservare che nelle pratiche applicazioni, l'utilizzo delle correlazioni empiriche o semiempiriche proposte in letteratura, non sempre è possibile o proficuo in contesti geoambientali differenti da quelli per i quali dette correlazioni sono state individuate. Ne consegue che la definizione della colata di progetto presenta spesso numerose incognite, che richiedono drastiche semplificazioni, con conseguenti ampi margini di incertezza (Fell et al., 2000).

In ogni caso, una volta ipotizzate le grandezze caratterizzanti la colata di progetto, il tipo di opere da eseguire, il loro numero e la loro localizzazione sono funzione di una serie di fattori, principalmente connessi con la morfologia dei luoghi e la posizione degli elementi esposti. Nel caso di colate che si propagano all'interno di impluvi incassati, le opere di più frequente realizzazione (VanDine, 1996; Lo, 2000) sono costituite da briglie e/o barriere permeabili o semipermeabili, concepite per dissipare l'energia della colata e consentire, nel contempo, il libero passaggio della piena ordinaria; per tali opere sono disponibili diverse tipologie strutturali, alcune delle quali sono illustrate nella Fig. 3.23. Per il loro dimensionamento, utili indicazioni sono fornite da Lo (2000), che propone di assumere, per la stima delle azioni conseguenti all'impatto, una pressione uniformemente distribuita sull'intera altezza

(2000), la complessità di tali modelli, non ne consente, spesso, un immediato utilizzo, ed il loro impiego per essere proficuo, deve necessariamente prevedere una fase preliminare di taratura sugli eventi pregressi (Hung et al., 1999). Utili indicazioni possono, talora, scaturire dai criteri semiempirici mediante i quali la definizione delle grandezze di interesse è sintetizzata in relazioni del tipo di quella riportata in Fig. 3.19 che si riferisce (Lo, 2000) ad alcuni fenomeni occorsi in Canada e Giappone. Anche i criteri empirici possono, talora, fornire indicazioni di una qualche utilità sia sui volumi mobilitabili (Fig. 3.20) che sulla distanza di arresto delle masse instabili. Con riferimento a questo secondo aspetto, molti Autori (Sassa, 1988; Hung, 1981; Corominas, 1996; Finlay et al., 1999) introducono (Fig. 3.21) il cosiddetto "angolo di estensione" (Scheidegger, 1973), che Corominas (1996) mette in relazione con i volumi di innesco. Dalla Fig. 3.22, nella quale sono riportati anche i dati conseguiti da Finlay et al. (1999) per alcuni dissesti del territorio di Hong Kong, emerge con chiarezza che la mobilità di un dissesto si incrementa all'aumentare del volume coinvolto e che la correlazione proposta

ben interpreta i movimenti caratterizzati da volumi superiori a $10^3 \div 10^4 \text{ m}^3$, per i quali i fattori locali (presenza di ostacoli, irregolarità topografiche, etc.) giocano un ruolo di secondaria importanza. Si deve, tuttavia, osservare che nelle pratiche applicazioni, l'utilizzo delle correlazioni empiriche o semiempiriche proposte in letteratura, non sempre è possibile o proficuo in contesti geoambientali differenti da quelli per i quali dette correlazioni sono state individuate. Ne consegue che la definizione della colata di progetto presenta spesso numerose incognite, che richiedono drastiche semplificazioni, con conseguenti ampi margini di incertezza (Fell et al., 2000).

In ogni caso, una volta ipotizzate le grandezze caratterizzanti la colata di progetto, il tipo di opere da eseguire, il loro numero e la loro localizzazione sono funzione di una serie di fattori, principalmente connessi con la morfologia dei luoghi e la posizione degli elementi esposti. Nel caso di colate che si propagano all'interno di impluvi incassati, le opere di più frequente realizzazione (VanDine, 1996; Lo, 2000) sono costituite da briglie e/o barriere permeabili o semipermeabili, concepite per dissipare l'energia della colata e consentire, nel contempo, il libero passaggio della piena ordinaria; per tali opere sono disponibili diverse tipologie strutturali, alcune delle quali sono illustrate nella Fig. 3.23. Per il loro dimensionamento, utili indicazioni sono fornite da Lo (2000), che propone di assumere, per la stima delle azioni conseguenti all'impatto, una pressione uniformemente distribuita sull'intera altezza

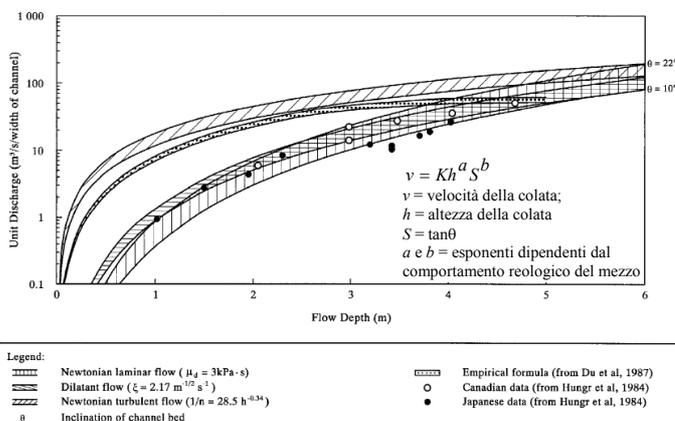


Fig. 3.19: Relazione proposta per la stima della velocità di una colata detritica (da Lo, 2000).

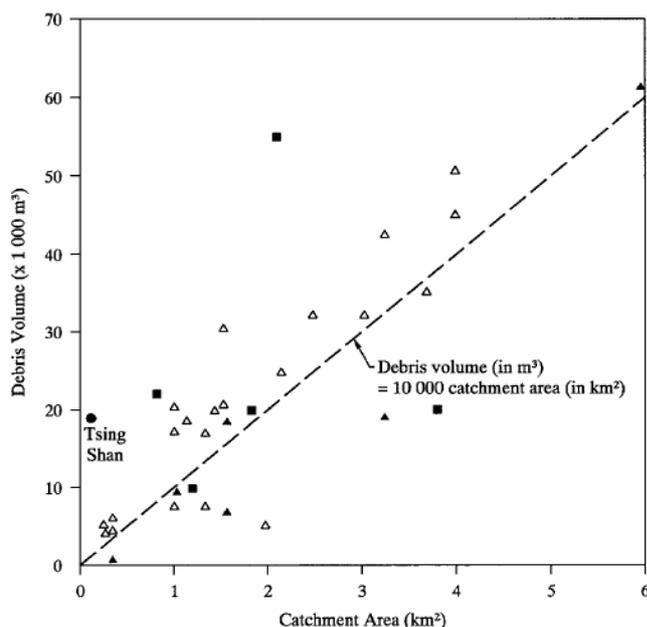


Fig. 3.20 Relazione proposta per la stima dei volumi di colate detritiche (da VanDine, 1996; modificata da Lo (2000)).

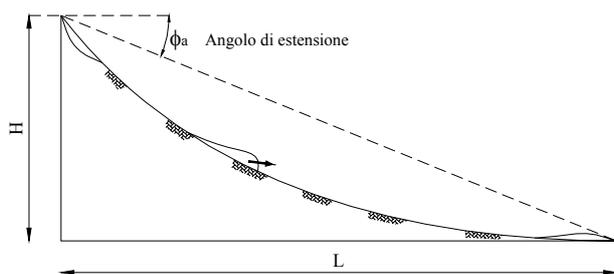


Fig. 3.21: Definizione dell'angolo di estensione.

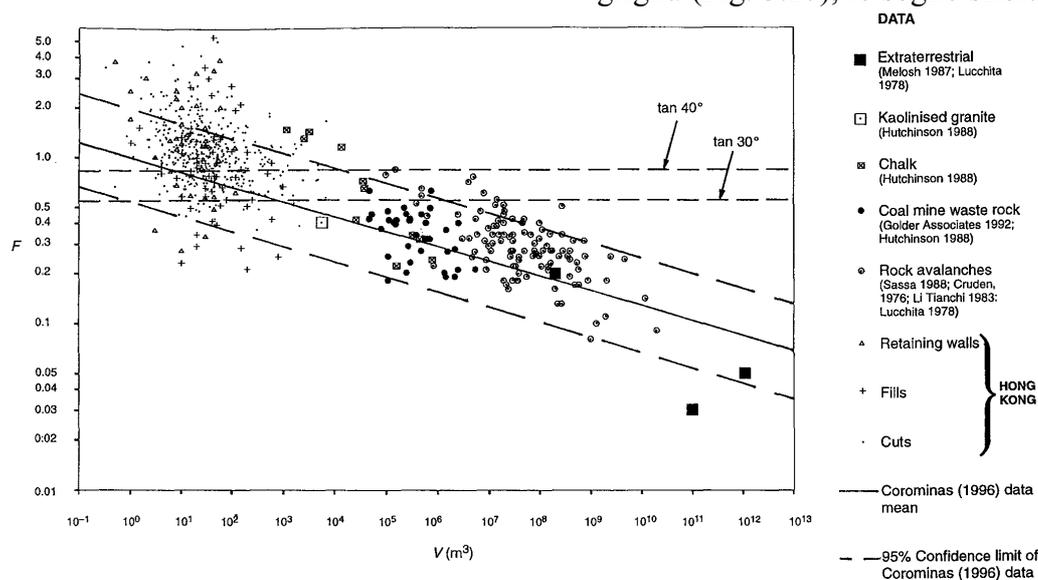


Fig. 3.22: Correlazioni proposte tra l'angolo di estensione ($F = \tan \phi_a$) ed il volume V per alcuni fenomeni di colata (da Finlay et al., 1999).

dell'opera, la cui intensità è espressa dalla relazione riportata in Fig. 3.24. Alcuni esempi di opere realizzate per la difesa da colate detritiche in Giappone sono mostrati in Fig. 3.25.

Quando i fenomeni di colata sono attesi lungo versanti con reticolo idrografico poco inciso o del tutto assente, le opere da realizzare nelle zone di transito possono configurarsi come sbarramenti discontinui, da disporre ortogonalmente alle linee di massima pendenza. Un esempio, a tale riguardo, è fornito in Fig. 3.26, che si riferisce al già citato caso di Pagani, sul quale sono stati disposti n. 30 speroni in calcestruzzo del diametro di circa 5.0 m ed altezza pari a 7.0 m, aventi funzione di dissipatori di energia.

Laddove la morfologia dei luoghi lo consente, alle opere disposte nelle zone di transito possono utilmente associarsi, a valle, uno o più bacini di espansione delle colate. Normalmente, tali opere sono realizzate all'apice o all'interno dei conoidi (Fig. 3.27) e sono di frequente associate ad opere idrauliche di canalizzazione delle porzioni terminali degli alvei. Al loro interno sono di norma realizzati dispositivi di dissipazione quali, per esempio, le briglie permeabili a griglia (Fig. 3.27), le soglie sfioranti ricavate

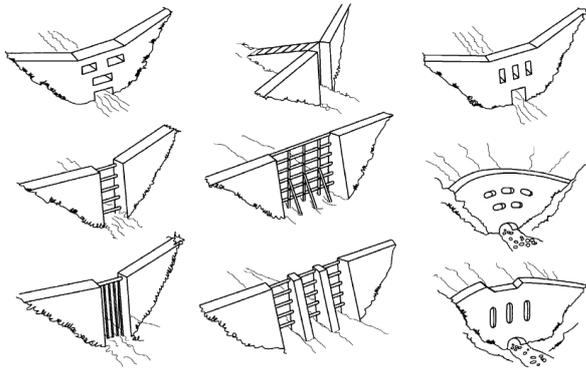


Fig. 3.23: Alcune tipologie di briglie permeabili e semipermeabili (da Lo, 2000).

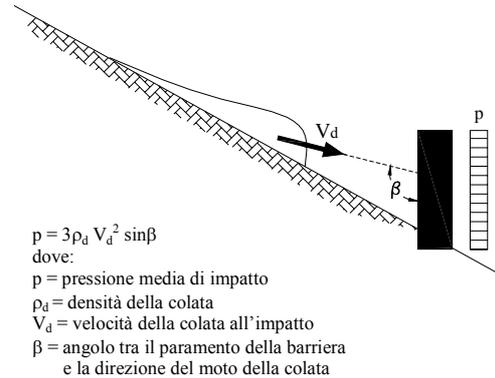


Fig. 3.24: Relazione proposta da Lo (2000) per la valutazione della pressione di impatto sulle opere di difesa passiva

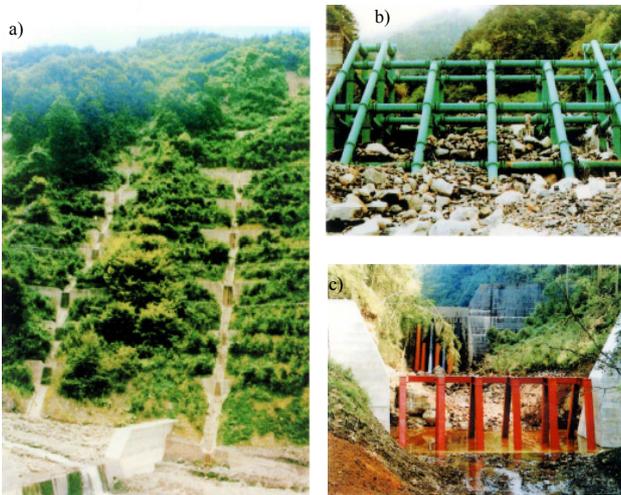


Fig. 3.25: Alcuni esempi di briglie frangicolata realizzate in Giappone: a) briglie semipermeabili nel distretto di Nagano; briglie permeabili sui fiumi Komu (b) e Yotagi (c) (da Lo, 2000).



Fig. 3.26: Speroni in calcestruzzo armato realizzati sul versante del Comune di Pagani (SA)

in fregio all'alveo principale (Fig. 3.28), i percorsi "a labirinto" (Fig. 3.29) realizzati con ostacoli artificiali o denti in calcestruzzo o di acciaio.

idrauliche di canalizzazione delle porzioni terminali degli alvei. Al loro interno sono di norma realizzati dispositivi di dissipazione quali, per esempio, le briglie permeabili a griglia (Fig. 3.27), le soglie sfioranti ricavate in fregio all'alveo principale (Fig. 3.28), i percorsi "a labirinto" (Fig. 3.29) realizzati con ostacoli artificiali o denti in calcestruzzo o di acciaio.

Il dimensionamento di questi bacini viene, di norma, effettuato in funzione della colata di progetto e segue essenzialmente i criteri dell'Idraulica. Interessanti esempi sono riportati in VanDine (1996) (Fig. 3.30), che fornisce utili indicazioni progettuali per il loro dimensionamento.

Come si è in precedenza accennato, gli interventi finalizzati alla riduzione della intensità dei fenomeni franosi possono essere affiancati e/o sostituiti da ulteriori interventi il cui scopo è quello di incidere su uno solo dei termini presenti nell'equazione (1). È questo il caso degli interventi di consolidamento degli edifici o delle strutture finalizzati alla diminuzione della loro vulnerabilità

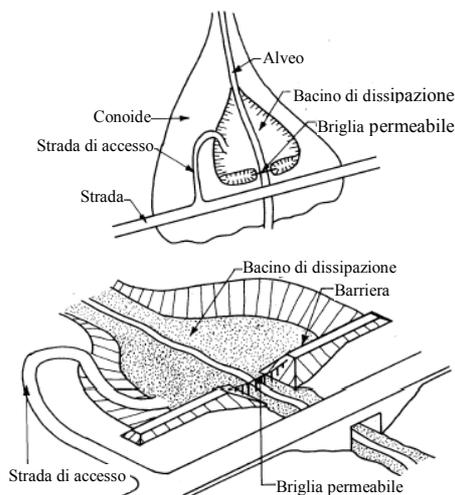


Fig. 3.27: Schema di un bacino di dissipazione (da VanDine, 1996; modificata).

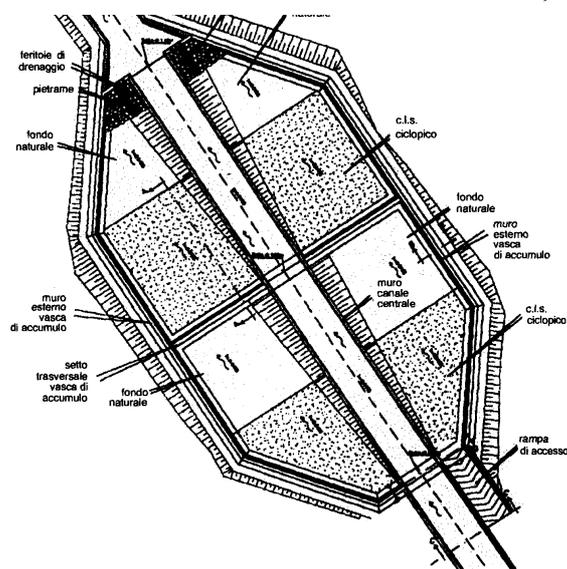


Fig. 3.28: Esempi di bacini di dissipazione.

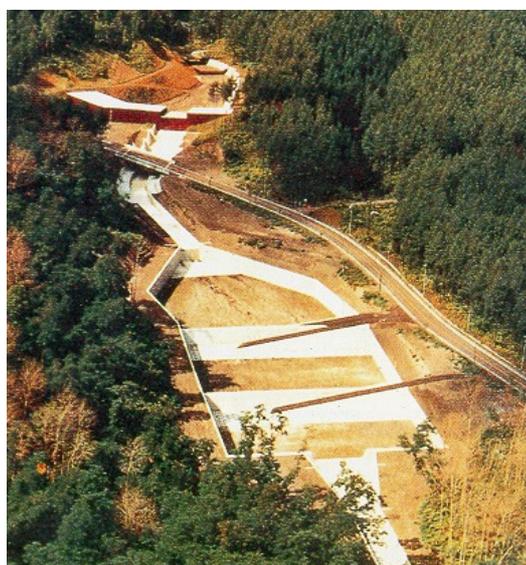


Fig. 3.28: Esempi di bacini di dissipazione.

distinti livelli di allerta, denominati rispettivamente di attenzione, preallarme ed allarme, ai quali corrispondono le procedure sinteticamente illustrate in Tab. 3.1.

È, viceversa, finalizzata ad una permanente diminuzione dei beni esposti, la progressiva delocalizzazione dei centri abitati a rischio. A tale riguardo, è particolarmente meritevole di attenzione una recente iniziativa, promossa dalla Regione Campania, che prevede incentivi economici ai nuclei familiari disposti ad abbandonare definitivamente le aree pedemontane del Vesuvio sottoposte ad un rilevante rischio vulcanico.

(Faella e Nigro, 2003a). Un ulteriore esempio è fornito dagli interventi non strutturali che mirano, in concomitanza di eventi estremi, all'allontanamento provvisorio e temporaneo della popolazione dalle zone a rischio o, in alternativa, ad una drastica e duratura riduzione dei beni esposti, intesi sia come popolazione che come patrimonio strutturale ed infrastrutturale.

Rientrano nella prima categoria i sistemi di allarme basati su valori soglia di alcune grandezze significative, ai quali corrispondono precise azioni da parte delle popolazioni residenti nonché degli organi preposti alla loro salvaguardia.

È questo, per esempio, il caso delle soglie pluviometriche (Rossi et al., 1998) adottate per i Cinque Comuni della Campania devastati, nel maggio '98, dalle colate rapide di fango, che prevedono tre

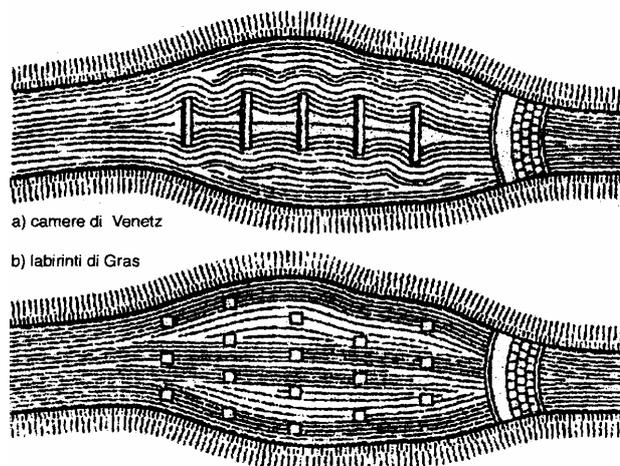


Fig. 3.29: Esempi di bacini di dissipazione tipo "labirinto" (da Scotto di Santolo, 2003; modificata).

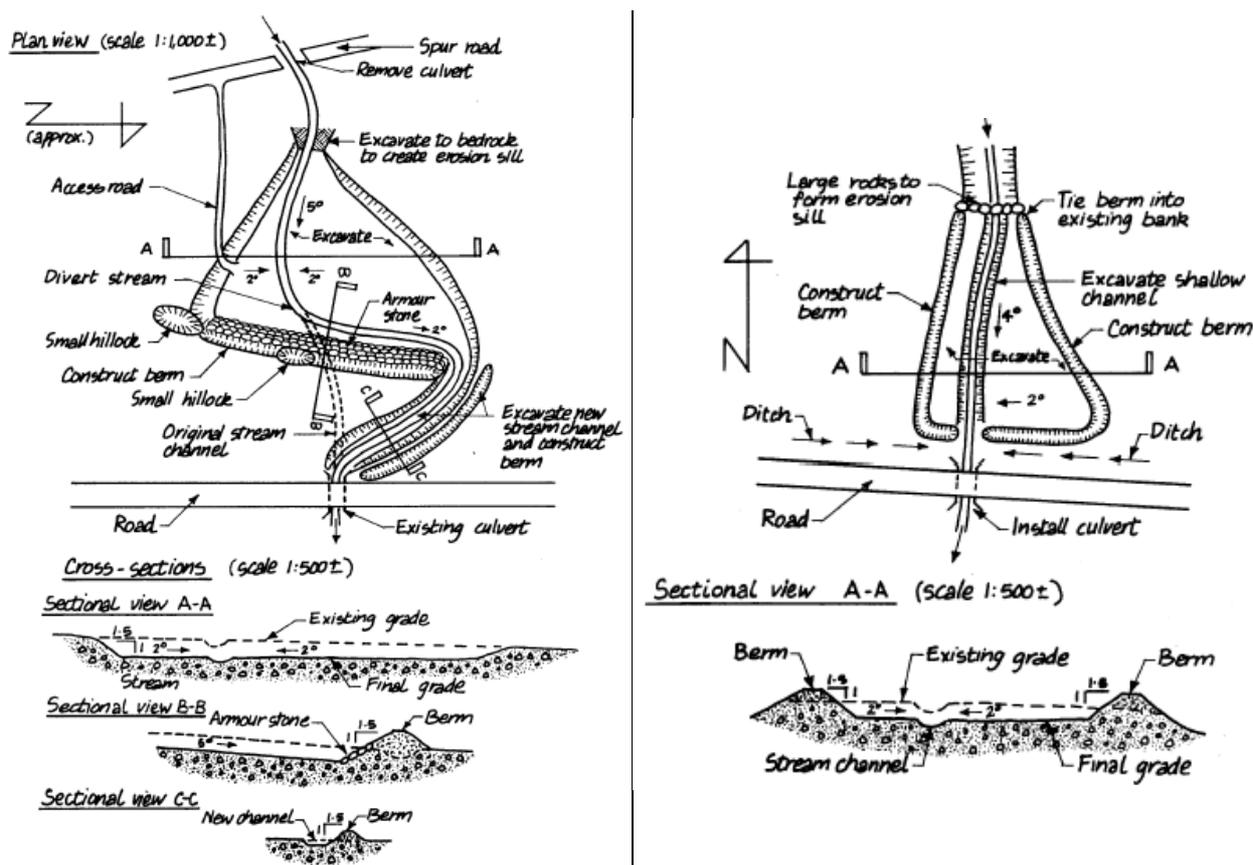


Fig. 3.30: Alcuni esempi di bacini di dissipazione realizzati nell'isola di Graham (Canada) (da VanDine, 1996)

Tab. 3.1: Livelli di allerta e procedure adottate nei Comuni coinvolti dalle colate rapide di fango del maggio '98.

Livello di allerta	Azioni corrispondenti
Attenzione	attivato con l'emissione da parte del Centro Operativo Aereo Unificato -Veglia Meteorologica del Dipartimento della Protezione Civile (COAU-Veglia Meteo - DPC) di un "Avviso" di avverse condizioni meteo o di "Bollettino" meteo, in previsione di un peggioramento della situazione meteorologica nella zona dei cinque Comuni. La sua attivazione determina la convocazione, da parte del Sindaco, del rispettivo Centro Operativo Comunale (C.O.C.) e l'apertura dello stato di presidio presso l'ufficio compartimentale di Napoli del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN).
Preallarme	attivato su segnalazione dell'Ufficio compartimentale di Napoli del SIMN quando il valore medio delle precipitazioni registrate ai pluviografi, rappresentativi di ciascun Comune, supera il corrispondente valore soglia. Vengono allertate le sole strutture della Protezione Civile.
Allarme	attivato su segnalazione dell'Ufficio compartimentale di Napoli del SIMN quando il valore medio delle precipitazioni registrate ai pluviografi, rappresentativi di ciascun Comune, supera il corrispondente valore soglia. Viene evacuata la popolazione dalle zone a rischio ad opera delle strutture della Protezione Civile secondo una prestabilita procedura di evacuazione.

4. UN ESEMPIO DI SISTEMAZIONE DEFINITIVA

Nella notte tra il 9 e il 10 settembre del 2000, in concomitanza della tristemente nota alluvione di Soverato (CZ), numerosi altri Comuni della Calabria Ionica sono stati interessati da fenomeni franosi talora di rilevante intensità, sia in termini di volumi mobilitati che di velocità raggiunte.

Uno di tali fenomeni si è manifestato nel centro abitato di S. Caterina allo Ionio (Fig. 4.1), laddove sono presenti depositi pliocenici a grana fine, superficialmente alterati e fessurati, poggianti su di un substrato anch'esso di età pliocenica, costituito da materiali limo-argillosi consistenti e sabbio limosi addensati.

I depositi in questione sono interessati da una franosità diffusa nell'ambito della quale prevalgono movimenti franosi pregressi ascrivibili, essenzialmente, a due differenti tipologie. La prima costituita da colate rapide di argilla che si originano nelle aree soggette ad erosione calanchiva; la seconda, alla quale è ascrivibile il fenomeno di Fig. 4.1, rappresentata da scorrimenti

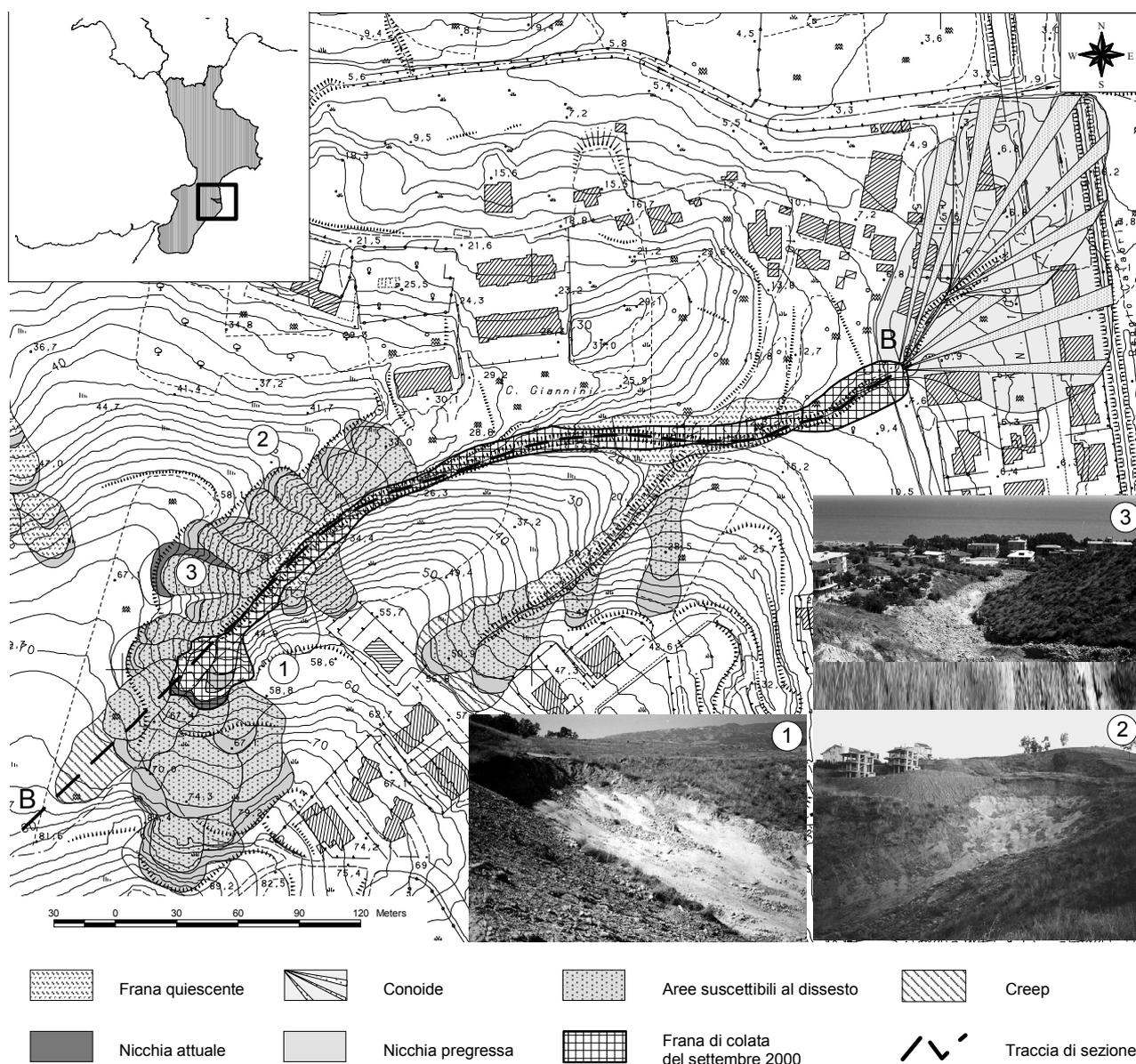


Fig. 4.1: Planimetria di una porzione del territorio comunale di S. Caterina allo Ionio (CZ) con indicazione dei dissesti del settembre 2000 e di quelli potenziali.

e, molto spesso, scorrimenti-colata, da lente a rapide. Questi ultimi, in genere localizzati in corrispondenza di lineazioni strutturali, sono caratterizzati da evidenti retrogressioni del versante con dislocazione delle masse instabilizzate lungo i sottostanti impluvi. In particolare, nel settembre del 2000, il fronte di colata ha coinvolto una strada interna di comunicazione dell'abitato, arrestandosi nel quasi totale silenzio a pochi metri da diversi edifici densamente abitati, posti a circa 400 m dalle aree di innesco.

Per la gravità del fenomeno occorso e, soprattutto, per la concreta possibilità di ulteriori eventi in grado di minacciare le costruzioni ubicate sia nelle zone di innesco che di recapito delle colate, si sono svolte, nei mesi successivi, indagini in sito e di laboratorio propedeutiche alle opere di mitigazione del rischio.

Il programma di indagini ha previsto l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo, di prove penetrometriche statiche (CPT) e dinamiche (SPT, con penetrometro leggero tipo DHL 030) ed il prelievo di numerosi campioni indisturbati per la conduzione di prove di laboratorio. Nel corso dei sondaggi si sono installati, lungo alcune verticali, piezometri a tubo aperto e piezometri Casagrande nonché tubi inclinometrici per la misura degli spostamenti in profondità. La successiva campagna di rilievi in sito è stata integrata, per quanto riguarda il regime delle pressioni neutre, da misure di suzione eseguite, sino ad un massimo di 0.60 m dal piano campagna, con l'ausilio di tensiometri portatili (tipo Quick-Draw).

L'insieme delle informazioni provenienti dall'analisi dei sondaggi a carotaggio continuo, opportunamente integrate con quelle derivanti dalle prove di laboratorio delle quali si dirà in seguito, ha consentito di riconoscere, nel sottosuolo, la presenza di tre litotipi principali:

- terreni in frana (**fr**) – costituiti da argilla limosa poco consistente, con struttura altamente rimaneggiata ed ammorbita;
- Argille limose plioceniche (**Alma**) – costituite da argilla limosa e limo argilloso da poco a moderatamente consistente, con struttura alterata, fratturata e fessurata in superficie;
- Argille limose e marnose plioceniche (**Alm**) – costituite da argilla limosa grigio azzurra da consistente a molto consistente, a luoghi con struttura marnosa.

Per quanto concerne i rapporti stratigrafici di tali litotipi, alcuni esempi sono forniti con riferimento alla sezione stratigrafica B-B di Fig. 4.2, la cui traccia è illustrata in Fig. 4.1.

Le proprietà geotecniche dei litotipi menzionati sono state dedotte sulla base di numerose prove di laboratorio che hanno riguardato la determinazione delle caratteristiche sia fisiche che meccaniche. Per quanto concerne le caratteristiche fisiche ed, in particolare, quelle granulometriche, tutti i campioni esaminati, indipendentemente dal litotipo di appartenenza, presentano percentuali delle frazioni argillose e limose tali da farli rientrare prevalentemente nel campo delle "argille con

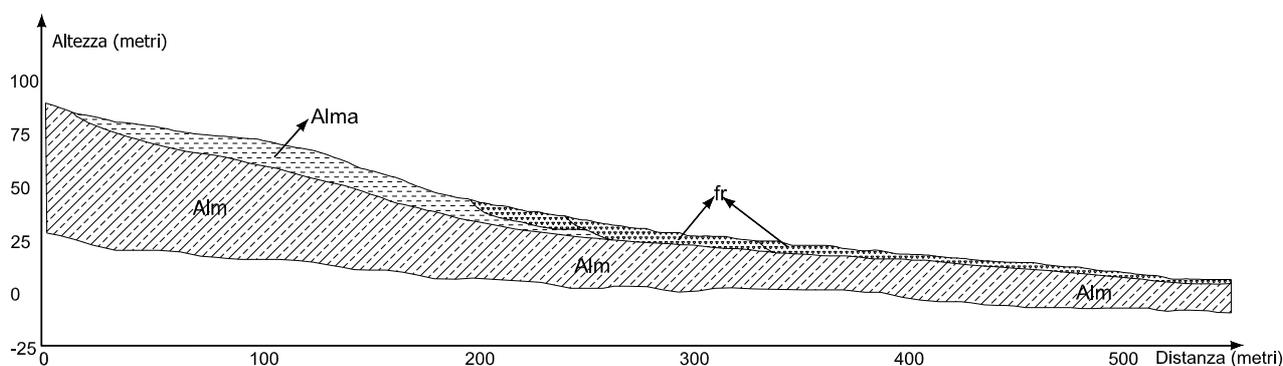


Fig. 4.2: Stratigrafia della sezione B-B.

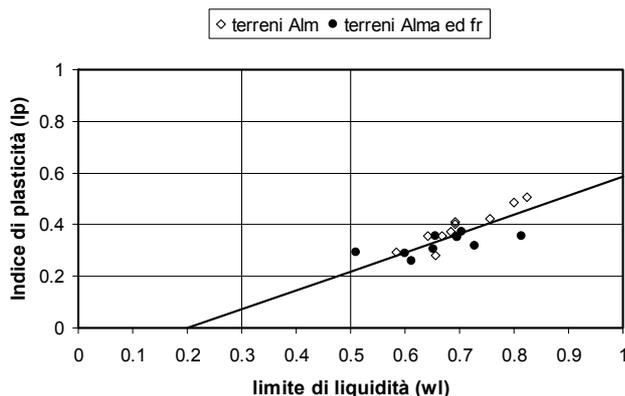


Fig. 4.3: Plasticità dei litotipi investigati.

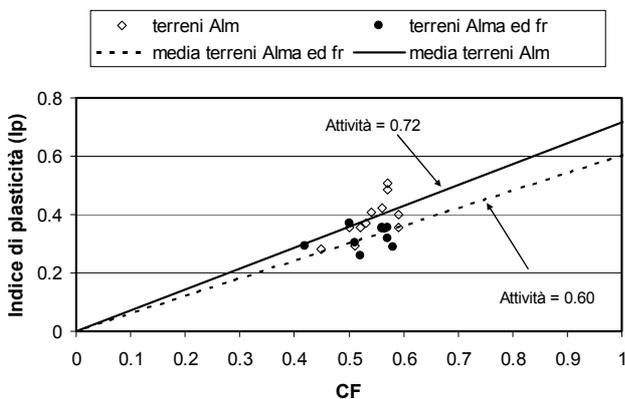


Fig. 4.4: Attività dei litotipi investigati.

Tab. 4.1: Valori minimi del grado di sovraconsolidazione dedotti dalle prove di compressione edometrica.

Campione	litotipo	profondità		OCR (min)
		da m	a m	
S10 - C1(alto)	Alma	2,0	2,5	12,95
S11 - C1	Alm	5,7	6,2	7,82
S9 - C1	Alma	3,0	3,5	6,49
S6 - C1	Alm	4,6	5,1	4,12
S2 - C1	fr	4,4	5,0	3,87
S7 - C1	Alma	4,0	4,5	2,47
S1 - C1	fr	5,4	6,0	2,04
S5 - C2	Alm	16,5	17,0	1,81
S9 - C2(alto)	Alma	15,3	15,8	1,50

di sovraconsolidazione minimo (OCR_{\min}) variabile tra 1.50 e 12.95, con valori generalmente elevati sino a circa 6.0 m dal piano campagna, a testimonianza della non trascurabile sovraconsolidazione della porzione superficiale dei terreni investigati. Le caratteristiche di deformabilità dei campioni sottoposti a prova danno luogo a valori dell'indice di compressibilità compresi tra 0.140 e 0.315, con differenze non significative nell'ambito dei diversi litotipi presenti, come si rileva dalla Fig. 4.5, nella quale i dati sperimentali sono messi a confronto con la correlazione proposta da Azzouz et al. (1976).

Per quanto concerne le caratteristiche di resistenza, nella Tab. 4.2 sono riportate, per ciascun tipo di terreno, i valori massimi e minimi dei parametri che definiscono l'involuppo a rottura, sia di picco che residuo, conseguiti attraverso prove di taglio diretto (TD) e prove triassiali drenate (CD) e consolidate non drenate (CU). Dall'esame della stessa tabella, si evince che la maggiore ampiezza

limo" ed, in misura minore, in quello dei "limi con argilla"; la percentuale della frazione sabbiosa risulta, nella stragrande maggioranza dei casi, inferiore al 5%.

I valori assunti dal grado di saturazione sono, per tutti i campioni, molto prossimi all'unità ed evidenziano, per le formazioni in sito e per tutti i periodi dell'anno, la sussistenza di condizioni di completa saturazione indipendentemente dalla profondità. Il peso dell'unità di volume assume valori contenuti in un intervallo alquanto ristretto e variabile tra 18.62 kN/m^3 e 20.56 kN/m^3 con valori minori rilevabili, prevalentemente, alle minori profondità.

Nelle Figg. 4.3 e 4.4 sono riportate, per ciascun litotipo di appartenenza, le caratteristiche di plasticità e di attività dei campioni esaminati. Come può notarsi (Fig. 4.3), non si rilevano sostanziali differenze di plasticità tra i vari litotipi che, complessivamente, ricadono in un campo intermedio tra le argille inorganiche di alta plasticità ed i limi inorganici di alta compressibilità. Anche per quanto concerne le caratteristiche di attività (Fig. 4.4) si osservano differenze alquanto contenute, con valori dell'indice di attività che si collocano nel campo tipico delle argille inattive.

Con riferimento alle proprietà meccaniche, sui campioni indisturbati si sono condotte prove edometriche, per l'individuazione delle caratteristiche di deformabilità, e prove di taglio diretto e triassiali per la definizione delle caratteristiche di resistenza.

I risultati conseguiti con le prove edometriche (Tab. 4.1) evidenziano un grado

Tab. 4.2: Valori massimi e minimi dei parametri di resistenza per i terreni in esame.

Terreno	Valori max di picco		Valori min di picco		Valori max residui		Valori min residui	
	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
fr	34.3	27.02	20.5	23.69	--	--	--	--
Alma	36.4	27.39	10.4	22.79	2.2	16.26	0.7	13.51
Alm	59.4	33.11	6.0	27.15	3.8	14.45	4.6	19.15

del campo delle resistenze osservate compete ai terreni **Alm** cui, tra l'altro, sono anche attribuibili i valori più elevati nell'ambito dei dati sperimentali acquisiti. Valori inferiori e tra loro comparabili, si osservano, invece, per i terreni denominati **fr** ed **Alma**, a testimonianza dei fenomeni di ammorbidimento subiti da tali materiali, ulteriormente confermati dalle prove triassiali non consolidate non drenate (UU) e dalle prove penetrometriche tipo CPT eseguite in sito. A parità di profondità, per i terreni **Alm** si osservano, infatti, valori di resistenza pari, in media, a circa il doppio di quelli rilevabili per i terreni **fr** ed **Alma**.

Per quanto concerne le acque sotterranee, il limitato periodo di osservazione (inferiore all'anno idrologico) non ha consentito di caratterizzarne adeguatamente il regime nel tempo e nello spazio. Purtroppo, alcune considerazioni appaiono possibili analizzando la distribuzione delle quote piezometriche, calcolate in profondità con l'ausilio dei piezometri (pressioni positive) e con i tensiometri (suzioni), negli strati più superficiali. In particolare, nella Fig. 4.6, sono riportati i valori minimi e massimi assunti da dette quote piezometriche nel periodo di osservazione ed il loro andamento presunto, per le profondità non direttamente investigate. Come si può osservare, le distribuzioni di Fig. 4.6 indicano la presenza, nel sottosuolo, di due distinti regimi di pressioni neutre con sede, rispettivamente, negli strati profondi ed in quelli più superficiali; il primo di tipo stazionario, il secondo contraddistinto, viceversa, da un regime marcatamente transitorio, funzione degli eventi pluviometrici stagionali. Circostanza quest'ultima che, unitamente alla rilevante diffusione di fratture nei terreni di copertura ed al loro elevato grado di saturazione, lascia ipotizzare l'instaurarsi, al loro interno, di una falda sospesa superficiale in concomitanza di eventi pluviometrici di breve durata ed elevata intensità, analoghi a quelli occorsi nel settembre del 2000.

In mancanza di misure dirette e tenendo conto della totale assenza di spostamenti nei corpi franosi prima e

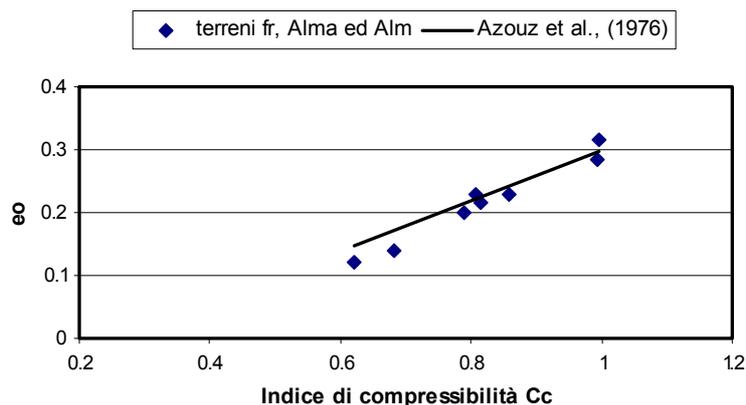
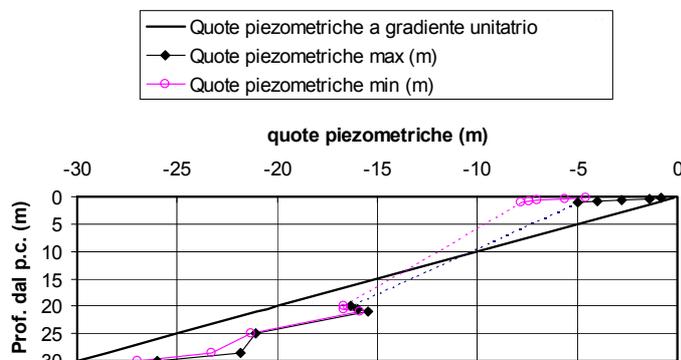
Fig. 4.5: Andamento dell'Indice di Compressibilità C_c con l'indice dei vuoti iniziali e_0 per i campioni sottoposti a prova edometrica.

Fig. 4.6: Andamento delle quote piezometriche massime e minime durante il periodo settembre - dicembre 2001.

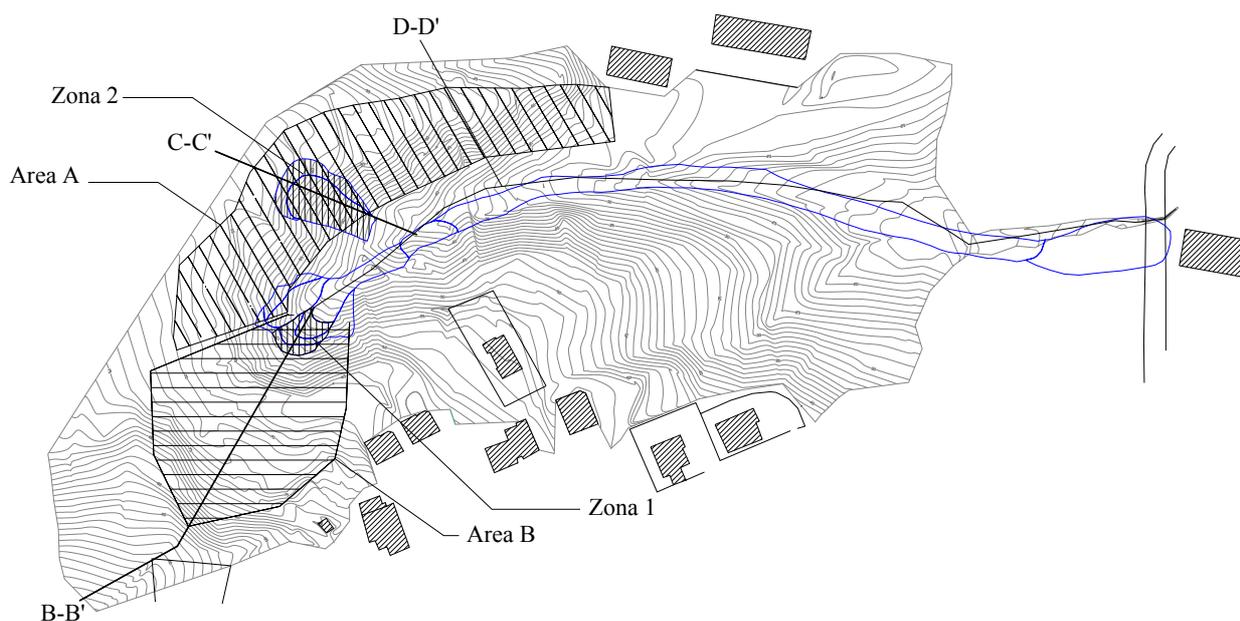


Fig. 4.7: Planimetria con indicazione delle aree e delle sezioni per le quali si sono condotte le analisi geotecniche.

dopo le fasi parossitiche, si è, quindi, resa indispensabile una approfondita analisi geotecnica dei pendii presenti all'interno dell'intera area di studio al fine di individuare, da una parte, i livelli piezometrici in grado di innescare ulteriori fenomeni di instabilità e, dall'altra, le resistenze mobilitabili nelle fasi parossitiche.

Si sono, così, prese in esame le due zone indicate, rispettivamente, con 1 e 2 nella planimetria di Fig. 4.7. La zona 1 è quella nella quale si è innescato il fenomeno franoso principale, successivamente evoluto in colata; la zona 2 è stata, invece, sede di un movimento franoso secondario, non evoluto in colata, manifestatosi contemporaneamente a quello principale. Per tali zone si sono prese a riferimento le sezioni B-B', e C-C' per lo svolgimento di analisi a ritroso orientate all'individuazione delle grandezze geotecniche in grado di oggettivare l'innescio dei movimenti. Si è, altresì, analizzata la sezione D-D' (Fig. 4.7), vale a dire la sezione caratterizzata dalla pendenza più elevata tra quelle non interessate da fenomeni franosi. In accordo con le considerazioni svolte sul regime delle pressioni neutre, in tutte le analisi i livelli di falda si sono assunti variabili tra il piano campagna ed i 5.0 metri di profondità.

Una discussione dei risultati conseguiti (Fig. 4.8), alla luce di quanto emerso dalle prove di laboratorio (Tab. 4.2) esula dagli scopi della presente relazione. È, tuttavia, di interesse sottolineare che le analisi complessivamente svolte hanno, innanzitutto, messo in luce come la condizione più verosimile, nel corso del settembre del 2000, sia stata quella dell'esistenza di una falda superficiale con superficie libera a 2.5 m dal piano campagna; tale condizione consente, infatti, di giustificare i fenomeni di instabilità occorsi lungo le sezioni B-B' e C-C' e l'assenza di movimenti lungo la sezione D-D'. Le analisi hanno, altresì, evidenziato che, nonostante la discreta omogeneità dei terreni coinvolti (Figg. 4.3 e 4.4), la resistenza mobilitata ha assunto valori diversi per le due zone alle quali afferiscono, rispettivamente, le sezioni B-B' e C-C'. Circostanza questa in accordo con i modelli messi a punto su basi geologiche, dai quali si evince che lo stadio morfoevolutivo dei versanti è molto avanzato nelle zone posizionate in testa all'alveo principale (area B di Fig. 4.7); risulta, viceversa, meno maturo lungo i fianchi laterali (area A di Fig. 4.7), dove i fenomeni di instabilità si sviluppano in terreni dalle migliori proprietà meccaniche, secondo scorrimenti rotazionali o traslativi, essenzialmente per l'approfondimento dell'alveo sottostante ad opera di fenomeni erosivi.

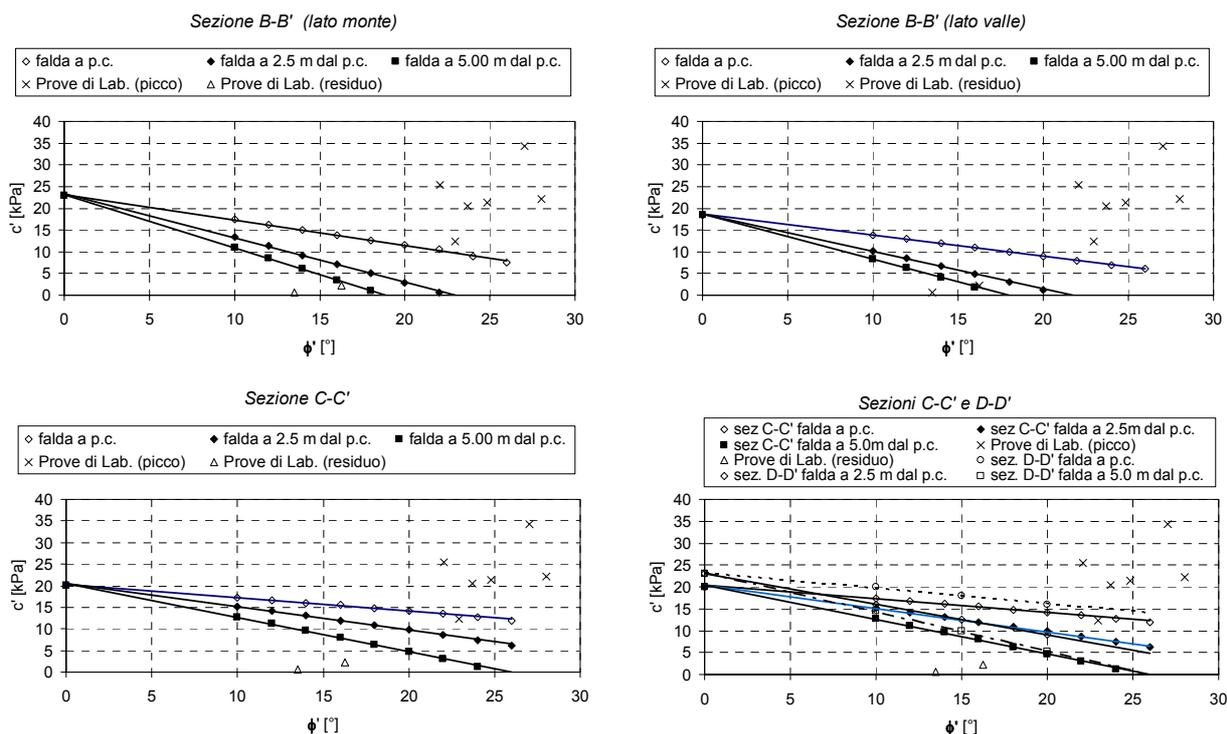


Fig. 4.8: Valori di c' e ϕ' che forniscono $F = 1$ per diverse posizioni della falda superficiale.

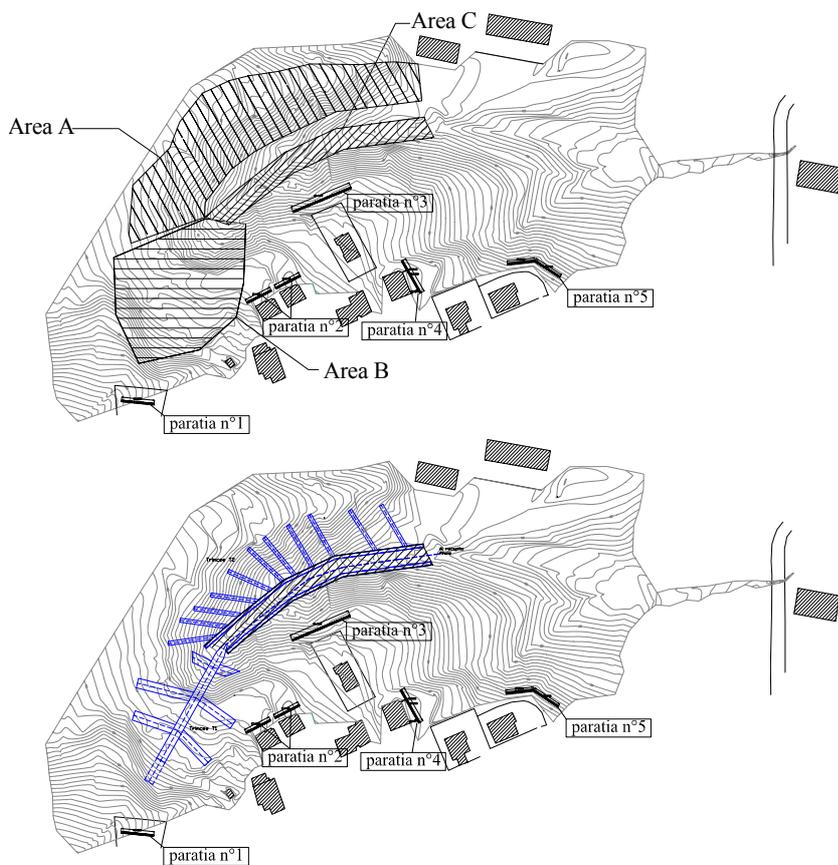


Fig. 4.9: Planimetrie degli interventi proposti.

In considerazione dell'assetto urbanistico del territorio e tenendo conto dei finanziamenti disponibili, gli interventi di mitigazione del rischio sono stati, quindi, concepiti per un completo recupero dell'area, certamente perseguibile alla luce dei risultati conseguiti con le indagini e gli studi svolti.

In particolare, per le zone sede nel passato di fenomeni franosi (sinistra orografica e testata di impluvio), gli interventi si sono indirizzati al conseguimento di adeguati margini di sicurezza nei riguardi di eventi analoghi a quelli occorsi nel settembre del 2000. In destra orografica si è, viceversa, provveduto ad indicare interventi idonei ad impedire il peggioramento delle attuali condizioni di stabilità. Si sono, inoltre, previste opere di protezione degli edifici esistenti



Fig. 4.10: Esecuzione del modellamento dei versanti con posa in opera delle trincee drenanti

orientati ad assicurare, ovunque, pendenze medie del versante non superiori ai 19° , con il duplice scopo di asportare una significativa porzione del terreno superficiale di più scadenti proprietà meccaniche e, nel contempo, di ridurre l'entità delle azioni instabilizzanti agenti sulle potenziali superfici di scorrimento (Fig. 4.10). A valle di tale rimodellamento ed al fine di contenere le escursioni della falda sospesa entro limiti compatibili con i coefficienti di sicurezza previsti dalla normativa vigente, si sono eseguite trincee drenanti, con profondità media pari a circa 3 m, disposte secondo direttrici prossime alle linee di massima pendenza (Fig. 4.10).

Al fine di scongiurare fenomeni di erosione superficiale con conseguente trascinarsi in

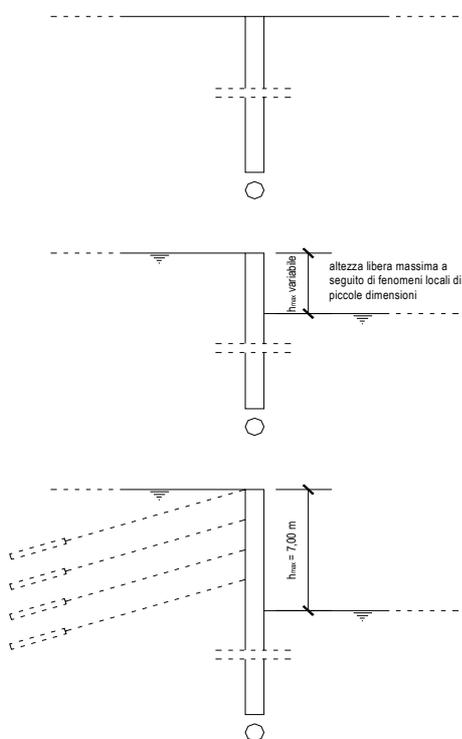


Fig. 4.11: Schemi tipo per le paratie da realizzare a protezione degli edifici.

o in via di ultimazione, così come opere propedeutiche alla rimozione di alcuni rilevati, di non trascurabili dimensioni, che aggravano, localmente, situazioni già parzialmente compromesse. Infine, si sono indicate opere di sistemazione e stabilizzazione del fondo alveo, in grado di assicurare un efficiente allontanamento delle acque ruscellanti e di evitare, nel contempo, fenomeni di erosione e/o di accumulo da parte dei materiali trasportati dalle acque dilavanti.

Le zone nelle quali si sono concentrate le diverse tipologie di intervento sono indicate nella Fig. 4.9; le loro caratteristiche salienti sono qui di seguito sintetizzate.

Per quanto attiene l'area A (Fig. 4.9), sono stati, innanzitutto, indicati lavori di sbancamento

alveo dei materiali dislocati, nonché per contenere, nel tempo, gli inevitabili fenomeni di alterazione dei terreni più superficiali, si è prevista l'adozione di materassi tipo "Reno", di spessore non superiore ai 0.30 m, da disporre lungo le aree prossime al piede del versante. A monte dei materassi, si è prevista la realizzazione di canalette superficiali, per un razionale smaltimento delle acque meteoriche, nonché la piantumazione di essenze arboree finalizzata a ridurre l'erosione superficiale e limitare ulteriormente l'infiltrazione delle acque ruscellanti nel sottosuolo.

Per quanto concerne la zona B (Fig. 4.9), gli interventi prevedono una preliminare regolarizzazione della zona coinvolta dall'evento del settembre 2000, con rimodellamenti locali delle scarpe e degli accumuli. Si sono, quindi, programmate trincee drenanti (Fig. 4.9), di profondità massima pari a 6.0 m circa dal piano campagna, per la riduzione del regime delle pressioni neutre in concomitanza di eventi pluviometrici critici, oltre che per il miglioramento delle caratteristiche di resistenza lungo potenziali superfici di scorrimento.

Per la presenza di un serbatoio idrico nella porzione apicale dell'area B e delle già citate strutture in destra

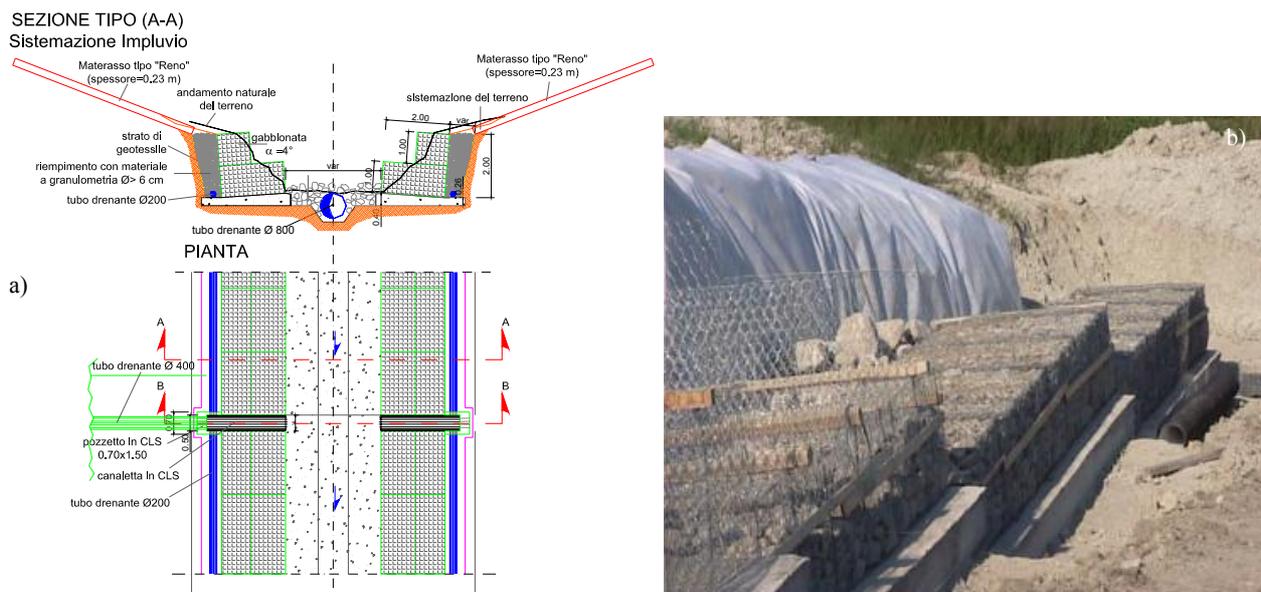


Fig. 4.12: a) schema dell'intervento lungo l'impluvio; b) fase esecutiva.

orografica, si è prevista la realizzazione di idonee opere di sostegno (Fig. 4.9), consistenti in paratie completamente interrato, costituite da pali non accostati, aventi una duplice funzione. Da una parte salvaguardare gli edifici da eventuali fenomeni di instabilità di neoformazione; dall'altra, consentire la rimozione, con successiva ricostruzione a regola d'arte, dei rilevati esistenti.

Lo schema assunto a riferimento per il dimensionamento delle paratie è illustrato nella Fig. 4.11 che evidenzia la possibilità di una loro futura integrazione con più file di tiranti, nell'eventualità di fenomeni di instabilità locali, conseguenti al continuo mutamento dei luoghi causato dalle attività antropiche. Per le zone situate in destra orografica (Fig. 4.9), l'intervento con opere di sostegno è stato, a sua volta, integrato con materassi "Reno" aventi le funzioni in precedenza illustrate.

Le opere previste per la sistemazione e stabilizzazione dell'alveo principale (Area C di Fig. 4.9) aventi le finalità in precedenza richiamate, sono illustrate in Fig. 4.12 e consistono in:

- rimodellamento del fondo alveo e delle sponde con realizzazione di trincee longitudinali per l'allontanamento delle acque;
- realizzazione di gabbionature a protezione delle sponde.

Dal punto di vista esecutivo, si è contemplato il preliminare rimodellamento delle sponde e del fondo alveo, la posa in opera del collettore principale insieme con i relativi collegamenti idraulici e la realizzazione delle gabbionature secondo conci longitudinali di lunghezza variabile, debolmente inclinati sull'orizzontale rispetto al piano ortogonale all'asse alveo (Fig. 4.12). Al fine di consentire un adeguato controllo sull'efficienza di tali opere nel tempo, sono stati previsti pozzetti ispezionabili in corrispondenza dei salti di livello tra un concio e quello successivo.

5. UN ESEMPIO DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO CON INTERVENTI STRUTTURALI E NON STRUTTURALI

Nei giorni 5 e 6 maggio 1998, a seguito degli eventi pluviometrici che hanno investito l'Appennino Campano, si sono innescate numerose colate rapide di fango nei depositi piroclastici presenti sui

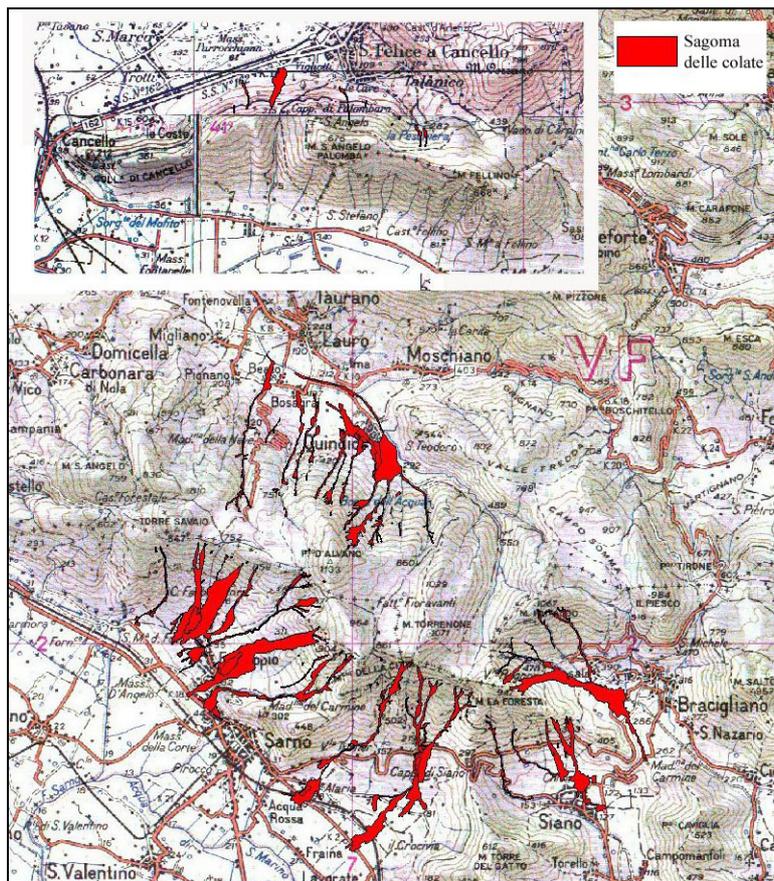


Fig. 5.1: Sagoma delle principali colate rapide di fango del maggio '98 nella Regione Campania (da Cascini, 2003a).

versanti di alcuni Comuni delle Province di Avellino, Caserta e Salerno. Particolarmente colpiti, con perdita di vite umane ed ingenti danni alle abitazioni ed alle infrastrutture, sono risultati i Comuni ubicati lungo la fascia pedemontana del rilievo montuoso del Pizzo d'Alvano (Bracigliano, Quindici, Sarno e Siano) ed il Comune di S. Felice a Cancellò, collocato al piede della omonima dorsale montuosa. Una visione di insieme dei fenomeni è illustrata in Fig. 5.1, mentre una stima preliminare dei volumi complessivamente mobilitati, condotta nei giorni immediatamente successivi gli eventi, è riportata in Tab. 5.1. Da sottolineare che successive analisi hanno messo in luce il rilevante apporto fornito dai volumi di materiale eroso lungo i tratti pedemontani, la cui entità è risultata, in molti casi, comparabile con quella dei volumi coinvolti nei fenomeni di primo distacco (U.O. 2.38, 1998a; Cascini, 2003a).

Le conseguenze delle colate rapide di fango, che nelle zone pedemontane hanno raggiunte velocità massime di 20 m/s (Faella e Nigro, 2003b), sono state catastrofiche sia in termini di perdite di vite umane (Tab. 5.2), che di danni al patrimonio strutturale ed infrastrutturale (Fig. 5.2). Per far fronte alla grave emergenza venutasi a creare, nei giorni immediatamente successivi gli eventi, il Dipartimento della Protezione Civile avviò numerose azioni coinvolgendo, per gli aspetti più squisitamente scientifici, l'Unità Operativa 2.38 (U.O. 2.38) del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (G.N.D.C.I.) del C.N.R., operante presso l'Università degli Studi di

Tab. 5.1: Stima preliminare dei volumi complessivamente mobilitati dalle colate rapide di fango (da Cascini, 2003a).

Comune	Volume mobilitato (m ³)
Bracigliano	424.832
Sarno	1124.980
Quindici	1.379.513
Siano	262.706
Totale:	3.192.031

Tab. 5.2: Vittime causate dagli eventi del maggio '98 (da Cascini, 2003a)

Comune	N° di vittime
Bracigliano	6
Sarno	137
Quindici	11
S. Felice a Cancellò	1
Siano	5
Totale:	160



Fig. 5.2: Alcuni danni causati dalle colate nel Comune di Sarno (da Cascini, 2003a).

Salerno. In particolare, i compiti complessivamente attribuiti all'Unità Operativa hanno riguardato: la valutazione della sussistenza o meno di un rischio residuo nei territori dei cinque Comuni; la perimetrazione delle aree risultate a rischio residuo e la definizione di una soglia pluviometrica di allarme per l'evacuazione temporanea della popolazione; la redazione di linee guida per gli interventi strutturali di mitigazione del rischio; la istituzione di un Presidio Territoriale nei Comuni a rischio; la individuazione, nella Regione Campania, delle aree sottoposte ad un rischio analogo a quello dei Comuni colpiti dalle colate del maggio '98.

Con riferimento al primo quesito, vale a dire la sussistenza o meno di un rischio residuo, l'U.O. 2.38 predispose, in tempi rapidissimi, approfonditi rilievi delle aree di innesco, di flusso, di invasione e di accumulo delle colate rapide di fango, nonché delle zone instabili, sia all'interno che al contorno di suddette aree. Accanto alle attività di campo, si condussero, altresì, con l'ausilio della fotointerpretazione, analisi geologiche e geomorfologiche che consentirono di pervenire ad una preliminare caratterizzazione dei fenomeni occorsi nel maggio '98, attraverso l'individuazione di puntuali corrispondenze fra aree sorgenti, posizionate nelle porzioni sommitali dei versanti, e le aree di recapito localizzate nei conoidi recenti e/o antichi delle zone pedemontane.

L'insieme delle indagini svolte consentì di stabilire che soltanto una porzione dei depositi piroclastici in quota si era mobilitata; mostrò, altresì, la presenza di numerose evidenze di dissesto incipiente ed, in particolare, un gran numero di fratture aperte nelle coltri piroclastiche, sia nelle immediate adiacenze delle frane, che in aree non interessate da distacchi.

Dal momento che tutti gli elementi acquisiti evidenziavano la sussistenza di un rischio residuo per la popolazione, il Dipartimento della Protezione Civile richiese di redigere la "Carta del Rischio Residuo". Rimandando a Cascini (2003) per i criteri adottati, sinteticamente riportati in Fig.

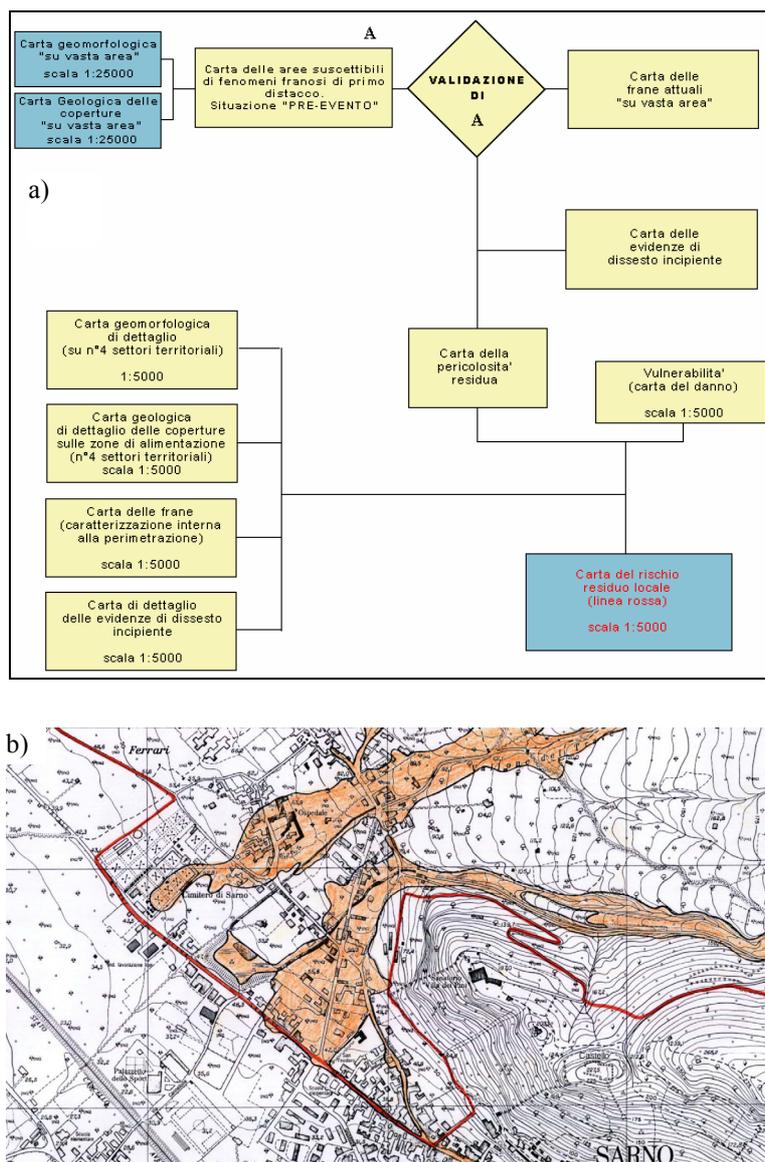


Fig. 5.3: a) Schema metodologico e b) perimetrazione delle aree a rischio residuo ("Linea Rossa"); Comune di Sarno (da Cascini et al., 2003).

relative linee di indirizzo per le successive progettazioni.

Fu, quindi, istituita una Commissione che definì gli interventi da realizzare sulla scorta della documentazione prodotta a seguito dei numerosi sopralluoghi eseguiti dai componenti l'U.O. 2.38, sia all'interno che all'esterno delle aree coinvolte dalle colate di fango. In particolare, come illustrato in Cascini (2003a), di cui nel seguito si riporta un'ampia sintesi, gli interventi furono articolati in tre differenti fasi:

Interventi di I Fase

- Ripristino della rete drenante all'interno delle aree a rischio;
- Manutenzione straordinaria della rete drenante all'esterno delle aree a rischio;
- Eliminazione del pericolo imminente.

Interventi di II Fase

- Adeguamento della rete drenante all'interno delle aree a rischio.

5.3a, detto elaborato (Fig. 5.3b) scaturì dall'insieme di tutte le informazioni acquisite durante i primi 11 giorni di attività, sintetizzate in tre tematismi inizialmente redatti a scala 1:5.000, rispettivamente denominati "Carta Geologica", Carta Geomorfologica" e "Carta delle Frane Attuali" (U.O. 2.38, 1998a; Cascini, 2003a).

Unitamente alla perimetrazione delle aree a rischio residuo, il 18 maggio 1998 fu fornita una prima soglia pluviometrica di allarme per la salvaguardia delle popolazioni residenti all'interno di tali aree. Soglia che si è andata progressivamente affinando nel tempo (Versace, 2001) e che ha rappresentato il punto di riferimento per la redazione, da parte del Dipartimento della Protezione Civile, de Piano Interprovinciale di Emergenza (novembre '98) e del suo successivo aggiornamento (dicembre '98).

Immediatamente a valle della redazione della Carta del Rischio Residuo, le successive attività affidate all'U.O. 2.38 – da espletare entro il 5 luglio 1998 con la collaborazione dei Servizi Tecnici Nazionali e delle Autorità di Bacino territorialmente competenti – riguardarono la individuazione degli interventi strutturali di mitigazione del rischio nei territori dei cinque comuni, nonché la redazione delle

Interventi di III Fase

- Realizzazione di opere sia strutturali che non strutturali finalizzate alla mitigazione del rischio.

Gli interventi di I Fase si resero necessari per far fronte all'intenso dissesto in cui versava la rete di drenaggio superficiale, sia principale che secondaria, con conseguente notevole pericolo incombente causato dal mancato convogliamento delle acque ruscellanti nei recapiti naturali ed artificiali preposti allo scopo. La obliterazione delle preesistenti linee di deflusso delle acque superficiali, conseguenza degli imponenti fenomeni occorsi il 5 e 6 maggio, nonché la elevata erodibilità dei depositi di colata facevano, infatti, temere che le portate idriche provenienti dai sovrastanti versanti potessero dare origine a percorsi di deflusso del tutto imprevedibili, con altrettanto imprevedibili recapiti finali. Si ritenne, pertanto, indispensabile, un'accurata opera di pulizia della rete drenante esistente all'interno delle aree invase dalle colate.

Al fine di garantire un adeguato convogliamento delle acque nelle zone poste all'esterno di tali aree, si rese, inoltre, necessario valutare la funzionalità dei canali che si diramavano dalle zone pedemontane. A tale scopo, si eseguì un accurato rilievo dello stato dei luoghi che, complessivamente, interessò le opere idrauliche e più di 150 km di canali. Gli elementi acquisiti evidenziarono una elevata inefficienza del sistema drenante, soprattutto per la diffusa presenza, all'interno dei canali, di materiali di qualsiasi natura che ne limitavano la sezione idraulica fino, in



Fig. 5.4: Esempi di degrado della rete di canali esterna ai territori dei cinque Comuni (da Cascini, 2003a).

alcuni casi, ad ostruirla completamente (Fig. 5.4).

La Commissione interventi evidenziò, quindi, la necessità di una manutenzione straordinaria, orientata al ripristino di:

- sezione originaria degli alvei;
- opere longitudinali di difesa spondale;
- opere trasversali di stabilizzazione del fondo alveo (briglie o soglie);
- manufatti di attraversamento;
- recapiti delle acque superficiali.

Nell'ambito dell'attività della I Fase l'U.O. 2.38 verificò, inoltre, tutte le segnalazioni pervenute in merito a situazioni di pericolo incombente all'interno delle zone a rischio inteso, ai sensi dell'Ordinanza n. 2789/98, come quel pericolo per il quale era necessario "disporre l'attuazione di ulteriori immediati interventi prioritari, urgenti ed indifferibili, finalizzati al soccorso della popolazione, alla salvaguardia della pubblica incolumità e per la ripresa delle normali condizioni di vita".

Esempi tipici erano rappresentati dalla presenza, all'interno degli impluvi, di massi di

significative dimensioni in condizioni di equilibrio precario, dalla parziale o totale perdita di funzionalità da parte di opere di sostegno a protezione di sedi stradali e così via.

Per ogni situazione di pericolo imminente furono acquisiti i verbali di sopralluogo, le relazioni tecniche a qualunque titolo prodotte e le segnalazioni degli Enti competenti. Laddove gli elementi disponibili furono ritenuti non sufficientemente esaustivi, si eseguirono verifiche in loco con personale tecnico dell'Unità Operativa, che provvedeva a compilare schede appositamente predisposte nelle quali venivano riportati uno stralcio planimetrico dell'area, la documentazione fotografica e le note esplicative sul dissesto. Le tipologie degli interventi proposti a valle della I Fase sono riportati, suddivisi per comune, nella Tab. 5.3.

I rilievi eseguiti nella I Fase avevano chiaramente evidenziato la mancanza di un adeguato "disegno idraulico" della rete drenante; in molti casi, infatti, le sezioni di deflusso erano poco idonee allo smaltimento delle portate defluenti, con alvei non sempre correttamente posizionati nei riguardi del loro sviluppo plano-altimetrico ed, in alcuni casi, altrettanto non correttamente utilizzati. Circostanza, quest'ultima, dimostrata dalla presenza dei cosiddetti alvei strada che davano sistematicamente luogo ad allagamenti delle aree urbanizzate, con conseguenti ulteriori disagi per le popolazioni e per i mezzi d'opera.

Ulteriori elementi di squilibrio erano rappresentati da: bruschi restringimenti della sezione idraulica, di norma in corrispondenza di manufatti di attraversamento; non corretta dislocazione delle briglie di fondo, a volte ubicate a distanza troppo ravvicinata rispetto ad altri manufatti trasversali; mancata realizzazione di elementi di raccordo nei punti di confluenza di due o più alvei.

Sulla base dello stato dei luoghi, la Commissione individuò, quindi, alcune tipologie di interventi provvisori (Fase II), al fine di migliorare il convogliamento delle acque ruscellanti verso i recapiti finali, posizionati all'interno o immediatamente a valle delle aree invase dalle colate.

Tali recapiti erano costituiti, per la rete idrografica dei Comuni di Bracigliano, Sarno e Siano, da vasche di raccolta che consentivano la decantazione del materiale solido trasportato, la laminazione delle piene e la riduzione dei volumi idrici defluenti a valle attraverso la loro parziale dispersione nel sottosuolo. Per il Comune di Quindici, invece, il recapito finale era rappresentato dal Lago omonimo, a sua volta sversante, dopo un percorso di circa 17 km, nell'alveo dei Regi Lagni.

Sulla base di un attento esame delle caratteristiche della rete idrografica esistente, la Commissione propose, innanzitutto, di realizzare briglie allo sbocco dei valloni, per limitare l'approfondimento delle incisioni nella parte terminale di questi ultimi ed assicurare un adeguato contenimento delle portate solide provenienti dai depositi di colata presenti lungo gli impluvi naturali.

Tab. 5.3: Tipologia degli interventi proposti al termine della I Fase (da Cascini, 2003a).

Comune	Tipologia di intervento
QUINDICI	Ripristino alvei – Risagomatura cumuli di frana – Convogliamento acque – Chiusura di strade secondarie - Disgaggio di massi pericolanti
BRACIGLIANO	Stabilizzazione di frane pregresse e/o aggravate - Disgaggio di massi pericolanti
SIANO	Pulizia canali – Risagomatura rilevati – Rimozione cumuli di frana – Ripristino opere di contenimento – Disgaggio massi pericolanti
S.FELICE C.	Rimozione cumuli di frana – Interventi di consolidamento su rilevato stradale e su muro di contenimento – disgaggio massi pericolanti
SARNO	Rimozione di cumuli di frana – Disgaggio massi pericolanti – Sistemazione idraulica canale immissario vasca del vallone S.Lucia

sino ai recapiti finali vennero, invece, indicate sia opere di adeguamento e/o di ricostruzione della rete esistente, sia opere da realizzarsi ex novo (Fig. 5.5).

Con riferimento a queste ultime, venne evidenziata l'opportunità di realizzare nuovi tratti di canale, per la esecuzione dei quali veniva raccomandato il mantenimento, da monte verso valle, di una sezione idraulica costante ed uno sviluppo planimetrico quanto più possibile

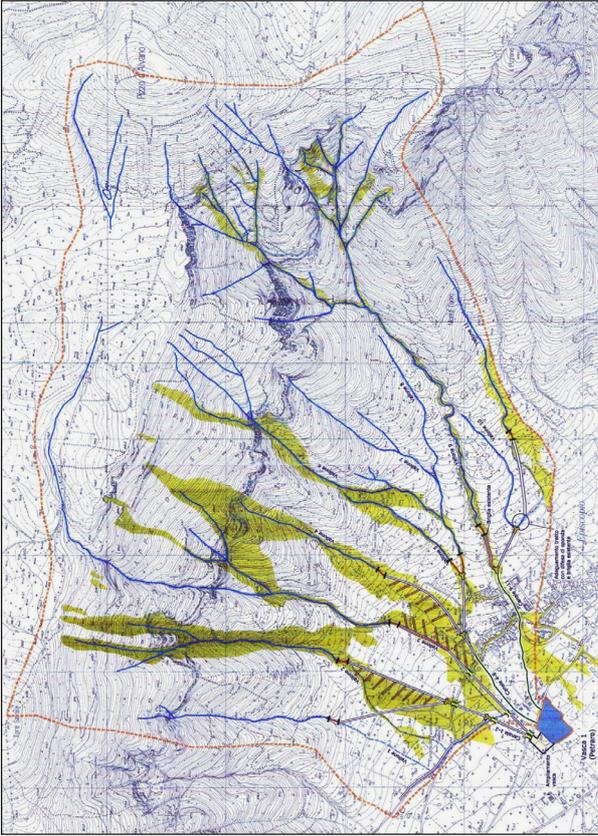


Fig. 5.5: Esempio di adeguamento della rete drenante all'interno delle aree a rischio, Comune di Sarno; (da U.O. 2.38, 1998a).

rettilineo. Ulteriori interventi proposti erano rappresentati da opere di difesa longitudinali e trasversali, nonché manufatti di imbocco, attraversamenti e confluenze. Con riferimento ai recapiti finali ed in previsione del presumibile aumento delle portate e dei volumi affluenti, conseguenti al parziale denudamento dei versanti, la Commissione evidenziò, infine, l'opportunità di verificare le possibilità di un incremento delle loro dimensioni e la necessità di porre in essere azioni periodiche orientate alla loro costante manutenzione.

Per la progettazione esecutiva delle opere proposte, soprattutto con riferimento alle briglie di testata ed ai manufatti principali, la Commissione raccomandò l'esecuzione di adeguate indagini, nell'ambito delle quali un ruolo importante veniva assegnato a quelle di tipo geotecnico, per la ricostruzione della costituzione stratigrafica del sottosuolo e la definizione delle proprietà fisico – meccaniche dei litotipi in esso presenti.

Con riferimento agli interventi della III fase, la loro definizione apparve, fin dall'inizio, non perseguibile nei tempi concessi, per la rilevante estensione del territorio ed il non approfondito livello delle conoscenze sui fattori

predisponenti e le cause innescanti la franosità, oltre che sui meccanismi di innesco, di propagazione e di evoluzione delle colate rapide di fango. La Commissione si limitò, pertanto, ad individuare le tipologie dei possibili interventi di mitigazione ed a redigere Linee Guida per il loro corretto dimensionamento, rimandando ai progettisti l'acquisizione delle informazioni necessarie per il dimensionamento delle opere.

Partendo dalla considerazione che l'estensione e la complessità del fenomeno non consentivano di annullare completamente alcuno dei fattori di rischio con un'unica tipologia di opere e con costi ragionevoli, la Commissione adottò una strategia finalizzata al contemporaneo conseguimento dei seguenti obiettivi:

- riduzione della frequenza e della intensità dei fenomeni;
- mitigazione dell'impatto dei fenomeni sulle strutture e sulle infrastrutture.

In ragione degli obiettivi che si intendevano perseguire, le tipologie di intervento furono, rispettivamente, classificate in accordo con quanto discusso nel paragrafo 3, in opere di difesa attiva ed opere di difesa passiva (Fig. 5.6): le prime finalizzate a limitare l'innesco dei fenomeni di primo distacco e la successiva trasformazione in colate di fango; le seconde rivolte a ridurre gli effetti delle colate nelle zone pedemontane.

Per quanto riguarda le opere di difesa attiva, si consigliarono, in particolare, interventi simili a quelli descritti in precedenza (paragrafo 3); si evidenziò, altresì, la necessità di far scaturire le scelte progettuali da una chiara conoscenza dei luoghi, da conseguirsi attraverso l'esecuzione di indagini in sito ed in laboratorio, nonché da una adeguata modellazione dei

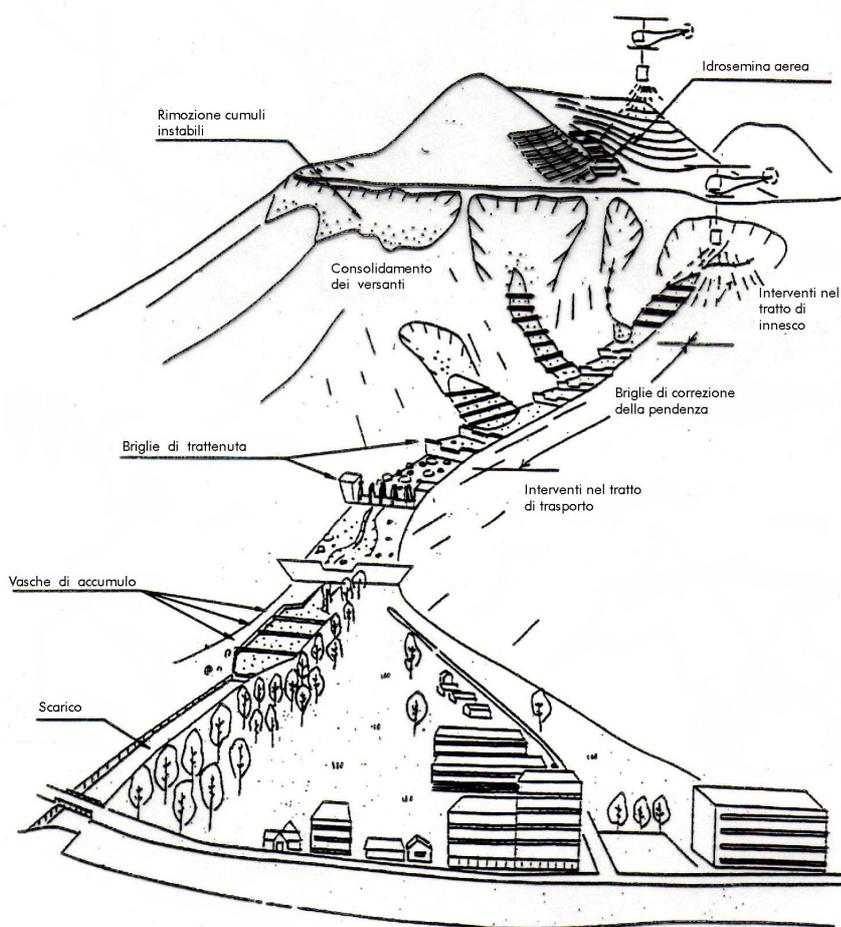


Fig. 5.6: Opere di difesa, attiva e passiva, previste nel piano degli interventi (da HBJLS, 1985; modificata).

fenomeni di primo distacco attraverso l'utilizzo di modelli ingegneristici da validare, preventivamente, attraverso l'analisi a ritroso dei fenomeni occorsi nel maggio '98.

Inoltre, la stessa Commissione invitava a porre particolare attenzione alle fasi esecutive, in quanto le opere propedeutiche e/o a supporto di quelle principali (ad esempio piste di accesso ed altre opere provvisorie) potevano costituire, soprattutto nelle zone molto acclivi, fattori predisponenti ulteriori movimenti franosi.

Con riferimento agli interventi di difesa passiva, la Commissione individuò alcune tipologie di opere finalizzate a salvaguardare i manufatti e le infrastrutture dall'impatto delle colate.

In particolare, assumendo che il comportamento meccanico del materiale mobilitato potesse essere rappresentato da un fluido ad elevata viscosità dotato di grande capacità erosiva, si indicarono gli interventi di tipo idraulico da realizzare, consistenti

fundamentalmente in canali, briglie ed opere di raccolta, orientate all'assolvimento, nel complesso o in parte, di diverse funzioni quali la canalizzazione dei flussi fangosi, la riduzione di energia della massa in movimento, il suo arresto o la diversione.

Per quanto riguarda i canali artificiali, da realizzarsi all'interno degli impluvi, la Commissione evidenziò la necessità di un'accurata stima di alcune grandezze significative (velocità, portata volumi in movimento e capacità erosiva delle masse in gioco), da effettuare sulla base di approfondite indagini geologiche, geotecniche ed idrauliche; per tali opere, veniva, inoltre, consigliato di prevedere valori costanti della pendenza di fondo e la realizzazione di arginature dotate di congrui franchi di sicurezza da valutarsi in funzione del massimo evento atteso.

Pur con tutti i limiti delle Linee Guida prodotte dall'U.O. 2.38, in parte evidenziati dal continuo e pressante richiamo alla necessità di adeguati approfondimenti delle conoscenze, appare doveroso sottolineare che esse hanno costituito il continuo punto di riferimento per la redazione del "Piano degli Interventi Infrastrutturali di emergenza e di prima sistemazione idrogeologica" elaborato dal Dipartimento della Protezione Civile. Detto Piano, tuttora vigente, ha consentito, tra l'altro, di precisare i finanziamenti da stanziare, circa 500ML di Euro, per la messa in sicurezza dei cinque Comuni ed ha dato l'avvio alle successive procedure di progettazione delle opere e di assegnazione dei lavori, parte dei quali sono stati completamente ultimati.

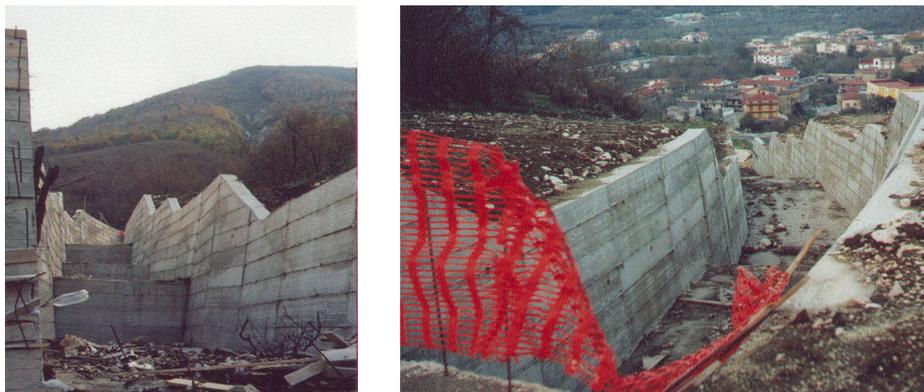


Fig. 5.7: Alcuni canali artificiali realizzati negli impluvi di Quindici (AV).



Fig. 5.8: Briglie realizzate lungo gli impluvi di alcuni bacini del Comune di Quindici.

In particolare, ad oggi risultano completati (Versace, 2001) la stragrande maggioranza delle opere di difesa passiva (canali, vasche, bacini di dissipazione, etc.) di cui, in Fig. 5.7, sono forniti alcuni esempi, nonché gli interventi di difesa attiva degli alvei, finalizzati ad impedire fenomeni erosivi nei depositi ivi presenti (Fig. 5.8). Non sono, viceversa, ancora iniziate le progettazioni degli interventi attivi di consolidamento dei versanti, per le rilevanti difficoltà che tali progettazioni comportano.

Essendo ben chiare tali difficoltà all'atto della presenta-

zione delle Linee Guida, fin dall'estate del 1998, l'U.O. 2.38 avviò numerose indagini su molteplici aspetti tematici quali: la geologia, la geomorfologia, l'idrogeologia, il regime delle pressioni neutre nelle coltri piroclastiche e le loro proprietà meccaniche, lo sviluppo dei centri urbani e la ripetitività dei fenomeni franosi nel tempo, la vulnerabilità degli edifici nei confronti degli eventi del maggio '98 e così via.

I primi quattro temi si sono approfonditi con il supporto del Presidio Territoriale, una struttura nata in seno all'U.O. 2.38 in ottemperanza all'Ordinanza del Ministero dell'Interno n. 2787/98 per supportare le attività poste in essere dagli organismi deputati alla gestione operativa dell'emergenza (Dipartimento della Protezione Civile, Commissariato di Governo, Centri Operativi Comunali). Le molteplici attività di campo svolte dal Presidio si sono concretizzate nella redazione, a scala 1:5000, di numerose carte tematiche, tra le quali la Carta degli spessori delle Coperture, la Carta di Zonazione Geologica, la Carta Litostrutturale e la Carta delle Sorgenti e dei Punti d'Acqua (Cascini et al., 2003).

Detta cartografia, di cui un esempio è fornito in Fig. 5.9, è risultata particolarmente utile per numerosi scopi. Per esempio, in ben due occasioni, fu possibile non evacuare le popolazioni residenti nelle zone a rischio, nonostante fosse stata superata la soglia di allarme; in tali occasioni, infatti, gli indicatori geologici e geomorfologici di franosità, tenuti sotto costante controllo da parte della struttura di Presidio, non evidenziarono alcun pericolo imminente su tutto il territorio di interesse.

Le carte tematiche hanno, d'altra parte, consentito di evidenziare, a piccola scala, il ruolo giocato sugli eventi del maggio '98 da alcune particolari unità geomorfologiche (gli Zero Order Basins), oltre che dalle emergenze idriche localizzate provenienti dal substrato calcareo e localizzate nelle porzioni medio-alte dei versanti. Sulla base di tali risultanze, opportunamente

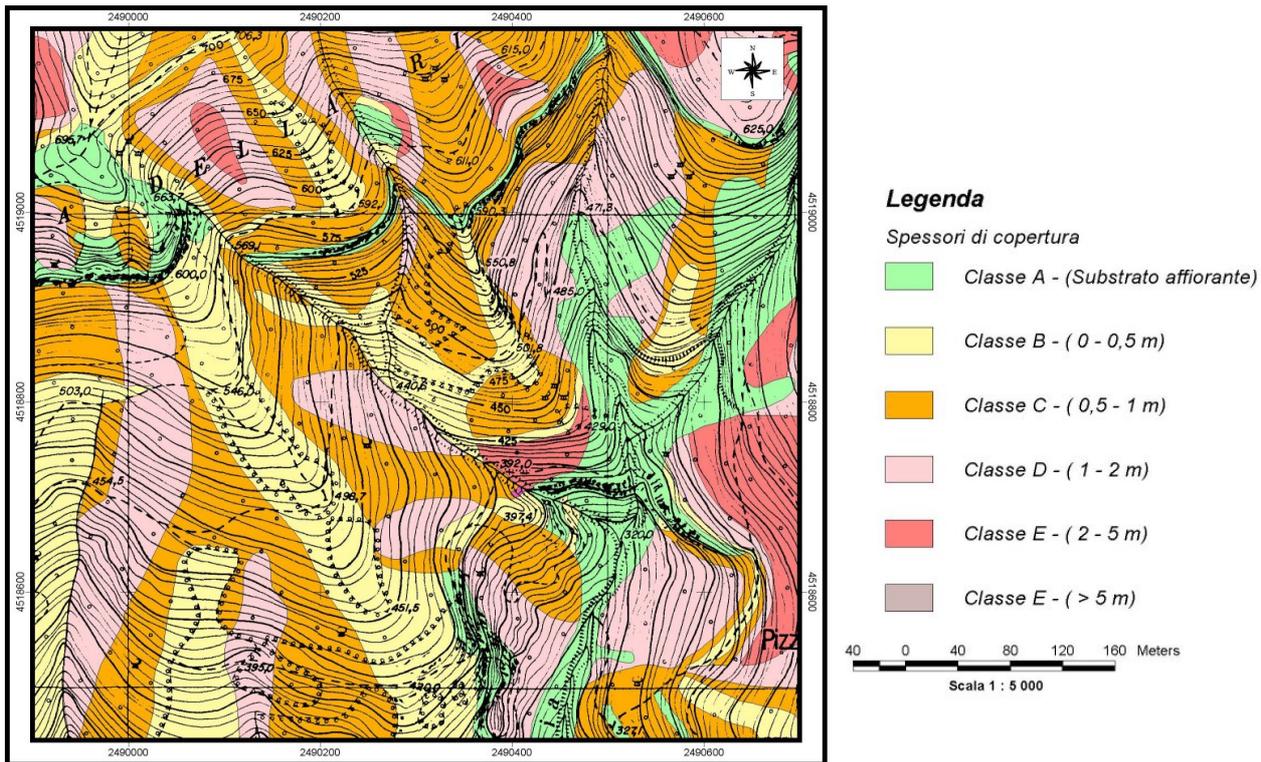


Fig. 5.9: Carta degli spessori delle coperture per i versanti di Sarno-Lavorate (da Cascini et al., 2003).

integrate da ulteriori informazioni di carattere geomorfologico, è stato possibile, infatti, mettere a punto un modello idrogeomorfologico a scala di massiccio (Cascini et al., 2000; Guida, 2003) in grado di fornire una spiegazione sulla localizzazione delle aree sede dei fenomeni di primo distacco, oltre che sui rilevanti fenomeni erosivi e di trasporto osservati lungo le porzioni medio-basse dei versanti (Fig. 5.10).

L'affidabilità del modello in questione è stata verificata con analisi geotecniche orientate alla simulazione dei fenomeni di innesco occorsi in un bacino pilota dove si sono particolarmente approfondite le conoscenze sull'assetto stratigrafico delle coltri (Fig. 5.11), e per il quale si sono precisati i caratteri del regime delle pressioni neutre (Fig. 5.12) e le proprietà meccaniche dei terreni (Fig. 5.13), in condizioni di totale e parziale saturazione, con l'ausilio dei risultati conseguiti a scala di massiccio.

Le analisi geotecniche (Fig. 5.14) hanno confermato il ruolo di primaria importanza giocato sull'innesco dalle immissioni idriche concentrate alla base delle coltri, nonostante i valori estremamente contenuti delle portate assunti a base dei calcoli, in accordo con quelli rilevati dalla campagna di misure in sito (Cascini, 2003a; Cascini et al., 2003).

In definitiva, i modelli messi a punto, sia a piccola che a grande scala, sembrano in grado di interpretare gli aspetti fondamentali degli eventi occorsi nel maggio'98 con evidenti positive ripercussioni sulla valutazione della pericolosità P, come definita nell'equazione (1). Ovviamente, a tal fine, sono necessari ulteriori indagini e studi che richiedono, tra l'altro, l'individuazione delle piogge critiche ed il loro periodo di ritorno, oltre che la definizione della frequenza degli eventi calamitosi nel tempo. Per quanto riguarda il primo degli aspetti menzionati i risultati sinora conseguiti appaiono incoraggianti (Rossi et al., 1998), come promettenti sono le relazioni fino ad ora individuate tra piogge e regime delle suzioni (Fig. 5.15), che tutte le analisi sin qui svolte indicano come uno dei fattori chiave nella comprensione delle fenomenologie occorse. Con riferimento al secondo aspetto, si deve osservare che risultati di un certo interesse stanno

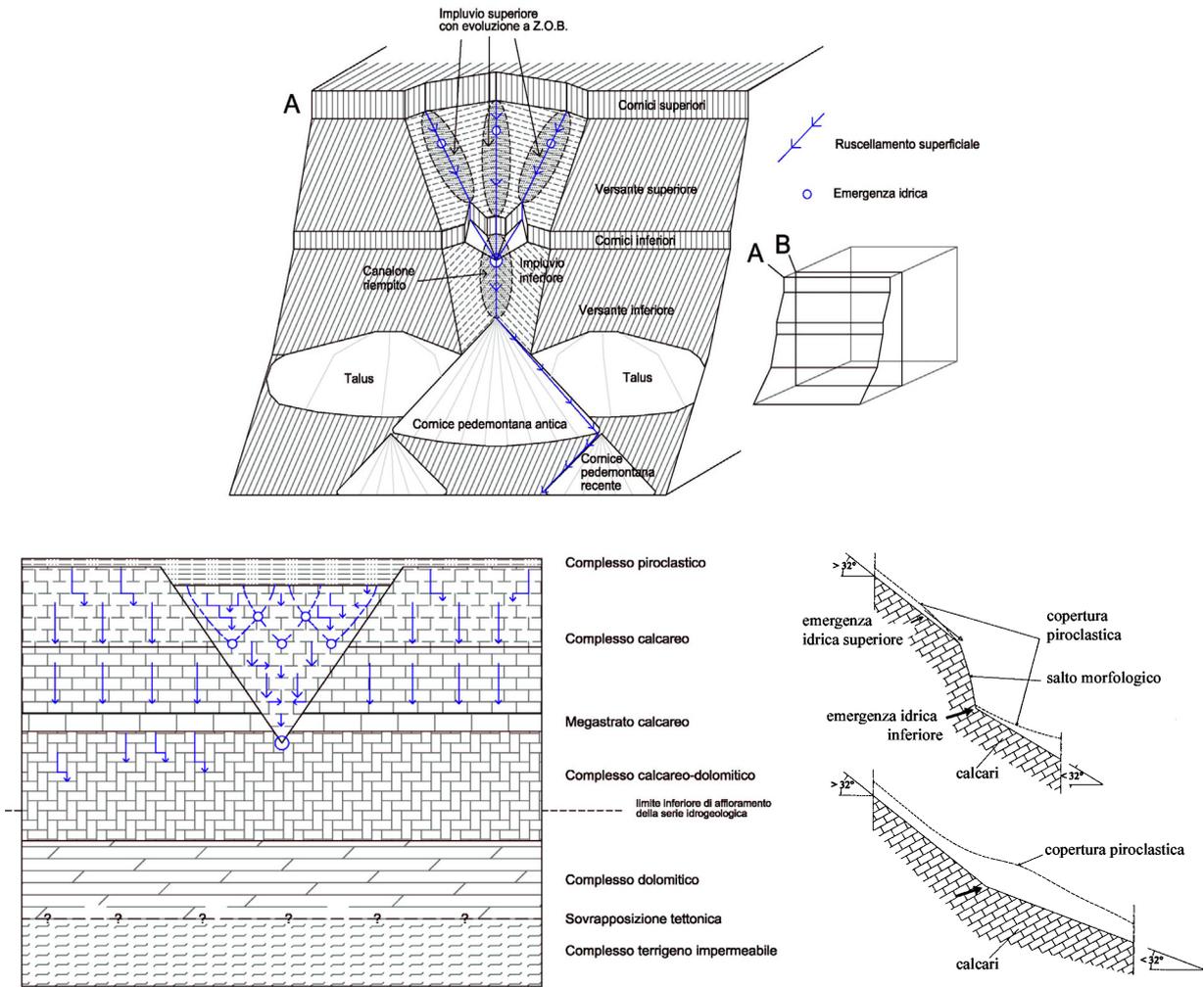


Fig. 5.10: Modello idrogeomorfologico del versante tipo Sarno, (da Cascini, 2003a).

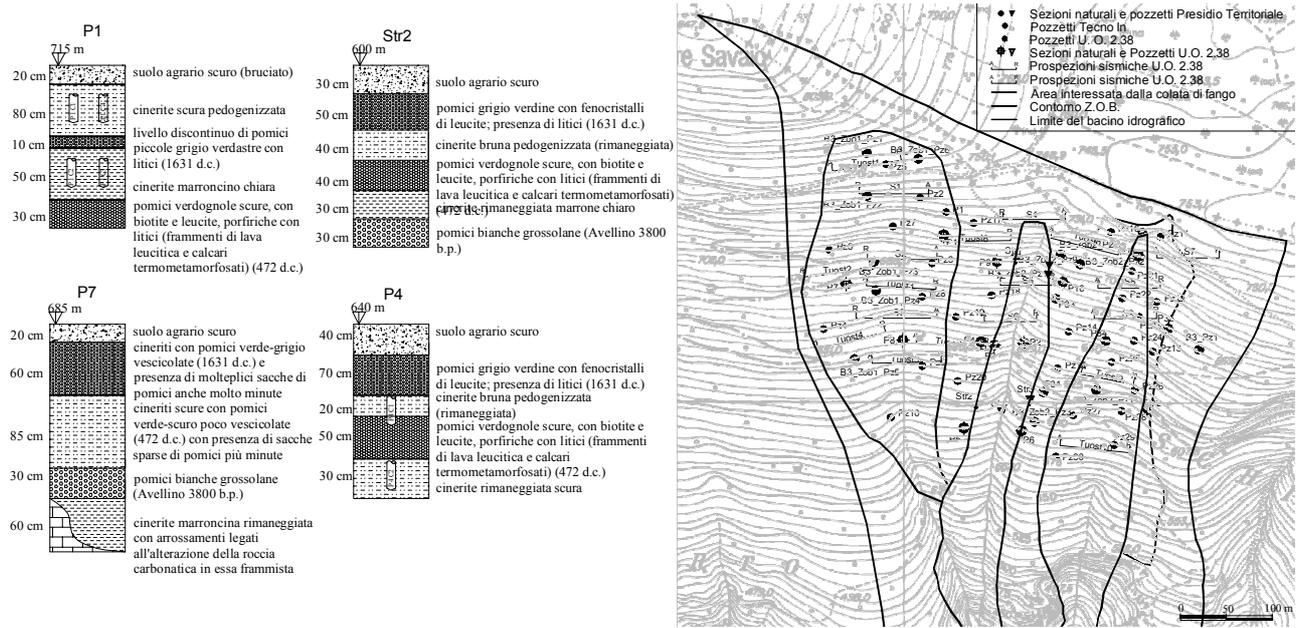


Fig. 5.11: Stratigrafie di dettaglio di alcuni dei pozzetti eseguiti nel bacino pilota B3, (da Cascini et al., 2003).

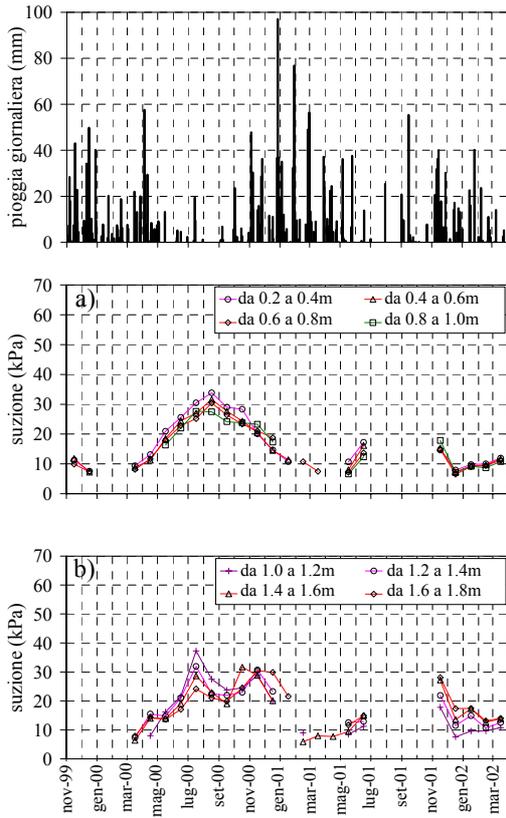


Fig. 5.12: Piogge giornaliere e medie mensili delle suzioni per diverse profondità (da Cascini e Sorbino, 2003; modificata).

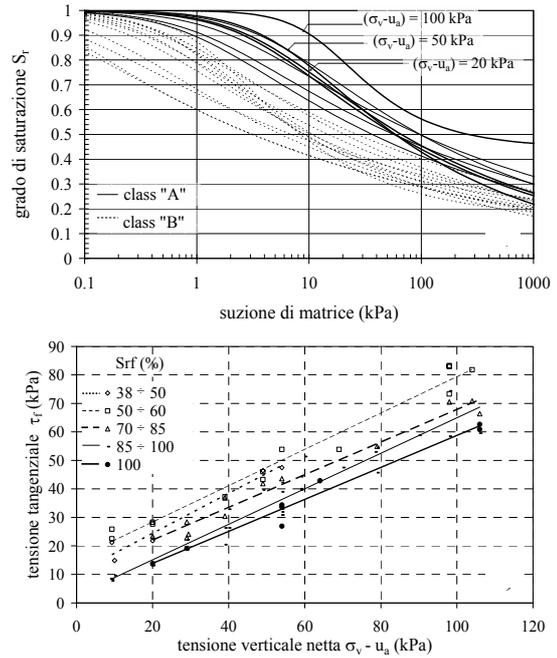


Fig. 5.13: Alcune proprietà meccaniche, in condizioni di parziale saturazione, di alcuni terreni piroclastici del Pizzo D'Alvano, (da Cascini et al., 2003).

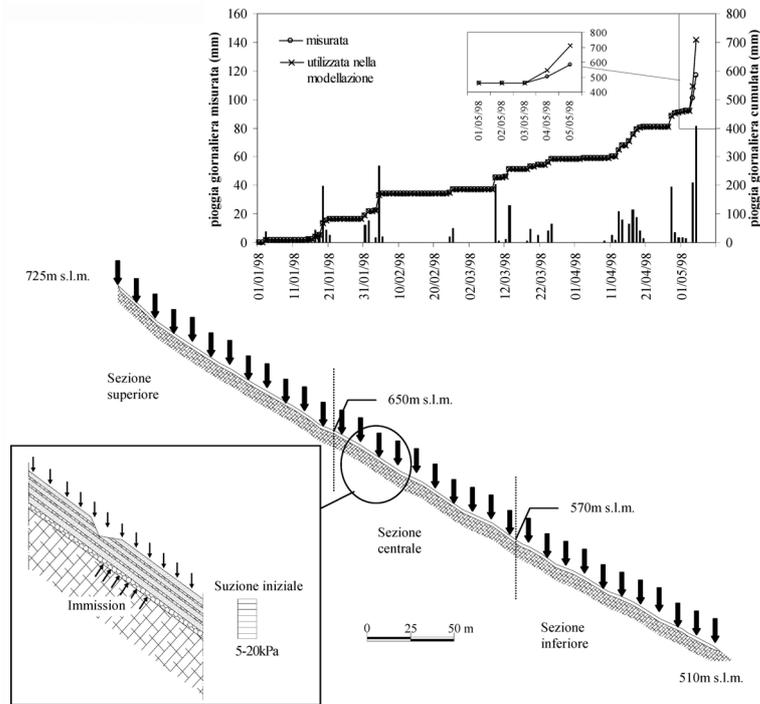


Fig. 5.14: Sezione stratigrafica di dettaglio, suzioni iniziali ed intensità di pioggia utilizzate per le analisi geotecniche dei fenomeni di innesco nel bacino pilota B3 (Tuostolo), (da Cascini et al., 2003; modificata).

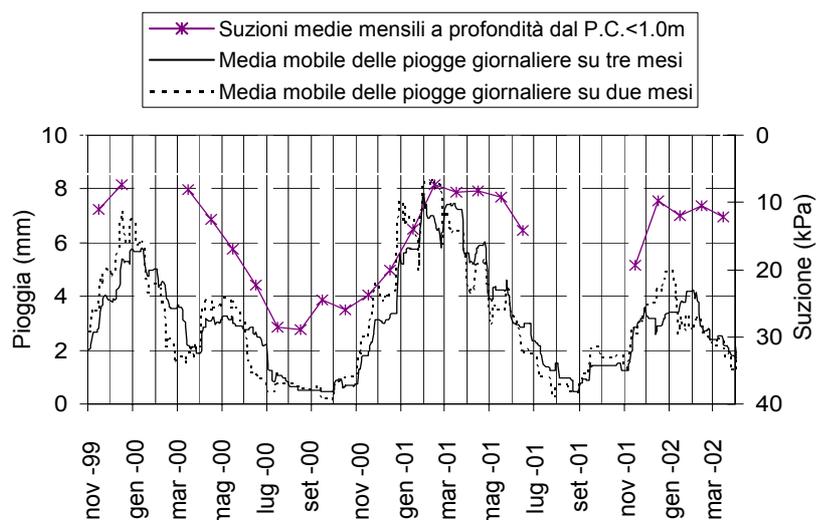


Fig. 5.15: Confronto tra i valori medi delle suzioni mensili, a profondità inferiori ad 1.0 m, e le medie mobili delle piogge giornaliere su base bimestrale e trimestrale (da Cascini e Sorbino, 2003; modificata)

traazione in vigore da ben cinque anni, nonostante la semplicità dei criteri metodologici che ne sono stati alla base (Fig. 5.3).

Comunque, sin da ora appaiono possibili misure di salvaguardia della popolazione più avanzate e progetti di consolidamento dei versanti che tengano, nel debito conto, le complesse problematiche messe in luce dagli studi svolti. Obiettivi che possono essere perseguiti grazie alla cartografia tematica prodotta, alle relazioni del tipo di quelle riportate in Fig. 5.15 e ad alcune calcolazioni preliminari (Cascini et al., 2003) che indicano le zone nelle quali fenomeni di instabilità locale possono minare aree di ben più ampia dimensione, tutte riportate nella cartografia tematica sin qui redatta.

6. UN CASO SU CUI RIFLETTERE

Come accennato nel paragrafo precedente, nell'ambito dei compiti attribuiti all'U.O. 2.38, il Dipartimento di Protezione Civile richiese di perimetrare le aree della Regione Campania soggette a a colate rapide di fango. Tale richiesta fu essenzialmente dettata dal sistematico ripetersi di eventi luttuosi connessi a tali fenomeni che, poco più di un anno prima (gennaio 1997), avevano causato 6 vittime in località non molto distanti da quelle coinvolte dagli intensissimi fenomeni occorsi nel maggio '98.

Con l'ausilio delle conoscenze geologiche, vulcanologiche e geomorfologiche disponibili, si delimitarono, quindi, le aree nelle quali sussistevano condizioni simili a quelle del Pizzo d'Alvano, rappresentate dalla presenza di un substrato carbonatico (Fig. 6.1) ricoperto da depositi sciolti di origine piroclastica, essenzialmente prodotti dalle eruzioni vulcaniche del Somma-Vesuvio (Fig. 6.2). In quanto ritenute meritevoli di attenzione, si individuarono e delimitarono, altresì, le coperture piroclastiche su substrato flyschioide e l'area napoletano-flegrea, costituita quasi esclusivamente da depositi vulcanici alterati in superficie. In tali aree, infatti, pur non verificandosi colate rapide di fango di rilevante intensità, hanno avuto ed hanno spesso sede nelle coltri piroclastiche, fenomeni franosi ad elevato impatto su un territorio intensamente antropizzato.

Sulla base della scelta operata, il territorio da investigare (Fig. 6.3) risultò di poco inferiore a

emergendo dalle indagini storiche in corso di svolgimento nell'area dei cinque Comuni (Cascini e Ferlisi, 2003).

Tenendo presente che risultati altrettanto incoraggianti si stanno conseguendo con riferimento ai beni presenti nelle aree a rischio, oltre che alla loro vulnerabilità (Faella e Nigro, 2003b), si può concludere che una definizione del rischio su basi ingegneristiche, per esempio con l'ausilio dell'equazione (1), appare oggi perseguibile con evidenti ripercussioni su molteplici aspetti, quali la valutazione della efficacia degli interventi sin qui realizzati, ed il superamento della prime-

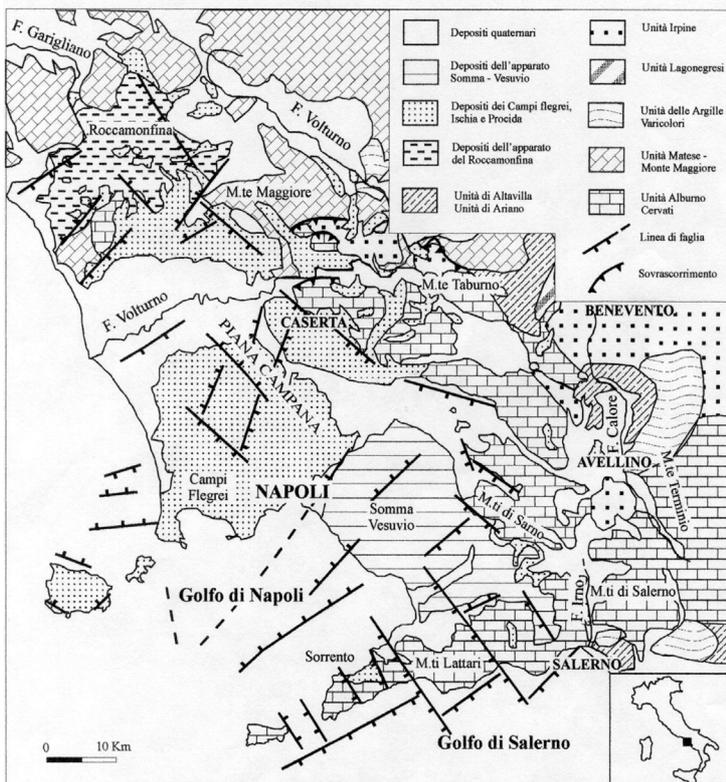


Fig. 6.1: Schema geologico-strutturale dell'area campana. (da Orsi et al., 1996; modificata).

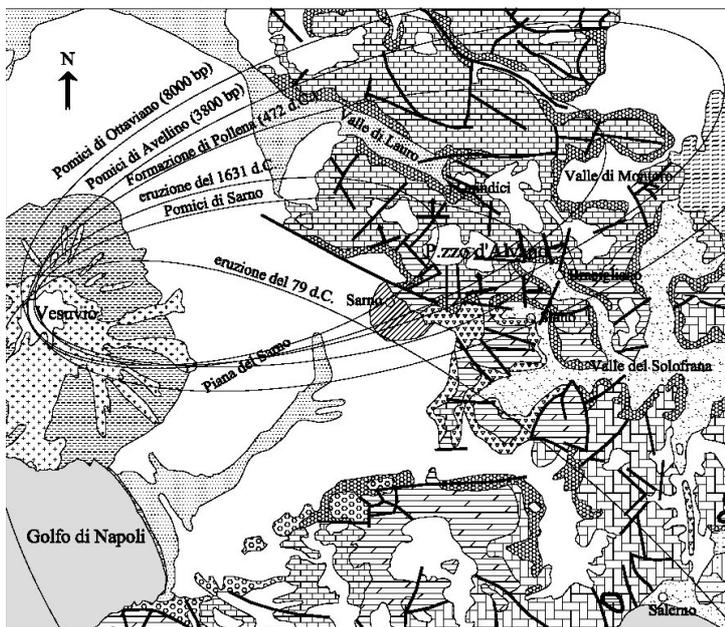


Fig. 6.2: Assi di dispersione dei prodotti piroclastici da caduta delle principali eruzioni esplosive del complesso vulcanico Somma-Vesuvio. (da Cascini, 2003a).

3000 km², all'interno del quale ricadono 212 ambiti comunali, di cui 51 della provincia di Avellino, 9 nella provincia di Benevento, 32 nella Provincia di Caserta, 79 nella provincia di Napoli e 41 in quella di Salerno.

Per l'assenza di standard di riferimento, sia a livello nazionale che internazionale, nonché per la ristrettezza dei tempi concessi (6 mesi), all'interno di detto territorio si adottarono criteri sostanzialmente analoghi a quelli utilizzati per la perimetrazione delle aree a rischio nei Comuni coinvolti dall'evento del maggio '98. In particolare, adattando la metodologia proposta in tale contesto, si individuarono alcuni "indicatori" principali per una preliminare individuazione della suscettibilità del territorio alle colate rapide di fango. Gli indicatori impiegati furono rappresentati da: "spessore delle coperture piroclastiche", "distribuzione spaziale delle frane", ed una serie di "elementi geomorfologici" significativi per la individuazione delle possibili zone di distacco, trasferimento e recapito/deposito delle colate di fango.

Queste tre serie di informazioni, rappresentate in altrettanti elaborati cartografici di base in scala 1:25.000 (l'unica disponibile sull'intero territorio oltre che unanimemente riconosciuta la più idonea per studi a carattere regionale) furono, quindi, tra di loro correlate per pervenire alla redazione della carta di sintesi definita *Carta preliminare della suscettibilità del territorio rispetto alle colate rapide di fango ed apporti detritico-piroclastici da alluvionamento*.

Nonostante il tempo estremamente ridotto concesso per la sua presentazione, questo elaborato, che si era in ogni caso basato su un'intensissima attività di campo, oltre che di fotointerpretazione, mise in luce una situazione particolarmente grave per la rilevante estensione delle aree potenzialmente sede di colate rapide di fango.

Ulteriori conferme, in tal senso, scaturivano da una indagine storica (Cascini e Ferlisi 2003), dalla quale emergevano almeno tre aspetti meritevoli di attenzione.



Fig. 6.3: Area delle piroclastici ed eventi luttuosi recenti, (da Cascini, 2003b; modificata).

Il primo di tali aspetti riguarda la elevata frequenza delle colate nei secoli e le drammatiche conseguenze sistematicamente prodotte laddove le coltri piroclastiche ammantano i rilievi carbonatici (Fig. 6.4a).

Un secondo aspetto si riferisce alla distribuzione delle vittime causate da tali fenomeni nelle varie epoche storiche. Come può notarsi dalla (Fig. 6.4b), il numero di perdite di vite umane si è andato sempre più incrementando nel tempo, pur in presenza di una analoga frequenza di accadimento; anche se tale circostanza richiede, per molteplici motivi, adeguati approfondimenti, essa mette chiaramente in luce il nefasto ruolo giocato dalla urbanizzazione sempre più intensa, soprattutto nel secolo scorso, di aree ad elevata suscettibilità di colate di fango.

Il terzo aspetto riguarda, infine, il periodo di ritorno per il quale elaborazioni preliminari hanno evidenziato che un evento di rilevanti dimensioni, quale quello del maggio '98, si verifica, nell'ambito dell'intero territorio campano, in un lasso di tempo uguale o inferiore, ai quaranta - cinquanta anni. Un periodo di tempo dell'ordine di alcune centinaia di anni sembra, viceversa, necessario perché un fenomeno catastrofico si ripeta nello stesso ambito territoriale. Non appare, tuttavia, superfluo sottolineare che tali valutazioni potrebbero rappresentare una stima per difetto della reale pericolosità delle colate di fango per la incompletezza della ricerca oltre che per la crescente urbanizzazione di aree ad elevata suscettibilità.

La consapevolezza, da parte degli Organi di Stato, di un livello di rischio così elevato su gran parte del territorio della Regione Campania, ebbe una importante ricaduta legislativa con il D.L. 180/98, successivamente convertito nelle Leggi n. 267/98 e n. 226/99, che si poneva la finalità di salvaguardare la vita umana, il patrimonio strutturale e quello ambientale nei confronti di alcuni rischi idrogeologici, tra i quali il rischio da frana.

L'adempimento formale del Decreto Legge era rappresentato dal Piano Straordinario, la cui redazione nell'area delle piroclastiti venne facilitata dagli studi appena ultimati sulla suscettibilità. Partendo dalle risultanze di tali studi, si delineò, pertanto, un percorso metodologico particolarmente articolato che è sintetizzato nello schema di Fig. 6.5, dal quale si evince che le attività svolte hanno riguardato due diversi percorsi: il primo finalizzato alla redazione della "Carta inventario dei fenomeni franosi in funzione delle massime velocità attese"; il secondo indirizzato alla stesura della "Carta degli insediamenti urbani, delle infrastrutture e della loro vulnerabilità".

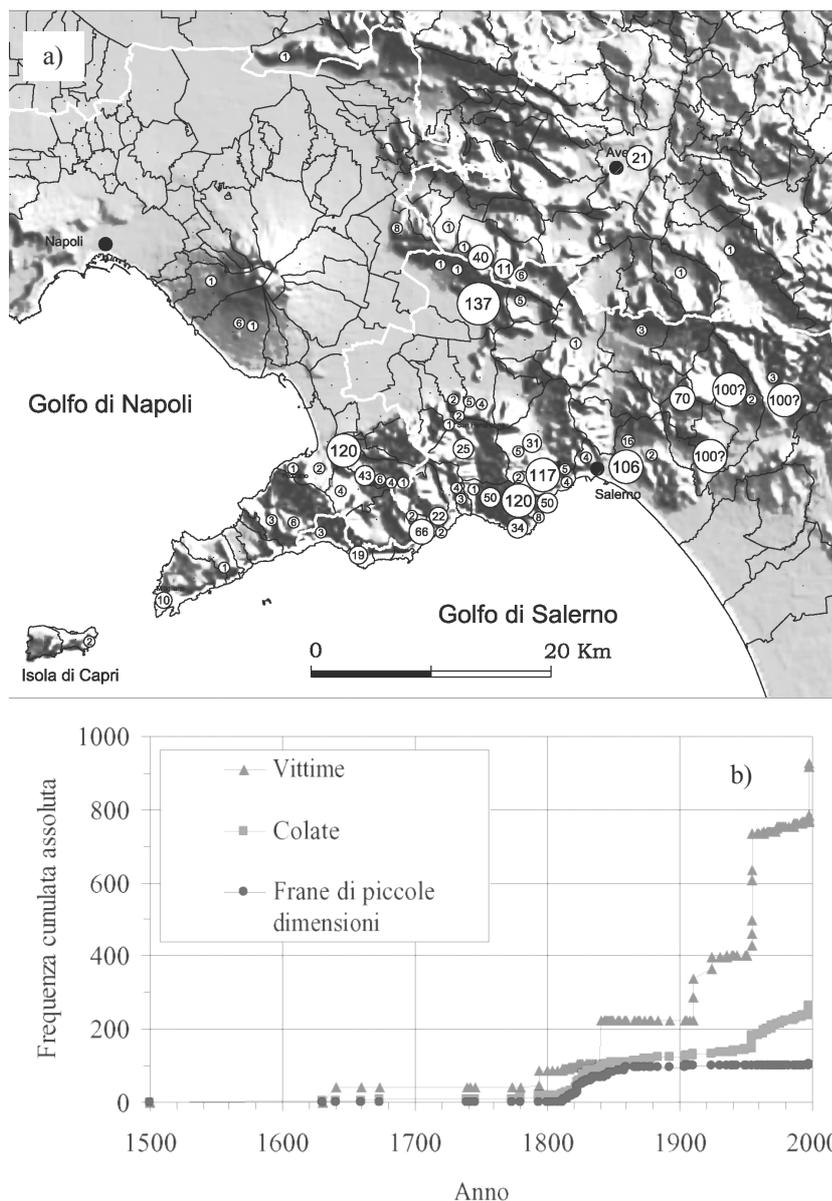


Fig. 6.4: a) Vittime censite nel periodo 1540-1998 e b) frequenza cumulata assoluta delle vittime e dei fenomeni franosi nel tempo (da U.O. 2.38, 1998b).

medesima simbologia tutte le frane e gli ambiti morfologici sede di frane rapide anche in totale assenza, al loro interno, di strutture e/o infrastrutture. Non appare superfluo osservare che la segnalazione di aree che non rientravano esplicitamente nel dettato legislativo (aree di attenzione) è scaturita dall'esigenza di evidenziare i rilevanti pericoli che potrebbero derivare dall'uso, anche temporaneo, di alcune zone e limitare, nel contempo, l'ulteriore incremento del rischio nel territorio di interesse.

All'interno di tale territorio, dalla data di approvazione del Piano Straordinario, di cui nella Fig. 6.6 è fornito uno stralcio, gli eventi si sono, purtroppo, verificati con continuità e sistematicità. In particolare, dal novembre del 1999 ad oggi, si sono contati più di venti fenomeni, di dimensione estremamente variabile, che hanno consentito un riscontro, seppure preliminare, del lavoro svolto. A tale riguardo, è significativo sottolineare che la totalità dei fenomeni franosi occorsi in circa tre anni di osservazione, si è sviluppata all'interno delle aree perimetrare (Fig. 6.7), evidenziando, in tal

Dalla sovrapposizione di queste ultime due Carte si è, infine, prodotta la "Carta delle aree a rischio di frana molto elevato", sulla quale sono segnalate le zone a rischio molto elevato, le zone di alta attenzione e le zone di attenzione (Cascini, 2002; 2003b).

Con la metodologia adottata sono rientrate nelle aree a "rischio molto elevato" quelle di piano di insediamento urbano, le aree vincolate di interesse rilevante, le vie di comunicazione e le infrastrutture a rete di rilevanza strategica ricadenti nel perimetro dei fenomeni franosi da rapidi ad estremamente rapidi (Cruden e Varnes, 1996). Nel caso delle colate di fango, detto perimetro comprende l'intero ambito morfologico significativo (Fig. 2.2), che è costituito dalle aree di alimentazione, transito ed accumulo dei fenomeni di più immediato riconoscimento morfologico, avvenuti nel passato recente.

La restante area del perimetro di frana, nella quale non sono presenti elementi esposti secondo il dettato del D.L. 180/98, è stata cartografata come "area di alta attenzione". Si sono, altresì, segnalate con la

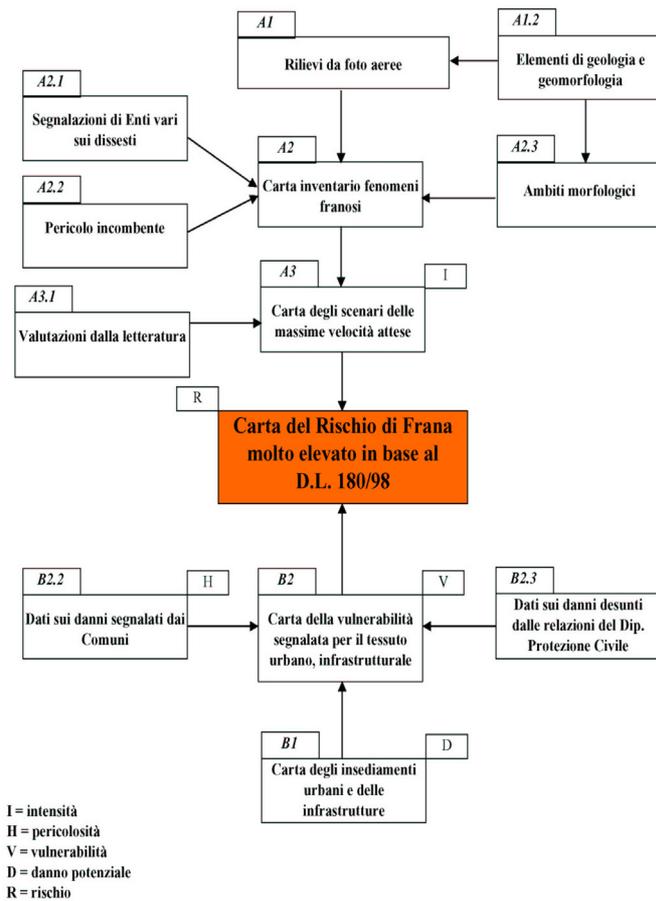


Fig. 6.5: Schema metodologico adottato per la perimetrazione delle aree a rischio.

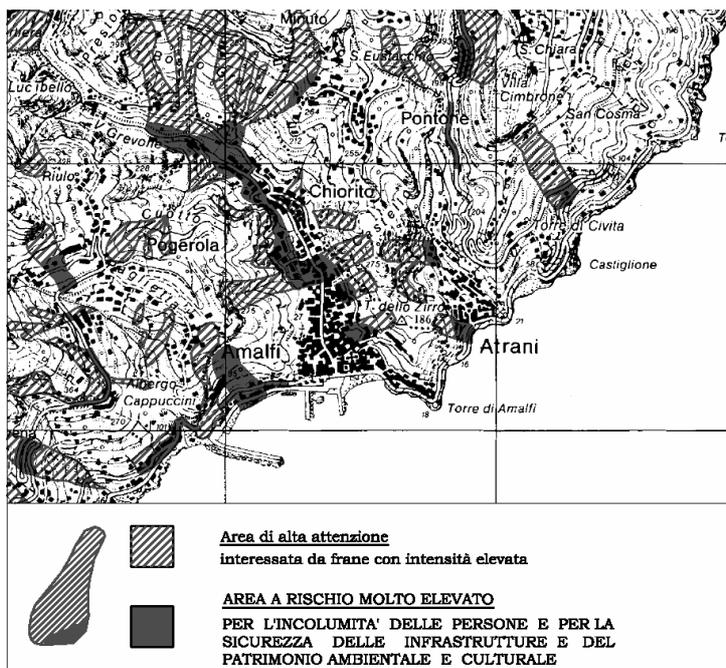


Fig. 6.6: Stralcio della perimetrazione delle aree a rischio per il territorio della Costiera Amalfitana, (da CUGRI, 1999; modificata).

modo, l'attendibilità della metodologia adottata e della cartografia prodotta.

La consegna di detta cartografia fu accompagnata, in ottemperanza al D.L. 180/98, da misure di salvaguardia per le aree a rischio e di alta attenzione, oltre che da una dettagliata relazione sulle azioni da intraprendere per la mitigazione del rischio. Nel rimandare a C.U.G.Ri. (1999) per tutti gli approfondimenti ritenuti necessari, qui si vuole ricordare che tali azioni sono state finalizzate alla eliminazione del pericolo incombente ed all'individuazione dei più idonei sistemi di controllo del territorio, nel breve-medio termine; alla progettazione e realizzazione di interventi di consolidamento realmente efficaci, nel medio-lungo periodo.

Per il perseguimento di tali obiettivi, si è sottolineata la necessità di: avviare e mantenere attivi sul campo presidi territoriali altamente qualificati; procedere ad interventi di manutenzione straordinaria facilmente progettabili e dal sicuro impatto per lo stato di profondo degrado di gran parte del territorio investigato; individuare soglie pluviometriche di allarme sperimentando, laddove le conoscenze lo consentivano, metodologie avanzate di monitoraggio anche basate su piattaforme aeree o satellitari. Solo a valle di tali azioni si sono indicate iniziative più radicali, quali la rivisitazione dei piani regolatori e la realizzazione di interventi strutturali di mitigazione del rischio da dover basare, per la loro efficacia e credibilità, su un processo rigoroso all'interno del quale attribuire il giusto peso alle fasi di indagine e di analisi, propedeutiche alla progettazione, oltre che a quelle di controllo e manutenzione delle opere realizzate.

Alla luce dell'esperienza sin qui maturata è doveroso sottolineare che il

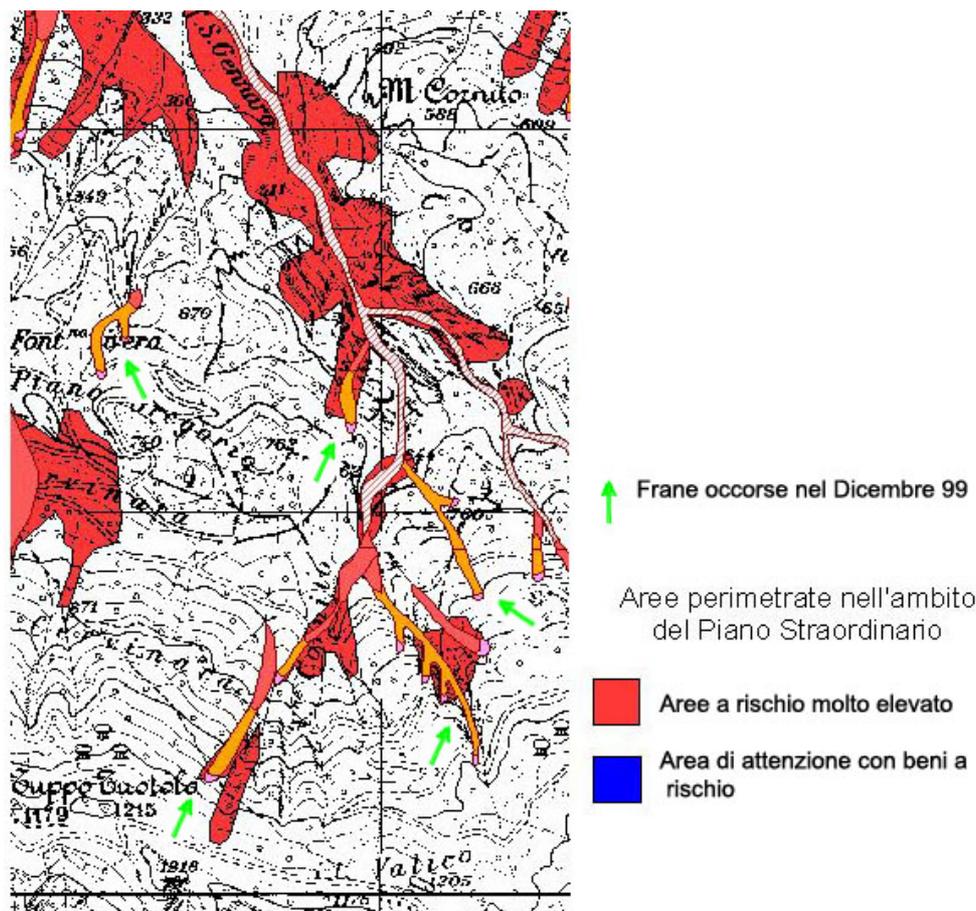


Fig. 6.7: Eventi franosi del Dicembre '99 nel territorio di Cervinara (AV).

perseguimento degli obiettivi complessivamente delineati nel Piano per la mitigazione del rischio richiedono consapevolezza ed impegno da parte degli Enti competenti, degli Amministratori, dei ricercatori, dei professionisti, etc., i quali devono, ognuno per la propria parte, contribuire al conseguimento di risultati realmente significativi e facilmente comprensibili da parte delle popolazioni. Da questo punto di vista è indispensabile che ad ogni livello di approfondimento e, quindi, di scala dello studio, corrispondano efficaci azioni di progressiva riduzione del rischio e di divulgazione dei risultati conseguiti, anche per interrompere la pressante richiesta di interventi da parte delle popolazioni, che risulta particolarmente controproducente in assenza di conoscenze adeguate sul territorio per il quale tali interventi sono richiesti.

7. CONCLUSIONI

Le analisi delle colate rapide presentano, di frequente, rilevanti difficoltà sia per quanto riguarda la comprensione dei meccanismi che presiedono alle diverse fasi di movimento, che per la definizione degli aspetti meccanici a questi ultimi sottesi. Nonostante gli spessori generalmente limitati di terreno coinvolti nei fenomeni di primo distacco, le aree potenzialmente instabili possono, infatti, essere di non facile identificazione, oltre ad avere, in genere, estensioni rilevanti. D'altra parte, i meccanismi di innesco, così come le modalità con le quali mutano drasticamente le proprietà reologiche dei materiali nella fase di post-rottura, non sono sempre chiaramente riconoscibili. Infine, i lunghi percorsi delle masse instabilizzate e le velocità raggiunte possono dipendere

fortemente da una molteplicità di fattori, la cui non semplice identificazione rende complesso l'inquadramento teorico delle fenomenologie.

A fronte di una problematica così articolata che vede coinvolte ampie porzioni del territorio nazionale, le opere di protezione sono molteplici e, in genere, alquanto semplici per quanto attiene la loro tipologia; fanno eccezione quelle opere che rientrano nell'ambito della cosiddetta ingegneria naturalistica, per le quali sono richieste approfondite conoscenze su aspetti non sempre di agevole determinazione quali la resistenza a rottura delle radici, la distribuzione delle pressioni neutre nel mezzo da considerare, il più idoneo modello da assumere a base dei calcoli, e così via. Problemi notevolmente più complessi possono sorgere con riferimento agli aspetti tecnologici, per le pendenze generalmente elevate che di norma caratterizzano le aree di innesco, le difficoltà di accesso nelle zone di transito delle masse instabilizzate, la mancanza di spazi in quelle pedemontane.

Per quanto riguarda poi la progettazione delle opere di protezione, le difficoltà si differenziano notevolmente in funzione dell'estensione dell'area da consolidare, del tempo disponibile, delle condizioni logistiche e della sensibilità alle problematiche da parte sia delle Autorità competenti che delle popolazioni residenti. Per esempio, in presenza di aree non particolarmente ampie, dette progettazioni, per quanto complesse, possono essere basate sulle analisi tipiche della meccanica delle terre, comprese quelle riguardanti gli interventi di ingegneria naturalistica, di frequente utilizzati a sproposito e non dimensionati con rigorosi criteri progettuali.

All'aumentare dell'area ed al diminuire del tempo a disposizione, la individuazione delle azioni di mitigazione del rischio rende, viceversa, indispensabile il ricorso ad un approccio marcatamente interdisciplinare, che può consentire una definizione del rischio progressivamente più approfondita alla quale fare corrispondere misure di salvaguardia e schemi progettuali degli interventi strutturali progressivamente più mirati.

Con riferimento agli interventi strutturali, si vuole, infine, osservare che, sul territorio nazionale particolarmente frequente è il ricorso ad opere di tipo passivo, il cui dimensionamento è affidato, di norma, a criteri idraulici, non sempre supportati da studi sull'innesco dei fenomeni e sulla colata di progetto. Appare, quindi, necessario un particolare impegno da parte della comunità geotecnica che può e deve fornire un contributo rilevante nel corso dell'intero processo di mitigazione del rischio, dalla perimetrazione su basi geologiche sino al consolidamento definitivo con interventi di tipo strutturale, sia attivi che passivi.

8. BIBLIOGRAFIA

- Airò Farulla C., Valore C. (1994). *Evoluzione delle condizioni di sicurezza dei pendii stabilizzati mediante gallerie drenanti*. Atti del Convegno Nazionale sul tema: Il ruolo dei fluidi nei problemi di Ingegneria Geotecnica. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Mondovì (CN), Vol. 1, pp. II-3-II-21.
- Anderson M.G., Howes S. (1985). *Development and application of a combined soil water slope stability model*. Q. J. Eng. Geol., 18, pp. 225-236.
- Azzouz A.S., Krizek R.J., Corotis R.B. (1976). *Regression analysis of soil compressibility*. Soils and Foundations, Vol. 6, n. 2.
- Blight G.E. (1987). *Lowering of the groundwater by deep-rooted vegetation - The geotechnical effects of water table recovery*. Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. Foundat. Engng, Dublin 1, 285-288.
- Blight G.E. (1997). *Interactions between the atmosphere and the Earth*. 37th Rankine Lecture. Géotechnique, 47(4), pp. 715-767.
- Burghignoli A., Desideri A. (1983). *Analisi dei moti di filtrazione indotti dall'esecuzione di scavi e trincee*. AGI, XVI Conv. Naz. di Geotecnica, Spoleto, Vol. 2, pp. 51-56.

- Burghignoli A., Desideri A. (1986). *Efficienza dei drenaggi*. Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, Vol. III, pp. 293-298.
- C.U.G.Ri. (1999). *Individuazione e Perimetrazione delle Aree a Rischio di Frana, Definizione delle Misure di Salvaguardia e Programmazione delle Azioni per la Mitigazione del Rischio*. Atti della Convenzione C.U.G.Ri. – Autorità di Bacino Regionali per la redazione dei Piani Straordinari per la mitigazione del Rischio Idrogeologico.
- Cascini L. (1994). *Il regime delle falde idriche*. Relazione generale. Atti del Convegno Nazionale sul tema: Il ruolo dei fluidi nei problemi di Ingegneria Geotecnica. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Mondovì (CN), Vol. 2, pp. 3-95.
- Cascini L. (2002). *Il rischio da frana in aree urbane dell'Appennino centro-meridionale*. Atti del XXI Convegno Nazionale di Geotecnica. L'Aquila, Patron Editore, pp. 127 – 134.
- Cascini L. (2003a). *La gestione scientifica dell'emergenza idrogeologica del maggio 1998*. G.N.D.C.I. - C.N.R. Edition, (in corso di stampa).
- Cascini L. (2003b). *Risk assessment of fast landslides – from theory to practice*. General Report. Proc. of the Int. Conference on “Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation”, Napoli, Patron Editore, 2, in corso di stampa.
- Cascini L., Critelli S., Di Nocera S., Gullà G., Matano, F. (1994). *Grado di alterazione e franosità negli gneiss del massiccio silano: l'area di S. Pietro in Guarano*. Geologia Applicata ed Idrogeologia, Vol. XXVII, pp. 49-76.
- Cascini L., Ferlisi S. (2003). *Occurrence and consequences of flowslides: a case study*. Atti della Conferenza Internazionale su “Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation”, Napoli. Patron Editore, 1, pp. 85 - 92.
- Cascini L., Guida D., Romanzi G., Nocera N., Sorbino G. (2000). *A preliminary model for the landslides of May 1998 in Campania Region*. Proceedings 2nd International Symposium on The Geotechnics of Hard Soil-Soft Rocks, Napoli, 3: p.1623-1649. Balkema, Rotterdam.
- Cascini L., Guida D., Sorbino G. (2003). *Il presidio territoriale: un'esperienza sul campo*. GNDCI-CNR Edition (in corso di stampa).
- Cascini L., Sorbino G. (2003). *The contribution of soil suction measurements to the analysis of flowslides triggering*. Atti del Workshop “Flows 2003 - Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfill”, Sorrento (NA), 15-16 Maggio 2003.
- Cascini L., Sorbino G., Cuomo S. (2003). *Modelling of flowslide triggering in pyroclastic soils*. Atti della Conferenza Internazionale su “Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation”, Napoli. Patron Editore, 1, 93 - 100.
- Corominas J. (1996). *The angle of reach as a mobility index for small and large landslides*. Canadian Geotechnical Jnl., 33, pp. 260-271.
- Cruden D.M., Varnes D.J. (1996). *Landslide types and process*. In “Landslides – Investigation and Mitigation”, Transportation Research Board Special Report No. 247 (A.T. Turner & R.L. Schuster ed.), National Academy Press, Washington DC, pp. 36-75.
- D'Elia, B., Picarelli, L., Leroueil, S., Vaunat, J. (1998). *Geotechnical characterisation of slope movements complex clay soils and stiff jointed clays*. Rivista Italiana di Geotecnica, Anno XXXII, n. 3, pp. 5-47.
- Di Maio C., Evangelista A., Viggiani C. (1988). *Analisi dell'efficienza di sistemi di dreni tubolari*. Rivista Italiana di Geotecnica. Vol. XXII, n. 4, pp. 187-199.
- Di Maio C., Viggiani C. (1987). *Influence of intermittent rainfall on effectiveness of trench drains*. IX ECSMFE, Dublin, Vol. 1, pp. 149-152.
- DRM – Délégation aux Risques Majeurs (1990). *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs*. Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs. La documentation Française. 143 pp.
- Ellen S.D., Wiczorek G.F. (1988). *Landslides, floods and marine effects of the storm of January 1982, in the San Francisco Bay Region, California*. U.S. Geological Survey Professional paper 1434, pp. 63-142.
- Evangelista A. (1997). *Sistemi drenanti per la stabilizzazione dei pendii: tipi e schemi di funzionamento*. Interventi di stabilizzazione dei pendii, CISM, Udine, pp. 387-423.
- Faella C., Nigro E. (2003a). *Dynamic impact of the debris flows on the constructions during the hydrogeological disaster in Campania-1998: failure mechanical models and evaluation of the impact*

- velocity*. Proc. Int. Conference on “Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation”, Napoli, Patron Editore, 1, pp. 179-186.
- Faella C., Nigro E. (2003b). *Dynamic impact of the debris flows on the constructions during the hydrogeological disaster in Campania-1998: description and analysis of the damages*. Proc. of the Int. Conference on “Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation”, Napoli, Patron Editore, 1, pp. 187-194.
- Fell R. (1994). *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Canadian Geotechnical Journal 31, p. 261-272.
- Fell R., Hungr O., Leroueil S., Riemer W. (2000). *Keynote Lecture – Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cut and fills in soils*. Int. Conf on Geotechnical and Geological Engineering GeoEng2000, Melbourne.
- Finlay P.J., Mostyn G.R., Fell R. (1999). *Landslide risk assessment: prediction of travel distance*. Canadian Geotechnical Journal 36, pp. 556-562.
- GED-HKIE (2003). *Soil nails in loose fill slopes*. Final Report – January 2003, 38 pp..
- Geotechnical Control Office (GCO) (1984). *Geotechnical Manual for slopes*. GCO Engineering Development Department, 295 pp..
- Geotechnical Engineering Office (GEO) (2003). *Annual report on Government Slope Safety Work*. GEO Publication, 86 pp..
- Gray D.H., Leiser A.J. (1982). *Biotechnical slope protection and erosion control*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 271 pp.
- Greenway D.R. (1987). *Vegetation and slope stability*. In Slope Stability, edited by Anderson and Richards, John Wiley & Sons, N.Y.
- Guida D. (2003). *The role of Zero-Order Basins in flowslides-debris flows occurrence and recurrence in Campania (Italy)*. Atti della Conferenza Internazionale su “Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation”, Napoli. Patron Editore, Vol. I, pp. 255-262.
- Guida D., Iaccarino G. (1991). *Fasi evolutive delle frane tipo colata nell’alta valle del F. Basento (Potenza)*. Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica, 68: 127-152.
- HBJLS (1985). *Usu Volcano, Disaster and Measures*. Guidebook for the 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Hokkaido Branch of the Landslide Society, Department of Public Works.
- Hungr O. (1981). *Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements*. PhD Thesis, University of Alberta, Canada.
- Hungr O. (1995). *A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches*. Canadian Geotechnical Journal, 31, p.610-623.
- Hungr O. (2003). *Flow slides and flows in granular soils*. Atti del Workshop Internazionale “Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfills - IW-Flows2003”, Sorrento.
- Hungr O., Evans S.G., Hazzard J. (1999). *Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia – Can. Geotech. J.36*, pp. 224-238.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N. (2001). *A review of the classification of landslides of the flow type*. Environmental & Engineering Geoscience, 7(3), pp. 1-18.
- Hutchinson J.N. (1977). *Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slope movements*. Bulletin of I.A.E.G., 16, pp. 151-156.
- Hutchinson, J.N. (1988). *Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology*. State of the Art Report. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne (Ed. C. Bonnard), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, vol.1, pp.3-35.
- Iverson R.M, Reid M.E, LaHusen R.G (1997). *Debris-flow mobilization from landslides*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1997. 25, pp. 85-138
- Kenney T.C., Pazin M., Choi W.S. (1977). *Design of horizontal drains*. J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 103, pp. 1311-1323.
- Leroueil, S., Locat, J., Vaunat, J., Picarelli, L., Faure, R. (1996). *Geotechnical characterisation of slope movements*. Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides. Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam. vol 1, p. 53-74.
- Lo D.O.K. (2000). *Review of natural terrain landslide debris resisting barrier design*. Special Project Report: SPR 1/2000, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong.

- Lumb P. (1975). *Slope failures in Hong Kong*. Quarterly Journal of Eng. Geol., vol. VIII, pp. 31-65.
- Maione U. (1998). *La sistemazione dei corsi d'acqua montani*. Editoriale BIOS, Cosenza.
- Malone, A.W. (1998). *Risk management and slope safety in Hong Kong*. Proc. of the Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong, Balkema, Rotterdam.
- Misra R.K. (1997). *Maximum axial growth pressures of the lateral roots of pea and eucalypt*. Plant and Soil, Kluwer Academic Publishers, 188, pp. 161-170.
- Morgenstern, N.R. (1985). *Geotechnical aspects of environmental control*. Proc. ICSMFE, San Francisco, Vol. I., pp. 155-185.
- Musso A. (1997). *Analisi delle colate rapide*, Interventi di stabilizzazione dei pendii, CISM, Udine, pp. 475-509.
- Nonvellier E. (1981). *Efficiency of horizontal drains on slope stability*. X ICSMFE, Stockholm, Vol. 3, pp. 495-500.
- Norem H., Locat J., Schieldrop B. (1990). *An approach to the physics and the modelling of submarine flowslide*. Marine Geotechnology, 9, pp. 93-111.
- Operstain V., Frydman S. (2000). *The influence of vegetation on soil strength*. Ground Improvement. Vol. 4, pp. 81-89.
- Orsi G., de Vita S., Di Vito M. (1996). *The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 74, 179-214.
- Pastor M., Fernandez Merodo J.A., Gonzalez E., Mira P., Li T., Liu X. (2003). *Modelling of landslides: (I) Failure mechanisms*. Appunti del Corso "Degradations and Instabilities in Geomaterials", June 16 - 20 2003, CISM, Udine.
- Picarelli L., Deangeli C., Olivares L. (2003). *Analisi dei fenomeni di colata*. Conferenze di Geotecnica di Torino, XIX Ciclo (in corso di stampa).
- Picarelli L., Olivares L. (2001). *Innesco e formazione di colate di fango in terreni sciolti di origine piroclastica*. Forum per il Rischio Idrogeologico in Campania, Napoli.
- Pierson T.C. (1977). *Factors controlling debris flow initiation on forested hillslopes in the Oregon Coast Range*. Ph.D. Thesis, University of Washington, Seattle.
- Puglisi S. (1999). *La sistemazione dei versanti e gli effetti della vegetazione*. Atti del Corso di aggiornamento in "L'Ingegneria Naturalistica nella sistemazione dei corsi d'acqua"; Milano, ottobre 1998, pp. 117-132.
- Rahardjo H., Leong E.C. (2002). *Horizontal drains in unsaturated slopes*. Atti della Third International Conference on Unsaturated Soils, 10-13 March, Recife, Brasil, 2, 773-777.
- Rossi F., Chirico G.B., Ricciardi (1998). *Guida all'utilizzo delle soglie pluviometriche dall'allarme*. Dipartimento della Protezione Civile. GNDCI. Università di Salerno, Settore di Idraulica e di Costruzioni Idrauliche.
- Sassa K. (1988). *Special lecture: Geotechnical model for the motion of landslides*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, 1, pp. 37-55.
- Savage S.B., Hutter K. (1986). *The motion of a finite mass of granular material down a rough incline*. J. Fluid Mechanics, 199, pp. 177-215.
- Scheidegger A.E. (1973). *On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides*. Rock Mechanics, 5, pp.231-236.
- Skempton A.W., Hutchinson J.N. (1969). *Stability of natural slopes and embankments foundations*. Proc. 7th Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng., Mexico, State of the Art volume, pp. 291-340.
- Sun H.W. (1998). *Review of fill slope failures in Hong Kong*. GEO Special Project Report SPR 4/98, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Dept., Hong Kong.
- Tarantino A., Mongiovi L., Mc Dougall J.R. (2002). *Analysis of hydrological effect of vegetation on slope stability*. Atti della Third International Conference on Unsaturated Soils, 10-13 March, Recife, Brasil, 2, 749-754.
- U.O. 2.38 (1998a). *Relazione sull'attività svolta dall'U.O. dell'Università di Salerno dal 21/05/1998 al 05/07/1998*. G.N.D.C.I. – Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno.
- U.O. 2.38 (1998b). *Ricerca storica sulle colate di fango in terreni piroclastici della Campania*. G.N.D.C.I.-C.N.R. - Università di Salerno.
- Valore C., Speciale G. (1986). *L'efficacia delle gallerie drenanti per il controllo delle pressioni neutre nei pendii*. AGI, XVI Conv. Naz. di Geotecnica, Bologna, vol. 2., pp. 203-211.

- VanDine D.F. (1996). *Debris flow control structures for forest engineering*. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08/1996, 68 pp..
- Varnes D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Natural Hazard, vol. 3, UNESCO Press, Parigi, 63 pp..
- Varnes D.J. (1978). *Slope movements. Types and processes*. In: Schuster R.L. & Krizker R.J. "landslides: analysis and control" – Nat. Acad of Sciences, Trasp. Res. Board, Washington, Special Report 76, pp.11-35.
- Versace, P. (2001). *La riduzione del Rischio idrogeologico nei Comuni colpiti dagli eventi del Maggio 1998 in Campania*. Proc. Forum per il Rischio Idrogeologico in Campania: 11-20. Napoli.
- Watson A., Phillips C., Marden M. (1999). *Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability*. Plant and Soil, Kluwer Academic Publishers, 217, pp. 39–47.
- Wu T.H. (1994). *Slope stabilization using vegetation*. In "Geotechnical engineering: emerging trends in design and practice", K.R. Saxena, Balkema, pp. 377-403.
- Wu T.H., Erb R. (1988). *Study of soil-root interaction*. J. Geotechn. Eng. 114(12), 1351-1375.