

I dissesti e le frane: che fare?

Classificazione, cause e suggerimenti di pronto intervento per un "fenomeno" ricorrente in questa Provincia

di **FIORAVANTE BOSCO**

Ufficiale volontario Corpo Nazionale Vigili del Fuoco Comando Provinciale di Benevento - Geologo professionista

1. PREMESSA E CONCLUSIONI

Gli Organi di informazione sanniti diffondono con frequenza notizie in merito a frane che hanno interessato questo o quell'angolo della Provincia. La cosa non sorprende.

La morfologia, la natura litologica e la giacitura delle formazioni geologiche affioranti, la sismicità e il carattere torrentizio di molti corsi d'acqua predispongono infatti il territorio della Provincia di Benevento a dissesto idrogeologico generalizzato. Come è noto, la zona più dissestata risulta quella della Val Fortore dove i terreni affioranti sono i più infidi e caratterizzati da scadenti proprietà meccaniche.

Il progressivo ampliamento delle aree utilizzate, strettamente interconnesso con l'incremento demografico, ha portato in questi ultimi anni, ad un uso sempre più esteso del territorio e delle risorse naturali, uso che molto spesso è diventato vero e proprio *abuso* o *sfruttamento* indiscriminato che non ha tenuto conto delle reazioni, a breve e lungo termine, dell'ambiente fisico naturale. L'aver gestito il territorio in maniera arbitraria e l'aver praticamente consentito il lecito e l'illecito nell'uso delle risorse naturali, ha portato ad un tale elevato grado di alterazione da produrre alluvioni, erosioni e frane ad ogni evento pluviale anche di entità inferiore alla media. In questo contesto gli eventi naturali non possono che tradursi in *calamità*, che molto spesso assumono erroneamente la denominazione di *calamità naturali*, provocando danni ingenti e stravolgimenti sociali ed economici alle popolazioni; non a caso la 42ª Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha designato l'ultimo decennio del secolo (1990-2000) come "*Decennio Internazionale per la Riduzione dei Disastri Naturali*" [CANUTI P. e ESU F. 1995].

Si contano in Italia tremila morti nel periodo dal 1949 al 1979, danni accertati dal Comitato Geologico del Ministero dell'Industria per circa 2000 miliardi l'anno [MINISTERO DELL'AMBIENTE 1987]. Questi dati sembrerebbero delineare che la difesa del suolo è una delle priorità nazionali. In quest'ottica sia il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, la Protezione Civile e sia gli Amministratori e Funzionari Pubblici degli Enti Territoriali sono chiamati direttamente in causa mediante *Soccorsi Tecnici* e cioè soccorsi che prevedono anche decisioni tecniche di pronto intervento sulla base però, di conoscenze scientifiche del problema. Nella pre-

sente nota pertanto, saranno esposte le nozioni di base che possono tornare utili a coloro che devono occuparsi dei dissesti e delle frane senza una specifica preparazione in campo geologico, come pure i suggerimenti tecnici di pronto intervento.

2. DEFINIZIONI

Sotto il profilo strettamente tecnico il *dissesto* in senso lato definisce "*qualsiasi situazione di squilibrio o di equilibrio instabile del suolo, del sottosuolo o di entrambi*" [NICOTERA P. 1975]. Il *dissesto idrogeologico*, per contro, secondo la Commissione DE MARCHI [1970], rappresenta "*quei processi che vanno dalle erosioni contenute e lente alle forme più consistenti della degradazione superficiale e sottosuperficiale dei versanti fino alle forme imponenti e gravi delle frane*". Il dissesto idrogeologico, pertanto, si può definire "*qualsiasi disordine o situazione di squilibrio che l'acqua produce nel suolo e nel sottosuolo*". In altre parole possono essere inclusi in questa definizione [BENEDINI M., GISOTTI G. 1975] i vari stati e forme dell'erosione idrica (erosione diffusa, calanchi, frane ecc.) come anche l'arretramento dei litorali in seguito alle aggressioni da parte delle acque del mare. A questi fenomeni distruttivi, si aggiungono generalmente sotto la stessa definizione, le alluvioni, le subsidenze e le valanghe. I dissesti, siano essi fenomeni franosi e/o di trasporto di massa, fenomeni di intensa erosione, alluvioni, valanghe ecc., sono da considerarsi, nel quadro generale del modellamento della superficie terrestre, come modi di esplicarsi del processo evolutivo generale che tende come stadio finale alla "*penneplanizzazione*" dei rilievi [IPPOLITO F. 1975].

Le frane, in particolare, tra i processi morfoevolutivi assumono una peculiare rilevanza, specie nelle aree dove affiorano sequenze terrigene a prevalente componente argillosa. In queste zone il fenomeno frana non è più un processo puntiforme, ma assume il significato di agente morfoevolutivo primario per il modellamento dei versanti [GUIDA M., IACCARINO G. 1984].

Ma come si può definire una frana?

Secondo ALMAGIA' R. [1907-1910] si deve considerare frana "*ogni forma accelerata e catastrofica della demolizione sub-aerea che sia effetto più o meno diretto della gravità*". CASTIGLIONI G.B. [1979] definisce frana il termine che indica "*tutti i*

fenomeni di caduta e i movimenti di masse rocciose o di materiali sciolti, come effetto prevalente della forza di gravità". LA COMMISSIONE INTERMINISTERIALE PER LO STUDIO DELLA SISTEMAZIONE IDRAULICA E DELLA DIFESA DEL SUOLO [1971] definisce frana "quei distacchi di falde di terreno più o meno repentina e veloce di masse più o meno cospicue di sfasciume roccioso". La stessa Commissione chiarisce che il termine frana talvolta viene usato per indicare tanto il movimento del terreno, quanto gli effetti di tale movimento e cioè lo squarcio del pendio intaccato dalla frana ed il cumulo di materiale franato. Per evitare confusione sarebbe utile usare la parola frana, in senso stretto, per lo squarcio e per il cumulo di frana e la parola franamento, per il movimento e/o il fenomeno franoso. Secondo la Commissione succitata, pertanto, si intende per fenomeno franoso "lo spostamento naturale di masse rocciose più o meno cospicue, sciolte o lapidee, che avviene con movimento veloce o lento sotto l'influenza della gravità".

Il fenomeno franoso peraltro è da considerarsi un fenomeno naturale, di per sé irripetibile, e di volta in volta condizionato dalla combinazione più o meno sfavorevole di molteplici fattori. L'uomo infatti è portato a considerare la superficie del suolo (che egli d'altronde chiama "terra ferma") perfettamente stabile e gli riesce difficile concepire che possa deformarsi, anche debolmente. Essa invece, orizzontale o inclinata, si trova in uno stato di stabilità apparente che può variare ad ogni istante a causa dei processi naturali o interventi antropici. L'evoluzione morfologica della superficie terrestre non è quindi esclusiva degli agenti esodinamici più appariscenti [NICOTERA P. 1975, VALLARIO A. 1975, IPPOLITO F. 1975]. Moltissime aree sono rimodellate ad opera di meccanismi complessi e spesso difficili da prevedere, ma di cui occorre temere gli effetti. Anzi, i movimenti franosi si possono ritenere, a scala umana, gli agenti fondamentali del modellamento dei versanti, specie laddove le condizioni geologiche favoriscono il prodursi di fenomeni ampi e continui [VALLARIO A. 1992].

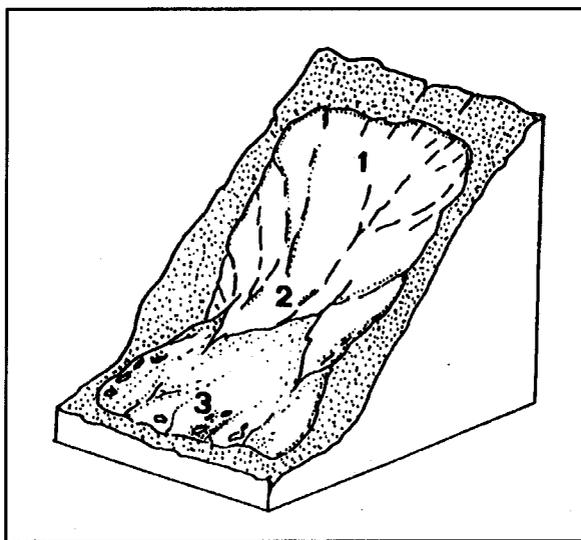


Fig. 1 - Parti di una frana: (1) Nicchia o zona di distacco, (2) Alveo o pendio di frana, (3) Accumulo o cumulo di frana (Da Desio A. 1971, ridisegnata)

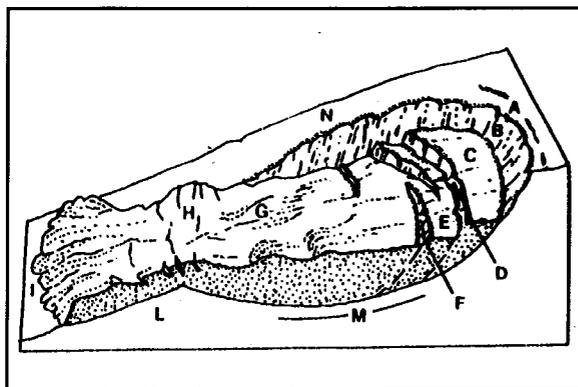


Fig. 2 - Nomenclatura delle varie parti di una frana: (A) Testata o coronamento, (B) Scarpata principale, (C) Terrazzo di testa di frana, (D) Scarpata secondaria, (E) Terrazzo di frana secondario, (F) Fessure trasversali, (G) Zona delle fessure longitudinali, (H) Zona delle fessure trasversali, (I) Fronte o unghia del cumulo di frana, (L) Piede, (M) Superficie di rottura, (N) Fianco destro della frana (Da Castiglione G.B. 1979, ridisegnata e modificata)

3. MORFOLOGIA DI UN MOVIMENTO FRANOSO

Nelle linee generali in un movimento franoso, sotto il profilo morfologico (Fig. 1 e 2), è possibile distinguere quasi sempre una *nicchia o zona di distacco*, un *alveo o pendio* e una *zona di accumulo o cumulo di frana*.

La nicchia di distacco è quella rottura di pendenza, spesso dal contorno arcuato, che si individua sul pendio, a monte del materiale franato. L'alveo è la superficie lungo la quale si sposta il corpo di frana, mentre la zona di accumulo è quell'area cui si accumulano i materiali franati.

La nicchia di distacco e il suo prolungamento sotto il cumulo di frana definiscono la *superficie di rottura o di scorrimento o di movimento* che segue il limite tra i terreni in posto e quelli franati. La rottura di pendenza a quota più alta viene definita anche *scarpata principale*, cui possono associarsi in basso delle *scarpate secondarie* che corrispondono a superfici di scorrimento relative, prodotte da movimenti differenziali entro la massa in frana. Tra la scarpata principale e le scarpate secondarie di norma sono presenti *gradini o terrazzi* talvolta sede di ristagni d'acqua. La zona a monte, adiacente alla parte più alta della scarpata principale, è detta *coronamento della frana* e spesso presenta una serie di *fessure periferiche*. La parte più alta del materiale di frana, lungo il limite tra il materiale spostato e la scarpata principale, è detta *testata della frana*. L'intersezione tra l'originaria superficie topografica e la superficie di scorrimento viene definita *pie-de* ed è, di norma sepolto dal cumulo di frana. Il *fronte o unghia della frana* è, invece, il margine più a valle del cumulo e generalmente anche il più distante dalla scarpata principale. I margini della massa franata vengono distinti rispettivamente in *fianco destro e sinistro*, per un osservatore con le spalle al coronamento. Nella zona di accumulo generalmente si riscontrano *fratture o crepe o rughe trasversali e longitudinali*. Nella parte centrale prevalgono quelle trasversali, più in basso e lungo i fianchi quelle longitudinali che, al fronte, possono divenire radiali.

4. CLASSIFICA DELLE FRANE

Numerose sono state fino ad oggi le classificazioni per le frane e i movimenti franosi da parte di illustri Studiosi. In letteratura si rilevano classificazioni estremamente semplicistiche ed altre altrettanto complicate. Le prime risultano di scarsa utilità pratica, le seconde propongono problemi tecnici spesso difficili per la loro applicazione [DESIO A. 1971].

Peraltro è da evidenziare che per classificare i dissesti in senso lato è opera ardua e complessa tenuto conto che molteplici e svariati sono i fattori che influenzano il fenomeno [NICOTERA P. 1975]. Le frane in particolare, come tutti i fenomeni naturali, sono meccanismi complessi che solo raramente è possibile ricondurre a schematizzazioni rigide e precostituite. A ciò bisogna aggiungere anche la visione specialistica dello Studioso (Geologo, Geotecnico, Ingegnere, Forestale, Geografo) che influisce sul particolare approccio al fenomeno [VALLARIO A. 1992].

Tanto premesso e considerato lo scopo della presente nota si ritiene richiamare una classificazione fondata essenzialmente sulle modalità con cui si manifesta la *frana*, modalità che dipendono in massima parte dalla natura geologica del sottosuolo in cui la frana si origina e si sviluppa [ALMAGIA' R. 1907-1910, CARRARA ED ALTRI 1985, CIVITA M. 1982, DESIO A. 1971, NICOTERA P. 1975, VALLARIO A. 1975-1992, VARNES D.J. 1958-1978].

I movimenti dei versanti possono essere distinti in due grandi categorie: "i Dissesti e le Frane".

I Dissesti, comprendono "quei fenomeni che agiscono e si sviluppano esclusivamente sulla porzione più esterna dei pendii e che ne regolano, più o meno rapidamente, la configurazione morfologica".

Le Frane comprendono "fenomeni ampi e profondi che investono anche il sottosuolo e modificano sostanzialmente la morfologia dei versanti mediante spostamenti di grandi masse rocciose".

4.1. DISSESTI

A questa categoria appartengono: "i fenomeni di intensa erosione, gli smottamenti, le colate fangose, i creep e i soliflussi".

4.1.1. Fenomeni di intensa erosione

In questi dissesti sono comprese tutte quelle manifestazioni morfologiche dovute quasi esclusivamente al processo distruttivo operato dall'azione meccanica delle acque scorrenti sui pendii. Tale azione si può esplicare su vaste aree come dilavamento e trascinarsi oppure in zone ristrette dove le acque si incanalano, generando una forte escavazione e conseguente trasporto di materiale. Queste azioni sono generalmente collegate in quanto le acque di dilavamento prima o poi finiscono con l'incanalarsi in alvei preesistenti e/o di neoformazione. L'erosione delle acque superficiali è certamente maggiore su quei pendii dove la permeabilità dei terreni è tale da consentire una scarsa infiltrazione delle acque stesse. L'intensità con cui progrediscono questi fenomeni però non è solo funzione del tipo litologico e quindi della permeabilità, ma anche della pendenza dei versanti: infatti, ad una maggiore pendenza corrisponde una più elevata velocità di corruzione e quindi una maggiore azione erosiva. Que-

sti fenomeni si svolgono quasi sempre in tempi brevi e in concomitanza delle massime precipitazioni.

4.1.2. Smottamenti

E' il precipitare caotico lungo una superficie di forma irregolare che si individua al momento in cui viene superata la resistenza al taglio del materiale (Fig. 3). Il fenomeno avviene in tempi brevi ed è

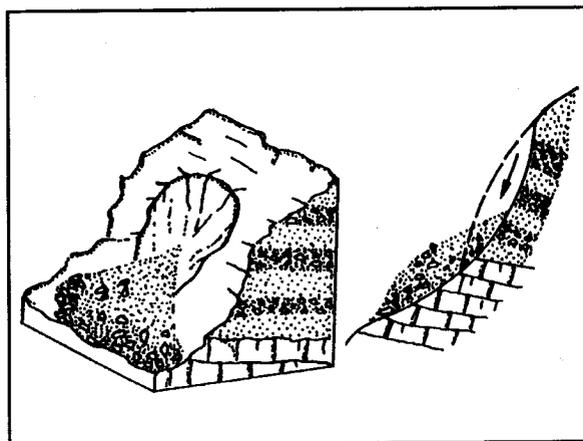


Fig. 3 - Aspetto morfologico di uno smottamento
(Da Vallario A. 1975, ridisegnata)

tipico dei conglomerati, delle sabbie più o meno cementate, dei tufi e di tutti i terreni clastici quaternari. Si originano di norma, ad opera di scalamenti al piede dovuti all'azione erosiva delle acque incanalate e spesso si manifestano in corrispondenza di tagli artificiali operati dall'uomo, laddove o non viene rispettato l'angolo di attrito interno del terreno o quando l'angolo di scarpa del pendio, per aumento del contenuto d'acqua, non corrisponde più alla resistenza al taglio del materiale. Generalmente si distingue una nicchia di distacco, dal contorno grossomodo arcuato, spesso allungata nel senso longitudinale del pendio e una zona di accumulo prossima a quella di distacco. L'alveo di frana è ridotto o assente; il materiale franato presenta un aspetto cumuliforme e funge da protezione naturale del piede del versante. Solo quando il materiale franato viene asportato, il fenomeno evolve nel tempo.

4.1.3. Colate fangose

Questi fenomeni sono paragonabili alle piene improvvise di una valle torrentizia. Sono colate essenzialmente fangose che hanno cioè una notevole percentuale in argilla o in limo, a cui possono mescolarsi ciottoli e blocchi. Questo materiale di alterazione superficiale (a cui si può associare anche il terreno arato) accumulato sui pendii si impregna d'acqua fino a che, superato il limite di liquidità, fluisce verso il basso inalveandosi in incisioni naturali. La distanza che percorrono le colate così come la velocità di scorrimento sono in rapporto con la quantità e la viscosità del materiale e la pendenza del versante. Via via che tali colate avanzano la loro massa aumenta a spese dei terreni mobili che incontrano nel loro cammino.

4.1.4. Creep e soliflussi

I creep sono scorrimenti plastici lenti che si manifestano con deformazioni superficiali dovute alla

somma dei movimenti delle singole particelle elementari di una formazione mobile e poco coerente (Fig. 4). Il fenomeno è lento e continuo e la veloci-

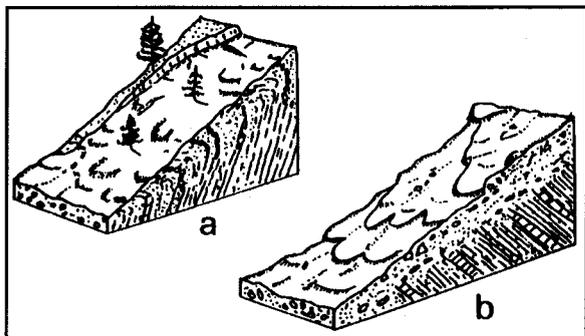


Fig. 4 - Aspetto morfologico di versanti interessati da creep e soliflussi

(Da Desio A. 1971 (a), Da Castiglione G.B. 1979 (b), ridisegnate)

tà è generalmente inferiore ai 25 mm. l'anno. Il fenomeno si verifica lungo superfici debolmente inclinate ed è accompagnato, in presenza di ostacoli da rigonfiamento e piegamento. Il movimento è legato al meccanismo gelo e disgelo, alle escursioni termiche, all'afflusso di acqua nelle fessure di disseccamento, all'azione delle radici, ad irrigazione intensiva ecc. Per quanto attiene i soliflussi, trattasi dello stesso procedimento descritto, ma su aree più vaste. Il processo di soliflussione si osserva su quei pendii dove nelle parti alte si riscontrano lacerazioni nel mantello vegetale ed in basso rigonfiamenti, dissesti nelle recinzioni ed alberi inclinati alla base del tronco e verticali in alto (alberi a canna di pipa).

4.2. FRANE

Si distinguono i seguenti tipi essenziali: "scoscendimenti, crolli, scivolamenti, colamenti, frane miste e/o di tipo complesso".

4.2.1. Frane da scoscendimento e/o da scorrimento rotazionale

Sono movimenti di masse rocciose lungo una superficie di neoformazione, dal profilo grosso modo cicloidale (ad anfiteatro e/o a vanga) (Fig. 5). Sono

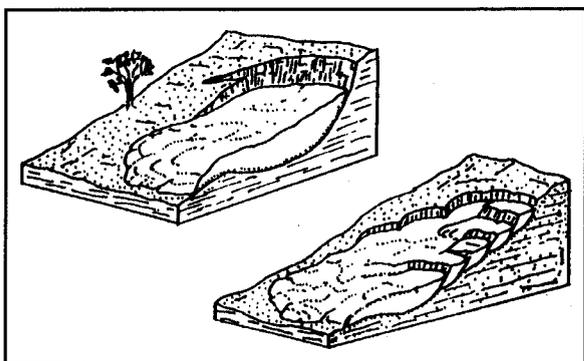


Fig. 5 - Aspetti morfologici di frane da scoscendimento e/o da scorrimento rotazionale

(Da un disegno di Trevisan in Desio A. 1971, ridisegnato)

tipici dei terreni sciolti o scarsamente cementati quali sabbie, conglomerati ed arenarie poco cementate, coltri di alterazione ecc. L'aspetto morfologico è tipico: una nicchia di distacco ben definita in alto, un cumulo di frana che presenta un profilo con pen-

denze inferiori a quella della preesistente superficie topografica. Nell'ambito del corpo di frana si possono individuare rigonfiamenti e depressioni in cui si raccolgono temporaneamente le acque di pioggia. Il fronte di frana ha una pendenza quasi sempre maggiore di quella del corpo di frana ed un andamento planimetrico arcuato. Gli scoscendimenti possono verificarsi per scalzamento alla base operato dalle acque fluviali oppure da lavori di scavo sbancamenti di natura antropica, oppure ancora per imbibizione del materiale dovuto all'infiltrazione di acque sotterranee o di pioggia.

4.2.2. Frane da crollo

Consistono nel distacco improvviso di falde rocciose che si spostano con relativa rapidità lungo una superficie che si individua al momento in cui la resistenza al taglio viene superata dallo sforzo (Fig. 6). Sono

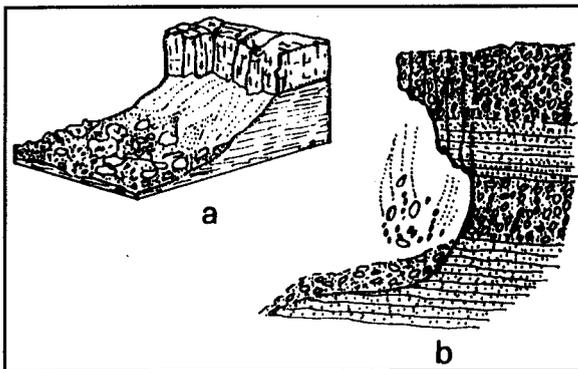


Fig. 6 - Aspetti morfologici di frane da crollo: (a) in rocce lapidee, (b) in rocce poco coerenti

(Da Vallario A. 1992, ridisegnate)

tipiche dei conglomerati, arenarie e tufi e subordinatamente nei calcari; la superficie di distacco, generalmente molto netta, ha un andamento subverticale. Si originano ad opera dello scalzamento al piede dei versanti dovuto alle acque fluviali oppure al franamento delle formazioni rocciose sottostanti.

4.2.3. Frane da scivolamento e/o da scorrimento traslativo

Sono slittamenti di materiali litoidi, per lo più stratificati, lungo le superficie preesistenti al fenomeno che si verifica per riduzione della resistenza di attrito (Fig 7). Il movimento può avvenire in

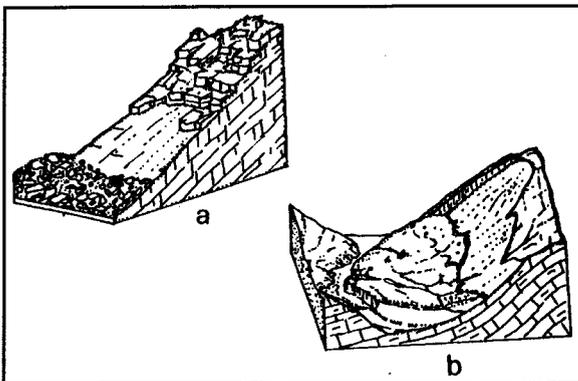


Fig. 7 - Aspetti morfologici di frane da scivolamento e/o da scorrimento traslativo: (a) Scivolamento di blocchi rocciosi, (b) Scorrimento traslativo nell'ambito di depositi lapidei stratificati con interstrati incompetenti

(Da Carrara A. 1985 (a), Da Civita M. 1982 (b), ridisegnate)

corrispondenza di piani di stratificazione, superfici di faglia o lungo superfici di contatto tra due formazioni rocciose differenti. Il fenomeno è rapido e si esplica lungo la linea di massima pendenza del piano di scorrimento. Il corpo di frana generalmente si suddivide in più *zolle* che spesso conservano il loro naturale assetto stratigrafico. Queste frane sono tipiche delle successioni sottilmente stratificate laddove si realizzano contatti tra formazioni a competenza e caratteristiche di permeabilità differenti. Si originano per effetto di un aumento della pressione interstiziale di una falda sotterranea o in corrispondenza di tagli e scavi sbancamenti che mettono a giorno piani potenziali di scorrimento, con una inclinazione uguale o minore di quella del versante.

4.2.4. Frane da colamento

Sono deformazioni plastiche generalmente lente (fino a 20/30 metri al giorno) che si sviluppano lungo superfici di scorrimento non ben definite geometricamente (Fig. 8). Non esiste cioè una netta sepa-

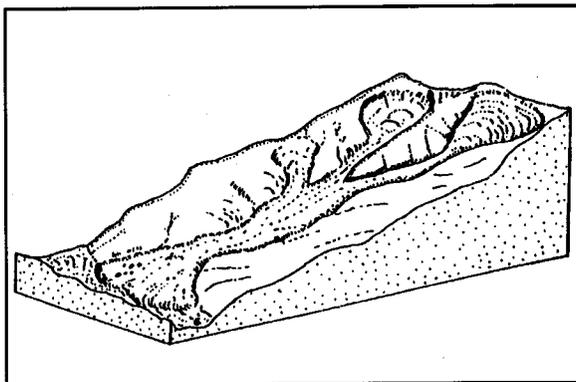


Fig. 8 - Aspetto morfologico di una frana da colamento e/o colata

(Da Castiglione G.B. 1979, ridisegnata)

razione tra la massa in frana e quella in sito e lo spostamento avviene lungo tante superfici relative per cui sembra logico parlare di una *banda e/o range* di scorrimento tra la massa in *quiete* e in quella in movimento. Ciò perché all'interno della falda che frana la distribuzione della velocità non è uniforme; l'ampiezza areale della banda è funzione delle caratteristiche tecniche del materiale e delle condizioni geomorfologiche del versante. Si originano per l'ammollimento di masse rocciose ad opera di acque superficiali o sotterranee. L'imbibizione infatti comporta un appesantimento dei terreni che si mettono in movimento, deformandosi plasticamente per uno spessore più o meno ampio. I colamenti interessano aree estese caratterizzate da ondulazioni, rigonfiamenti, depressioni a conca e scarpate. L'aspetto morfologico è tipico: la frana si manifesta con un corpo in continuo e lento movimento verso valle che riceve apporto di materiale da monte e lateralmente laddove sono più evidenti le depressioni. Spesso si accompagnano a scoscendimenti in quelle aree, dove lo spostamento è più accelerato per un aumento di acclività del versante, o per erosione alla base lungo incisioni laterali. I terreni prevalentemente interessati da questi fenomeni sono tutti i sedimenti argillosi o clastici con abbondante matrice argillosa ed arenacea.

4.2.5. Frane miste e/o di tipo complesso

Sono la combinazione dei tipi precedentemente descritti (Fig. 9 e 10). Frequenti sono le associazio-

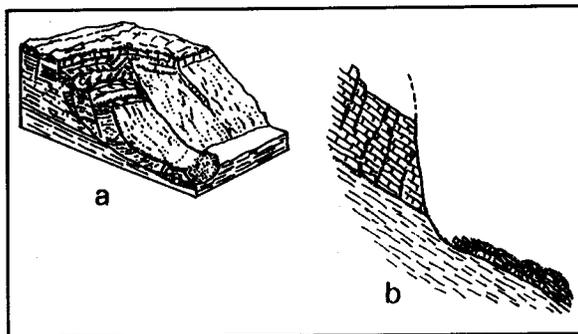


Fig. 9 - Esempi di due fenomeni franosi di tipo complesso e/o misti: (a) Scorrimento rotazionale (scoscendimento) colamento, (b) Scorrimento traslativo (scivolamento) di blocchi-crollo di roccia

(Da Carrara A. 1985, ridisegnate)

ni crollo colamento, scoscendimento crollo, scoscendimento colamento, colamento colata fangosa. Frane miste del tipo crollo colamento si sviluppano allorquando masse litoidi competenti (calcarei, conglomerati, arenarie ecc.) sono sovrapposte a formazioni plastiche (argille, limi ecc.). L'imbibizione dei terreni argillosi provoca fenomeni di colamento, con richiamo di materiale da monte. La mancanza di sostegno alla base dei litotipi più rigidi genera in essi crolli lungo superfici di neoformazione quando, lo sforzo di taglio supera la resistenza offerta dalle rocce. Scoscendimenti si sviluppano di sovente al fronte e lungo i fianchi di fenomeni franosi del tipo crollo o colamento, cosicché in queste zone è possibile osservare le combinazioni crollo scoscendimento e colamento scoscendimento legate essenzialmente a fenomeni erosivi, operati dalle acque incanalate, alla base del cumulo di frana o lungo i fianchi di incisioni longitudinali e laterali. L'associazione colamento colata fangosa si individua frequentemente lungo i pendii affetti da vasti colamenti. Nelle parti superficiali la coltre in movimento, dopo intensi eventi piovosi, si allenta e fluisce verso valle, assumendo l'aspetto di una vera e propria colata fangosa. Il fenomeno si genera soprattutto nelle zone più acclivi e lungo le incisioni nelle quali queste colate si inalveano.

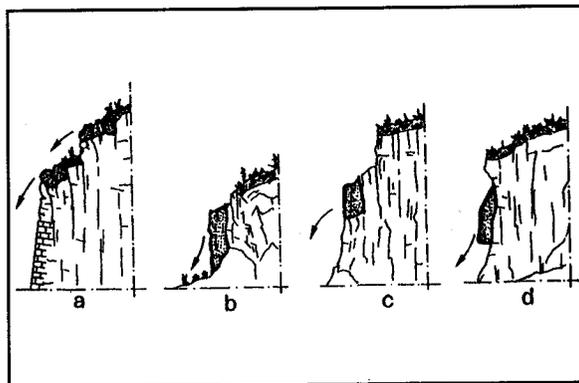


Fig. 10 - Aspetti morfologici di alcune forme di instabilità in rocce lapidee: (a) Rotolamento e caduta libera di volumi rocciosi, (b) Scivolamenti di volumi rocciosi, (c) Ribaltamento di volumi rocciosi, (d) Crollo per distacco di volumi rocciosi

(Da Fornaro M. e Lunardi P. 1980, ridisegnate)

5. CAUSE DELLE FRANE

I fattori che favoriscono, condizionano e determinano i movimenti franosi si possono distinguere in fissi o passivi (per lo più costanti nel tempo), e fattori variabili o attivi che possono subire variazioni anche in tempi brevi. Nei primi rientrano la *costituzione geologica*, la *configurazione topografica* e le *caratteristiche idrogeologiche*. Nei secondi rientrano i fattori *climatici e vegetazionali* e quelli *antropici* [DESIO A. 1971, VALLARIO A. 1975, 1992].

Nelle linee generali le cause dei movimenti franosi sono costituite da tutte le azioni che turbano gli equilibri naturali ad un pendio, provocando lo spostamento di ammassi rocciosi sotto l'azione della gravità. Le stesse cause, in particolare, possono essere distinte in: a) cause *strutturali o predisponenti*; b) cause *occasionalmente o determinanti* che possono ulteriormente essere distinte in *naturali ed artificiali*. Le cause strutturali o predisponenti sono quelle connesse ai fattori geologici, morfologici, idrogeologici, quali la forma e le dimensioni dei corpi geologici, i rapporti con quelli adiacenti, i tipi litologici, la giacitura degli strati, lo stato di fratturazione, l'alterazione delle rocce, la permeabilità, la pendenza dei versanti ecc. Le cause occasionali o determinanti sono quelle che determinano in quel momento l'alterazione degli equilibri naturali, in conseguenza alla sfavorevole combinazione di più fattori [VALLARIO A. 1992]. In particolare l'equilibrio può essere turbato da [DESIO A. 1971, ESU F. 1984]:

- "aumento del peso specifico"
- "aumento dell'inclinazione del pendio"
- "aumento di carico"
- "diminuzione della coesione"
- "diminuzione dell'attrito tra falda e substrato"

- L'aumento del peso specifico apparente o peso di volume è dovuto ad un aumento della quantità di acqua nel terreno. Ciò, in una falda rocciosa con inclinazione prossima all'angolo di riposo, può provocare il franamento. A titolo di esempio una sabbia grossolana asciutta presenta un peso di volume variabile da 1,3 a 1,5 t/mc.; la stessa sabbia, bagnata, raggiunge il peso di circa 1,7 t/mc.
- L'aumento dell'inclinazione si verifica soprattutto per effetto dell'erosione al piede operato dalle acque di ruscellamento, all'azione erosiva delle onde marine o da lavori di scavi-sbancamenti. Nelle linee generali la pendenza di una scarpata dovrebbe essere sempre mantenuta al di sotto dell'angolo di riposo o di natural declivio, tenendo presente che, per uno stesso terreno, la pendenza medesima varia in funzione della quantità d'acqua che contiene.
- L'aumento di carico si ha quando nuovi materiali detritici, siano essi naturali (materiali di frana) od artificiali (discariche) si sovrappongono ai terreni antecedenti affioranti. Lo stesso effetto può essere provocato dalla realizzazione di manufatti (edifici compresi) che esercitano forti carichi o pressioni sull'unità di superficie.
- La diminuzione della coesione è determinata prevalentemente dall'azione delle acque vado-se. Questa azione può esplicarsi nella solubiliz-

zazione del cemento che teneva uniti fra loro gli elementi del terreno, nell'ammollimento (*plasticizzazione*) di masse argillose, nell'ampliamento di fessure per azioni solvente (*in particolare su rocce calcaree e gessi*) e dall'azione del gelo e del disgelo. L'annullamento o quasi della coesione comporta conseguentemente anche una notevole riduzione dell'angolo di attrito interno.

- La diminuzione dell'attrito tra falda e substrato è dovuta sia all'azione erosiva delle acque sotterranee sia a processi di plasticizzazione delle argille. Spesso si formano accumuli idrici alla base quando il substrato è meno permeabile e ciò favorisce scollamenti e franamenti delle masse rocciose che slittano lungo superfici lubrificate.

Tra le cause determinanti, sia naturali che artificiali, si ricordano le sollecitazioni al moto provocate da cadute di slavine e valanghe, di massi rocciosi nonché dalle spinte del vento specie sulle creste montuose. Si ricordano ancora anche le vibrazioni prodotte da scosse sismiche e vibrazioni artificiali dovute ad esplosioni o al transito di mezzi pesanti. Le scosse sismiche in particolare, aumentano bruscamente le tensioni di taglio lungo potenziali superfici di scorrimento; cioè le forze che tendono a far scivolare la falda si amplificano di una quantità proporzionale al peso stesso della falda rocciosa ed eventuali sovraccarichi. Le conseguenze associate a questo possibile evento possono essere addirittura disastrose per il pendio e quindi per eventuali centri abitati sovrastanti [COTECCHIA V. 1984].

Occorre aggiungere infine, sempre tra le cause determinanti artificiali le azioni antropiche che, sono essenzialmente il disboscamento e gli scavi sbancamenti [BOSCO F. 1993]. I primi agevolano lo scorrimento delle acque dilavanti e l'erosione superficiale; gli scavi sbancamenti, quando non protetti da opportune opere di presidio statico, modificano le pendenze del versante, interrompendo la continuità della copertura vegetale e spesso aprono nuove vie di penetrazione delle acque meteoriche.

Sotto il profilo geomeccanico, le cause delle frane, vanno distinte secondo TERZAGHI K. [1974] in *esterne ed interne*. Le prime generano aumenti delle forze di taglio, pur rimanendo inalterate le resistenze del materiale. Assumono particolare importanza gli aumenti di acclività dei versanti per erosione alla base o per scavi sbancamenti, il sovraccarico dovuto al peso dei manufatti nonché le scosse sismiche.

Le cause interne sono quelle che conducono ad un decremento delle resistenze senza che vi siano variazioni di condizioni superficiali. Quindi in assenza di cause esterne, se un pendio frana, si può ritenere che la resistenza al taglio diminuisce a causa di un incremento delle pressioni neutre o interstiziali. Infatti, esaminando la nota relazione di Mohr-Coulomb in termini di pressioni effettive:

$$\tau = c + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi \quad \text{dove:}$$

c = coesione del terreno

ϕ = angolo di attrito

σ = pressione totale in sito

si vede come un aumento del termine (u) , *valore puntuale delle pressioni neutre*, provoca un abbassamento della resistenza locale a taglio (τ) .

6. PRINCIPI E METODI DI STABILIZZAZIONE

La stabilizzazione di un pendio si realizza correttamente agendo sulle cause del fenomeno naturale mediante interventi opportuni atti ad incrementare le forze resistenti, ovvero a ridurre le forze motrici che tendono a provocare la rottura. Seguire l'uno o l'altro principio, dipende da molteplici fattori e circostanze, di ordine tecnico e di natura economica, che vanno valutati caso per caso. In generale, un intervento di stabilizzazione è tanto più efficace quanto più profondamente agisce nel senso di eliminare le cause del dissesto in atto e temuto [D'ELIA B. 1983].

L'incremento delle forze resistenti si può raggiungere mediante l'aumento degli sforzi normali lungo la superficie di rottura, con la riduzione delle pressioni neutre in punti interni o lungo il contorno della superficie di rottura stessa ed infine, con il miglioramento della resistenza al taglio del materiale.

La riduzione delle forze applicate, che tendono a provocare il franamento, si può realizzare con il decremento degli sforzi tangenziali lungo la superficie di rottura e con il trasferimento degli sforzi tangenziali ad elementi strutturali fondati o ancorati ad un ammasso roccioso non interessato dal fenomeno [VALLARIO A. 1992].

Si riportano di seguito i principali metodi di stabilizzazione e/o opere da realizzare distinti secondo il principio di funzionamento e cioè a seconda che si intende incrementare le forze resistenti o ridurre gli sforzi applicati o si voglia tendere contemporaneamente ad entrambe i fini [JAPPELLI G. ED ALTRI 1985, ESU F. 1987, D'ELIA B. 1983, VALLARIO A. 1992].

6.1. PRINCIPIO DELL'INCREMENTO DELLE FORZE RESISTENTI

- "Incremento degli sforzi lungo la superficie di rottura": si ottiene con la realizzazione di rinfianchi o placcaggi al piede (Fig. 11a).
- "Riduzione delle pressioni neutre in punti interni o lungo il contorno": si realizza con l'allontanamento delle acque superficiali e nella costruzione di drenaggi (Fig. 11b).
- "Incremento delle resistenze al taglio del materiale": si ottiene mediante interventi speciali applicabili solo in casi particolari; tra i sistemi in uso vanno ricordati le iniezioni, l'addensamento del materiale, il congelamento e la cottura.

6.2. PRINCIPIO DELLA RIDUZIONE DELLE FORZE CHE TENDONO A PROVOCARE LA ROTTURA

- "Riduzione degli sforzi tangenziali lungo la superficie di rottura": si realizza mediante scavi di alleggerimento sulla sommità del pendio o anche con l'abbattimento e/o riduzione della pendenza del versante (Fig. 11c e 11d); questi sistemi non sono sempre fattibili tenuto conto del costo eccessivo e per la presenza di eventuali manufatti.

- "Incremento delle forze resistenti mediante elementi strutturati fondati o ancorati ad una formazione sottostante non interessata dal dissesto": il trasferimento degli sforzi tangenziali può avvenire con la realizzazione di muri di sostegno, palificate, paratie, palancole, ancoraggi, chiodature ecc. (Fig. 11e e 11f); questi interventi devono essere progettati con criteri cautelativi specialmente quando previsti con funzione di sostegno prevalente.

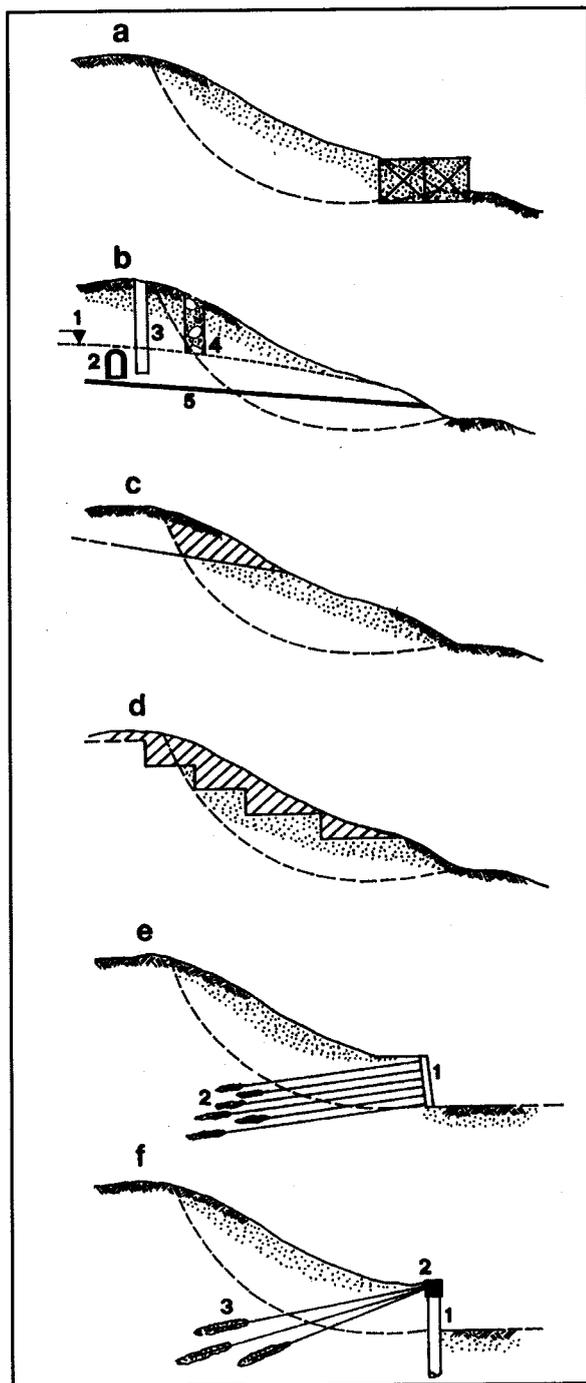


Fig. 11 - Esempi di interventi-provvedimenti per la stabilizzazione dei pendii-scarpate: (a) Sovraccarico al piede; (b) Drenaggi: 1) Livello piezometrico, 2) Galleria drenante, 3) Pozzo drenante, 4) Trincea drenante, 5) Dreno subverticale; (c) Scavo di alleggerimento alla sommità del pendio-scarpata, (d) Abbattimento e/o risagomatura a gradoni della parte alta del versante; (e) Elementi strutturali: 1) Muri di sostegno, 2) Tiranti pretesi; (f) Sistemi di pali: 1) Paratia, 2) cordolo di coronamento e/o di registro, 3) eventuali tiranti

(Da Jappelli R., Musso A. 1983 e da Vallario A. 1992, ridisegnate e modificate)

7. PROVVEDIMENTI DI PRONTO INTERVENTO

Il progetto delle opere per la stabilizzazione di un pendio comprende, in generale, in un primo tempo, una serie di provvedimenti immediati o "di pronto intervento", per scongiurare anche incombenti pericoli alla incolumità pubblica, ed, in un secondo tempo, la scelta e la progettazione delle opere di carattere definitivo*.

Quando si verifica una frana, specie se di notevole dimensioni, non è sempre possibile iniziare i lavori di sistemazione definitiva in breve tempo. Il ritardo può essere giustificato dai lunghi tempi necessari per l'esecuzione delle indagini preliminari, specie quelle di tipo geologico e geotecnico. Ciò nonostante, per ragioni di pubblica utilità, può risultare necessario mantenere "in uso e/o in esercizio", anche se ridotta, la zona investita dal fenomeno. E' in questo contesto che diventa improrogabile eseguire rapidamente determinate opere immediate che forniscano un certo grado di sicurezza nelle aree coinvolte in eventuali movimenti successivi. Sistemazioni di questo tipo in particolare, sono più frequenti quando il dissesto interessa linee di comunicazione di una certa importanza, sia stradali che ferroviarie, lungo le quali si deve garantire il transito con un buon grado di sicurezza. Si deve tener presente che un fenomeno correttamente interpretato nell'immediato, può essere curato con l'esecuzione di manufatti da utilizzare poi quali opere di base per i futuri interventi. Ciò che certamente non si deve fare è l'asportazione del cumulo di frana o della porzione anteriore dello stesso, a meno che non si tratti di una frana da crollo (non conseguente ad uno scalzamento al piede del versante) o da ribaltamento, in questi due ultimi casi il cumulo non partecipa attivamente all'equilibrio del versante [VALLARIO A. 1992].

I provvedimenti immediati e/o di pronto intervento comprendono essenzialmente:

7.1. DISCIPLINA, CAPTAZIONE, CONVOGLIAMENTO DELL'ACQUA E DELLE EVENTUALI SORGENTI CHE DEFLUISCONO ALLA ZONA IN FRANA E CHE SI ACCUMULANO NELLE AREE PIÙ DEPRESSE

L'obiettivo è quello di disciplinare le acque superficiali e/o di media profondità al fine di diminuire le pressioni neutre alleggerendo nel contempo il peso del pendio stesso. Per la raccolta e lo smalti-

mento delle acque liberamente fluenti o di precipitazione diretta che dall'esterno tendono a raggiungere l'area in frana è opportuno realizzare, a monte della nicchia di distacco, un "fosso di guardia o circondariale" in terra e/o mediante canalette flessibili. Per contro, se le acque superficiali circolano direttamente in corrispondenza dell'area in frana o che sostano nelle depressioni topografiche della stessa è opportuno realizzare, una piccola ma efficace rete di "canali drenanti" (in terra o con tubazioni flessibili). E' ovvio, che le acque così disciplinate saranno convogliate in impluvi opportunamente sistemati al di fuori dell'area in frana. Per disciplinare le eventuali acque sotterranee si potranno realizzare opere di drenaggio mediante scavi in trincea e la posa in opera di gabbionate e/o direttamente materiale arido di idonea pezzatura. Generalmente si realizza dapprima un setto drenante longitudinale al corpo di frana, con compiti talvolta anche di struttura portante e quindi di contrasto al movimento franoso, cui si attestano rami laterali disposti a "spina di pesce".

7.2. RIMOZIONE, EVENTUALMENTE CON L'IMPIEGO DI ESPLOSIVI, DEI DETRITI CHE IMPEDISCONO IL DEFLUSSO DELLE ACQUE

Come detto, l'acqua va sempre disciplinata tenuto conto che costituisce uno tra i maggiori pericoli sia per la stabilità del versante che per l'incolumità degli operatori che vicino vi operano. Si deve cercare quindi di permettere, nel modo più agevole, il deflusso ricorrendo anche all'uso di esplosivi per la rimozione di massi, trovanti e detriti che ne sbarrano il passaggio. Ciò al fine di evitare anche possibili formazioni di vere e proprie vasche di accumulo incontrollate che con il passar del tempo, anche a causa di eventi meteorici, potrebbero rovinosamente tracimare e rovesciarsi verso valle, creando ulteriori e seri danni.

7.3. POMPAGGIO DELL'ACQUA DAI POZZI ESISTENTI IN ZONA

Quando nell'area in frana sono numerosi i pozzi per emungere acqua dal sottosuolo, può essere molto utile, provocare l'abbassamento della piezometrica con il pompaggio continuo. Questa operazione, non sempre possibile, può agevolare rapidamente un incremento delle pressioni effettive e quindi delle resistenze al taglio del materiale.

7.4. RISAGOMATURA DEL PENDIO INTERESSATO DALLA FRANA

La stabilità del pendio può essere sensibilmente migliorata modificando l'andamento della superficie topografica con la realizzazione di sottobanche al piede e, se possibile, alleggerimenti in sommità. Nelle linee generali provvedimenti basati su semplici movimenti di terra hanno il vantaggio di consentire l'esecuzione di ogni tipo di operazione con sufficiente immediatezza e con grande economicità. In particolare l'alleggerimento del pendio in sommità, dove è possibile, garantirà certamente maggiore sicurezza al lavoro che gli operatori svolgeranno a valle dello stesso. L'intervento di risagomatura comprende nelle linee essenziali tre operazioni: asportazione della porzione sommitale del versante, riporti

(*) Da anni nei Paesi centro europei e da qualche decennio nelle Regioni Alpine italiane sono in fase di sperimentazione, accanto ai metodi tradizionali, tecniche e metodi di ripristino e/o di stabilizzazione complementari a basso impatto ambientale. Si utilizzano, come materiali da costruzione, piante viventi, parti di piante o addirittura intere biocenosi vegetali, spesso in unione con materiali non viventi come pietrame, terra, legname, acciaio. Trattasi di tecniche di «Ingegneria naturalistica» e/o di «Bioingegneria forestale» le quali, accelerando i processi naturali in atto, consentono il raggiungimento di precisi obiettivi in tempi più brevi ed a costi sostenibili. E' auspicabile che anche in questa Provincia, e più in particolare nelle zone Appenniniche, si avvii la sperimentazione al fine di conoscere meglio le caratteristiche della vegetazione autoctona, specialmente per le specie «pioniere» che sono capaci di consolidare efficacemente, grazie agli apparati radicali, sponde, versanti e scarpate.

nella zona del piede e riduzione della pendenza in modo da ridurre il momento delle forze motrici ed aumentare nel contempo il momento delle forze resistenti.

7.5. SIGILLATURA, PREVIA PULITURA SUPERFICIALE, DELLE PRINCIPALI LESIONI CHE SI MANIFESTANO NEL CORPO DI FRANA, DISGAGGIO DI MASSI PERICOLANTI

E' un tipo di intervento che, per lo più, riguarda le frane di tipo traslatorio in terreni lapidei. La sigillatura, mediante l'inserimento nelle fessure e nelle lesioni, di malta di tipo espansivo consente di evitare possibili crolli o distacchi di materiale roccioso. Se inserita lungo la superficie di discontinuità, la malta cementizia può garantire maggiore aderenza tra strati a diretto contatto incrementando quindi la resistenza al taglio lungo la predetta superficie. La sigillatura comunque, dovrebbe essere preceduta da una accurata operazione di pulitura di tutto il versante interessato dalla frana al fine di mettere a nudo la roccia fessurata. Nell'ambito della pulitura è opportuno anche procedere al *disgaggio di massi* che si ottiene facendo precipitare le parti pericolanti della roccia di una parete o di una scarpata, in modo da anticipare la loro caduta.

7.6. CARICO AL PIEDE

Con questo intervento si cercherà, sovraccaricando il piede delle frana, di incrementare gli sforzi normali lungo la superficie di rottura. L'operazione si realizza con la posa in opera di gabbionate o di materiale arido di idonea pezzatura, posizionato normalmente alla direzione di scorrimento verso la zona dell'unghia del cumulo di frana. In questo modo si ostacolerà il movimento del cumulo di frana, si avrà nel contempo una compattazione del cumulo stesso a partire dal basso e si agevolerà l'espulsione delle acque (funzione drenante). Per una maggiore rapidità di esecuzione si possono utilizzare particolari tipi di gabbioni costituiti da un cilindro di rete metallica con apertura ad una estremità (a sacco) o laterale (a pagliericcio). Se il cumulo di frana interessa linee di comunicazione, sia stradali che ferroviarie, lungo le quali si deve garantire il transito con un buon grado di sicurezza, si procederà alla rimozione parziale del cumulo di frana stesso predisponendo alcune strutture di sostegno nei punti critici. Ci si può indirizzare verso palizzate in elementi prefabbricati metallici o palizzate di legno infisse a file distribuite su vari livelli e naturalmente a cordoni di gabbionate.

7.7. INSTALLAZIONE DI CAPISALDI IN SUPERFICIE PER IL CONTROLLO DEGLI SPOSTAMENTI

Non si tratta di un vero e proprio intervento immediato e direttamente sulla frana. La sua utilità comunque è quella di registrare eventuali spostamenti in atto e/o residui del versante nel tempo, permettendo successivamente di avere più dettagli puntuali sulla massa interessata dal dissesto anche al fine delle decisioni sugli interventi definitivi. Ciò si realizza generalmente con ripetute misure topografiche dirette con apposita strumentazione ed ese-

guite con cadenza temporale. Va ricordato peraltro che alcuni fenomeni franosi, per la "salvaguardia della pubblica incolumità", impongono la sorveglianza "a vista" o la realizzazione di sistemi automatici di allarme [VALLARIO A. 1992.].

APPENDICE:

VERIFICHE DI STABILITÀ

La stabilità dei pendii, comprendendo sia i pendii naturali (generati in tempi lunghi da cause naturali legate al modellamento della superficie del suolo) che quelli artificiali (generati modificando con scavi o riporti la configurazione originaria del suolo creando superfici con inclinazione maggiore di quelle naturali) è un problema di notevole interesse tecnico, e può essere studiato facendo riferimento a condizioni di equilibrio limite globale, atteso il coinvolgimento della resistenza a rottura del terreno impegnato.

Nelle linee generali le condizioni di stabilità dipendono essenzialmente dai seguenti fattori principali:

- dalla *pendenza* e quindi dalla forza di gravità che tende a trascinare in basso i terreni (la gravità è tanto maggiore quanto è più inclinato il pendio);
- dall'*attrito* che contrasta la gravità ostacolando lo scorrimento;
- dalla *coesione* e/o resistenza d'attrito che tende a mantenere unite fra loro le particelle che compongono il terreno impedendo che una parte si distacchi dal resto.

La coesione e l'attrito sono interconnessi alle caratteristiche geologiche e geotecniche e alle condizioni di umidità del terreno.

Lo scorrimento verso il basso di un ammasso roccioso può essere assimilato al moto di un corpo su un piano, inclinato di un certo angolo β rispetto all'orizzontale (Fig. 12).

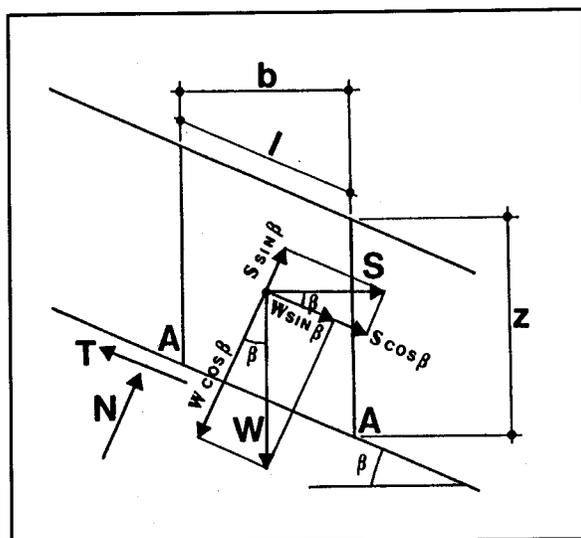


Fig. 12 - Schema grafico delle condizioni di equilibrio di un pendio illimitato

Considerando un elemento verticale di una striscia di terreno di spessore e lunghezza illimitata, dall'esame dell'equilibrio si definiscono le seguenti forze in gioco (le pressioni sui lati della striscia essendo uguali ed opposte si annullano, vanno considerate pertanto solo le forze che agiscono sul lato A-A):

- la forza peso dell'elemento verticale considerato, data da:

$$W = z \cdot b \cdot G \quad \text{con} \quad (1)$$

G = peso di volume del terreno

- la forza attiva o di taglio (componente di W parallela al piano inclinato) che può generare lo scivolamento, data da:

$$T = W \cdot \sin \beta \quad (2)$$

- la forza resistente o pressione normale (componente di W normale al piano inclinato) che si oppone allo scivolamento, data da:

$$N = c + W \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi \quad \text{dove} \quad (3)$$

c e ϕ sono rispettivamente la coesione e l'angolo di attrito del terreno impegnato.

Si osserva che la (3), è stata scritta supponendo che lungo la A-A di Figura 1 lo sforzo di taglio τ e lo sforzo normale σ sono legati dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb in assenza di pressione dei pori:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (4)$$

In condizione di equilibrio limite, cioè quando il "blocco" di terreno è prossimo allo scivolamento, avremo:

$$T = N \quad \text{e quindi} \quad (5)$$

$$W \cdot \sin \beta = c + W \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi \quad (6)$$

Il primo membro dell'equazione rappresenta le forze agenti o attive e il secondo le forze resistenti. Una variazione dei valori di uno dei membri della (6) porta alla stabilizzazione (se il primo diventa minore del secondo) o a una perdita dell'equilibrio e quindi al "franamento" (se il secondo diventa minore del primo).

Nasce così l'opportunità di definire il fattore o coefficiente di sicurezza F nella forma:

$$F = \frac{\text{RESISTENZA AL TAGLIO DISPONIBILE}}{\text{RESISTENZA AL TAGLIO MOBILITATA}} \quad \text{ossia} \quad (7)$$

$$F = \frac{c + W \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \beta}$$

per cui: $F = 1$ rappresenta la condizione di equilibrio limite (condizione da evitare atteso che viene a corrispondere con la situazione di potenziale instabilità) e $F > 1$ esprime la stabilità secondo l'evidente significato fisico attribuito a questo termine.

Nel caso di assenza di coesione, il coefficiente di sicurezza sarà pari a:

$$F = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (8)$$

Per quanto attiene le condizioni di stabilità di pendii o scarpate di altezza limitata, generalmente si fa riferimento, quando non esistono piani preferenziali di scorrimento, a superfici cilindriche a direttrice circolare. La linea di slittamento o superficie critica viene riprodotta lungo archi di cerchio aventi raggio " r " e centro " o " (Fig. 13). La parte di terreno ricadente al di sopra del cerchio di scorrimento si sposta da monte a valle rispetto al terreno sottostante, che rimane fermo. La porzione in movimento va però divisa in due parti: quella lato monte, rispetto alla verticale passan-

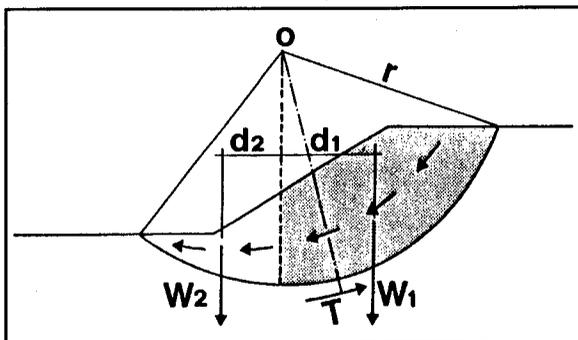


Fig. 13 - Schema grafico delle condizioni di equilibrio di un pendio limitato

te per il centro, favorisce il movimento e quella lato valle lo contrasta. L'equilibrio viene esaminato definendo i momenti delle forze W e T rispetto al centro di rotazione " o ":

$$W1 \cdot d2 - W2 \cdot d1 = T \cdot r \quad (9)$$

- il primo membro della relazione rappresenta il *momento ribaltante* (Mr) dovuto dalla differenza fra il momento delle forze peso della parte a monte della verticale, e quello delle forze della parte a valle ($W1$ e $W2$ sono le risultanze delle forze peso delle due parti e $d1$ e $d2$ i relativi bracci rispetto al centro " o ");
- il secondo membro della relazione rappresenta il *momento stabilizzante* (Ms) dovuto alle resistenze offerte dall'attrito e dalla coesione del terreno che, all'atto del movimento, si sviluppano lungo l'arco di cerchio.

Il grado di stabilità si definisce come rapporto tra il momento stabilizzante, dovuto alle forze resistenti che si oppongono al franamento e il momento ribaltante delle forze agenti che favoriscono tale tendenza.

Il coefficiente di sicurezza è dato da:

$$F = \frac{Ms}{Mr} = \frac{T \cdot r}{W1 \cdot d1 - W2 \cdot d2} \quad (10)$$

E' ovvio, che per un terreno pianeggiante, qualunque sia la natura e le caratteristiche meccaniche, la stabilità è infinita in quanto risulta nullo il momento ribaltante. Infatti essendo $W1 = W2$ e $d1 = d2$ la (10) diventa:

$$F = \frac{Ms}{0} = \infty \quad (11)$$

Il metodo descritto analizza la stabilità globale della scarpata-pendio, ossia dell'intero corpo delimitato dalla superficie di slittamento.

Nella pratica, atteso che la scarpata-pendio presenta generalmente delle irregolarità topografiche, o è probabile che la superficie di slittamento attraversi terreni eterogenei con differenti valori di c e ϕ , o ancora, nel caso di filtrazione o di scarpata-pendio semisommerso, il maggior numero dei parametri in gioco, non consente più l'analisi globale e si ricorre al metodo delle strisce e/o dei conci. Il metodo classico o ordinario, detto anche del "circolo svedese", introdotto da Fellenius nel 1936, prevede l'esame dell'equilibrio dei momenti delle forze agenti rispetto al centro di rotazione " o ".

Il corpo A B C nella Figura 14a, viene diviso in una serie di strisce a facce verticali di larghezza non necessariamente costante. Si considera l'equilibrio delle singole strisce e della massa sotto l'azione del peso proprio, delle eventuali forze esterne e delle forze interne (nella Figura 14b sono riportate le forze agenti su una generica striscia). Si assume che la risultante delle forze tra le varie strisce è parallela alla base, conseguentemente risultano nulli i momenti rispetto al centro di rotazione. Tenendo anche conto della posizione della superficie piezometrica si considera il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (4) in termini di pressioni effettive, ossia in presen-

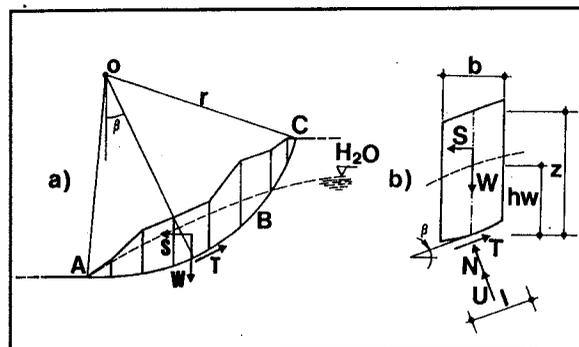


Fig. 14 - Analisi di stabilità con il metodo di Fellenius in presenza di filtrazione e di forza d'inerzia orizzontale indotta da sisma: (a) Suddivisione in strisce o conci della scarpata pendio; (b) Forze agenti sulla generica striscia

za di pressione dei pori:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi' \quad (12)$$

Con riferimento alla Figura 14 e tenendo conto della scomposizione della forza peso W , l'equilibrio dei momenti è dato da:

$$W \cdot r \cdot \sin \beta = T \cdot r \quad (13)$$

il coefficiente di sicurezza è espresso conseguentemente da:

$$F = \frac{\sum (T \cdot r)}{\sum (W \cdot r \cdot \sin \beta)} \quad (14)$$

semplificando e osservando che:

$$W \cos \beta = N + U \quad (15)$$

dove U è la risultante delle pressioni dell'acqua data da:

$$U = u \cdot l = Gw \cdot hw \cdot b / \cos \beta$$

con Gw peso di volume dell'acqua e hw altezza piezometrica, il coefficiente di sicurezza è dato da:

$$F = \frac{\sum c' \cdot l + (W \cdot \cos \beta - U) \tan \phi'}{\sum W \cdot \sin \beta} \quad (16)$$

Per le zone sismiche è opportuno procedere alla valutazione delle condizioni di stabilità in presenza di sollecitazioni dinamiche. Come è noto, in occasione di terremoti possono verificarsi dissesti e frane in pendii naturali ed artificiali. In Italia, la problematica è balzata drammaticamente all'attenzione della pubblica opinione e dell'ambiente tecnico scientifico a seguito dei terremoti del Friuli (1976), e di quello Irpino-Lucano (1980), in occasione dei quali si sono innescate numerose ed imponenti frane.

Le sollecitazioni sismiche sono movimenti alternativi e transitori (forze d'inerzia) che si sovrappongono a quelli dovuti alle azioni statiche. Per effetto delle forze d'inerzia il coefficiente di sicurezza può scendere al di sotto del valore 1 più volte durante un terremoto ed in conseguenza si producono deformazioni e spostamenti permanenti. La grandezza delle deformazioni dipende dall'andamento nel tempo delle forze d'inerzia stesse.

Il valore del coefficiente di sicurezza minimo globale della scarpata-pendio in condizioni sismiche, si può valutare (o ricercare) considerando l'azione del sisma, equivalente ad una forza statica orizzontale applicata nel baricentro delle masse.

Pertanto gli effetti di un terremoto su una massa di terreno potenzialmente instabile vengono rappresentati da una forza statica orizzontale equivalente, pari al prodotto del coefficiente sismico Kh per il peso W della medesima massa potenzialmente instabile (Forza S Figure 12 e 14):

$$S = W \cdot Kh \quad (17)$$

Il coefficiente di sicurezza, nel caso di pendio illimitato (Fig. 12), è dato da:

$$F = \frac{c + (W \cos \beta - S \sin \beta) \cdot \tan \phi'}{W \sin \beta + S \cos \beta} \quad (18)$$

Adottando il metodo delle strisce (pendio illimitato Fig. 14) a ciascuna striscia, separatamente, va applicata una forza orizzontale corrispondente al prodotto del peso della striscia per Kh ; il coefficiente di sicurezza è dato da:

$$F = \frac{\sum c \cdot l + (W \cos \beta - S \sin \beta) \cdot \tan \phi'}{\sum (W \sin \beta + S \cos \beta)} \quad (19)$$

Per quanto attiene la scelta del coefficiente sismico Kh , nessuna normativa fornisce indicazioni in merito sui valori da impiegare nella

pratica corrente. Alcuni Studiosi [D'ELIA B. 1983] suggeriscono di adottare i coefficienti sismici della normativa in vigore per le costruzioni in zone sismiche, in analogia a quanto previsto per le dighe e per le opere di sostegno dei terreni. La normativa italiana sulle dighe di materiali sciolti (D.M. 24/3/1982) e per le opere di sostegno dei terreni (D.M. 16/1/1996) prescrivono, di considerare nei calcoli di verifica, la seguente forza statica orizzontale equivalente:

$$F_h = C \cdot W \quad \text{dove:} \quad (20)$$

C è il coefficiente di intensità sismica in base alla normativa in vigore, variabile con la categoria sismica della zona (D.M. 3/3/1975). Il coefficiente di intensità sismica C assume valore 0,04 per le zone con grado di sismicità 6, valore 0,07 per le zone con grado di sismicità 9 (ex 2 categoria) e valore 0,1 per le zone con grado di sismicità 12 (ex 1 categoria).

Anche per la scelta del coefficiente di sicurezza, nessuna normativa fornisce indicazioni sui valori minimi da impiegare in presenza di sollecitazioni dinamiche. Il D.M. 11/3/1988 (Norme Tecniche Riguardanti le Indagini sui Terreni e sulle Rocce, la Stabilità dei Pendii Naturali e delle Scarpate ecc.) che tratta specificatamente la materia nella sezione G (Stabilità dei Pendii Naturali e dei Fronti di Scavo) prescrive, che il valore del coefficiente di sicurezza, per i pendii naturali, deve essere assunto e giustificato dal progettista e, per i fronti di scavo, non deve essere minore di 1,3 nel caso di terreni omogenei e nei quali le pressioni neutre siano note con sufficienti attendibilità. Lo stesso D.M. dispone, relativamente ai pendii naturali ricadenti in zona sismica, che le verifiche di stabilità devono essere esperite tenendo conto delle azioni dinamiche come prescritto dalla norme sismiche. Pertanto, in analogia con il regolamento delle dighe di materiali sciolti, possono essere adottati coefficienti di sicurezza inferiori a quelli usualmente impiegati in condizioni statiche, ma comunque maggiori di 1. E' prassi consolidata peraltro, di considerare una scarpata-pendio in condizioni di sicurezza quando le resistenze dei materiali, che si oppongono al franamento, superano di almeno il 30% gli sforzi applicati; il coefficiente di sicurezza F , deve risultare pertanto maggiore di 1,30.

A completamento della nota si valuta, a titolo di esempio esplicativo, il coefficiente di sicurezza di una scarpata nelle condizioni di assenza e presenza di sisma e per diversi valori del coefficiente sismico Kh . Si fa riferimento alla sezione schematica di un fronte di scavo riportato in Figura 15. Si adotta il procedimento delle strisce o di Fellenius, in assenza di falda idrica, ricorrendo ad una tabella per facilitare il calcolo manuale (Fig. 16).

Si ipotizza che la scarpata interessi terreno coerente omogeneo caratterizzato dai seguenti parametri:

G = peso di volume	= 2,00 t/mc.
c = coesione	= 1,50 t/mq.
ϕ = Angolo d'attrito	= 20°

L'azione sismica si considera sotto forma di una forza statica orizzontale applicata alla base di ciascuna striscia.

Le risultanze delle calcolazioni vengono riportate nella tabella sinottica di Fig. 16 a cui si rimanda per un esame di dettaglio.

In Fig. 17 inoltre, sono riportati in un diagramma cartesiano i coefficienti di sicurezza derivati in funzione dei vari gradi di sismicità.

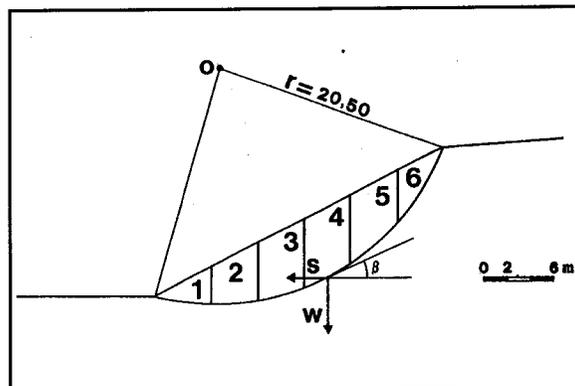


Fig. 15 - Sezione schematica della scarpata oggetto della verifica di stabilità

STRISCE	1	2	3	4	5	6	
b	5	4	4	4	4	4	
z	1,66	4,20	5,55	6,00	5,29	2,29	
b·z	8,30	16,80	22,20	24,00	21,16	9,16	
W = b·z·G	16,60	33,60	44,40	48,00	42,32	18,32	
β	- 9	3	15	27	40	58	
cos β	0,987	0,998	0,966	0,891	0,766	0,529	
sin β	-0,156	0,053	0,258	0,454	0,643	0,848	Σ
W · cos β	16,32	33,53	42,89	42,77	32,42	9,69	177,69
W · sin β	-2,59	1,78	11,45	21,79	27,21	15,53	75,17
l = b/cosβ	5,06	4,00	4,14	4,49	5,22	7,56	30,47
F = 1,46		Ms = 2250 tm		Mr = 1541 tm			
S = W·0,04	0,66	1,34	1,78	1,92	1,69	0,73	Σ
S · cos β	0,65	1,33	1,72	1,71	1,29	0,38	7,08
S · sin β	-0,10	0,07	0,46	0,87	1,08	0,62	3,00
F = 1,32		Ms = 2227 tm		Mr = 1687 tm			
S = W·0,07	1,16	2,35	3,11	3,36	2,96	1,28	Σ
S · cos β	1,15	2,34	3,00	2,99	2,27	0,67	12,42
S · sin β	-0,18	0,12	0,80	1,53	1,90	1,08	5,24
F = 1,23		Ms = 2209 tm		Mr = 1796 tm			
S = W·0,10	1,66	3,36	4,44	4,80	4,23	1,83	Σ
S · cos β	1,64	3,35	4,29	4,27	3,24	0,97	17,66
S · sin β	-0,26	0,18	1,14	2,18	2,72	1,55	7,51
F = 1,15		Ms = 2192 tm		Mr = 1906 tm			

Fig. 16 - Tabella di calcolo

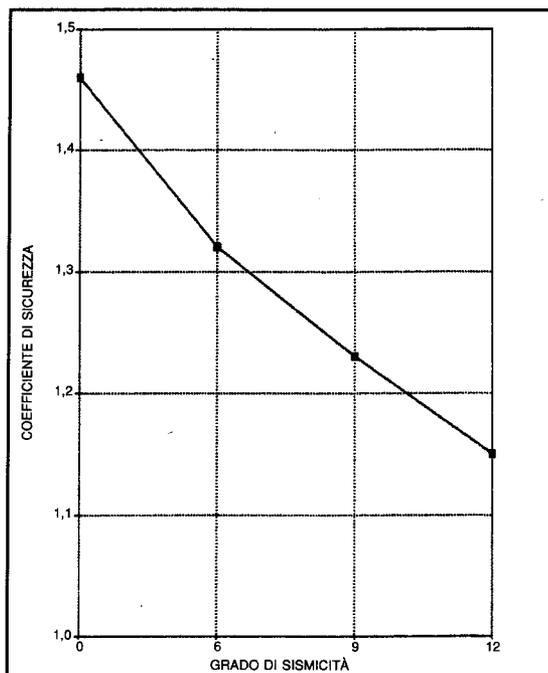


Fig. 17 - Diagramma della variazione del coefficiente di sicurezza in funzione del grado di sismicità

BIBLIOGRAFIA

- ALBERTINI V. ED ALTRI. (1988). *Le cavità sotterranee del Napoletano: pericolosità e possibili utilizzazioni*. Geologia Tecnica, n° 3, Roma.
- ALESSANDRINI A. (1971). *Il disboscamento*. Quaderni C.N.R. n° 74, Roma.
- ALMAGIÀ R. (1907 e 1910). *Studi geografici sulle frane in Italia* (I e II parte). Mem. Soc. Geograf. It., Vol. 1 e 2, Roma.
- AUTORI VARI (1993). *Manuale tecnico di ingegneria naturalistica*. Regione Emilia Romagna e Regione del Veneto.
- BENEDINI M., GISOTTI G. (1985). *Il dissesto idrogeologico*. La nuova Italia Scientifica, Roma.
- BENINI G. (1990). *Sistemazioni idraulico forestali*. UTET, Torino.
- BOSCO F., MALASPINA A. (1990). *Il dissesto idrogeologico*. Monografia a cura del Comando Provinciale VV.F. Benevento.
- BOSCO F. (1993). *Il disboscamento concausa antropica del dissesto Idrogeologico*. Vigili del Fuoco e Protezione Civile 11/93, Milano.
- BOSCO F. (1993-1994). *La Montagna, Il Disboscamento, La difesa del Suolo, Problema Storico Politico*. Vigili del Fuoco e Protezione Civile, 12/93 e 1/94, Milano.
- BOSCO F. (1994). *Stabilità dei pendii e delle scarpate*. Vigili del Fuoco e Protezione Civile, 5/94, Milano.
- BOWLES J. E. (1991). *Fondazioni, progetto ed analisi*. McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano.
- CANUTI P., ESU F. (1995). *Glossario Internazionale per le Frane*. Rivista Italiana di Geotecnica 2/95, Roma.
- CARRARA A., D'ELIA B., SEMENZA E. (1985). *Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi*. Geol. Appl. e Idrog. Vol. 20, Bari.
- CASTIGLIONI G.B. (1979). *Geomorfologia*. UTET, Torino.
- CEDERNA A. (1975). *La distribuzione della natura in Italia*. Piccola Biblioteca Einaudi, Torino.
- CEDERNA A. (1991). *Brandelli d'Italia*. Newton Compton Editori, Roma.
- CESTELLI GUIDI C. (1981). *Geotecnica e tecnica delle fondazioni*. HOEPLI, Milano.
- CIVITA M. (1982). *Classificazione tecnica e identificazione pratica dei movimenti franosi*. Libreria Editrice Universitaria Levrotto, Torino.
- COLOMBO P. (1974). *Elementi di geotecnica*. Zanichelli, Bologna.
- COLOSIMO P. (1982). *Manuale di Geologia tecnica delle frane*. Edizione Nuove Ricerche, Ancona.
- COMMISSIONE INTERMINISTERIALE PER LO STUDIO DELLA SISTEMAZIONE IDRAULICA E DELLA DIFESA DEL SUOLO (1970). *Atti della Commissione*, Camera dei Deputati, Roma.
- COTECCHIA V. (1968). *Le alluvioni e la difesa del suolo*. Annuario EST Mondadori, Milano.
- COTECCHIA V. (1984). *Note sui fenomeni d'instabilità del territorio e sulla loro rappresentazione con particolare riguardo agli eventi sismici*. In Lineamenti di Geologia Regionale e Tecnica, FORMEZ, Napoli.
- COPPOLA L., VALLARIO A. (1973). *Geologia e franosità nell'area ad oriente del Taburno Camposauro e del Partenio (Province di Benevento ed Avellino)*. Geol. Applicata e Idrogeologia, Vol. 8, Bari.
- D'ELIA B. (1975). *Aspetti meccanici delle frane tipo colata*. Rivista Italiana di Geotecnica, n° 9, Napoli.
- D'ELIA B. (1983). *Interventi di stabilizzazione di pendii naturali e di fronti di scavo*. Associazione Geotecnica Italiana - Regione Molise, Roma.
- D'ELIA B. (1983). *Pendii in condizioni sismiche*. Associazione Geotecnica Italiana - Regione Molise, Roma.
- DESIO A. (1959). *Geologia applicata all'Ingegneria*. Hoepli, Milano.
- DESIO A. (1971). *Caratteristiche geologiche delle frane*. In guida alla classificazione delle frane ed ai primi interventi, atti della Commissione Interministeriale, per lo studio della sistemazione idraulica e della difesa del suolo, Roma.
- ESU F. (1973). *Effetti dell'acqua sulla stabilità dei pendii*. Rivista Italiana di Geotecnica, n° 7, Napoli.
- ESU F. (1983). *Stabilità dei pendii*. Associazione Geotecnica Italiana - Regione Molise, Roma.
- ESU F. (1984). *Fattori che governano il comportamento dei pendii ed il verificarsi delle frane e loro valutazioni in termini geotecnici*. In Lineamenti di Geologia Regionale e Tecnica, Formez, Napoli.
- ESU F. (1987). *La scelta del tipo e delle modalità di intervento nei pendii (relazione generale)*. Associazione Geotecnica Italiana, Atti XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, vol. 3, Roma.
- FORNARO M., LUNARDI P. (1980). *Criteri di scelta per interventi di consolidamento della rupe di Orvieto e proposte operative*. Associazione Geotecnica Italiana, Atti del XIV Convegno Nazionale, Vol. 1, Roma.
- GUADAGNO F.M., PALMIERI M., SIVIERO V., VALLARIO A. (1988). *La frana di Palma Campania del 22 febbraio 1986*. Geologia Tecnica, n° 4, Roma.
- GUIDA D., GUIDA M., IACCARINO G., METCALF G., VALLARIO V., ZIGARI G. (1979). *Il bacino del Mingardo (Cilento): evoluzione geomorfologica, fenomeni franosi e rischio a franare*. Geol. Appl. e Idrogeologia, vol. 14, Bari.
- GUIDA M., IACCARINO G. (1984). *Evoluzione dei versanti e franosità*. In Lineamenti di Geologia Regionale e Tecnica, Formez, Napoli.
- GUIDA M., IACCARINO G., LOMBARDI G., VALLARIO A. (1977). *Analisi geologico tecnica della frana in località Solaro nel Comune di Formia (LT)*. Boll. Soc. Naturalisti in Napoli, Vol. 86, Napoli.
- IPPOLITO F., NICOTERA P., LUCINI P., CIVITA M., DE RISO R. (1975). *Geologia Tecnica*. ISEDI, Torino.
- JAPPELLI G., MUSSO A. (1983). *Stabilità dei pendii*, in Manuale di Ingegneria Civile. Edizioni Scientifiche Cremonesi, Roma.
- JAPPELLI G., MUSSO A. (1985). *La progettazione geotecnica degli interventi sui pendii*. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. 20, Bari.
- JAPPELLI G., MUSSO A. (1987). *La progettazione geotecnica per la stabilizzazione dei pendii*. Atti XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Vol. 3, Bologna.
- LANCELLOTTA R. (1987). *Geotecnica*. Zanichelli, Bologna.
- MARTINIS B. (1988). *Geologia Ambientale*. UTET, Torino.
- MARTINETTI S. (1974). *Alcune considerazioni sulle caratteristiche e sugli effetti del moto dell'acqua negli ammassi rocciosi*. Rivista Italiana di Geotecnica, n° 2/3, Roma.
- MAZZIOTTI L. (1980). *Frane e stabilità dei pendii*. Appunti 36° Corso Ispettori VV.F. Scuole Centrali Antincendio Campanelle, Roma.
- MENZIES B.K., SIMONS N.E. (1985). *Problemi di geotecnica*. Editrice Flaccovio, Palermo.
- MIGLIORINI P. (1981). *Calamità naturali*. Editori Riuniti, Roma.
- MINISTERO DELL'AMBIENTE (1989). *Relazione sullo stato dell'ambiente*. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- NICOTERA P. (1975). *Dissesti e Movimenti franosi*. In Ippolito ed altri, Iseidi, Torino.
- PANIZZA M. (1973). *Elementi di geomorfologia*. Pitagora Editrice, Bologna.
- PANIZZA M. (1988). *Geomorfologia applicata*. La Nuova Italia Scientifica, Roma.
- PASTORELLI E. (1986). *La Protezione Civile Oggi*. Rusconi, Milano.
- PENTA F. (1959). *Contributo alla sistemazione delle frane*. Rend. Acc. Scie. Fis. Mat. Soc. Naz. Scie. LL.AA. di Napoli, Vol. 26, Napoli.
- PIZZONIA V. (1991). *Esercizi di geotecnica*. Ordine Nazionale dei Geologi, Roma.
- TERZAGHI K., PEEK R.B. (1974). *Geotecnica*. UTET, Torino.
- SAVARESE V. (1989). *Napoli e il sottosuolo*. Atti del Seminario, Corpo Nazionale VV.F., Ispettorato Regionale Campania, Napoli.
- SASSA K. (1989). *Geotechnical Classification of Landslides*. Traduzione di Lesmo R. da Landslide News, n° 3. In Geologia Tecnica, n° 4/90, Roma.
- SCHIECHTL H.M., STERN R. (1992). *Ingegneria Naturalistica*. Edizioni Castaldi, Feltre (Belluno)
- VALLARIO A. (1975). *I movimenti del suolo*, appunti del corso di Geologia Applicata, Istituto di Geologia Università di Napoli, Napoli.
- VALLARIO A. (1992). *Frane e territorio*. Liquori Editore, Napoli.
- VARNES D.J. (1958). *Landslide types and processes*, in Landslides and Engineering Practice (Eckel, E.B., ed.) HRB, Special Rept. 29, Washington.
- VARNES D.J. (1978). *Slope movement types and processes*, in Schuster R. e Krizek R. Landslides, analysis and control, Transp. Res. Board, Nat. Acad. of Sc., Washington D.C., Special Report.