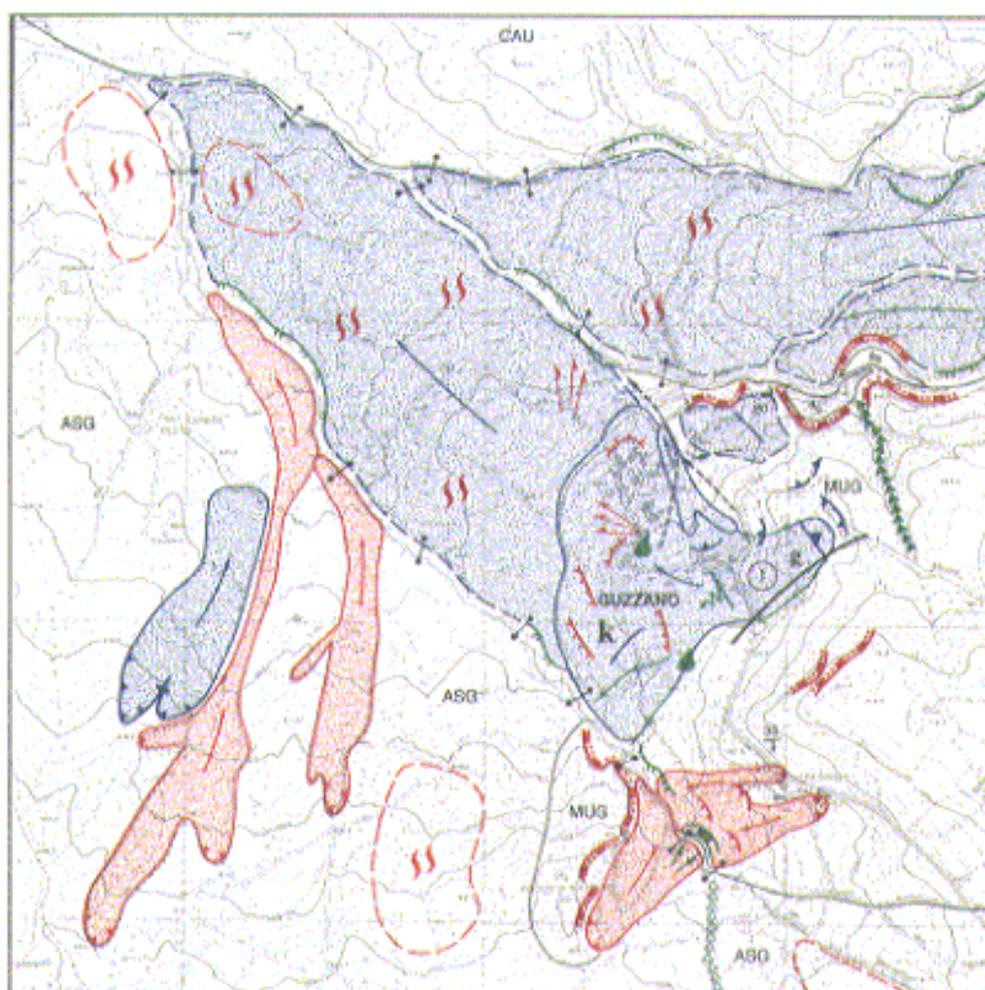


**Consiglio Nazionale delle Ricerche**  
GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DALLE CATASTROFI IDROGEOLOGICHE

*LINEA 2*  
*Previsione e Prevenzione di Eventi Franosi a Grande Rischio*

## CONSIDERAZIONI SULLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI FRANA



Estratto da "*Fenomeni Franosi e Centri Abitati*"  
Atti del Convegno di Bologna del 27 Maggio 1994  
CNR-GNDICI - Regione Emilia-Romagna



Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



**Consiglio Nazionale delle Ricerche**  
GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DALLE CATASTROFI IDROGEOLOGICHE  
*Linea 2 - Previsione e Prevenzione di Eventi Franosi a Grande Rischio*

**CONSIDERAZIONI SULLA VALUTAZIONE  
DEL RISCHIO DI FRANA**

Estratto da “*Fenomeni Franosi e Centri Abitati*”  
*Atti del Convegno di Bologna del 27 Maggio 1994*  
CNR-GNDICI - Regione Emilia-Romagna

**Paolo CANUTI & Nicola CASAGLI**  
*U.O. 2.14 - Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze*  
*Via. G. La Pira, 4 - 50121 FIRENZE - E-mail: geoapp@unifi.it*

PUBBLICAZIONE N.846



## TAVOLA DEI CONTENUTI

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>2. DEFINIZIONI</b> .....	<b>2</b>
2.1 IL TERMINE FRANA .....	2
2.2 TERMINI RELATIVI ALLA PERICOLOSITÀ E AL RISCHIO .....	2
<b>3. DESCRIZIONE DELLO STATO DELLA NATURA</b> .....	<b>5</b>
3.1 DESCRIZIONE DELLE CAUSE.....	5
3.2 DESCRIZIONE DEGLI EFFETTI .....	6
<b>4. VALUTAZIONE DELL'INTENSITÀ O PERICOLO</b> .....	<b>12</b>
4.1 VELOCITÀ .....	12
4.2 DIMENSIONI.....	13
4.3 ENERGIA.....	14
<b>5. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ</b> .....	<b>16</b>
5.1 PREVISIONE SPAZIALE .....	16
5.1.1 Valutazione empirica.....	17
5.1.2 Indicizzazione degli effetti.....	18
5.1.3 Indicizzazione delle cause.....	19
5.1.4 Analisi statistica .....	20
5.1.5 Analisi morfometrica .....	21
5.1.6 Analisi deterministica.....	23
5.1.7 Analisi probabilistica.....	23
5.1.8 Analisi cinematica.....	25
5.2 PREVISIONE TEMPORALE .....	26
5.2.1 Stima empirica.....	27
5.2.2 Analisi di serie temporali relative agli effetti.....	28
5.2.3 Analisi di serie temporali relative alle cause.....	28
5.2.3.1 Precipitazioni.....	29
5.2.3.2 Terremoti.....	33
5.2.4 Monitoraggio .....	34
5.2.4.1 Approccio meccanico .....	35
5.2.4.2 Approccio cinematico .....	36
5.3 PREVISIONE TIPOLOGICA.....	38
5.4 PREVISIONE DELL'INTENSITÀ.....	38
5.5 PREVISIONE DELL'EVOLUZIONE .....	39
5.5.1 Previsione della distanza di propagazione.....	39
5.5.2 Previsione dei limiti di retrogressione .....	40
5.5.3 Previsione dell'espansione laterale .....	40
5.6 SINTESI DELLE INFORMAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ.....	41
<b>6. DEFINIZIONE DEGLI ELEMENTI A RISCHIO</b> .....	<b>42</b>
<b>7. VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ</b> .....	<b>44</b>
7.1 VULNERABILITÀ DELLA VITA UMANA .....	45
7.2 VULNERABILITÀ DI BENI ED ATTIVITÀ.....	45
<b>8. VALUTAZIONE DEL RISCHIO</b> .....	<b>47</b>
8.1 RISCHIO TOTALE .....	47
8.2 DANNO POTENZIALE.....	48
8.3 RISCHIO SPECIFICO.....	49
<b>9. RISCHIO ACCETTABILE</b> .....	<b>49</b>
9.1. RISCHIO TOTALE ACCETTABILE.....	49
9.2. RISCHIO SPECIFICO ACCETTABILE .....	50
9.3. PROBABILITÀ DI ROTTURA ACCETTABILE.....	51
<b>10. GESTIONE DEL RISCHIO</b> .....	<b>53</b>
<b>11. CONCLUSIONI</b> .....	<b>54</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>56</b>



## 1. INTRODUZIONE

I fenomeni franosi, rispetto ad altre calamità naturali quali terremoti, eruzioni vulcaniche ed esondazioni, ricevono un'attenzione minore da parte dei mezzi di comunicazione di massa, probabilmente a causa della loro minore "spettacolarità". Tuttavia essi costituiscono indubbiamente una delle cause principali di rischio per la incolumità di beni e persone.

In base a dati frammentari raccolti su scala mondiale dall'*International Association of Engineering Geology (IAEG) Commission on Landslides* nel periodo 1971-75, per conto dell'UNESCO, risulta che il 14% delle vittime di catastrofi naturali è attribuibile ai fenomeni franosi. Quest'ultima percentuale è da considerarsi sottostimata se si considera che parte delle vittime attribuite ai terremoti è in realtà provocata da fenomeni franosi indotti dall'azione del sisma.

Per quanto riguarda l'Italia, un recente rapporto del Ministero dei Lavori Pubblici (CATENACCI, 1992) riporta che nel periodo 1945-1990 le vittime accertate a causa di fenomeni franosi sono 2447, corrispondenti al 32% del totale delle vittime per catastrofi naturali in Italia. Tale dato evidenzia che le frane sono, subito dopo i terremoti, le calamità naturali più pericolose per l'incolumità pubblica. L'ammontare dei danni provocati da dissesti idrogeologici (frane ed esondazioni) è stato stimato in circa 2.000-3.000 miliardi all'anno (DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE, 1992).

In seguito ai numerosi disastri verificatisi nei recenti anni ed al riconoscimento della natura sociale dei fenomeni franosi, sono stati intrapresi programmi di ricerca, sia a livello nazionale che internazionale, per la caratterizzazione dei fenomeni, per la loro previsione e prevenzione, per la valutazione e la gestione delle loro conseguenze.

In Italia le ricerche si svolgono essenzialmente nell'ambito del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI), nel quale è attiva una linea di ricerca denominata "Previsione e Prevenzione di Eventi Franosi a Grande Rischio". Dal 1988 il GNDCI ha intrapreso un servizio di consulenza per il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri. I concetti di previsione e prevenzione degli eventi a rischio sono entrati a far parte della legislazione nazionale con l'istituzione del Servizio Nazionale della Protezione Civile (legge 24/2/1992 n.225). La funzione di tale servizio è la "*tutela dell'integrità della vita, dei beni, degli insediamenti e dell'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, da catastrofi o da altri eventi calamitosi*" (art.1). Tali finalità sono perseguite attraverso attività di previsione, prevenzione, soccorso e superamento delle emergenze.

Con il termine "previsione" la legge comprende le "*attività dirette allo studio ed alla determinazione delle cause dei fenomeni calamitosi, alla identificazione dei rischi ed alla individuazione delle zone del territorio soggette ai rischi stessi*" (art.3). Il termine "prevenzione" comprende invece le "*attività volte ad evitare o ridurre al minimo la possibilità che si verifichino danni conseguenti agli eventi calamitosi anche sulla base delle conoscenze acquisite per effetto dell'attività di previsione*" (art.3).

A livello internazionale, la Francia costituisce probabilmente il paese più all'avanguardia nella realizzazione di piani di previsione e prevenzione dei rischi. La legge 13/07/1982 prevede l'indennizzo da parte dello Stato delle vittime delle catastrofi naturali (inondazioni, sismi, movimenti di terreno). Lo Stato francese attraverso la *Délégation aux Risques Majeurs* (DRM) del Ministero dell'Ambiente si è assunto l'incarico della realizzazione di "Piani di Esposizione al Rischio" (PER) i quali prevedono:

- a) una serie di rapporti generali di presentazione che definiscono e giustificano le disposizioni da prendere riguardo alla previsione, alla prevenzione e allo stato di emergenza;
- b) una cartografia in cui sono delimitate le zone a rischio alla scala 1:10.000 o 1:5.000;

c) un regolamento che fissa le condizioni di utilizzo del suolo e di espansione urbanistica all'interno delle zone cartografate.

La mitigazione dei danni causati dalle catastrofi naturali e la riduzione del rischio sono fra i compiti istituzionali dell'UNESCO. Nel 1976, l'UNESCO ha promosso la costituzione di una "commissione frane" presso l'IAEG, per svolgere ricerche sulla zonazione della pericolosità per frana (VARNES & IAEG, 1984).

La 42<sup>a</sup> Assemblea Generale della Nazioni Unite ha inoltre designato l'ultimo decennio del secolo (1990-2000) come Decennio Internazionale per la Riduzione dei Disastri Naturali. In questo contesto è stata costituita nell'ambito dell'UNESCO una Commissione delle Società Geotecniche Internazionali per il censimento mondiale dei fenomeni franosi (*UNESCO International Geotechnical Societies' Working Party on World Landslide Inventory WP/WLI*). La Commissione è stata formata dalla "Commissione Frane" dell'IAEG, dal "Comitato tecnico sulle Frane" della *International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE)* e da membri della *International Society of Rock Mechanics (ISRM)*.

Il WP/WLI, attualmente coordinato dal Prof. Cruden dell'Università di Alberta (Canada), ha come obiettivo la creazione di una banca dati mondiale che dovrà costituire la base di riferimento per l'analisi della distribuzione della frane. L'attività del WP/WLI ha condotto alla preparazione di "metodi raccomandati" per la descrizione della frane, di "schede" per l'introduzione nella banca-dati mondiale e di "glossari" per uniformare la terminologia scientifica relativa ai fenomeni franosi (WP/WLI, 1990, 1991, 1993, 1994). Inoltre il WP/WLI si è articolato in diversi Gruppi di Lavoro (*working groups*) per suggerire metodi di classificazione dei diversi aspetti dei movimenti franosi (morfologia, cinematica del movimento, velocità, cause, condizioni geologiche, attività).

Nonostante il lavoro delle commissioni scientifiche nazionali ed internazionali, permane fra i tecnici che operano sul territorio, una certa incertezza relativa al significato di pericolosità, vulnerabilità e rischio, nonché alla valutazione dei parametri con cui tali concetti possano essere quantificati.

In questa nota, gli autori si propongono di contribuire al loro chiarimento, attraverso un'analisi e revisione della letteratura scientifica più recente e dei rapporti delle commissioni nazionali e internazionali.

## **2. DEFINIZIONI**

### **2.1 Il termine frana**

Il WP/WLI ha dato una semplice definizione del termine "frana" (*landslide*) come "movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante" (CRUDEN, 1991). Analogamente a quanto suggerito da CRUDEN (1991) preferiamo tradurre il termine "landslide" semplicemente con "frana", anziché con "fenomeno franoso" o "movimento di versante", in modo da agevolare la comprensione degli utilizzatori non tecnici, quali amministratori e funzionari pubblici.

### **2.2 Termini relativi alla pericolosità e al rischio**

Nel rapporto UNESCO di VARNES & IAEG (1984) vengono date precise definizioni relative alle diverse componenti che concorrono nella determinazione del rischio di frana:

a) **Pericolosità** (*hazard H*): probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area.

- b) **Elementi a rischio** (*element at risk E*): popolazione, proprietà, attività economiche, inclusi i servizi pubblici etc., a rischio in una data area.
- c) **Vulnerabilità** (*vulnerability V*): grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità. È espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale).
- d) **Rischio specifico** (*specific Risk R<sub>s</sub>*): grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale. Può essere espresso dal prodotto di *H* per *V*.
- e) **Rischio totale** (*total Risk R*): atteso numero di perdite umane, feriti, danni alla proprietà, interruzione di attività economiche, in conseguenza di un particolare fenomeno naturale; il rischio totale è pertanto espresso dal prodotto:

$$R = H V E = R_s E \quad (2.1)$$

In diversi lavori della letteratura francese il termine "*risque*" corrisponde alla pericolosità mentre il rischio è identificato con il termine "*exposition aux risque*" (HUMBERT, 1976, 1977; DRM, 1985). Più recentemente (DRM, 1988, 1990; PERROT, 1988) la pericolosità è stata indicata con il termine "*aléa*"; essa tuttavia è espressa come combinazione della probabilità di occorrenza del fenomeno (*probabilité*) e della sua severità meccanica e geometrica (*intensité*). Il rischio (*risque*) è calcolato combinando opportunamente la pericolosità del fenomeno con la vulnerabilità del territorio (*vulnérabilité*). Quest'ultima, a differenza della definizione UNESCO, è definita in termini monetari ed esprime l'entità delle perdite attese nel caso di un evento con pericolosità ed intensità fissata. Tale accezione estesa del termine vulnerabilità è diffusa anche in Italia (PANIZZA, 1988; DEL PRETE *et alii*, 1992; PROVINCIA DI MODENA & GNDICI U.O.2.9, 1994).

EINSTEIN (1988) ha proposto l'uso del termine "pericolo" o "intensità" (*danger*) per caratterizzare il fenomeno potenzialmente distruttivo, "pericolosità" (*hazard*) per caratterizzare la sua imprevedibilità, e "rischio" (*risk*) per caratterizzare le conseguenze del fenomeno. Il pericolo comprende tutte le caratteristiche geometriche e meccaniche del fenomeno, inclusa la sua localizzazione nello spazio. La pericolosità è limitata alla probabilità di occorrenza del fenomeno in un determinato intervallo di tempo (la probabilità di occorrenza nello spazio è inclusa nel pericolo). Il rischio è dato dal prodotto:

$$R = H W_L \quad (2.2)$$

dove  $W_L$  è il "danno potenziale" (*potential worth of loss*) espresso come funzione degli elementi a rischio e della vulnerabilità nell'accezione di VARNES & IAEG (1984).

Recentemente FELL (1994) ha riproposto, con modeste variazioni, la terminologia UNESCO, introducendo il concetto di intensità (magnitudo), e ridefinendo la pericolosità come il prodotto della intensità *I* per la probabilità di occorrenza *P*. Il rischio specifico è definito come:

$$R_s = P V \quad (2.3)$$

mentre il rischio totale rimane espresso in maniera analoga alla definizione di VARNES & IAEG (1984):

$$R = R_s E \quad (2.4)$$

Per tentare di dare un ordine alle definizioni ed alle metodologie adottate dai diversi autori è opportuno analizzare in dettaglio le varie componenti del rischio tenendo separate le caratteristiche del fenomeno di instabilità da quelle degli elementi a rischio.

Il fenomeno di instabilità è caratterizzato da una certa intensità e da una determinata probabilità di occorrenza. Ognuno degli elementi a rischio è caratterizzato da un certo valore e da una diversa predisposizione a subire un danno in conseguenza del fenomeno stesso. Data l'occorrenza di un fenomeno franoso generico le conseguenze sull'elemento a rischio (*danno*) sono una funzione sia dell'intensità del fenomeno che delle caratteristiche dell'elemento a rischio stesso. Per esempio è chiaro che il grado di danno su un determinato elemento a rischio sarà tanto maggiore quanto più elevate sono la velocità, il volume o l'energia della frana (parametri che ne caratterizzano l'intensità). Viceversa a

parità di intensità e di valore economico, è altrettanto palese che il fenomeno determinerà in percentuale un maggior grado di danneggiamento su un edificio antiquato, in muratura, privo di fondazioni, rispetto ad un edificio in cemento armato con fondazioni.

La vulnerabilità, definita in maniera analoga a VARNES & IAEG (1984), è pertanto una funzione dell'intensità del fenomeno e delle caratteristiche dell'elemento a rischio, ma è indipendente dalla probabilità di occorrenza del fenomeno (la quale caratterizza la pericolosità) e dal valore economico degli elementi a rischio. Nella definizione della pericolosità occorre pertanto differenziare la probabilità di occorrenza di eventi con intensità diversa mentre nella definizione degli elementi a rischio occorre differenziare, oltre al costo, la tipologia e la propensione a subire un danno di ognuno di questi.

Sulla base delle precedenti considerazioni e cercando di rimanere il più possibile consistenti con la terminologia dell'UNESCO, si propongono le seguenti definizioni:

a) **Intensità** (*intensity I*): [sinonimi: **pericolo** (*danger*), **magnitudo** (*magnitude*)] severità geometrica e meccanica del fenomeno potenzialmente distruttivo. Può essere espressa in una scala relativa oppure in termini di una o più grandezze caratteristiche del fenomeno (velocità, volume, energia, etc.)

b) **Pericolosità** (*hazard H*): [sinonimi: **probabilità di occorrenza** (*probability of occurrence*)] probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità, si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area. E' espressa in termini di probabilità annuale (o di tempo di ritorno). La pericolosità definita in questo modo è pertanto riferita ad una determinata intensità del fenomeno:

$$H=H(I) \tag{2.5}$$

c) **Elementi a rischio** (*element at risk E*): popolazione, proprietà, attività economiche, servizi pubblici e beni ambientali in una data area esposta a rischio.

d) **Valore degli elementi a rischio** (*worth of element at risk W*): valore economico o numero di unità relative ad ognuno degli elementi a rischio in una data area. Il valore degli elementi a rischio può essere pertanto espresso in termini di numero o quantità di unità esposte (es. numero di persone, ettari di terreno agricolo) oppure in termini monetari. Il valore è una funzione del tipo di elemento a rischio:

$$W=W(E) \tag{2.6}$$

e) **Vulnerabilità** (*vulnerability V*): grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità. È espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è una funzione dell'intensità del fenomeno e della tipologia di elemento a rischio:

$$V = V(I;E) \tag{2.7}$$

f) **Danno potenziale** (*potential worth of loss WL*): entità potenziale delle perdite nel caso di un evento con intensità fissata (corrisponde alla vulnerabilità degli autori francesi). Può essere espresso in termini di numero o quantità di unità esposte oppure in termini monetari. Per una determinata tipologia di elemento a rischio *E* e per una data intensità *I* il danno potenziale è dato da:

$$WL(I;E)= W(E) V(I;E) \tag{2.8}$$

g) **Rischio specifico** (*specific Risk Rs*): grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di data intensità. E' espresso in termini di probabilità annua. Per una determinata tipologia di elemento a rischio *E* e per una data intensità *I* il rischio specifico è dato da:

$$R_s(I;E) = H(I) V(I;E) \tag{2.9}$$

h) **Rischio totale** (*total Risk R*): atteso valore delle perdite umane, dei feriti, dei danni alla proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti ad un particolare fenomeno naturale. E' espresso

in termini di costo annuo oppure di numero o quantità di unità perse per anno. Il rischio totale associato ad un particolare elemento a rischio  $E$  e ad una data intensità  $I$  è il prodotto:

$$R(I;E) = H(I) V(I;E) W(E) = R_s(I;E) W(E) = H(I) W_L(I;E) \quad (2.10)$$

Le definizioni date sopra, così come quelle dell'UNESCO, hanno un carattere generale e valgono per ogni tipologia di fenomeno di instabilità potenzialmente distruttivo. Esse sono infatti consistenti con la terminologia consolidata nella comunità scientifica relativa ad altri rischi naturali. Per esempio la definizione di intensità, ristretta rispetto a quella di EINSTEIN (1988), è consistente con quella impiegata nel rischio sismico o nel rischio di esondazione, nell'ambito dei quali l'intensità è definita rispettivamente dalla magnitudo del sisma e dall'altezza di piena, ovvero da singole caratteristiche fisiche del fenomeno. La vulnerabilità definita come grado di perdita in percentuale, e non in termini di entità potenziale delle perdite, è consistente con il concetto di vulnerabilità impiegato per esempio nel campo del rischio di inquinamento delle falde, nell'ambito del quale la vulnerabilità esprime la probabilità che, dato il verificarsi di un fenomeno di inquinamento (che rappresenta il fenomeno calamitoso), l'acquifero (che rappresenta l'elemento a rischio) venga danneggiato.

Modificando in parte l'approccio di EINSTEIN (1988) ed in base alle definizioni date sopra, l'analisi completa del rischio di frana si può basare sul seguente schema operativo:

- 1) Descrizione dello stato della natura;
- 2) Valutazione dell'intensità;
- 3) Valutazione della pericolosità;
- 4) Definizione degli elementi a rischio;
- 5) Valutazione della vulnerabilità;
- 6) Valutazione del rischio;
- 7) Definizione del rischio accettabile;
- 8) Gestione del rischio.

Nelle sezioni successive tali punti verranno esaminati singolarmente. Una particolare attenzione è dedicata alla **valutazione della pericolosità** (*hazard assessment*) in quanto è in questa fase che il contributo della comunità scientifica assume una particolare importanza.

### 3. DESCRIZIONE DELLO STATO DELLA NATURA

La raccolta dei dati per la descrizione dello stato della natura da utilizzarsi per la definizione dei parametri del rischio è in genere sintetizzata mediante carte tematiche (*mapping*) (COTECCHIA, 1978; VARNES & IAEG, 1984; GNGFG, 1987).

In Italia, il Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia ha formato una commissione con lo scopo di esaminare criteri e metodi per la realizzazione della cartografia della pericolosità connessa alla instabilità dei versanti (GNGFG, 1987). Ai risultati del lavoro di tale commissione si sono ispirate anche le linee guida per la realizzazione della cartografia della pericolosità geologica alla scala 1:50.000 per il Servizio Geologico d'Italia (AMANTI *et alii*, 1992). Nella fase di raccolta dati è stato proposto di trattare separatamente le *cause* (geologia, geomorfologia, idrogeologia, ecc.) e gli *effetti* (fenomeni di instabilità).

#### 3.1 Descrizione delle cause

La descrizione delle cause della franosità consiste nell'esame dei molteplici fattori della instabilità, nella loro parametrizzazione e suddivisione in classi e, infine, nella loro rappresentazione in una serie di

carte tematiche. I fattori (o cause) che condizionano la stabilità dei versanti possono essere raggruppati nel modo seguente:

- a) **fattori litologici** caratteristiche composizionali, tessiturali, strutturali, stratigrafiche, meccaniche, di alterazione dei materiali.
- b) **fattori tettonici**: storia tettonica dell'area, sismicità.
- c) **fattori morfologici** topografia, morfometria dei versanti e degli alvei.
- d) **fattori idrogeologici** idrografia, sorgenti, condizioni di drenaggio, condizioni statiche e dinamiche delle acque del sottosuolo, caratteristiche delle falde acquifere.
- e) **fattori meteorologici**: condizioni climatiche generali dell'area e microclimatiche di ogni sottobacino (regime termo-pluviometrico; escursione termica, intensità e durata degli eventi meteorologici estremi).
- f) **fattori connessi al tipo e all'uso del suolo**: caratteristiche pedologiche, tipo e stato della copertura vegetale, utilizzazione del suolo e tecniche colturali.
- g) **fattori antropici**: azioni dell'uomo sull'ambiente che determinano l'alterazione delle condizioni di equilibrio dei versanti (disboscamenti, tagli, costruzione di edifici, ecc.).

Tali informazioni sono essenzialmente analitiche e non richiedono, in questa fase, alcuna sintesi o interpretazione (VARNES & IAEG, 1984; EINSTEIN, 1988).

### 3.2 Descrizione degli effetti

La cartografia geomorfologica di dettaglio rappresenta lo strumento base per la descrizione della situazione del territorio nei confronti dei processi che determinano condizioni di instabilità geomorfologica. Attraverso opportune indagini di tipo geomorfologico è possibile realizzare infatti "carte inventario" dei fenomeni franosi esistenti e individuare aree con potenziale instabilità dei versanti. Esempi di carte inventario particolarmente accurate sono proposte da CARRARA & MERENDA (1974), WIECZORECK (1982, 1984) e dal progetto nazionale svizzero DUTI (1985).

Tali carte inventario sono talvolta identificate con il termine "carte del pericolo" (*danger maps*) (EINSTEIN, 1988) in quanto forniscono indicazioni sulla geometria e sul meccanismo dei fenomeni franosi. Tuttavia esse, come la carte tematiche dei fattori della franosità, sono sostanzialmente carte analitiche in cui viene registrato lo stato di fatto e non viene fornita alcuna sintesi o parametrizzazione del pericolo, ovvero dell'intensità. Gli autori preferiscono considerare pertanto le "carte inventario" come documenti relativi alla descrizione dello stato della natura; dall'interpretazione di tali mappe è possibile in seguito derivare i parametri per quantificare l'intensità e la pericolosità.

Il livello di dettaglio con cui i fenomeni franosi vengono rappresentati è diverso per i diversi autori. I parametri che più spesso vengono indicati sono i seguenti:

- a) tipologia di movimento;
- b) materiale coinvolto;
- c) stato di attività;
- d) estensione areale;
- e) profondità stimata;
- f) direzione del movimento;
- g) grado di certezza nell'identificazione;
- h) velocità stimata;
- i) aree di richiamo o di propagazione;
- j) aree potenzialmente instabili.

Alla rappresentazione cartografica dei fenomeni può essere associato un codice al quale può essere riferita una scheda di descrizione in cui sono riportati i dettagli, rilevabili sul terreno o attraverso ricerche storiche, che non possono efficacemente essere rappresentati in forma cartografica. A tal fine risultano particolarmente utili i sistemi informativi territoriali (G.I.S.), i quali oltre a permettere l'associazione di banche dati ad elementi geografici, consentono un rapido e costante aggiornamento delle informazioni.

Nell'ambito del GNDCI (CANUTI *et alii*, 1992) è stata proposta una legenda per la realizzazione di carte geomorfologiche di dettaglio finalizzate all'identificazione dei fenomeni franosi (Fig.1). Tale legenda si ispira sostanzialmente ai principi delineati dal GNGFG (1987) per la redazione delle "carte geomorfologiche di base" e si basa sulla mappatura delle *forme* o dei *depositi*.

- Ogni forma o deposito è caratterizzata da uno *stato di attività*; il GNGFG (1987) distingue forme:
- a) *attive*: se sono associate a processi in atto al momento del rilevamento, o ricorrono con un ciclo il cui periodo massimo non supera quello stagionale;
  - b) *quiescenti*: forme non attive al momento del rilevamento, per le quali però esistono indizi che ne dimostrino un'oggettiva possibilità di riattivazione, in quanto esse non hanno esaurito la loro potenzialità di evoluzione;
  - c) *inattive*: se l'agente morfogenetico non è più presente al momento del rilevamento, in quanto ha esaurito la propria attività.

La legenda illustrata in Fig.1, prende in particolare considerazione gli elementi più caratteristici delle condizioni di instabilità dei versanti, rappresentati da forme e processi legati alla *gravità* ed all'azione delle *acque correnti superficiali*. Appositi simboli contraddistinguono i diversi elementi rappresentati, fornendo anche indicazioni sullo stato di attività dei processi. Le frane vengono distinte in diverse tipologie seguendo la classificazione di VARNES (1978). Vengono inoltre presi in considerazione i depositi superficiali (*coperture*), distinti in base allo spessore e alla tessitura, in quanto essi rivestono una particolare importanza per la stabilità dei versanti.

AGENTE MORFODINAMICO: <b>ACQUE CORRENTI SUPERFICIALI</b>	STATO DI ATTIVITÀ		
	ATTIVO	QUIESCENTE	INATTIVO
Area interessata da ruscellamento diffuso			
Fosso di ruscellamento concentrato			
Calanco			
Scarpata di erosione fluviorotenzia			
Erosione in alveo: a) nelle alluvioni; b) nel substrato			
Erosione di sponda			
Ripiano di erosione fluviale			
Piana di esondazione			
Conoide di deiezione			
Deviazione o sbarramento dell'alveo			
Forra			
Ristagni e venute d'acqua			
Sorgenti			

AGENTE MORFODINAMICO: <b>GRAVITÀ</b>	STATO DI ATTIVITÀ		
	ATTIVO	QUIESCENTE	INATTIVO
Area interessata da reptazione			
Area interessata da soliflusso generalizzato			
Lobo di soliflusso			
Falda detritica			
Cono detritico			
Scarpata interessata da caduta di detriti			
Corona di frana			
Gradino di frana			
Contropendenza			
Trincea			
Frattura di trazione			
Corpo di frana per crollo o ribaltamento			
Corpo di frana per scorrimento rotazionale			
Corpo di frana per scorrimento traslativo			
Corpo di frana per colamento			
Espandimento laterale			
Corpo di frana complessa			
Area interessata da deformazione gravitativa profonda			
Area interessata da deformazioni plastiche			

Fig.1- Legenda per la cartografia geomorfologica di dettaglio dei fenomeni franosi (da CNR-GNDICI & REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 1993).

Recentemente, nell'ambito del Gruppo di Lavoro per l'Inventario Mondiale delle Frane (WP/WLI) sono stati definiti dei nuovi criteri per la descrizione dell'attività e la classificazione delle frane.

Per quanto riguarda l'attività delle frane il WP/WLI (1993; 1994) ha proposto delle raccomandazioni che permettono una completa e dettagliata comprensione della dinamica e dell'evoluzione dei movimenti. La classificazione dell'attività si articola nei seguenti punti:

a) **stato di attività:** che descrive le informazioni sul tempo in cui si è verificato il movimento e che permette di prevedere il tipo di evoluzione, in senso temporale, del fenomeno (Fig.2); in base allo stato di attività una frana si definisce:

1) *attiva (active):* se è attualmente in movimento;

- 2) *sospesa (suspended)*: se si è mossa entro l'ultimo ciclo stagionale ma non è attiva attualmente;
- 3) *riattivata (reactivated)*: se è di nuovo attiva dopo essere stata inattiva;
- 4) *inattiva (inactive)*: se si è mossa l'ultima volta prima dell'ultimo ciclo stagionale. Le frane inattive si possono dividere ulteriormente negli stati 5-8:
- 5) *quiescente (dormant)*: se può essere riattivata dalle sue cause originali;
- 6) *naturalmente stabilizzata (abandoned)*: se non è più influenzata dalle sue cause originali;
- 7) *artificialmente stabilizzata (stabilized)*: se è stata protetta dalle sue cause originali da misure di stabilizzazione;
- 8) *relitta (relict)*: se si è sviluppata in condizioni geomorfologiche o climatiche considerevolmente diverse dalle attuali.

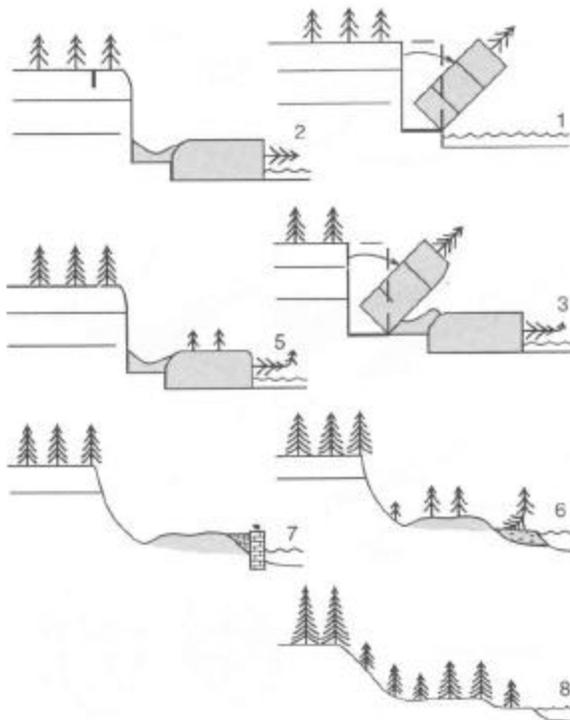


Fig.2 - Frane di ribaltamento con diversi stati di attività: **1) Attiva**: l'erosione all'unghia del pendio causa il ribaltamento di un blocco. **2) Sospesa**: fessurazione locale nel coronamento del ribaltamento. **3) Riattivata**: un altro blocco ribalta, disturbando il materiale precedentemente spostato. **5) Quiescente**: la massa spostata riprende la sua copertura vegetale, le scarpate sono modificate dalla degradazione meteorica. **6) Naturalmente stabilizzata**: la deposizione fluviale ha protetto l'unghia del pendio, la scarpata riprende la sua copertura vegetale. **7) Artificialmente stabilizzata**: un muro protegge l'unghia del pendio; **8) Relitta**: si è stabilita una copertura vegetale uniforme (da CRUDEN & VARNES, 1994).

b) **distribuzione di attività**: che descrive dove la frana si sta muovendo e che permette di prevedere il tipo di evoluzione, in senso spaziale, del dissesto (Fig.3) ; in base alla distribuzione di attività una frana si definisce:

- 1) *in avanzamento (advancing)*: se la superficie di rottura si estende nella direzione del movimento;
- 2) *retrogressiva (retrogressing)*: se la superficie di rottura si estende in senso opposto a quello del movimento del materiale spostato;
- 3) *multi-direzionale (enlarging)*: se la superficie di rottura si estende in due o più direzioni;
- 4) *in diminuzione (diminishing)*: se il volume del materiale spostato decresce nel tempo;
- 5) *confinata (confined)*: se è presente una scarpata ma non è visibile la superficie di scorrimento al piede della massa spostata;
- 6) *costante (moving)*: se il materiale spostato continua a muoversi senza variazioni apprezzabili della superficie di rottura e del volume del materiale spostato;
- 7) *in allargamento (widening)*: se la superficie di rottura si estende su uno o entrambi i margini laterali.

c) **stile di attività**: che indica come i diversi meccanismi di movimento contribuiscono alla frana (Fig.4); in base allo stile di attività una frana si definisce:

- 1) *complessa (complex)*: se è caratterizzata dalla combinazione, in sequenza temporale, di due o più tipi di movimento (crollo, ribaltamento, scivolamento, espansione, colamento);
- 2) *composita (composite)*: se è caratterizzata dalla combinazione di due o più tipi di movimento (crollo, ribaltamento, scivolamento, espansione, colamento) simultaneamente in parti diverse della massa spostata;
- 3) *successiva (successive)*: se è caratterizzata da un movimento dello stesso tipo di quello di un fenomeno precedente e adiacente, e se le masse spostate e le superfici di rottura si mantengono ben distinte;
- 4) *singola (single)*: se è caratterizzata da un singolo movimento del materiale spostato;
- 5) *multipla (multiple)*: se si tratta di una molteplice ripetizione dello stesso tipo di movimento.

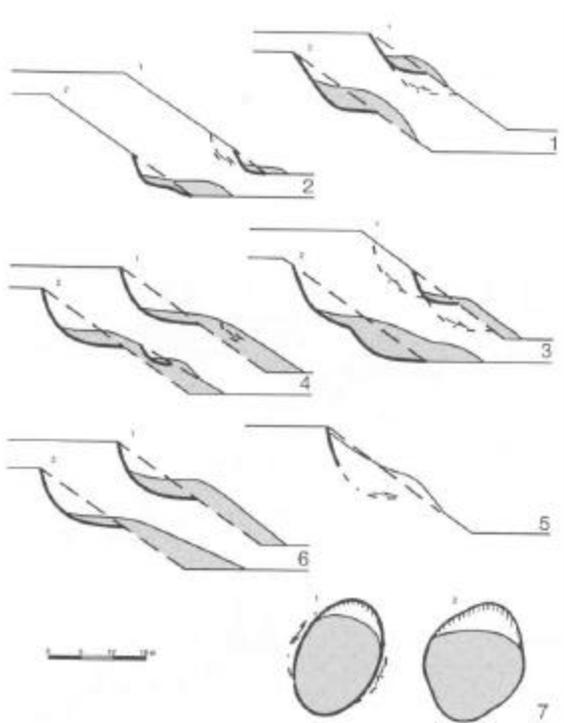


Fig.3- Frane con diversa distribuzione di attività: 1) in avanzamento; 2) retrogressiva; 3) multi-direzionale; 4) in diminuzione; 5) confinata; 6) costante; 7) in allargamento (in pianta). La sezione 2 di ogni diagramma mostra il versante dopo il movimento sulla superficie di rottura, indicata con la freccia. Il materiale spostato è retinato (da CRUDEN & VARNES, 1994).

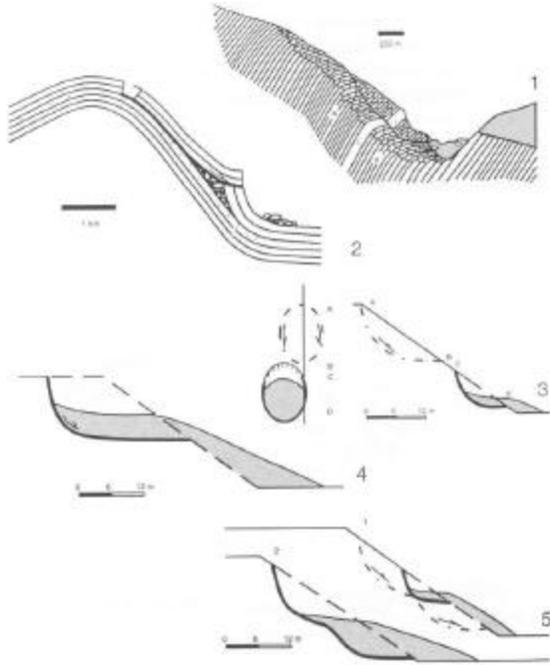


Fig.4- frane con diverso stile di attività. **1) Complessa:** si è verificato un ribaltamento in seguito all'incisione della valle, dopo che i processi di degradazione meteorica hanno causato l'indebolimento della massa ribaltata, una parte del materiale spostato è coinvolto in uno scivolamento. **2) Composita:** si è verificato uno scivolamento in corrispondenza di una superficie di debolezza, il movimento ha causato un ribaltamento sotto l'unghia della superficie di rottura. **3) Successiva:** l'ultimo scivolamento, AB, è dello stesso tipo dello scivolamento DC ma non condivide le masse spostate e le superfici di rottura si mantengono ben distinte. **4) Singola;** **5) Multipla.** (da CRUDEN & VARNES, 1994).

La principale differenza con la classificazione dell'attività del GNGFG, riguarda i fenomeni inattivi: mentre per il GNGFG, ed in gran parte della letteratura scientifica nazionale, sono considerati inattivi i fenomeni verificatisi in un altro contesto morfoclimatico e pertanto non più riattivabili, nella letteratura internazionale e nelle raccomandazioni del WP/WLI sono considerate inattive tutte le frane che si sono mosse l'ultima volta prima dell'ultimo ciclo stagionale. Pertanto nell'utilizzare i termini relativi allo stato di attività è sempre opportuno indicare la classificazione impiegata.

Per caratterizzare il tipo di evoluzione di una frana può essere utile fare riferimento alla frequenza delle riattivazioni invece che allo stato di attività registrato al momento del rilevamento. A questo proposito può essere utile la distinzione proposta da DEL PRETE *et alii* (1992) fra *frane continue, stagionali* e *intermittenti* (con tempo di ritorno pluriennale o pluridecennale).

Per quanto riguarda infine la classificazione delle frane, l'utilizzo della classificazione di VARNES (1978) presenta delle difficoltà legate all'interpretazione dei fenomeni "complessi". Questi ultimi sono costituiti, secondo la definizione dell'autore, dalla combinazione di meccanismi di movimento diversi. Entro tale tipologia vengono pertanto a ricadere fenomeni estremamente diversi fra loro, quali per esempio un "crollo di roccia - colata di detrito" o uno "scivolamento di terra - colata di terra". Poiché l'associazione di meccanismi diversi rappresenta più la regola che l'eccezione nella genesi e nell'evoluzione di un fenomeno franoso, le frane complesse costituiscono in genere una parte rilevante di una carta-inventario delle frane. CRUDEN & VARNES (1994) hanno proposto di evitare l'uso del termine "complesso" per la descrizione del tipo di movimento e di mantenerlo come descrittore dello "stile di attività" della frana. I fenomeni franosi costituiti da un'associazione di tipologie di movimento diverse possono essere identificati da una coppia di termini, uno relativo al cosiddetto *primo movimento*, l'altro relativo al *secondo movimento*. Per convenzione si intende come primo movimento quello che avviene per primo, nel caso che i due meccanismi siano in successione temporale, oppure quello che si verifica a quota più alta, nel caso in cui i due meccanismi si verificino simultaneamente.

#### 4. VALUTAZIONE DELL'INTENSITÀ O PERICOLO

Per quanto riguarda altri tipi di catastrofi naturali, quali gli eventi meteorologici estremi, le piene o i terremoti, la definizione dell'intensità di un evento è immediata in quanto può essere fatta corrispondere, rispettivamente, all'altezza di precipitazione, alla portata al colmo di piena o all'intensità macrosismica. Per i fenomeni franosi la definizione dell'intensità è più problematica, infatti la severità di una frana dipende da una serie di fattori di difficile valutazione.

Molto spesso l'intensità delle frane viene valutata in base a scale che forniscono una previsione delle possibili conseguenze. E' questo il caso per esempio del progetto francese PER (DRM, 1988, 1990) nell'ambito del quale sono definiti a priori dei livelli di intensità in base alle possibili conseguenze sull'incolumità umana (Tab.1) e sul quadro economico (Tab.2).

Tale approccio, analogo a quello impiegato nella sismologia per esprimere l'intensità dei terremoti con la scala Mercalli, è tuttavia sconsigliabile in quanto presuppone già nella definizione dell'intensità del fenomeno una valutazione delle possibili conseguenze (ovvero del rischio secondo le definizioni date in sez.2.2. E' preferibile invece definire la severità del fenomeno *a priori* rispetto alle conseguenze attese in base alle sole caratteristiche geometriche, cinematiche e meccaniche.

Grado	Intensità	Possibili conseguenza	Natura del fenomeno
H <sub>0</sub>	nulla	incidente improbabile (tranne conseguenze indotte)	movimenti a cinematica lenta
H <sub>1</sub>	media	incidenti isolati	crolli isolati
H <sub>2</sub>	elevata	qualche vittima	crolli, scivolamenti o colate di terra
H <sub>3</sub>	molto elevata	catastrofe (qualche decina di vittime)	crolli e scivolamenti catastrofici, colate rapide di terra o detrito

Tab.1 - Intensità dei fenomeni rispetto alle conseguenze sull'incolumità umana (DRM, 1990).

Grado	Intensità	Livello delle misure di prevenzione necessarie	Esempio
E <sub>1</sub>	lieve	10% del valore economico di un'abitazione singola individuale	disgaggio di blocchi instabili
E <sub>2</sub>	media	intervento tecnico sopportabile per un gruppo ristretto di proprietari: immobili d'abitazione o piccole lottizzazioni	disgaggio o realizzazione di strutture paramassi; drenaggio di una zona instabile di modesta estensione
E <sub>3</sub>	elevata	intervento tecnico specifico altamente qualificato interessante un'area geografica estesa rispetto all'estensione del lotto abitativo. Costo rilevante.	stabilizzazione di uno scivolamento di terreno di considerevoli dimensioni; consolidamento di una parete rocciosa
E <sub>4</sub>	molto elevata	non è possibile alcun intervento tecnico ad un costo accettabile per la collettività	scivolamento o crollo catastrofico

Tab.2 - Intensità dei fenomeni rispetto alle conseguenze economiche (DRM, 1990).

#### 4.1 Velocità

HUNGR (1981) ha proposto una scala di intensità dei fenomeni franosi basata sulla velocità del movimento ed associata ad una scala dei danni analoga alla scala Mercalli per i terremoti. Anche in questo caso la definizione dell'intensità è basata su delle ipotesi sulle conseguenze; tuttavia vengono anche fornite precise soglie di velocità che delimitano le diverse classi. La scala di HUNGR (1981) è stata in parte modificata e razionalizzata da CRUDEN & VARNES (1994) ed è mostrata in Tab.3.

class e	Descrizione	Danni osservabili	Velocità (m/s)	
7	ESTREM. RAPIDO	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	5 m/s	5
6	MOLTO RAPIDO	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$
5	RAPIDO	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	1.8 m/h	$5 \cdot 10^{-4}$
4	MODERATO	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute	13 m/mese	$5 \cdot 10^{-6}$
3	LENTO	Possibilità di intraprendere 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.	1.6m/anno	$5 \cdot 10^{-8}$
2	MOLTO LENTO	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	16mm/anno	$5 \cdot 10^{-10}$
1	ESTREM. LENTO	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni.		

Tab.3 - Scala di intensità delle frane basata sulla velocità e sul danno prodotto (da CRUDEN & VARNES, 1994).

La determinazione della velocità di un fenomeno franoso è in genere problematica. Una stima approssimata della velocità può essere ottenuta dalla tipologia del fenomeno e dal suo stato di attività (Tab.4).

Tipologia	Crollo	Scivolamento				Colamento			
Materiale	roccia	roccia		detrito	terra		roccia	detrito	terra
Stato di attività	-	N	R	-	N	R	-	-	-
Classe di velocità	6-7	5-6	1-5	1-6	5-6	1-5	1-2	1-7	1-4

Tab.4 - Velocità delle frane (riferita alla classi proposte da CRUDEN & VARNES, 1994, vedi Tab.3) in base alla tipologia del movimento, al materiale coinvolto e allo stato di attività. N= neoformazione; R = riattivazione.

La relazione fra tipo di movimento e velocità è abbastanza ovvia: un crollo di roccia è generalmente molto rapido o estremamente rapido, mentre una colata di terra è in genere lenta o molto lenta. Per quanto riguarda lo stato di attività, esso assume una particolare importanza per i meccanismi di scivolamento che avvengono per deformazione di taglio: in questo caso un movimento di neoformazione è generalmente più rapido della riattivazione di uno scivolamento preesistente, poiché il primo è caratterizzato da una rottura "fragile" mentre il secondo da un comportamento "duttile" in quanto la resistenza è decaduta a valori residui. Tale differenza è tanto più marcata quanto più elevata è la fragilità del materiale.

## 4.2 Dimensioni

Un altro approccio per la quantificazione dell'intensità dei fenomeni franosi si basa sulla stima delle dimensioni della massa spostata in un evento franoso. Tale approccio è, seguito da FELL (1994), il quale esprime l'intensità di una frana come il volume in  $m^3$  della massa spostata (Tab.5).

Intensità (I)	Descrizione	Volume ( $m^3$ )
7	Estremamente grande	$> 5 \cdot 10^6$
6	Molto grande	$1 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$
5	Mediamente grande	$2.5 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^6$

4	Media	$5 \cdot 10^4 \div 2.5 \cdot 10^5$
3	Piccola	$5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$
2.5	Molto piccola	$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$
2	Estremamente piccola	$< 5 \cdot 10^2$

Tab.5 - Scala di intensità delle frane basata sul volume della massa spostata (da FELL, 1994).

La stima del volume della massa spostata è spesso difficile per cui può essere conveniente far riferimento all'estensione areale delle frane come misura dell'intensità.

Una migliore definizione dell'intensità sulla base delle dimensioni, dovrebbe tener conto delle differenze fra i vari tipi di frana. Il DRM (1990) ha proposto di associare ai livelli di intensità presentati in Tab.1 e Tab.2 delle volumetrie di materiale spostato diverse per fenomeni di crollo-ribaltamento e di colata (Tab.6). Per le frane di scivolamento, in cui la stima del volume spostato è particolarmente difficile, vengono forniti dei limiti di profondità.

<b>CROLLI E RIBALTAMENTI</b>			
		<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Descrizione</b>
H <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	$< 10^2$	caduta di blocchi isolati
H <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	$10^2 - 10^4$	crollo, ribaltamento o scivolamento di blocchi
H <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	$10^4 - 10^6$	crollo in massa
H <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	$> 10^6$	crollo o scivolamento di roccia catastrofico
<b>COLATE</b>			
		<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Descrizione</b>
H <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	$< 5 \cdot 10^2$	colata o scivolamento di fango
H <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	$5 \cdot 10^2 - 10^4$	colata di fango o detrito
H <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	$10^4 - 10^6$	colata rapida di detrito
H <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	$> 10^6$	trasporto in massa eccezionale
<b>SCIVOLAMENTI</b>			
		<b>Profondità (m)</b>	<b>Descrizione</b>
H <sub>0</sub>	E <sub>1</sub>	$< 2$	scivolamento superficiale o soliflusso
H <sub>0</sub>	E <sub>2</sub>	$2 - 10$	scivolamento localizzato
H <sub>0</sub>	E <sub>3</sub>	$10 - 50$	scivolamento di un versante
H <sub>0</sub>	E <sub>4</sub>	$> 50$	scivolamento eccezionale

Tab.6 - Corrispondenza fra l'intensità e le caratteristiche fisiche del fenomeno (da DRM, 1990).

Nella Tab.6 è mantenuta la distinzione fra intensità rispetto alle conseguenze sul piano umano ( $H_0$ ;  $H_1$ ;  $H_2$ ;  $H_3$ ) e su quello economico ( $E_1$ ;  $E_2$ ;  $E_3$ ;  $E_4$ ). Si noti che nell'associazione delle due scale di intensità si è fatto implicitamente riferimento a valutazioni sulla velocità di movimento: infatti le due scale coincidono per i movimenti rapidi quali i crolli e i colamenti; per quanto riguarda invece gli scivolamenti, generalmente lenti, l'intensità rispetto alle conseguenze sul piano umano è da considerarsi nulla ( $H_0$ ) indipendentemente dalle dimensioni del fenomeno. In tale definizione sono pertanto incluse delle valutazioni sulla vulnerabilità.

### 4.3 Energia

Gli approcci presentati in sez.4.1 e in sez.4.2 sono entrambi parziali. Infatti come rilevato da MORGENSTERN (1985) e da CRUDEN & VARNES (1994), frane di ridotte dimensioni ed elevata velocità producono spesso più danni di grandi frane con bassa velocità. Una misura dell'intensità può essere data dal prodotto dell'area in frana per il quadrato della velocità; tale quantità è infatti proporzionale all'energia cinetica dal fenomeno.

L'intensità potrebbe essere considerata uguale, o proporzionale, all'energia cinetica sviluppata dalla frana. E' ovvio che l'energia cinetica varia nel tempo: è nulla nelle condizioni iniziali, aumenta dopo l'innesco del fenomeno, raggiunge un valore massimo e quindi decresce fino ad annullarsi di nuovo. Per intensità della frana si può considerare la massima energia cinetica istantanea oppure l'energia cinetica media.

Una stima del bilancio energetico di una frana può essere effettuata adottando il "modello a slitta" (*sled model*) per l'interpretazione del movimento. Tale modello, originalmente proposto da HEIM (1932) e ripreso, fra gli altri, da SCHEIDEGGER (1973), HSÜ (1975) e SASSA (1988), si basa sull'assunzione che tutta l'energia persa nel movimento sia dissipata per attrito. Facendo riferimento alla Fig.5, il bilancio energetico di una frana di massa  $m$ , il cui centro di massa si trovi ad un'altezza  $y$  dal punto di arresto e ad una distanza orizzontale  $x$  dal punto di distacco, sottoposta ad un'accelerazione gravitazionale  $g$ , può essere espresso da:

$$\Delta U = \Delta K + W \quad \text{dove:} \quad (4.1)$$

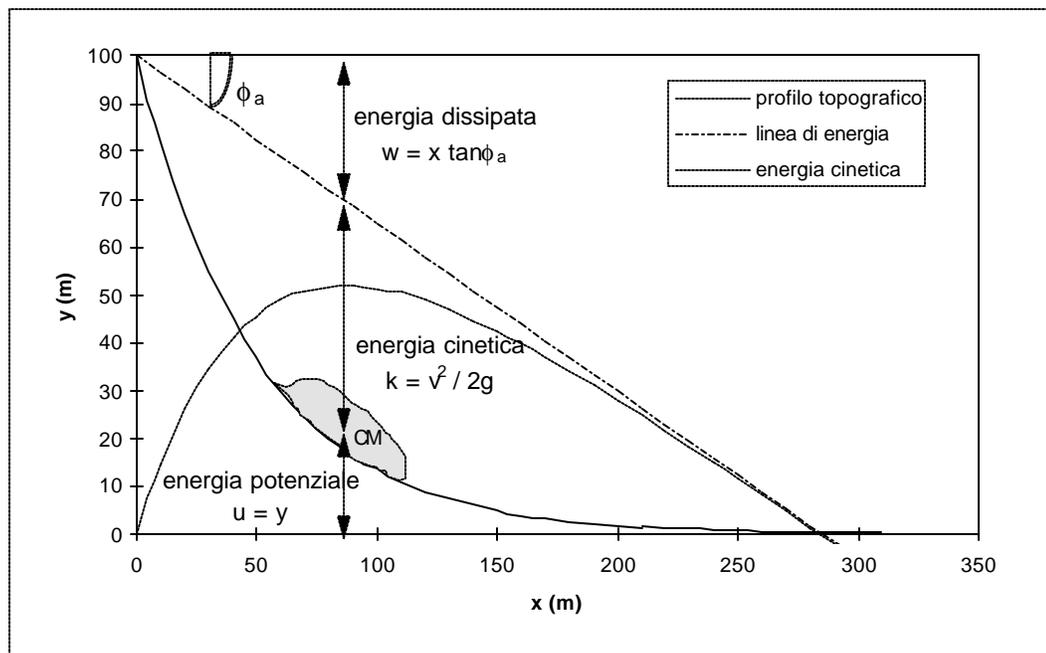


Fig. 5 - Modello a slitta per l'interpretazione dei fenomeni franosi.  $CM$  = centro di massa della massa spostata;  $u$  = energia potenziale;  $k$  = energia cinetica;  $w$  = lavoro delle forze di attrito;  $\phi_a$  = angolo di attrito apparente. Re tinato: massa spostata. (Nota: l'energia è divisa per il peso della massa spostata).

$$\begin{aligned} U &= m g y_2 && \text{è l'energia potenziale;} \\ K &= \frac{1}{2} m v^2 && \text{l'energia cinetica;} \\ W &= m g x \tan f_a && \text{il lavoro delle forze d'attrito.} \end{aligned}$$

Dividendo tutto per il peso  $mg$  della frana, si ottiene la seguente relazione:

$$y = y_o - \frac{v^2}{2g} - x \tan f_a \quad (4.2)$$

dove, oltre alle quantità già definite,  $y_o$  indica la quota iniziale del centro di massa (all'inizio del movimento), mentre  $\phi_a$  rappresenta l'angolo di attrito apparente (SASSA, 1988) ed è una funzione dell'angolo di attrito dinamico del materiale  $\phi'$  e della pressione dell'acqua interstiziale durante il moto:

$$\tan \phi_a = (1 - r_u) \tan \phi' \quad (4.3)$$

dove  $r_u$  esprime il rapporto fra la pressione dell'acqua  $u$  e la pressione litostatica verticale totale  $\sigma_v$ .

La distanza di arrivo della frana e la velocità possono essere semplicemente stimate tracciando una "linea di energia" (Fig.5) passante per il centro di massa all'inizio del movimento ed inclinata di un angolo  $\phi_a$  sull'orizzontale. L'energia cinetica massima sviluppata dalla frana è pertanto proporzionale alla massima distanza fra il profilo topografico e la linea di energia; l'energia cinetica media è proporzionale invece all'area del settore compreso fra il profilo e la linea di energia.

## 5. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ

La valutazione della pericolosità consiste nella caratterizzazione dell'imprevedibilità di un fenomeno franoso di determinate caratteristiche. Tale valutazione è generalmente complessa e richiede la quantificazione, sia a livello spaziale che temporale, della probabilità di occorrenza dell'evento.

Per alcuni autori il termine pericolosità è limitato alla sola previsione temporale; in questa nota, in base alle definizioni date in sez.2.2, il termine pericolosità è inteso nella sua accezione più ampia e comprende ogni interpretazione dello stato della natura che contenga elementi previsionali.

Ad un fenomeno franoso possono essere associati determinati attributi (es. tipologia, intensità, tipo di evoluzione). Tali attributi, geometrici o meccanici, possono essere considerati come descrittori del *pericolo*, anziché della pericolosità, come per esempio propone EINSTEIN (1988). Tuttavia lo stesso EINSTEIN (1988) rileva che la caratterizzazione del pericolo non deve includere alcun elemento di previsione. Pertanto è opportuno limitare il termine pericolo alla quantificazione dell'intensità del fenomeno, mentre laddove l'interesse è centrato sulla previsione della sua evoluzione è più opportuno parlare di pericolosità.

In particolare la valutazione completa della pericolosità prevede i seguenti passi (HARTLÉN & VIBERG, 1988):

- a) **previsione spaziale** : previsione di dove, entro una data area, si può verificare una frana;
- b) **previsione temporale** : previsione di quando uno specifico fenomeno franoso può avvenire in un determinato versante;
- c) **previsione tipologica**: previsione del tipo di frana che può verificarsi nell'area considerata;
- d) **previsione dell'intensità**: previsione della velocità, delle dimensioni o dell'energia del fenomeno franoso;
- e) **previsione dell'evoluzione** : previsione della distanza di propagazione, dei limiti di retrogressione o di espansione laterale.

### 5.1 Previsione spaziale

La previsione spaziale della pericolosità consiste nella valutazione della **pericolosità relativa** ovvero nella stima del grado di pericolosità di un versante rispetto ad un altro, senza esprimere la probabilità di occorrenza dei fenomeni franosi in termini assoluti ed in senso temporale. Molto spesso la previsione dei fenomeni futuri si basa del quadro dei movimenti di versante passati o presenti per cui la previsione spaziale può fornire indirettamente indicazioni qualitative sulla probabilità di occorrenza.

Il grado di pericolosità relativa dei versanti può essere valutato ed espresso con diversi criteri; quelli più comunemente impiegati si possono raggruppare nelle seguenti categorie:

- a) *valutazione empirica*: in cui viene effettuata una zonazione del territorio in base alla valutazione soggettiva della suscettibilità all'instabilità dei versanti sulla base delle informazioni raccolte con l'inventario delle frane e con la cartografia tematica.
- b) *indicizzazione degli effetti*: in cui l'analisi della distribuzione dei fenomeni franosi presenti o passati viene utilizzata come base per la previsione dei fenomeni futuri, mediante la definizione di percentuali areali in frana per singole litologie (o altri tematismi).
- c) *indicizzazione delle cause*: si basa sull'assegnazione di pesi a diverse classi di fattori della franosità e sulla loro combinazione in modo da ricavare indici di pericolosità relativa.
- d) *analisi statistica*: in cui l'integrazione dei fattori della franosità avviene mediante analisi statistiche multivariate; anche in questo caso si ottengono indici di pericolosità relativa.
- e) *analisi morfometrica*: in cui il confronto fra l'altezza e la pendenza di pendii stabili e di pendii interessati da fenomeni franosi permette di ottenere indicazioni sulla pericolosità relativa nell'ambito di unità litologiche omogenee.
- f) *analisi deterministica*: mediante la quale la pericolosità relativa è espressa dal fattore di sicurezza, ricavato con i metodi di analisi di stabilità all'equilibrio limite.
- g) *analisi probabilistica (o di affidabilità)*: mediante la quale l'incertezza nella determinazione di alcuni parametri necessari alle analisi di stabilità è ovviata considerando variabili stocastiche in modo da ottenere distribuzioni di probabilità del fattore di sicurezza.
- h) *analisi cinematica*: nel caso di ammassi rocciosi, in cui le frane sono influenzate essenzialmente dall'assetto delle discontinuità, la distribuzione delle orientazioni di queste ultime può essere analizzata in base ai requisiti cinematici richiesti per l'innescio del movimento.

### 5.1.1 *Valutazione empirica*

La carta inventario delle frane fornisce già la base per la previsione spaziale e tipologica dei fenomeni franosi e permette l'identificazione dei fenomeni passibili di riattivazione. Il passo successivo è la zonazione dei versanti, attualmente non interessati da fenomeni franosi, in modo da prevedere anche le frane di prima generazione, le quali, anche se più rare di quelle riattivate, sono generalmente più distruttive (ovvero hanno una maggiore intensità) in quanto caratterizzate da rottura fragile.

Le carte della suscettibilità all'instabilità dei versanti, o della franosità, redatte solo su base geomorfologica hanno il pregio di essere documenti di rapida esecuzione e basso costo. Il principale limite di tale metodo consiste nella soggettività: documenti attendibili richiedono operatori estremamente esperti e, inoltre, mappe redatte da operatori diversi sono difficilmente confrontabili.

Sono numerosi gli esempi di carte della suscettibilità all'instabilità dei versanti realizzate su base essenzialmente geologica o geomorfologica. Accurate revisioni delle metodologie impiegate sono presentate da BOSI (1978), VARNES & IAEG (1984), BRABB (1984) e HANSEN (1984), per cui si rimanda a tali lavori per ulteriori approfondimenti.

A questa categoria appartengono i metodi impiegati nel progetto nazionale francese ZERMOS (*Zones exposées à des risques aux mouvements du sol et du sou-sol*) (HUMBERT, 1976, 1977; ANTOINE, 1977). La zonazione della pericolosità relativa del territorio, alla scala 1:25.000, si realizza con la divisione del territorio in tre classi:

- a) zone in cui non è rilevabile alcun segno di movimento attuale;
- b) zone in cui sono presenti alcune evidenze di movimenti attuali o potenziali;
- c) zone in cui sono presenti rilevanti evidenze di movimenti attuali o potenziali.

La zonazione si realizza attraverso la sintesi, su base essenzialmente qualitativa, di informazioni raccolte durante la fase di descrizione dello stato della natura (acclività, litologia, assetto strutturale, etc.). Sono

distinti diversi tipi di pericolosità, corrispondenti a diversi tipi di frana o di altri tipi di instabilità geologica (es. subsidenza) in modo da realizzare anche una previsione tipologica dei fenomeni.

In Italia, la valutazione della suscettibilità dei versanti ai movimenti di massa è stata impiegata, fra gli altri, da NARDI *et alii* (1987) per la realizzazione di una serie di "carte della franosità" alla scala 1:10.000 in alcune aree sismiche della Toscana settentrionale, nell'ambito del Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti (GNDT). Le classi di pericolosità definite sulla base di elementi geomorfologici, geologici e topografici sono le seguenti:

- a) aree instabili o ad elevata pericolosità, in cui sono presenti frane attive o quiescenti;
- b) aree con instabilità potenziale elevata per caratteristiche morfologiche, nelle quali sono presenti indizi morfologici di instabilità;
- c) aree potenzialmente franose per caratteristiche litologiche;
- d) aree di media stabilità con sporadici e locali indizi di instabilità;
- e) aree stabili: corrispondenti a zone di fondovalle o pianeggianti.

Una valutazione soggettiva dell'importanza relativa dei diversi fattori della franosità, integrata con le informazioni della carta-inventario delle frane, è alla base della metodologia adottata dalla PROVINCIA DI MODENA & GNDICI U.O.2.9 (1994), nell'ambito del Progetto SCAI (Studio Centri Abitati Instabili), per la realizzazione di carte della pericolosità nei centri abitati. Vengono definite sei classi di pericolosità alle quali sono associati dei valori di probabilità relativa di frana (pari a 1 per i terreni interessati da frane attive; pari a 0 in terreni non interessati da frane e con condizioni litologiche e geomorfologiche favorevoli alla stabilità).

### 5.1.2 Indicizzazione degli effetti

Una stima della probabilità relativa può essere fornita dall'analisi della distribuzione dei fenomeni esistenti. Infatti, in alcuni casi, specialmente nel caso di litologie pelitiche, gran parte degli eventi franosi rappresentano riattivazioni di fenomeni preesistenti, mentre sono rari gli eventi di neoformazione.

La zonazione della pericolosità può pertanto essere ricavata, anziché da un'interpretazione soggettiva della carta-inventario, dalla determinazione, per ogni unità o sotto-unità geologica, della percentuale di area interessata da fenomeni franosi. La metodologia è pertanto oggettiva e riproducibile da diversi operatori.

Uno dei primi esempi di tale metodologia è proposto da BRABB *et alii* (1972) per la redazione della carta della suscettibilità ai fenomeni franosi nella San Mateo County (California): per ogni unità geologica, la percentuale di affioramento interessata da fenomeni franosi è determinata sovrapponendo alla carta geologica una carta inventario dei fenomeni franosi. La percentuale di area in frana è impiegata anche da RADBRUCH-HALL *et alii* (1982) per la carta della franosità degli Stati Uniti alla scala 1:7500000. Numerosi altri esempi di applicazione della metodologia, con variazioni e integrazioni, sono citati da VARNES & IAEG (1984), da BRABB (1984) e da HANSEN (1984).

La densità dei fenomeni franosi può efficacemente essere rappresentata mediante *isoplete* (CAMPBELL, 1973; WRIGHT *et alii*, 1974) ovvero con curve di ugual percentuale di area in frana. Tale metodologia è stata adottata da CANUTI *et alii* (1985a) e DE GRAFF & CANUTI (1988) per l'analisi della stabilità dei versanti nei depositi marini pliocenici della Toscana.

Una metodologia più completa per l'analisi della distribuzione delle aree in frana, che comprende anche informazioni sulle possibili cause dei movimenti, è stata proposta da BOSI (1978) e BOSI *et alii* (1985). La procedura è illustrata in Tab.7.

1	Suddivisione dell'area considerata in zone litotecniche omogenee.
2	Nell'ambito delle zone definite nella fase 1 delimitazione delle zone interessate dai diversi processi erosivi.
3	Nell'ambito delle zone definite nella fase 2 delimitazione delle zone caratterizzate da analoghe tipologie di fenomeni franosi.
4	Nell'ambito delle zone definite nella fase 3 delimitazione delle zone nelle quali:

	a) le frane sono da imputare prevalentemente a variazioni di forma dei versanti provocate da processi erosivi; b) le frane sono da imputare prevalentemente al decadimento della resistenza delle rocce e dei terreni.
5	Sulla base di opportune estrapolazioni delle zone definite con la fase 4, delimitazione di zone nelle quali: a) lo stato tensionale può risentire significativamente degli effetti delle variazioni di forma dei versanti provocate da processi erosivi; b) lo stato tensionale può risentire significativamente degli effetti del decadimento della resistenza delle rocce e dei terreni; c) zone in cui non si verificano le precedenti circostanze;
6	Per ciascuna delle zone determinate con l'operazione 5 determinazione di un <i>indice di franosità</i> definito dal rapporto fra la superficie in frana (di determinata tipologia) nella zona e la superficie totale della zona.
7	Rappresentazione cartografica degli <i>indici di franosità</i> .

Tab.7 - Metodologia per l'elaborazione delle carte di stabilità dei versanti (da BOSI *et alii*, 1985).

### 5.1.3 Indicizzazione delle cause

I metodi di zonazione della pericolosità più frequentemente adottati nella letteratura geomorfologica si basano sull'integrazione quantitativa o semiquantitativa di carte tematiche relative ai diversi fattori della franosità. Per i dettagli relativi alle diverse metodologie proposte in letteratura si rimanda alle revisioni di VARNES & IAEG (1984), BRABB (1984) e HANSEN (1984).

In Italia l'espressione più nota di tali metodi è stata proposta da AMADESI *et alii* (1977) ed AMADESI & VIANELLO (1978) ed è stata adottata dalla Regione Emilia-Romagna per la realizzazione della "carta della propensione al dissesto idrogeologico". Il metodo prende in considerazione quattro tematismi: litologia (divisa in 10 classi), pendenza dei versanti (5 classi), struttura e giacitura (9 classi) e uso del suolo (4 classi). Ogni classe è indicizzata con un peso che ne esprime l'influenza sulla stabilità. Dalla somma algebrica dei pesi relativi ai quattro tematismi si ottiene una zonazione della stabilità dei versanti. Opportune correzioni ed aggiustamenti vengono effettuati successivamente per confronto con gli elementi geomorfologici, sismici e climatici presenti nell'area.

Il limite principale della metodologia, consiste nella soggettività con cui vengono attribuiti i pesi alle diverse classi; inoltre molto spesso il documento di sintesi non rispecchia la distribuzione delle frane così come rilevabile attraverso indagini geomorfologiche, per cui la fase finale di aggiustamento per confronto con la carta-inventario assume una fondamentale importanza.

Per ovviare a tali inconvenienti si può ricorrere a procedure statistiche (cfr. sez.5.14) per l'attribuzione dei pesi ed alla taratura del modello statistico sulla base del confronto con la carta geomorfologica di dettaglio. Il GNGFG (1987) ha proposto uno schema formale per la redazione di "carte della pericolosità connessa con l'instabilità dei versanti" che si basa sulla separazione rigorosa e sul confronto iterativo fra cause (fattori) ed effetti (fenomeni franosi) dell'instabilità dei versanti. La carta geomorfologica, oppure la carta-inventario dei fenomeni franosi, diventa il documento base sul quale deve essere tarato ogni modello di sintesi dei fattori.

L'analisi delle cause si esplica attraverso la redazione di carte tematiche di base dei fattori (es. carte dell'acclività, litologiche, giacaturali, della fratturazione, idrogeologiche, dell'uso del suolo, etc.). Parallelamente all'analisi delle cause, viene effettuata l'analisi degli effetti, mediante indagini geomorfologiche con le quali vengono descritte le forme ed i processi, e viene tentata una ricostruzione della cronologia e dello stato di attività dei fenomeni. Dall'interpretazione della carta geomorfologica di base si ottiene una carta degli effetti dell'instabilità dei versanti, considerando solo gli elementi di maggior pericolo.

Assegnando, per tentativi, dei pesi ad ogni classe di fattori, si ottiene una carta di sintesi, la quale viene confrontata con la carta degli effetti. I pesi vengono quindi continuamente aggiustati attraverso un

confronto iterativo fra cause ed effetti, in modo da ottenere una congruenza fra pesi assegnati ed effetti osservati. A questo punto la carta di sintesi dei fattori può essere impiegata direttamente per la zonazione della pericolosità.

Per quanto riguarda gli ammassi rocciosi, ROMANA (1985), ha proposto una modifica della classificazione geomeccanica di BIENIAWSKI (1974), per la valutazione della stabilità dei pendii. L'autore propone il seguente indice *SMR* (*Slope Mass Rating*):

$$SMR = RMR - (F_1 F_2 F_3) + F_4 \quad \text{dove:} \quad (5.1)$$

*RMR* (*Rock Mass Rating*) è l'originale indice della classificazione di Bieniawski, funzione della resistenza del materiale roccia, dell'indice *RQD*, della spaziatura delle discontinuità, delle condizioni delle discontinuità e delle condizioni idrauliche;

*F*<sub>1</sub> è un parametro che dipende dal parallelismo fra la direzione del pendio e quella delle discontinuità;

*F*<sub>2</sub> è un parametro che dipende dall'inclinazione delle discontinuità;

*F*<sub>3</sub> è un parametro che riflette le relazioni fra il piano del versante e l'inclinazione delle discontinuità in relazione al meccanismo potenziale di rottura (scivolamento planare o ribaltamento);

*F*<sub>4</sub> è un fattore di correzione che dipende dalla natura del pendio (naturale o artificiale) e dal metodo di scavo.

L'indice *SMR*, espresso in percentuale, esprime il grado di stabilità del versante. Il valore di *SMR* permette di prevedere la tipologia di rottura ed è associato a delle strategie di riduzione della pericolosità, definite su base essenzialmente empirica. I limiti della metodologia riflettono quelli insiti nella definizione dell'indice *RMR*, quale l'elevato grado di soggettività nella attribuzione dei pesi ai diversi parametri e la non interdipendenza fra i parametri stessi, tuttavia i vantaggi risiedono proprio nella facilità d'uso e nella consolidata sperimentazione della classificazione di Bieniawski.

#### 5.1.4 *Analisi statistica*

Mediante l'analisi statistica multivariata di indicatori morfologici, geologici, idrogeologici, vegetazionali ed idrografici è possibile ottenere modelli per la zonazione relativa della pericolosità.

Esistono numerosi esempi di analisi statistica dei fattori della stabilità dei versanti, spesso associati all'utilizzo di sistemi informativi territoriali o di cartografia numerica. Le tecniche di analisi statistica più comunemente impiegate sono quelle regressive e quelle discriminanti. Revisioni sulle metodologie proposte sono presentate da VARNES & IAEG (1984), BRABB (1984), HANSEN (1984), EINSTEIN (1988) e HARTLÉN & VIBERG (1988).

I lavori più interessanti, per rigore metodologico e livello di dettaglio, sono quelli di CARRARA (1983, 1984) e CARRARA *et alii* (1982, 1985, 1991). In questi vengono elaborati numerosi indicatori geomorfologici di instabilità (topografici, geologici, geomorfologici, vegetazionali, idrogeologici, idrografici ed antropici) mediante un'analisi discriminante.

Il Servizio Geologico d'Italia ha proposto l'impiego di metodologie statistiche per la realizzazione delle carte di pericolosità alla scala 1:50.000 (AMANTI *et alii*, 1992) ed ha elaborato il seguente schema operativo:

- a) suddivisione del territorio in domini elementari omogenei, delimitati da confini geometrici (*celle*) o morfologici (*sotto-bacini, versanti*);
- b) parametrizzazione, secondo un criterio più oggettivo possibile, di ogni fattore dell'instabilità dei versanti;
- c) rappresentazione cartografica delle classi di valori assunti da ogni fattore nell'ambito di ogni dominio elementare, secondo cui il territorio è stato suddiviso (zonazione);
- d) elaborazione di modelli statistici multivariati in grado di spiegare la distribuzione delle frane.

Le linee guida del Servizio Geologico prevedono anche di tener conto del fattore tempo, attraverso l'analisi della ricorrenza dei fenomeni e degli eventi meteorologici estremi o sismici, per cui la carta della pericolosità ottenuta non si limita alla sola previsione spaziale ma fornisce una pericolosità completa.

Le metodologie di analisi statistica hanno l'indubbio vantaggio di fornire una sintesi dettagliata, oggettiva e riproducibile delle informazioni sull'incidenza delle frane partendo da dati facilmente rilevabili con le consuete indagini geologiche, geomorfologiche e morfometriche. Il limite principale della metodologia è che il modello statistico ottenuto è tarato specificatamente sulla particolare area considerata e non è esportabile su aree diverse.

### 5.1.5 Analisi morfometrica

L'idea di analizzare le relazioni fra l'acclività del versante e la presenza di frane in atto entro domini litologici omogenei al fine di ricavare soglie clivometriche per la zonazione della stabilità dei versanti, è alla base del metodo proposto da LUCINI (1969). Tale metodo è stato criticato, soprattutto dai geomorfologi, sulla base dell'evidenza che l'instabilità dei versanti non aumenta al crescere della pendenza bensì, nell'ambito di un'unità litologica omogenea, si può riscontrare statisticamente un intervallo clivometrico entro cui si ha la massima incidenza delle frane. Tale evidenza, seppur riconosciuta in una serie di lavori di geomorfologia applicata, è però contraddetta su base geotecnica: tranne che per meccanismi di rottura molto particolari, il fattore di sicurezza di un pendio diminuisce monotonamente all'aumentare dell'acclività. L'anomalia riscontrata nelle analisi geomorfologiche è da imputare soprattutto ad una inadeguata definizione di domini litologici omogenei; questi ultimi dovrebbero essere definiti infatti non tanto sulla base di criteri litostratigrafici, bensì rigorosamente su base litotecnica.

Nell'ambito di un dominio litotecnico omogeneo la valutazione della stabilità relativa dei versanti può essere ottenuta, con un approccio strettamente morfometrico, confrontando l'altezza e la pendenza dei pendii stabili con quelle dei pendii interessati da fenomeni franosi. In tal modo si possono ottenere curve altezza-pendenza empiriche che segnano il limite fra pendii stabili e pendii instabili.

La ricerca di soglie clivometriche o relazioni altezza-pendenza dei pendii può essere supportata anche da considerazioni geotecniche di tipo deterministico. Una prima sostanziale distinzione deve essere effettuata fra pendii interessati da frane presenti o passate, passibili di riattivazione, e pendii in cui si possono verificare frane di neoformazione.

Per quanto riguarda pendii con frane preesistenti, la stabilità è indipendente dall'altezza del versante ma dipende solo dall'acclività. La soglia clivometrica, o pendenza limite  $\beta_{lim}$ , può essere ricavata dall'espressione del fattore di sicurezza per un pendio indefinito con filtrazione parallela al piano di campagna (SKEMPTON & DELORY, 1957):

$$\tan \beta_{lim} = \left( 1 - m \frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \tan \phi_r' \quad (5.2)$$

dove  $\phi_r'$  è l'angolo di attrito residuo, in termini di sforzi efficaci, lungo la superficie di scivolamento,  $\gamma$  il peso di volume del terreno,  $\gamma_w$  quello dell'acqua ed  $m$  il rapporto fra l'altezza della superficie piezometrica sopra la superficie di scorrimento e la profondità di quest'ultima (in condizioni a secco  $m=0$ , per falda a piano di campagna  $m=1$ ). Poiché per molti terreni  $\gamma_w/\gamma$  è circa uguale a  $1/2$  ne consegue che, nelle condizioni più sfavorevoli, ovvero per falda a piano di campagna, la pendenza limite corrisponde a circa la metà dell'angolo di attrito residuo in termini di sforzi efficaci.

Per quanto riguarda pendii caratterizzati da frane di neoformazione e da una resistenza al taglio drenata non coesiva (es. terreni granulari o coesivi normalconsolidati) oppure influenzati da processi di

decadimento a lungo termine della componente coesiva della resistenza (es. argille sovraconsolidate fessurate), la stabilità è ancora indipendente dall'altezza del versante e la pendenza limite è ancora data dall'espressione di SKEMPTON & DELORY (1957), nella quale invece di considerare l'angolo di attrito residuo  $\phi_r'$ , si può introdurre l'angolo di attrito di picco o, meglio, quello in condizioni di taglio a volume costante  $\phi_{cv}'$  (stato critico o di completo rammollimento). Nelle condizioni idrauliche più sfavorevoli la pendenza limite è circa pari alla metà di  $\phi_{cv}'$ .

Per quanto riguarda rotture di neoformazione in terreni o rocce caratterizzati da una coesione  $c'$  in condizioni drenate, l'analisi di pendio indefinito si rileva inadeguata in quanto i meccanismi di instabilità più comuni in queste condizioni sono rappresentati generalmente da "scivolamenti rotazionali". Relazioni fra altezza  $H$  e pendenza  $\beta$  del pendio possono essere ricavate utilizzando i "diagrammi di stabilità" (*stability charts*) di BISHOP & MORGENSTERN (1960) o l'estensione di questi recentemente realizzata da CHANDLER & PEIRIS (1989). CHANDLER (1984) ha, per esempio, mostrato diagrammi  $H$ - $\beta$  per pendii artificiali in argille sovraconsolidate: si ottengono curve diverse in funzione del valore dell'angolo di attrito  $\phi'$ , della coesione  $c'$ , del peso di volume  $\gamma$  e del rapporto di pressione interstiziale  $r_u$ , definito nella sez.4.3.

Diagrammi  $H$ - $\beta$  possono essere costruiti anche per gli ammassi rocciosi mediante gli schemi di calcolo proposti da HOEK & BRAY (1981).

Tali analisi deterministiche non devono tuttavia sostituirsi all'indagine morfometrica, ma ne devono costituire un completamento ed un controllo. Un esempio di applicazione dell'analisi morfometrica, associata ad analisi geotecniche, è stato sperimentato dagli autori nell'area di Certaldo presso Firenze (Fig.6) (BERTOCCI *et alii*, 1994).

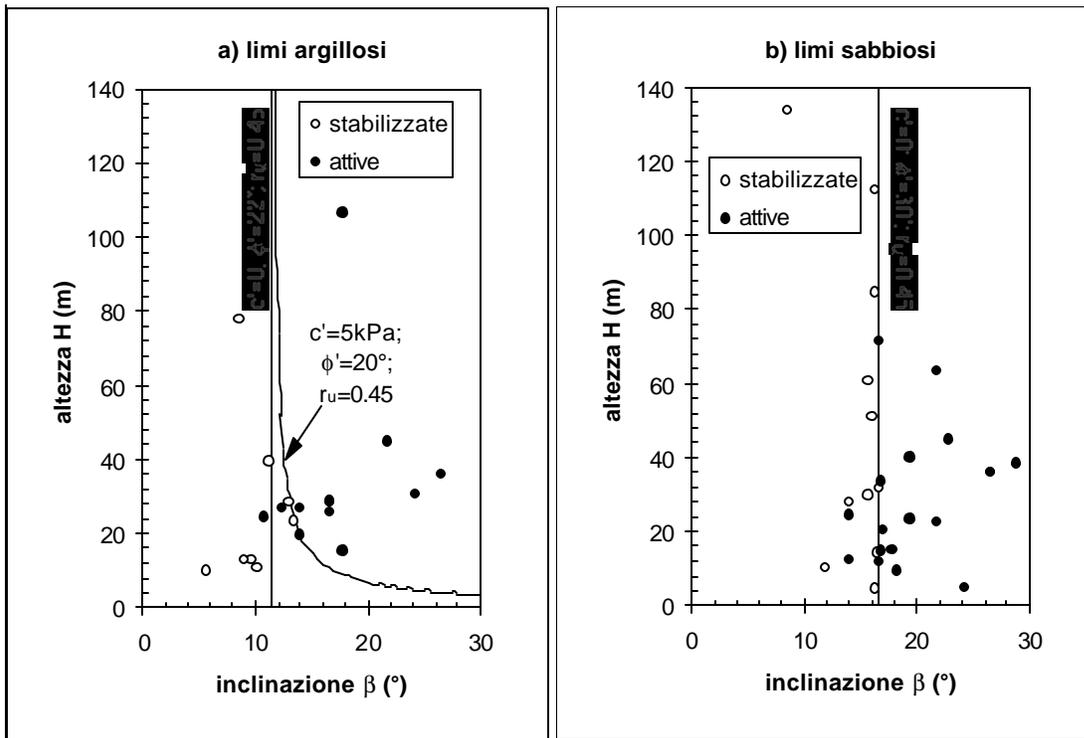


Fig.6 - Diagramma altezza - pendenza per frane stabilizzate ed attive nel bacino pliocenico della Val d'Elsa, presso Certaldo (FI). (da BERTOCCI *et alii*, 1994).

### 5.1.6 Analisi deterministica

I metodi puramente deterministici si basano sul calcolo del fattore di sicurezza dei pendii mediante analisi di stabilità all'equilibrio limite. In genere il calcolo è effettuato considerando le condizioni più cautelative (precipitazioni eccezionali, elevata altezza piezometrica, scosse sismiche).

Il fattore di sicurezza di un pendio è definito in due modi:

- a) come rapporto fra i valori rappresentativi delle forze resistenti  $C$  (capacità) e di quelle destabilizzanti  $D$  (domanda):

$$F = C / D \quad (5.3)$$

- b) come il fattore per cui devono essere divisi i parametri di resistenza del materiale per portare il pendio in uno stato di equilibrio limite; in questo caso il fattore di sicurezza è una funzione della resistenza mobilitata a rottura  $S_m$  che, per un criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb, è espressa da:

$$S_m = \frac{c'}{F} + \frac{\tan \mathbf{F}}{F} \quad (5.4)$$

Quando il pendio è in condizioni di equilibrio limite  $F=1$ ; valori di  $F>1$  indicano condizioni di stabilità.

Un'analisi puramente deterministica della pericolosità può essere effettuata solo per singoli pendii o per zone di limitata estensione laddove si disponga di una conoscenza geotecnica del sottosuolo sufficientemente approfondita. Metodi di zonazione della pericolosità, che prevedono criteri di estrapolazione del fattore di sicurezza determinato su singoli pendii, sono stati proposti da KLUGMAN & CHUNG (1976) e MULDER (1991).

Il fattore di sicurezza permette una valutazione sul grado di stabilità del versante e un confronto oggettivo fra la stabilità di versanti diversi, tuttavia esso non consente di stimare la probabilità di occorrenza del movimento. Una distinzione fra "versanti stabili" ed "instabili" può essere effettuata considerando un valore del fattore di sicurezza uguale a quello prescritto dalla normativa geotecnica per i fronti di scavo artificiali, pari a 1.3 (D.M.LL.PP. 11/3/1988).

Il maggior problema legato ai metodi puramente deterministici è legato all'incertezza con cui possono essere stabiliti alcuni dei parametri necessari per le analisi quali, ad esempio, la resistenza al taglio ed il regime delle pressioni interstiziali. A tale proposito si deve osservare che considerare nelle analisi condizioni di falda a piano di campagna porta generalmente a risultati troppo cautelativi; d'altra parte invece tali condizioni possono in qualche caso sottostimare la stabilità, per esempio in tutte le situazioni in cui si possono verificare processi che determinano valori artesiani delle pressioni interstiziali, quali fenomeni di carico non drenato (es. franamento di detrito sopra un corpo di frana, costruzione di opere, processi di disgelo del ghiaccio nel terreno, collasso della struttura del materiale).

Nella determinazione dei parametri di resistenza o del regime delle pressioni interstiziali, spesso entrano in gioco elementi di analisi a posteriori (*back-analysis*) di rotture già avvenute per cui, come già osservato nella sez.5.1.5, può essere opportuno abbinare all'analisi in termini di fattore di sicurezza un controllo geomorfologico basato sull'osservazione del comportamento dei pendii in zone litotecniche omogenee.

### 5.1.7 Analisi probabilistica

Per evitare i problemi connessi con l'incertezza nell'attribuzione dei valori ai parametri necessari per le analisi deterministiche si può ricorrere ad analisi probabilistiche, o "analisi di affidabilità" (*reliability analyses*), nelle quali un certo numero di parametri, connessi con il più elevato grado di incertezza, vengono trattati come variabili aleatorie (McMAHON, 1975; YONG *et alii*, 1977; TOBUTT & RICHARDS, 1979; CHOWDHURY, 1984; SCAVIA *et alii*, 1988). I metodi probabilistici hanno trovato un largo uso nell'analisi della stabilità dei pendii in roccia per i quali la determinazione di alcuni

parametri, quali per esempio la pressione dell'acqua entro le discontinuità, è particolarmente problematica.

Il fattore di sicurezza, espresso come rapporto fra la capacità (resistenza)  $C$  e la domanda (sollecitazione) del sistema  $D$ , è considerato una variabile aleatoria alla quale possono essere associati dei valori di *probabilità di rottura*  $P(F \leq 1)$ . La stabilità di un versante non è pertanto determinata dal solo valor medio del fattore di sicurezza  $E(F)$ ; infatti come illustrato in Fig.7 un elevato valore di  $E(F)$  con un'alta deviazione standard  $\sigma(F)$  può determinare una probabilità di rottura più alta rispetto ad un  $E(F)$  più basso con  $\sigma(F)$  minore.

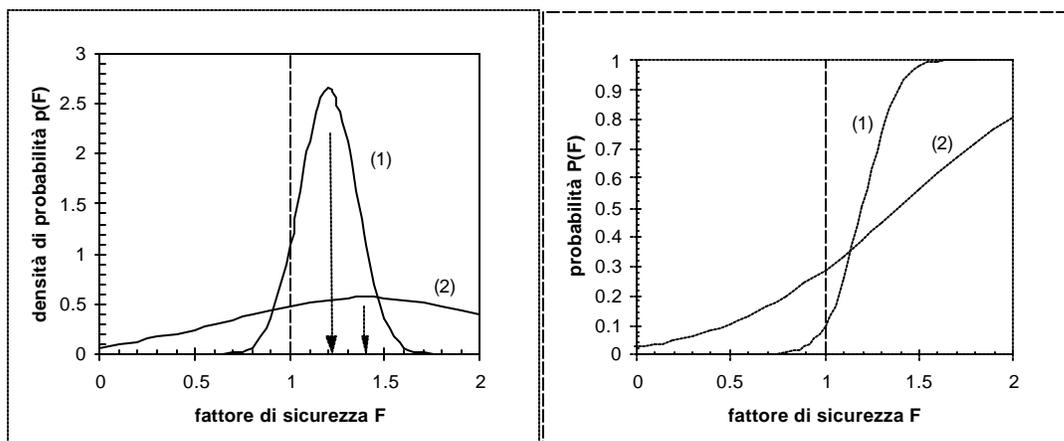


Fig.7 - Dipendenza della probabilità di rottura dalla distribuzione di densità di probabilità del fattore di sicurezza. 1)  $E(F)=1.2$ ,  $\sigma(F)=0.15$ ; 2)  $E(F)=1.4$ ,  $\sigma(F)=0.7$ ;

I metodi probabilistici si dividono in due categorie (HARR, 1987):

- a) *metodi semplificati* (o di livello II) che a partire dalla media e dalla deviazione standard delle variabili di ingresso permettono il calcolo della media e della deviazione standard del fattore di sicurezza nonché il calcolo di un *indice di affidabilità*;
- b) *metodi completi* (o di livello III) che a partire dalle distribuzioni di densità di probabilità delle variabili di ingresso permettono di ricavare numericamente la funzione di densità di probabilità del fattore di sicurezza  $p=p(F)$ .

Nei metodi della prima categoria, viene definita una funzione di rottura lineare che esprime le condizioni di stabilità del versante. Nella sua espressione più semplice la funzione di rottura può essere espressa dal *margin di sicurezza SM*, definito come differenza fra la capacità e la domanda del sistema:

$$SM = C - D \tag{5.5}$$

Se  $C$  e  $D$  sono funzioni lineari delle variabili aleatorie di ingresso, la media  $E(SM)$  e la deviazione standard  $\sigma(SM)$  possono essere ricavate analiticamente dalle medie e dalle deviazioni standard delle singole variabili. Se  $C$  e  $D$  non sono funzioni lineari si ricorre a procedure di linearizzazione come ad esempio lo sviluppo in serie di Taylor.

La stabilità del versante viene quindi valutata in termini di un *indice di affidabilità*  $\beta$  che, in generale è espresso da:

$$\beta = \frac{E(SM)}{\sigma(SM)} \tag{5.6}$$

e, nel caso particolare in cui solo la capacità del sistema sia considerata aleatoria (le sollecitazioni destabilizzanti presentano in genere un minor grado d'incertezza rispetto alla resistenza), da:

$$\beta = \frac{E(F)-1}{\sigma(F)} \tag{5.7}$$

L'indice di affidabilità può essere associato ad una probabilità di rottura  $P(F \leq 1) = P(SM \leq 0)$  facendo delle ipotesi sul tipo di distribuzione. Dato l'elevato numero di fattori che concorrono a determinare la stabilità del versante è ragionevole supporre, in base al teorema del limite centrale, che la distribuzione di  $SM$  sia di tipo normale. In questo caso:

$$P(F \leq 1) = P(SM \leq 0) = 1 - \Phi(\beta) \quad (5.8)$$

dove  $\Phi(\beta)$  è la funzione della distribuzione normale.

Fra i metodi completi (III livello), il più comune è quello noto come "Montecarlo" (MAJOR *et alii*, 1978; PRIEST & BROWN, 1983). In tale metodo viene effettuato un numero statisticamente significativo di calcoli (10.000-20.000) del fattore di sicurezza considerando, ogni volta, per le variabili stocastiche, valori casuali selezionati in base a distribuzioni di densità di probabilità prefissate. Il risultato è un istogramma di frequenza del fattore di sicurezza dal quale può essere stimata una curva di distribuzione della densità di probabilità  $p=p(F)$ .

La pericolosità può essere valutata con la probabilità che  $F$  sia minore o uguale ad un valore soglia prefissato  $t$ , ricavabile per integrazione della funzione di densità di probabilità:

$$P(F \leq t) = \int_{-\infty}^t p(F) dF \quad (5.9)$$

Esempi di zonazione della pericolosità dei versanti basati su analisi probabilistiche sono stati proposti da GENEVOIS & TECCA (1987) e da GENEVOIS *et alii* (1987), i quali hanno relizzato "carte della probabilità degli scivolamenti in roccia".

Si noti che la probabilità di rottura valutata in termini di analisi probabilistica è una probabilità connessa con il grado di incertezza nella determinazione di alcuni parametri e non una probabilità di occorrenza in termini temporali. Pertanto essa può essere considerata come una probabilità relativa da impiegare per la zonazione e deve essere integrata, per la determinazione della pericolosità, con informazioni sull'incidenza nel tempo dei fenomeni.

In genere tuttavia, nell'applicazione dei metodi probabilistici alla valutazione del rischio, la variabile tempo non viene presa in considerazione, ma il valore di probabilità di rottura viene direttamente confrontato con dei livelli di probabilità accettabile prefissati. Poiché questi si differenziano in base all'utilizzo del pendio  $e$ , quindi, tengono implicitamente conto della vulnerabilità degli elementi a rischio, una discussione sui livelli di probabilità accettabile è rimandata nel contesto dell'esame del rischio accettabile (sez.9.3)

### 5.1.8 Analisi cinematica

Nel caso di ammassi rocciosi la stabilità dei versanti è dettata essenzialmente dall'assetto delle discontinuità, che rappresentano le zone di debolezza della massa. Come si è accennato, l'analisi deterministica delle condizioni di stabilità dei pendii in roccia presenta generalmente notevoli limitazioni, connesse soprattutto all'elevato grado di incertezza con cui possono essere stabiliti alcuni parametri fondamentali; per tale motivo è spesso più efficace esprimere il grado di sicurezza dei pendii mediante analisi basate su criteri cinematici, piuttosto che in base ad analisi meccaniche rigorose in termini di fattore di sicurezza (GOODMAN, 1980).

Con il termine "analisi cinematica" si intende normalmente l'analisi delle condizioni che possono determinare il movimento di blocchi, delimitati da discontinuità piane e infinitamente persistenti, senza riferimento alle forze che lo producono. Con l'introduzione del concetto di "cono di attrito" (TALOBRE, 1957), il termine è stato tuttavia esteso anche all'analisi del comportamento di blocchi di roccia sotto il proprio peso e con resistenza allo scorrimento puramente attritiva sulle superfici di discontinuità.

Esiste una vasta letteratura sui metodi di analisi cinematica della stabilità di scavi in roccia basati sull'elaborazione grafica dei dati di orientazione delle discontinuità, rappresentati in proiezione emisferica (JOHN, 1968; MARKLAND, 1972, GOODMAN & BRAY, 1976; GOODMAN, 1976,

1980; HOEK & BRAY, 1981; MATHESON, 1983, 1989; HUDSON & HARRISON, 1994). Tali metodi possono essere utilizzati per una valutazione qualitativa del grado di stabilità relativa dei versanti in roccia. Recentemente CASAGLI & PINI (1993) hanno proposto una metodologia, per una zonazione relativa della pericolosità dei versanti, basata su criteri cinematici in termini quantitativi. In tale metodologia, vengono in particolare analizzati cinque diversi meccanismi di rottura: scivolamento planare, scivolamento di cunei, ribaltamento diretto, ribaltamento diretto con scivolamento e ribaltamento di flessura. Per ognuno di essi viene definito un indice di "pericolosità cinematica", analogo al "potenziale di rottura" di MATHESON (1989), espresso dal rapporto fra il numero dei poli (o intersezioni) che soddisfano le condizioni cinematiche ed il numero totale di poli (o intersezioni). Se il numero di dati di orientazione è sufficientemente elevato da rappresentare un campione casuale non sbilanciato della popolazione di discontinuità dell'ammasso roccioso, l'indice fornisce una stima della probabilità relativa che un determinato meccanismo di rottura avvenga in un dato punto, in base alle condizioni cinematiche al contorno.

L'impiego di tale indice adimensionale consente di ottenere informazioni di tipo quantitativo e permette una previsione spaziale e tipologica della pericolosità. Rispetto ai metodi probabilistici di analisi della stabilità dei pendii in roccia, l'utilizzo di tale indice adimensionale, seppur definito in un contesto cinematico anziché meccanico, permette di tenere conto della reale variabilità dell'ammasso roccioso, in quanto prende in considerazione dati effettivamente misurati *in situ*, senza bisogno di ricorrere a procedure di simulazione stocastica.

## 5.2 Previsione temporale

La previsione temporale della pericolosità consiste essenzialmente nella definizione delle probabilità di occorrenza dei fenomeni franosi. A differenza della previsione spaziale, che fornisce indicazioni sulla pericolosità relativa dei diversi versanti, la previsione temporale fornisce una **pericolosità assoluta**.

Per alcuni autori (HARTLÉN & VIBERG, 1988) il termine "pericolosità assoluta" non è riferito alla probabilità di occorrenza ma alla determinazione del fattore di sicurezza; tuttavia, come è stato discusso in sez.5.1.6, l'analisi in termini di sicurezza fornisce solo una zonazione relativa della propensione al movimento in diversi versanti ma non permette alcuna stima delle probabilità di occorrenza, per cui non può essere considerata una pericolosità assoluta in senso stretto.

Se si definisce  $P$  come la probabilità di occorrenza di un evento franoso, di data intensità, in un anno, il tempo di ritorno  $T$  dell'evento è dato da  $1/P$ . La pericolosità  $H$ , definita come la probabilità di occorrenza dell'evento franoso in un periodo di  $N$  anni (cfr. sez.2.2), è data dall'espressione della distribuzione binomiale:

$$H(N) = 1 - (1 - P)^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (5.10)$$

per eventi rari rispetto al numero di anni considerato, ovvero per  $N \ll T$ , l'espressione si riduce a:

$$H(N) \cong NP = \frac{N}{T} \quad (5.11)$$

Le probabilità di occorrenza possono essere determinate sia in termini assoluti (valori di probabilità annuale o tempi di ritorno) oppure secondo scale nominali (es. molto probabile, poco probabile, etc.). A questo proposito si deve osservare che è spesso difficile associare ad un determinato valore di probabilità una valutazione intuitiva del grado di pericolosità. Un primo contributo, per l'interpretazione della ricorrenza delle riattivazioni di frane a cinematica lenta, è stato proposto da DEL PRETE *et alii* (1992), anche sulla base delle considerazioni espone da CROZIER (1984) per la valutazione sul

terreno della stabilità dei versanti (Tab.8). Una seconda proposta, di validità generale, è presentata da FELL (1994) ed è illustrata in Tab.9.

Classe	Pericolosità	T (anni)	Tipo di frana
1	MOLTO ELEVATA	< 2	continua o stagionale
2	ELEVATA	2 - 5	intermittente
3	MEDIA	5 - 20	intermittente
4	BASSA	20 - 50	intermittente
5	MOLTO BASSA	> 50	intermittente

Tab.8 - Classi di pericolosità di frana in base al tempo di ritorno (da DEL PRETE *et alii*, 1992)

Pericolosità	T (anni)	P (annuale)
ESTREMAMENTE ELEVATA	1	1
MOLTO ELEVATA	5	0.2
ELEVATA	20	0.05
MEDIA	100	0.01
BASSA	1000	0.001
MOLTO BASSA	10000	0.0001

Tab.9 - Scala di pericolosità delle frane in base al tempo di ritorno (da FELL, 1994)

Le due scale differiscono notevolmente fra loro: un evento con tempo di ritorno di 50 anni è considerato di pericolosità molto bassa da DEL PRETE *et alii* (1992) e medio-elevata per FELL (1994). Tale differenza sono da imputare alle differenti finalità perseguite dai due autori e alla diversa metodologia proposta per la valutazione della pericolosità. FELL (1994) ha proposto una scala di utilizzo generale che può essere impiegata in diverse situazioni geologiche e per diversi tipi di frana; inoltre per la valutazione completa della pericolosità l'autore propone di moltiplicare il valore di probabilità per il volume della massa franata (che esprime l'intensità del fenomeno). DEL PRETE *et alii* (1992) hanno invece considerato riattivazioni di frane a cinematica lenta, e quindi caratterizzate tutte da bassa intensità, per cui il valore di probabilità è usato direttamente per quantificare la pericolosità; inoltre tali autori si trovano ad operare in una regione con caratteristiche geologiche e meteorologiche tali da determinare un'elevata frequenza delle riattivazioni, per cui una classificazione cautelativa dei livelli di pericolosità si ripercuoterebbe in maniera troppo onerosa, in termini economici, nella fase di calcolo del rischio e della successiva pianificazione territoriale.

I criteri più comunemente adottati per la previsione temporale sono i seguenti:

- a) *stima empirica*;
- b) *analisi di serie temporali relative agli effetti*: l'analisi di serie temporali di movimenti permette di stabilire direttamente i tempi di ritorno dei fenomeni franosi;
- c) *analisi di serie temporali relative alle cause*: la correlazione fra eventi franosi e fenomeni naturali (piogge, terremoti, etc.) per i quali si disponga di misure sistematiche nel tempo, permette la stima dei tempi di ritorno dei movimenti;
- d) *monitoraggio*: l'osservazione strumentale dei livelli piezometrici o delle deformazioni in singoli fenomeni franosi consente la previsione dei movimenti mediante il confronto con soglie o modelli di comportamento predefiniti.

### 5.2.1 *Stima empirica*

La ricorrenza dei fenomeni franosi può essere stimata soggettivamente in base alle informazioni di carattere generale sul quadro della franosità in una determinata zona. Per una valutazione quantitativa

della pericolosità, da utilizzare nel calcolo del rischio, è opportuno tentare sempre di quantificare in termini di probabilità le informazioni, anche se frammentarie, sulla incidenza dei fenomeni.

### 5.2.2 *Analisi di serie temporali relative agli effetti*

L'analisi storica è uno degli strumenti più efficaci per ottenere informazioni sulla ricorrenza dei movimenti di un fenomeno franoso. Per alcune frane è possibile infatti datare esattamente gli eventi di riattivazione in base a documenti o alle testimonianze della popolazione.

La frequenza annua  $f(N)$  degli eventi franosi in un periodo di  $N$  anni, è data dal rapporto fra il numero di eventi  $n$  e il numero  $N$  di anni considerati. Se  $N$  è sufficientemente lungo,  $f(N)$  costituisce una stima della probabilità di occorrenza annua  $P$ , in base alla quale può essere calcolata la pericolosità con l'eq.5.10.

Tale tipo di analisi è particolarmente agevole nel caso di eventi ben visibili e ripetibili come nel caso di crolli o ribaltamenti, per i quali si possono predisporre sistemi di registrazione dei movimenti. Informazioni attendibili e significative possono essere ricavate nel caso di frane intermittenti (riattivate periodicamente) specialmente nel caso in cui queste interessino centri abitati, in modo da poter utilizzare le testimonianze degli abitanti. DEL PRETE *et alii* (1992) hanno raccolto dati dettagliati sugli episodi di riattivazione di frane intermittenti a cinematica lenta in alcuni centri abitati della Basilicata; tali dati sono stati elaborati in modo da fornire carte della pericolosità e, in una seconda fase, carte del rischio, mediante l'analisi degli elementi a rischio.

Altri esempi di analisi di dettaglio dei dati storici, anche se non finalizzati alla determinazione della pericolosità, sono presentati da SKEMPTON *et alii* (1989) e da LEE *et alii* (1991).

Per l'analisi di eventi con tempo di ritorno lungo possono essere impiegati i metodi di datazione comunemente impiegati nelle Scienze della Terra.

### 5.2.3 *Analisi di serie temporali relative alle cause*

Quando non sono disponibili informazioni sulla cronologia dei movimenti in quantità tale da permettere una stima diretta dei tempi di ritorno, si ricorre all'analisi di fenomeni naturali per i quali si disponga di misure sistematiche nel tempo e che siano in qualche modo correlabili all'innescamento di movimenti franosi.

Per la valutazione delle probabilità è di fondamentale importanza il riconoscimento delle cause di innescamento dei diversi tipi di fenomeni franosi in una regione. Le cause innescanti più comuni sono rappresentate dalle precipitazioni, dall'attività antropica e, in subordine, dall'erosione e dalle scosse sismiche.

In linea teorica la probabilità di un fenomeno franoso è data dalla somma delle probabilità delle diverse cause di innescamento:

$$P = P_r + P_a + P_e + P_s \quad (5.12)$$

dove le quantità al secondo membro sono rispettivamente la probabilità di innescamento per precipitazioni, attività antropica, erosione e sisma.

I problemi relativi alla valutazione della pericolosità associata all'attività antropica non riguardano la fase di previsione, bensì quella di prevenzione, e devono essere analizzati in fase di pianificazione del territorio e di gestione del rischio.

Per quanto riguarda l'erosione essa costituisce un fattore innescante solo in particolari condizioni, laddove essa è particolarmente intensa. Tali condizioni si hanno soprattutto in corrispondenza di sponde fluviali o litorali marini. In tali situazioni la previsione temporale della pericolosità può essere effettuata

in termini di tempo di ritorno sulla base dei dati disponibili sugli agenti stessi dell'erosione, come le portate del corso d'acqua o i livelli del pelo libero (le frane in genere avvengono in fase di rapido svasso delle piene) nel caso delle sponde fluviali, o la frequenza delle mareggiate nel caso di litorali. Risultati attendibili possono essere ottenuti in materiali di permeabilità medio-elevata in cui l'erosione non determina effetti transitori sul regime delle pressioni neutre. In terreni poco permeabili infatti la riduzione degli sforzi totali, determinata dallo scarico non drenato prodotto dal processo erosivo, causa una riduzione delle pressioni neutre che provoca un aumento della stabilità a breve termine. Le pressioni neutre si riequilibrano quindi nel tempo, attraverso un processo di rigonfiamento (*swelling*) per cui la rottura può avvenire dilazionata nel tempo rispetto all'evento erosivo.

I sismi e le piogge, per i quali esistono reti di rilevamento, possono essere analizzati in modo da ricavare informazioni sulla ricorrenza dei fenomeni franosi da essi innescati.

### 5.2.3.1 Precipitazioni

La causa più comune di innesco delle frane è sicuramente rappresentata dalle precipitazioni. L'effetto delle precipitazioni consiste soprattutto nell'aumento della pressione dell'acqua interstiziale  $u$ , la quale determina una riduzione degli sforzi efficaci che, in terreni saturi, è espressa dal principio di Terzaghi:

$$\mathbf{s}' = \mathbf{s} - u \quad (5.13)$$

dove  $\sigma$  e  $\sigma'$  rappresentano rispettivamente lo sforzo totale e quello efficace.

Tale riduzione comporta una diminuzione della resistenza al taglio, secondo il criterio di Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = \mathbf{s}' \tan \phi' + c' \quad (5.14)$$

In letteratura esistono numerosi studi rivolti allo studio delle relazioni fra precipitazioni e fenomeni franosi. Generalmente infatti i dati pluviometrici sono di facile acquisizione nei paesi dotati di reti di stazioni meteorologiche sufficientemente articolate; per questo i dati pluviometrici possono essere efficacemente utilizzati sia in fase previsionale, per la valutazione della pericolosità, che in fase di prevenzione, per la realizzazione di sistemi di allarme per la mitigazione del rischio.

Il problema della definizione delle cosiddette "soglie pluviometriche" è reso difficile dalle complesse relazioni che esistono fra afflussi, infiltrazione efficace e risposta della pressione nei pori. Gli approcci adottati possono essere ricondotti ai seguenti:

- a) *modelli statistici o empirici* (o a "scatola chiusa"): in cui si ricerca una correlazione diretta fra altezza di precipitazione, in un determinato intervallo di tempo, e innesco dei movimenti, senza entrare nel merito delle leggi fisiche che regolano le trasformazioni afflussi - infiltrazione - risposta piezometrica.
- b) *modelli deterministici*: in cui vengono utilizzati modelli idrologici per la previsione delle diverse componenti del bilancio idrico del versante (afflussi, deflussi, infiltrazione efficace) e modelli idrogeologici per la previsione dei rapporti fra altezza piezometrica e ricarica della falda. In teoria ogni componente dei modelli adottati dovrebbe riflettere le effettive leggi fisiche che regolano il comportamento dell'acqua nel sottosuolo; in pratica, data la complessità del problema, diverse parti di tali modelli si fondano su leggi sostanzialmente empiriche.
- c) *modelli misti*: in cui vengono abbinate entrambe le precedenti strategie; ad esempio la ricarica della falda è prevista mediante un modello idrologico mentre la risposta piezometrica è correlata statisticamente alla ricarica.

Generalmente la taratura dei modelli deterministici o di quelli misti richiede la conoscenza delle oscillazioni piezometriche nel tempo, ottenibile solo con un accurato monitoraggio; per questo motivo la discussione su questi tipi di modello è rimandata alla sez.5.2.4.1. Nella presente sezione vengono considerati soltanto i modelli di tipo empirico fra precipitazioni e movimenti franosi.

Il dato fondamentale di ingresso per questo tipo di modelli è la serie temporale di intensità di precipitazione  $x(t)$ , espresse in mm/h o mm/giorno. Il problema è ricavare una funzione  $y(t)=f[x(t)]$  alla quale possa essere associata la probabilità di occorrenza  $P(E)$  di un evento franoso (CASCINI & VERSACE, 1986, 1988).

La funzione  $y(t)$  può rappresentare, a seconda del tipo di modello impiegato, l'altezza di precipitazione cumulata in un certo intervallo di tempo oppure uno dei parametri del bilancio idrologico.

La definizione della relazione che lega  $P(E)$  a  $y(t)$  è spesso problematica, specie nei casi in cui non si disponga di informazioni dettagliate ed attendibili sull'occorrenza degli eventi franosi in passato. Spesso pertanto si utilizza una "relazione soglia" ovvero si definisce un valore soglia  $y_o$  di  $y(t)$  tale che:

$$P(E) = \begin{cases} 1 & \text{se } y(t) \geq y_o \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (5.16)$$

Disponendo di una serie temporale della grandezza  $y(t)$  su un arco di tempo statisticamente significativo, è possibile stimare direttamente le probabilità associate ad ogni suo valore. In particolare, in base al "modello soglia", la probabilità associata al valore soglia  $y_o$  esprime direttamente la probabilità di occorrenza del fenomeno franoso. In genere, nel caso della previsione della pericolosità, si ha a che fare con eventi estremi; pertanto per la stima delle probabilità possono essere impiegati i metodi di analisi statistica normalmente usati in Idrologia (NERC, 1975; MAIONE & MOISELLO, 1981). In pratica si analizza il comportamento della variabile  $Y(y)$  costituita, per ogni anno, dal massimo valore assunto della variabile  $y(t)$  (es. massima precipitazione giornaliera di ogni anno).

Considerando i valori della  $Y$  in un numero di anni  $N$  ed assegnando un rango  $R$  ad ognuno di essi ( $R=1$  per il valore massimo;  $R=N$  per quello minimo) si possono ottenere le frequenze di non superamento associate ad ogni valore di  $Y$  (che può essere per esempio il valore soglia di  $y_o$ ):

$$F(Y) = 1 - \frac{R(Y)}{N} \quad (5.17)$$

Le frequenze campionarie possono quindi essere utilizzate per una stima della distribuzione di probabilità. In Idrologia, per l'analisi statistica degli eventi eccezionali è spesso impiegata la distribuzione asintotica del massimo valore (GUMBEL, 1967). Secondo tale distribuzione la probabilità  $P$  associata ad ogni massimo valore annuo  $Y$  di  $y$  è data da:

$$P(Y) = \exp \{ -\exp [-\alpha (Y - u)] \} \quad (5.18)$$

dove  $\alpha$  e  $u$  sono i parametri della distribuzione di Gumbel, i quali possono essere stimati dalla media  $\bar{Y}$  e dalla deviazione standard  $s_Y$  campionarie (MAIONE & MOISELLO, 1981):

$$u = \bar{Y} - 0.450 s_Y$$

$$\alpha = 1.283 / s_Y$$

La probabilità  $P(y_o)$ , associata al valore soglia, rappresenta la probabilità di non superamento di  $y_o$ . Il tempo di ritorno del valore soglia, definito dal numero di anni in cui mediamente  $y_o$  è superato una sola volta, è quindi espresso da:

$$T = \frac{1}{P(Y > y_o)} = \frac{1}{1 - P(y_o)} \quad (5.19)$$

La pericolosità in un numero  $N$  di anni è pertanto data da (cfr. eq.5.10):

$$H(N) = 1 - P(y_o)^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (5.20)$$

Il problema principale nell'analisi temporale delle precipitazioni sta nella definizione della funzione  $y(t)$ , dalla quale estrarre i massimi valori  $Y(y)$ , in modo da ottenere la migliore "soglia" di innesco degli eventi franosi.

L'approccio più semplice è considerare la precipitazione cumulata in un certo intervallo di tempo di durata  $d$ :

$$y(d) = \int_0^d x(t) dt \quad (5.21)$$

La durata  $d$  e l'altezza massima di pioggia cumulata  $Y$  relativa ad un tempo di ritorno fissato  $T$  sono legate fra loro da una legge di potenza:

$$Y = a d^b \quad (5.22)$$

Diagrammi  $Y - d$  per diversi tempi di ritorno sono noti in Idrologia come "curve di possibilità climatica" (Fig.8).

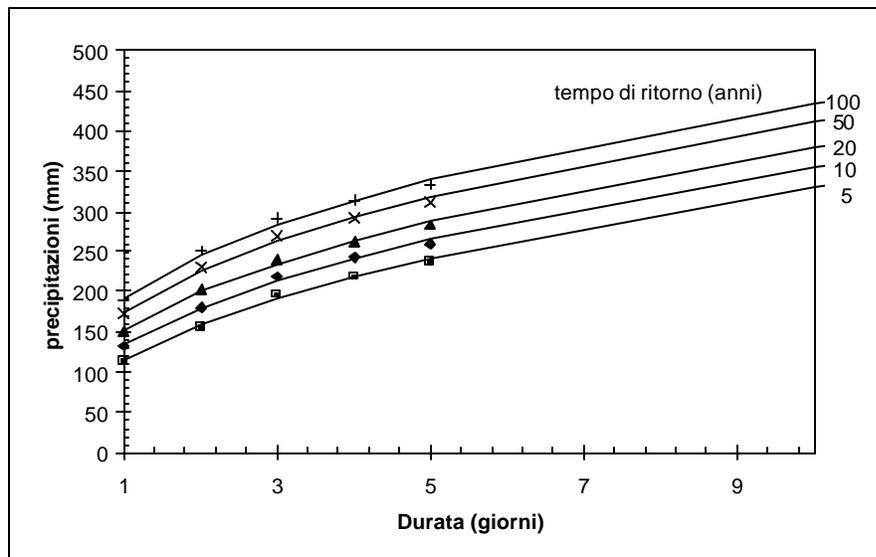


Fig.8 - Curve di possibilità climatica per diversi tempo di ritorno (Stazione di S.Marcello Pistoiese, periodo 1937-1986).

La definizione di "soglie pluviometriche" è particolarmente agevole nel caso di eventi di prima generazione in terreni di permeabilità medio-alta (colate o scivolamenti, in genere superficiali, di sabbia o detrito). Tali terreni sono caratterizzati infatti da una rapida risposta delle pressioni interstiziali; per cui i fenomeni franosi sono influenzati da piogge brevi ed intense. I valori della funzione  $Y$ , sui quali basare l'analisi statistica per definire i tempi di ritorno, possono pertanto essere fatti corrispondere alle altezze di precipitazione massime in 1, 2, 3, 6, 12 ore riportati negli Annali del Servizio Idrologico. Diversi autori (CAINE, 1980; GOVI & SORZANA, 1980; CANCELLI & NOVA, 1985; WIECZOREK & SARMIENTO, 1988; CANNON & ELLEN, 1988; JIBSON, 1989) hanno proposto relazioni fra durata  $d$  ed intensità  $I$  (in mm/h) delle piogge, del tipo di quelle illustrate in Fig.9. Tali relazioni sono in genere esprimibili in forma di leggi di potenza e riflettono la relazione 5.22 fra altezza di pioggia massima e durata:

$$I = \frac{Y}{d} = a d^{b-1} \quad (5.23)$$

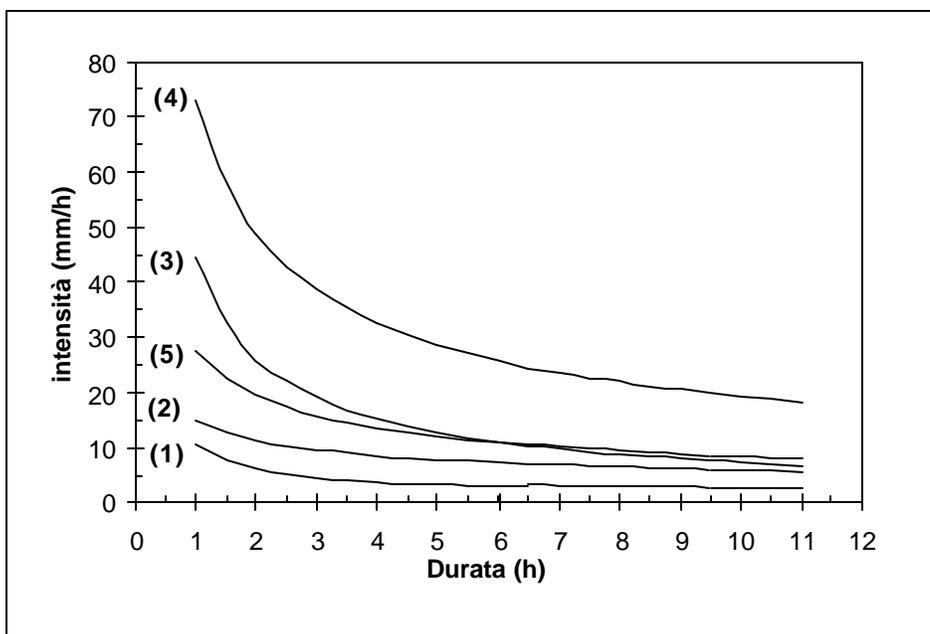


Fig.9 - Relazioni intensità - durata per frane superficiali in materiali granulari in diverse parti del mondo. 1) California (WIECZOREK & SARMIENTO, 1988); 2) relazione generale (CAINE, 1980); 3) Valtellina (CANCELLI & NOVA, 1985); 4) Porto Rico (JIBSON, 1989); 5) relazione generale (JIBSON, 1989).

Pertanto attraverso la costruzione di curve di possibilità climatica è possibile associare un tempo di ritorno alla curva critica intensità - durata, ricavata sulla base dell'osservazione dei fenomeni franosi in una data regione. Per frane di scivolamento più profonde che interessano coltri regolitiche, detritiche, colluviali o rocce molto fratturate, le relazioni fra intensità e durata si rivelano spesso inadeguate, in quanto entra in gioco l'influenza delle precipitazioni antecedenti su un periodo più o meno lungo. In questi casi il parametro da prendere in considerazione è l'altezza di pioggia cumulata su un arco di tempo plurigiornaliero:

$$y = \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.24)$$

dove  $x_i$  è la pioggia giornaliera del giorno  $i$ -esimo ed  $n$  il numero di giorni considerati.

Poiché il numero di giorni  $n$  significativi non è noto a priori, CASCINI & VERSACE (1986, 1988) hanno proposto di ricavare le soglie critiche in base ad un'analisi statistica dei massimi annuali delle piogge cumulate in  $n$  giorni consecutivi, in modo da selezionare il valore di  $n$  a cui corrisponda la migliore soglia  $y_o$ .

Un approccio simile è stato adottato da CANUTI *et alii* (1985b) e da CAPECCHI & FOCARDI, (1988) i quali hanno considerato nell'analisi, invece delle piogge cumulate, un "indice di precipitazione" definito come:

$$y = \frac{1}{y_o} \sum_{i=0}^n x_i I^{n-i} \quad \text{dove :} \quad (5.25)$$

$x_i$  = altezza in mm della pioggia nel giorno  $i$ -esimo;

$y_o$  = fattore di normalizzazione corrispondente, nell'originale lavoro di CANUTI *et alii* (1985b) alla massima pioggia con durata e tempo di ritorno prefissato, ma che può essere fatto corrispondere alla "soglia critica";

$\lambda$  = coefficiente inferiore ad 1, funzione della capacità drenante del terreno e delle condizioni idrogeologiche nell'area.

$n$  = numero di giorni entro cui gli eventi meteorici sono ritenuti significativi per l'instabilità.

L'impiego di tale indice normalizzato consente di tener conto dell'effetto delle piogge antecedenti con un peso via via minore quanto più esse precedono l'evento franoso.

Per quanto riguarda invece le frane più profonde, in materiali di bassa permeabilità, l'interesse è in genere centrato sulla previsione degli eventi di riattivazione di fenomeni preesistenti. Le fluttuazioni della falda sono influenzate a più lungo termine dal regime pluviometrico per cui entrano in gioco le precipitazioni mensili o invernali. HUTCHINSON (1970) e SANGREY *et alii* (1984) propongono, per esempio, di impiegare la precipitazione utile mensile, espressa dalla differenza fra la precipitazione mensile e l'evapotraspirazione potenziale, come parametro idrologico di base per ricavare correlazioni con gli eventi di riattivazione di frane preesistenti. In genere tuttavia i modelli a scatola chiusa non consentono di ottenere risultati soddisfacenti, per cui è necessario predisporre sistemi di monitoraggio delle pressioni neutre in modo da ricavare relazioni indipendenti fra precipitazioni e risposta piezometrica da un lato e fra quest'ultima e l'occorrenza dei movimenti, dall'altro. La discussione sull'argomento è rimandata alla sezione 5.2.4.1.

### 5.2.3.2 Terremoti

L'influenza dei terremoti sulla stabilità dei versanti è piuttosto controversa e spesso sovrastimata. Essa costituisce uno degli argomenti di ricerca attualmente più dibattuti sia in Italia, nel quadro dell'attività del GNDT e del GNDCI, che all'estero.

Gli effetti del sisma su un pendio possono essere diretti o indiretti. I primi determinano frane direttamente in corrispondenza dell'evento sismico; i secondi invece si manifestano dilazionati di alcune ore o giorni rispetto all'evento (HUTCHINSON, 1993).

Il principale effetto diretto consiste nell'incremento delle sollecitazioni destabilizzanti mediante l'applicazione transitoria di una forza d'inerzia orizzontale  $F=KW$  data dal prodotto fra il peso  $W$  della massa potenzialmente instabile e il coefficiente di accelerazione sismica  $K$ . Tale forza è in genere inclusa nel calcolo all'equilibrio limite per la valutazione del fattore di sicurezza in condizioni pseudostatiche. Come rilevato da AMBRASEYS (1977), poiché le lunghezze d'onda dei sismi più intensi, nella maggior parte dei materiali, sono dell'ordine di alcune decine di metri, gli effetti di destabilizzazione diretta si possono verificare solo in pendii di dimensioni ridotte, generalmente con lunghezza minore di 30 m (HUTCHINSON, 1987). Per pendii più estesi infatti l'accelerazione destabilizzante diretta verso l'esterno del pendio è bilanciata da un'accelerazione stabilizzante, di segno contrario, determinata dal treno d'onda successivo. La massima accelerazione sincrona (associata al massimo valore del coefficiente sismico  $K$ ) si ha per frane di dimensione pari a metà della lunghezza d'onda. E' inoltre documentato che in seguito ai terremoti del Friuli (GOVI, 1977) e dell'Irpinia (D'ELIA *et alii*, 1985; COTECCHIA *et alii*, 1986) gli effetti diretti del sisma sui versanti furono costituiti da fenomeni di crollo di ridotte dimensioni, mentre le frane principali, rappresentate generalmente dalla riattivazione di fenomeni preesistenti, avvennero dopo qualche ora rispetto alla scossa e, quindi, in conseguenza di effetti indiretti.

Un altro degli effetti diretti del sisma, che assume particolare importanza in presenza di materiali granulari sciolti saturi, è il fenomeno della liquefazione dinamica (SEED & IDRIS, 1967; SEED, 1968; VALERA & DONOVAN, 1977; CRESPELLANI *et alii*, 1988). Il terremoto può infatti determinare una densificazione del materiale, per collasso della struttura aperta e, di conseguenza, generare elevati valori di pressione interstiziale che possono dar luogo a fenomeni di liquefazione. In tali situazioni si ha la totale perdita di resistenza al taglio del materiale che può quindi colare come un fluido anche su pendenze molto modeste.

Gli effetti indiretti generalmente determinano la riattivazione di frane preesistenti, anche di considerevoli dimensioni, in materiali coesivi. Tale riattivazione, dilazionata nel tempo rispetto al sisma, sembra da imputare agli effetti del carico ciclico sul regime delle pressioni interstiziali. Recenti ricerche (LEMOS *et alii*, 1985; SASSA, 1992) hanno mostrato che l'applicazione di rapide deformazioni cicliche in speciali apparecchi di taglio torsionale determinano in alcuni tipi di materiali coesivi una progressiva diminuzione della resistenza al taglio residua, dopo un picco iniziale. Tale comportamento può spiegare il ritardo fra la scossa sismica e la riattivazione delle frane.

Una volta accertate, per le diverse tipologie di frana, le relazioni fra sisma e movimento, si possono stabilire i tempi di ritorno delle frane sulla base della raccolta delle informazioni sui sismi. A questo proposito si rivelano particolarmente utili le curve sperimentali proposte da KEEFER (1984), mostrate in Fig.10, che riportano, per diverse tipologie di frana, la massima distanza dall'epicentro entro la quale le frane possono essere innescate da un sisma, in funzione della magnitudo.

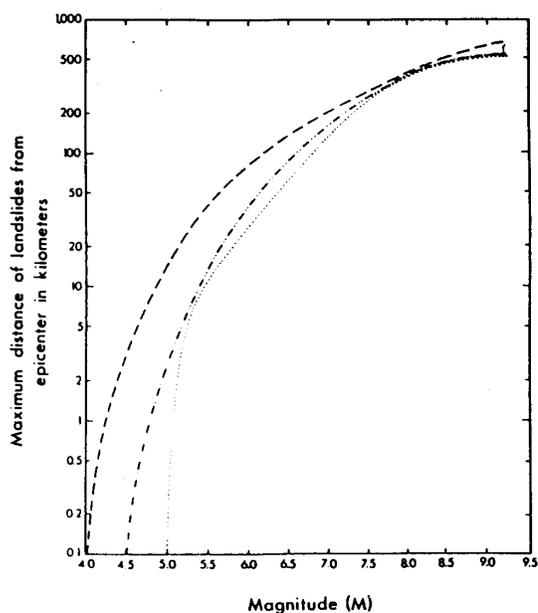


Fig.10 - Massima distanza dell'epicentro dalle frane innescate dei terremoti in funzione della magnitudo (da KEEFER, 1984).

Tali relazioni sono state ricavate per terremoti negli Stati Uniti ma sembrano essere soddisfacenti anche per il territorio italiano (DEL PRETE *et alii*, 1992). Le soglie di magnitudo minima per la quale possono generarsi movimenti di massa sono rispettivamente 4 per i crolli, 4.5 per gli scivolamenti e 5 per le colate ed i fenomeni di liquefazione.

#### 5.2.4 Monitoraggio

La previsione degli eventi franosi basata sul monitoraggio fornisce sicuramente le informazioni più dettagliate e attendibili, tuttavia è tecnicamente complessa ed economicamente onerosa. Essa è applicabile in particolari situazioni, in genere associate ad un rischio elevato in termini economici tale da apportare benefici, in termini di prevenzione, che possano giustificare i costi.

Esistono due principali approcci di analisi della pericolosità mediante monitoraggio: uno meccanico l'altro cinematico.

### 5.2.4.1 Approccio meccanico

La previsione dei movimenti di un fenomeno franoso o di un versante potenzialmente instabile può avvenire in teoria mediante il monitoraggio di ognuno dei parametri, caratterizzati da variabilità temporale, che entrano in gioco nella definizione del fattore di sicurezza, ovvero:

- a) pressioni neutre;
- b) morfologia del versante;
- c) proprietà meccaniche dei terreni;
- d) carichi applicati.

In pratica il parametro caratterizzato dalla maggiore incertezza e dalla più ampia variabilità nel tempo è rappresentato dalle pressioni neutre, per cui in genere l'approccio meccanico si basa sulle misure piezometriche.

In genere si utilizzano periodi limitati di osservazioni piezometriche (uno - due anni) per ricavare correlazioni fra afflussi meteorici ed oscillazioni della falda. In base a tali correlazioni la previsione della pericolosità può essere effettuata mediante l'analisi statistica delle precipitazioni, come descritto in sez.5.2.3.1. Le pressioni neutre stimate possono essere utilizzate per il calcolo del fattore di sicurezza, mediante l'analisi all'equilibrio limite. In questo modo si possono stimare le variazioni del fattore di sicurezza nel tempo e, attraverso l'analisi dei valori estremi annuali, si può associare un tempo di ritorno ad ogni valore del fattore di sicurezza.

Esiste una vasta letteratura sulla previsione delle oscillazioni piezometriche in relazione alle precipitazioni e ad altre grandezze meteorologiche (UNO *et alii*, 1977; RENNOLLS *et alii*, 1980; BERTINI *et alii*, 1984; BARTON & THOMPSON, 1986; LERNER, 1986; IVERSON & MAJOR, 1987; MATICHARD & POUGET, 1988; SANGREY *et alii*, 1984; SKEMPTON *et alii*, 1989; FELL *et alii*, 1991). Come si è accennato in sez.5.2.3.1 gli approcci seguiti possono essere distinti in empirici, deterministici e di tipo misto.

Fra gli approcci di tipo empirico, i risultati più interessanti sembrano quelli ottenuti da SKEMPTON *et alii* (1989). Tali autori osservano che gran parte delle riattivazioni delle frane in terreni coesivi possono essere imputate ad una risposta "istantanea" della superficie piezometrica, al di sopra del livello medio della stagione umida, in seguito a scrosci intensi di breve durata (*storm*). Infatti, durante la stagione umida, quando il deficit di umidità del suolo e le pressioni neutre negative (suzione) sono effettivamente nulli, gran parte delle precipitazioni va ad alimentare l'infiltrazione efficace; in tali condizioni si osserva una risposta direttamente proporzionale del livello piezometrico agli scrosci brevi ed intensi. Il rapporto  $\Delta h/R$  (*storm response*) fra l'innalzamento piezometrico e l'altezza di pioggia risulta compreso fra 3 e 6 in diverse località del Regno Unito (Fig.11).

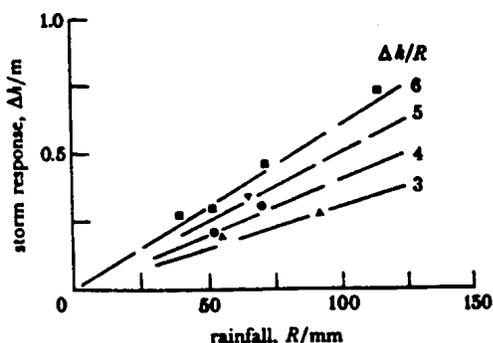


Fig.11 - Risposta invernale della superficie piezometrica agli scrosci brevi ed intensi (*storm response*). ■ Harmondsworth; ● Uxbridge; ▲ Burdeop Wood; ◆ Brendon Hill. L'intensità di pioggia è 5-10 mm/giorno.

Fra gli approcci di tipo deterministico, uno di quelli più completi è stato proposto da FELL *et alii* (1991) e si basa su un modello idrologico a "doppio serbatoio" per valutare i singoli elementi del bilancio

entro la zona non satura e quella satura. Il modello utilizza valori di precipitazione ed evaporazione giornalieri e permette di valutare la risposta piezometrica giornaliera, tenendo conto del ruscellamento, dell'infiltrazione, dell'evapotraspirazione e delle variazioni di contenuto d'acqua nella zona non satura. Pur essendo in gran parte fisicamente basato, il modello richiede una taratura di alcuni parametri su base sostanzialmente empirica.

Fra gli approcci di tipo misto, è interessante la metodologia di SANGREY *et alii* (1984), i quali presentano un metodo per la previsione delle oscillazioni piezometriche mensili. Gli autori utilizzano la precipitazione utile  $U$ , ovvero la differenza fra la precipitazione mensile  $P$  e l'evapotraspirazione potenziale  $E_p$  (stimata con il metodo THORNTHWAITE, 1948), per valutare la ricarica effettiva che, per ogni mese, tiene conto della precipitazione del mese stesso e di quella dei mesi precedenti secondo una legge di decadimento esponenziale. La ricarica nel mese  $i$ -esimo è espressa da:

$$R_i = [1 - \exp(-t_0^{-1})] U_i + [\exp(-t_0^{-1})] R_{i-1} \quad (5.26)$$

dove  $t_0$  è il tempo di drenaggio dell'acquifero, funzione delle caratteristiche idrogeologiche. La ricarica  $R$  viene quindi correlata linearmente con l'altezza piezometrica  $h$ .

L'analisi in termini di fattore di sicurezza presenta tuttavia alcuni problemi, legati all'incertezza con cui questo può essere determinato e al fatto che, in relazione alla reologia dei materiali interessati, le deformazioni si sviluppano entro un certo intervallo temporale cui corrispondono modeste variazioni del fattore di sicurezza poco sopra l'unità.

#### 5.2.4.2 Approccio cinematico

Un approccio più diretto per la previsione dell'istante di rottura (*time of failure*) di un pendio si basa sul monitoraggio delle deformazioni, mediante misure topografiche estensimetriche o inclinometriche. L'analisi del quadro deformativo è in genere problematica a causa della complessità delle leggi costitutive che regolano il comportamento meccanico dei materiali naturali. Pur essendo possibile dare un'interpretazione deterministica delle deformazioni, sulla base di modelli numerici, è spesso conveniente far riferimento a procedimenti empirici a "scatola chiusa". Fra questi ultimi è di particolare interesse il modello di VOIGHT (1988) che è stato proposto da un'apposita commissione del GNDCI per la previsione delle frane e la messa a punto dei piani di emergenza, nell'ambito delle attività del Servizio Nazionale della Protezione Civile (PELLEGRINO *et alii*, 1993).

Se si considera la variazione nel tempo della velocità di un movimento franoso, essa in genere è descritta da una curva che presenta due tratti (Fig.12)

- 1) il primo in cui la velocità si mantiene pressoché costante  $v = v_0$ , entro il quale le deformazioni sono essenzialmente di natura viscosa;
- 2) il secondo, che inizia ad un determinato tempo  $t_0$ , in cui la velocità aumenta nel tempo; tale fase può dar luogo a due tipi di evoluzione:
  - a) la velocità può continuare ad aumentare indefinitamente nel tempo fino alla rottura (che teoricamente corrisponde al tempo  $t_f$  in cui  $v \rightarrow \infty$ );
  - b) la velocità, dopo l'iniziale aumento, si stabilizza su un valore costante o diminuisce nel tempo, in modo che non si raggiungono mai condizioni di rottura.

Il tratto di curva che corrisponde al comportamento 2a) può essere interpretato mediante leggi empiriche. La legge proposta da VOIGHT (1988), che estende la validità di quella di FUKUZONO (1985), si basa sull'ipotesi di una relazione fra accelerazione e velocità, prima dell'evento franoso, descritta da una legge di potenza:

$$\frac{dv}{dt} = A v^a \quad (5.27)$$

dove  $A$  e  $\alpha$  sono costanti empiriche. Per integrazione fra due istanti di tempo  $i$  ed  $i+1$  si ottiene:

$$(t_{i+1} - t_i) = \frac{(v_{i+1})^{1-\alpha} - (v_i)^{1-\alpha}}{A(1-\alpha)} \quad \text{dove:} \quad (5.28)$$

- $t_i$  = tempo all'istante  $i$ ;
- $t_{i+1}$  = tempo all'istante  $i+1$ ;
- $v_i$  = velocità all'istante  $i$ ;
- $v_{i+1}$  = velocità all'istante  $i+1$ .

La legge può essere applicata a partire da due osservazioni effettuate in qualsiasi tempo  $t > t_0$ .

L'istante di rottura  $t_f$ , può essere previsto calcolando il tempo in cui  $v \rightarrow \infty$ ; in alternativa si può ottenere il tempo in cui si raggiunge una velocità tollerabile prefissata, per la scelta della quale si può fare riferimento alla Tab.3. I parametri  $A$  e  $\alpha$  vengono determinati sperimentalmente basandosi su un periodo di osservazioni sufficientemente lungo. Generalmente  $\alpha$  è compreso fra 1.7 e 2.3, mentre  $A$  presenta un più ampio campo di variabilità.

Se è noto l'inizio  $t_0$  dell'accelerazione del fenomeno (in cui  $v = v_0$ ) la legge permette di stimare la durata dell'intera evoluzione delle deformazioni ( $t_f - t_0$ ). Si può stimare che per  $v=10v_0$  si sono verificate fra il 78% ed il 95% delle deformazioni, mentre per  $v=100v_0$  il fenomeno può considerarsi praticamente esaurito (si sono verificate infatti il 96-99.7% delle deformazioni) (PELLEGRINO *et alii*, 1993).

Il limite principale insito nell'impiego di modelli a "scatola chiusa" per la previsione del tempo di rottura è che essi si basano su condizioni di stato tensionale costante e non possono tener conto di improvvise variazioni delle sollecitazioni causate, per esempio, da eventi meteorici estremi, scosse sismiche o applicazioni di carichi transitori.

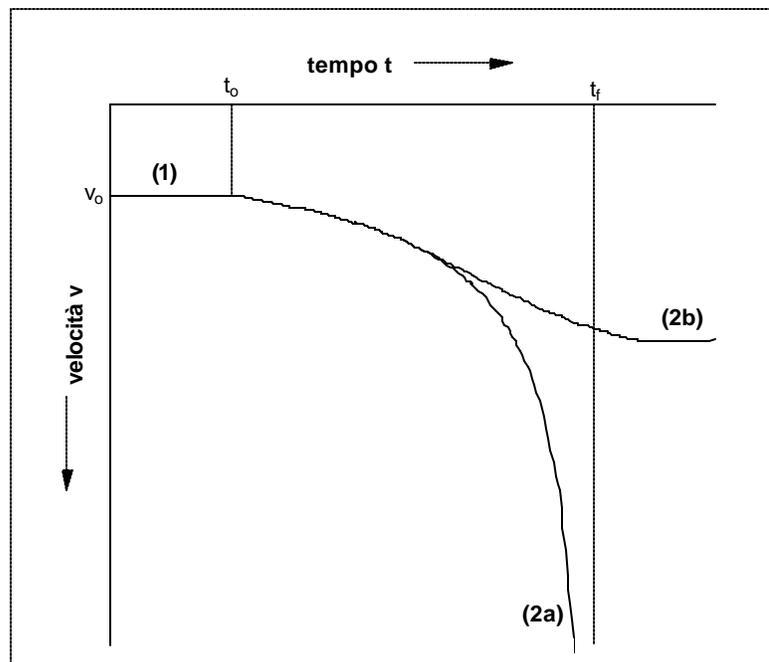


Fig.12- Evoluzione cinematica di una frana: 1) fase di deformazione viscosa; 2a) evoluzione con collasso; 2b) evoluzione senza collasso (da PELLEGRINO *et alii*, 1992).

### 5.3 Previsione tipologica

La previsione della tipologia di frana che può verificarsi, con più elevata probabilità, in ogni parte dell'area considerata, non costituisce generalmente un problema se si dispone di un'accurata carta inventario dei fenomeni franosi.

In questo caso infatti sia la previsione spaziale che quella temporale possono essere differenziate in modo da tener conto della diversa tipologia di frana secondo le classificazioni di VARNES (1978) o, in maniera più dettagliata, di CRUDEN & VARNES (1994).

### 5.4 Previsione dell'intensità

Anche nel caso della previsione dell'intensità dei fenomeni il risultato dipende dalla quantità e dalla qualità delle informazioni raccolte in sede di inventario dei fenomeni franosi. La pericolosità dei fenomeni, ovvero la probabilità di occorrenza, dovrebbe essere differenziata in base all'intensità in modo da consentire una migliore stima delle conseguenze (rischio).

Alcuni autori (FELL, 1994) danno una definizione diversa di pericolosità rispetto a quella UNESCO, descritta in sez.2.2, considerando questa come il prodotto fra l'intensità  $I$  e la probabilità di occorrenza  $P$ .

La metodologia proposta da FELL (1994) prevede la moltiplicazione di un indice di intensità per un indice di probabilità associati alle classi presentate in Tab.5 e Tab.9 (Tab.10). In tal caso la pericolosità esprime anche la severità del fenomeno e non è più una quantità adimensionale compresa fra 0 ed 1.

INTENSITÀ			PROBABILITÀ			PERICOLOSITÀ	
I	Descrizione	Volume (m <sup>3</sup> )	P	Descrizione	P(annua)	H = I P	Descrizione
7	estremam. grande	> 5 10 <sup>6</sup>	12	estremem. elevata	1	≥30	estremam.alta
6	molto grande	1 10 <sup>6</sup> ÷ 5 10 <sup>6</sup>	8	molto elevata	0.2	20-29	molto alta
5	mediam. grande	2.5 10 <sup>5</sup> ÷ 1 10 <sup>6</sup>	5	elevata	0.05	10-19	alta
4	media	5 10 <sup>4</sup> ÷ 2.5 10 <sup>5</sup>	3	media	0.01	7-9	media
3	piccola	5 10 <sup>3</sup> ÷ 5 10 <sup>4</sup>	2	bassa	0.001	3-6	bassa
2.5	molto piccola	5 10 <sup>2</sup> ÷ 5 10 <sup>3</sup>	1	molto bassa	0.0001	≥2	molto bassa
2	estremam.piccola	< 5 10 <sup>2</sup>					

Tab.10 - Valutazione della pericolosità con previsione dell'intensità (da FELL, 1994).

L'espressione della pericolosità come prodotto dell'intensità e della probabilità di occorrenza presenta tuttavia alcuni problemi, oltre al fatto di non essere coerente con la terminologia UNESCO. Infatti un evento di piccole dimensioni molto frequente può avere lo stesso livello di pericolosità di uno di dimensioni eccezionali meno frequente. Inoltre la vulnerabilità è già di per sé una funzione dell'intensità per cui quest'ultima entra due volte nel computo del rischio. Proprio per ovviare a tale problema FELL (1994) ridefinisce il rischio specifico come prodotto della probabilità per la vulnerabilità.

L'approccio seguito dal DRM (1990) per i piani di esposizione al rischio (PER) è più appropriato e prevede la definizione di probabilità di occorrenza differenziate in base ai diversi livelli di intensità (Tab.1 e 2). Tuttavia nell'applicazione dei PER, i singoli enti territoriali hanno talvolta messo a punto criteri operativi nei quali la pericolosità è espressa come combinazione della probabilità per l'intensità (PERROT, 1988).

## 5.5 Previsione dell'evoluzione

La previsione dell'evoluzione consente di individuare l'area che può essere interessata, direttamente o indirettamente, dal fenomeno franoso. Tale concetto è analogo a quello di "bacino di pericolosità" (DRM, 1990), definito dalla zona in cui sono riunite le condizioni che stanno alla base del meccanismo di instabilità. Nel caso di frane di scivolamento il "bacino di pericolosità" è generalmente limitato all'estensione del versante, o a una sua porzione; nel caso di "colate di detrito", che interessano spesso impluvi o aste fluviali montane, esso coincide spesso con un bacino in senso idrografico. La previsione dell'evoluzione di una frana prevede i seguenti tre punti:

- a) previsione della distanza di propagazione;
- b) previsione dei limiti di retrogressione;
- c) previsione dell'espansione areale.

### 5.5.1 Previsione della distanza di propagazione

La previsione della distanza di propagazione è particolarmente importante nel caso di frane di crollo o di colate di terra o detrito, le quali possono coprire grandi distanze.

Nel caso delle colate rapide di terra o detrito il metodo più semplice per la valutazione della distanza di propagazione è quello delle linee di energia (*modello a slitta*) descritto in sez.4.3. Il metodo richiede, oltre alla conoscenza della geometria del problema, la stima dell'angolo di attrito apparente, che può essere ricavata da quella dell'angolo di attrito effettivo e delle pressioni neutre durante il moto (eq.4.3). Il metodo permette di essere adattato a situazioni geologiche complesse in cui si hanno materiali con caratteristiche fisiche diverse (SASSA, 1988).

Nel caso dei crolli la previsione della distanza di arrivo può essere basata sull'osservazione della posizione dei blocchi già distaccati, può essere analizzata con metodi sperimentali (RITCHIE, 1963) oppure con analisi cinematiche o dinamiche delle traiettorie dei blocchi, in funzione della loro forma e dimensione e delle caratteristiche morfologiche del pendio (PITEAU & CLAYTON, 1976; PITEAU & PECKOVER, 1978; AZIMI *et alii*, 1982; FALCETTA, 1985; PASQUERO, 1987). La traiettoria dei blocchi è analizzata considerando le leggi fisiche che regolano la successione dei diversi tipi di movimento dei blocchi, ovvero:

- a) scorrimento o ribaltamento;
- b) caduta libera;
- c) rimbalzo;
- d) rotolamento.

Alcuni dei parametri richiesti (diametro del blocco, velocità iniziale, coefficienti di attrito volvente e di restituzione) presentano una marcata variabilità e la loro determinazione è inevitabilmente associata a notevoli incertezze. Pertanto si ricorre a metodologie di simulazione stocastica (es. metodo Montecarlo) in cui i suddetti parametri vengono considerati come variabili aleatorie caratterizzate da distribuzioni di densità di probabilità prefissate. A titolo di esempio in Fig.13 sono mostrati i risultati di un'analisi delle traiettorie dei blocchi su una falesia nell'abitato di Talamone (GR), effettuata con il metodo descritto da PITEAU & CLAYTON (1977) e PITEAU & PECKOVER (1978). Dalla curva di frequenza cumulata mostrata in Fig.13 è possibile stimare le probabilità associate ad ogni distanza di arrivo.

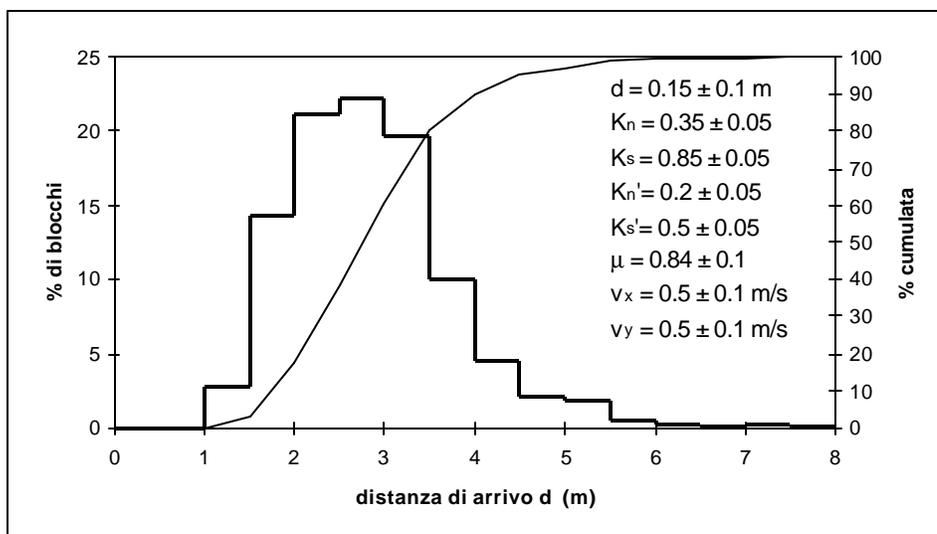


Fig.13 Analisi delle traiettorie dei blocchi nella falesia di Talamone: istogrammi di frequenza e curva di frequenza cumulata relativi alla massima distanza raggiunta dai massi alla base della falesia, ottenuti con 1000 simulazioni (da CASAGLI *et alii*, 1994).

### 5.5.2 Previsione dei limiti di retrogressione

La previsione del limite di retrogressione di una frana si effettua essenzialmente sulla base dei caratteri osservabili. Pertanto è importante dettagliare, in fase di inventario e cartografia delle frane, la distribuzione di attività e mappare ogni indicatore che faccia prevedere la possibilità di regressione (fessure, scarpate, etc.). In molti casi l'estremo limite di retrogressione è rappresentato dalla linea di spartiacque, per cui sono sufficienti informazioni di tipo topografico; tuttavia tale limite può essere spesso troppo cautelativo.

### 5.5.3 Previsione dell'espansione areale

La previsione dell'espansione areale è importante nel caso di colate viscosse di terra o di fenomeni di liquefazione nei quali la massa spostata è molto fluida e può espandersi a lobo al piede del versante.

La previsione di tale fenomeno è estremamente complessa in quanto dipende da molti fattori, alcuni dei quali strettamente connessi fra loro, quali la morfologia del versante, la granulometria ed il contenuto d'acqua dei materiali, i parametri di resistenza al taglio, le pressioni interstiziali ed il coefficiente di spinta laterale. SASSA (1988) ha presentato un modello per la previsione dell'evoluzione areale dei fenomeni franosi, in cui il parametro chiave, che controlla l'espansione del corpo di frana è il coefficiente di spinta laterale  $k$ . Quest'ultimo è pari a 1 nell'acqua e a 0 in un materiale solido. Nei terreni la grandezza di  $k$  dipende dall'angolo di attrito apparente  $f_a$ :

$$k = 1 - \sin f_a \quad (5.29)$$

L'angolo di attrito apparente  $f_a$ , come si è visto in sez.4.3, è espresso dall'eq.4.3

In uno stato di completa liquefazione  $r_u=1$  e  $K=1$  per cui la massa si comporta con un fluido e si espande con facilità. Per valori normali (non artesiani) di  $r_u$  (compresi circa fra 0 e 0.5) la massa ha invece una modesta tendenza all'espansione.

## 5.6 Sintesi delle informazioni per la determinazione della pericolosità

Una volta che sono stati presi in esame i diversi tipi di previsione esaminati nelle precedenti sezioni, è necessario tentare una sintesi delle informazioni in modo da definire in maniera completa la pericolosità.

Il passo più importante è associare alla zonazione spaziale della pericolosità le informazioni desunte dalla previsione temporale, in modo da ottenere delle probabilità assolute a partire dalle probabilità relative. In secondo luogo può essere opportuno differenziare i diversi eventi, dei quali si vuole determinare la pericolosità, in base alla tipologia, all'intensità ed all'evoluzione.

Per quanto riguarda il primo punto, si deve osservare che le metodologie discusse in sez.5.2 per la valutazione della probabilità di occorrenza si basano sull'elaborazione di informazioni sui movimenti passati di singoli fenomeni franosi, e quindi sono strettamente valide solo per questi. In altri casi è invece possibile ottenere generiche indicazioni sulla ricorrenza dei fenomeni di instabilità sulla base della conoscenza generale di una regione.

Quando l'interesse è centrato sulla zonazione della pericolosità si devono fare necessariamente delle estrapolazioni, in modo da "distribuire" le informazioni sulla ricorrenza delle frane, sia di tipo generale che puntuale, su tutto il territorio.

EINSTEIN (1988) ha proposto una metodologia formale per la definizione delle probabilità basata sull'*analisi bayesiana delle decisioni*. Essa si basa sui seguenti tre passi:

- a) valutazione delle *probabilità a priori*;
- b) definizione di indicatori dell'instabilità e di funzioni di verosimiglianza (*likelihood function*);
- c) aggiornamento (*updating*) delle *probabilità a priori* per ottenere le *probabilità a posteriori*.

Le *probabilità a priori* sono basate sul quadro generale delle conoscenze sui fenomeni di instabilità esistenti in una determinata zona. Ad esempio, in base ad i metodi presentati nella sez.5.2, si può stimare che il tempo di ritorno della riattivazione degli scivolamenti di terra in una determinata regione sia mediamente di 10 anni. Sulla base di questo dato generale si può tentare una zonazione più dettagliata della pericolosità entro la regione, utilizzando degli indicatori di instabilità definiti nella fase di descrizione dello stato della natura (es. indicatori geologici, geomorfologici, idrologici, vegetazionali etc.). In pratica vengono utilizzate delle ulteriori informazioni per una migliore definizione della probabilità dei fenomeni franosi.

La probabilità definita a priori viene modificata in modo da ottenere una *probabilità a posteriori* con una procedura nota come "*aggiornamento della probabilità*". I diversi indicatori di instabilità vengono considerati attraverso funzioni di verosimiglianza, espresse in forma di probabilità condizionata, in modo da esprimere l'attendibilità di un particolare indicatore per la previsione dei fenomeni franosi. In generale una funzione di verosimiglianza è espressa da  $P(I/F)$  che esprime la probabilità condizionata che, dato il verificarsi di una frana di determinato tipo  $F$ , sia presente l'indicatore  $I$  considerato. Ad esempio considerando la presenza di scarpate attive come un indicatore della possibilità di frane di scivolamento, la funzione di verosimiglianza fornisce una valutazione della probabilità che le scarpate attive indichino effettivamente la presenza di frane di scivolamento.

Come indicatori possono essere considerate tutte le cause della franosità elencate in sez.3.1, ad esempio l'acclività dei pendii, la presenza di determinate litologie o tipi vegetazionali e così via. La probabilità condizionata di ogni indicatore può essere stimata soggettivamente sulla base della conoscenza geologica della regione, oppure può essere quantificata in modo oggettivo utilizzando i metodi per la previsione spaziale descritti nella sez.5.1. Per esempio per ogni indicatore esprimibile in modo areale può essere impiegata la percentuale di area in frana come descritto in sez.5.1.2, oppure gli indici di franosità definiti in sez.5.1.3, oppure può essere effettuata un'analisi statistica del tipo di quelle presentate in sez.5.1.4.

La probabilità a posteriori per ogni tipo di frana può essere ancora formulata in forma di probabilità condizionata ed è espressa da  $P(F|I)$ , ovvero dalla probabilità che si verifichi una frana di tipo  $F$ , posto che sia presente l'indicatore  $I$ .

L'aggiornamento delle probabilità avviene applicando il Teorema di Bayes:

$$P(F|I) = \frac{P(F)P(I|F)}{P(I)} \quad (5.30)$$

dove  $P(F)$  rappresenta la probabilità a priori dell'evento  $F$  e  $P(I)$  la probabilità che si presenti l'indicatore  $I$ .

Nel caso in cui si sia interessati a differenziare la probabilità di eventi franosi distinti per tipologia, per intensità o per evoluzione, è chiaro che lo stesso indicatore può essere associato a più di uno di questi. In tal caso la probabilità a posteriori che si verifichi una frana di tipo  $F_j$ , data la presenza dell'indicatore  $I$ , è fornita dall'espressione generale del Teorema di Bayes:

$$P(F_j|I) = \frac{P(F_j)P(I|F_j)}{\sum_{j=1}^n P(I|F_j)P(F_j)} \quad (5.31)$$

dove  $P(F_j)$  è la probabilità a priori dell'evento  $F_j$ ,  $P(I|F_j)$  è la funzione di verosimiglianza, mentre l'espressione al denominatore è una funzione di normalizzazione.

## 6. DEFINIZIONE DEGLI ELEMENTI A RISCHIO

Gli elementi a rischio, rispetto ad un potenziale evento franoso, sono rappresentati dalla vita umana, dalle strutture ed infrastrutture pubbliche o private, dal quadro delle attività economiche e dai beni ambientali. Nell'ambito della valutazione del rischio finalizzata alla pianificazione territoriale, l'interesse è centrato non solo sul quadro di beni ed attività esistenti, ma anche su quello previsto dai piani di programmazione e sviluppo.

Per ognuna delle tipologie di elemento a rischio può essere quantificato un valore  $W=W(E)$ . Tale valore può essere espresso dal numero  $N$  di unità esposte nel caso di elementi formati da unità discrete (es. popolazione; edifici) oppure dalla superficie esposta  $S$  nel caso di elementi definiti arealmente (es. terreno agrario):

$$W = N \quad \text{oppure} \quad W = S \quad (6.1)$$

Per permettere un confronto fra elementi a rischio diversi è spesso opportuno esprimere il valore  $W$  in termini monetari, moltiplicando il numero  $N$  o la superficie  $S$  per un costo unitario  $w$ :

$$W = N w \quad \text{oppure} \quad W = S w \quad (6.2)$$

L'espressione del valore in termini monetari è particolarmente utile per caratterizzare elementi a rischio di difficile parametrizzazione, quali per esempio le attività economiche connesse con una determinata installazione o i beni ambientali. Il valore di ognuno degli elementi a rischio può essere valutato in base ai criteri propri delle società assicurative.

Nel progetto nazionale francese PER il rischio viene calcolato separatamente in relazione alla vita umana e al quadro socio-economico.

Il costo degli elementi a rischio in termini di vita umana fornito dal DRM (1990) è illustrato in Tab.11. I valori monetari, in franchi francesi nell'originale, sono espressi in una scala relativa assumendo 1 come il costo medio di una vita umana. L'elevato valore associato ai feriti esprime probabilmente il più alto costo sociale dell'invalidità permanente rispetto alla morte.

Morti	Feriti	Senza tetto
1	2 - 3	0.2 - 1

Tab.11 - Costo relativo degli elementi a rischio connessi con la vita umana in Francia. (da DRM, 1990)

Il costo dei beni e delle attività è valutato per ogni zona omogenea di utilizzo del suolo (Tab.12). I valori monetari, espressi in franchi francesi per ettaro nell'originale, sono espressi in una scala relativa assumendo 1 come il costo medio della perdita di un ettaro di terreno agricolo. Sono differenziati i costi relativi ai beni immobili e quelli relativi al quadro di attività economiche ad essi associato.

Nella metodologia adottata dalla PROVINCIA DI MODENA & GNDCI U.O.2.9 (1994) per la valutazione del rischio nei centri abitati il valore socio-economico degli elementi a rischio viene valutato in base ad una scala relativa illustrata in Tab.13.

In alcuni casi può essere opportuno esprimere un valore globale che tenga conto di tutti gli elementi a rischio in una data area.

Zone di uso del suolo	beni	attività
zona agricola	1	0.5
abitazioni isolate	6	2
gruppi di case	10	1
grandi insediamenti	23	8
zona artigianale, industriale o commerciale	8	28
centri urbani	16	30

Tab.12 - Costo relativo per ettaro connesso all'utilizzo del suolo in Francia. (da DRM, 1990).

Operando in termini di costi, il valore globale è dato dalla semplice somma del costo delle diverse componenti. DEL PRETE *et alii* (1992) propongono, per esempio, l'uso della seguente formula per il calcolo del valore totale degli elementi a rischio:

$$W = [R_m(M_m - E_m)] N_{ab} + N_{ed} C_{ed} + C_{str} + C_{morf} \quad \text{dove:} \quad (6.3)$$

- $R_m$  è il reddito medio degli abitanti;
- $M_m$  è l'età media di morte degli abitanti;
- $E_m$  è l'età media degli abitanti;
- $N_{ab}$  è il numero degli abitanti;
- $N_{ed}$  è il numero degli edifici;
- $C_{ed}$  è il costo medio degli edifici;
- $C_{str}$  è il costo delle strutture ed infrastrutture;
- $C_{morf}$  è il costo delle modificazioni morfologiche.

Nella definizione del rischio il valore totale di  $W$  va moltiplicato per un appropriato indice di vulnerabilità. Per una analisi più dettagliata gli indici di vulnerabilità possono essere differenziati per le diverse componenti di  $W$ .

COSTO :	ALTO	MEDIO	BASSO
PESO :	1	0.7	0.3
<i>Edifici</i>	Abitazioni civili. Edifici pubblici e di uso pubblico. Cimiteri. Fondi rurali. Alberghi con abitazioni.	Abitazioni civili: seconde case ed abitazioni turistiche. Fondi rurali abbandonati, stalle.	Strutture di servizio. Strutture commerciali ed artigianali.
<i>Vie di comunicazione</i>	Viabilità primaria: strade statali.	Viabilità secondaria: strade provinciali e comunali.	Viabilità minore: strade vicinali ed interpoderali.
<i>Acquedotti</i>	Opere di presa. Collettori principali.		

<i>Elettrodotti</i>	Elettrodotti ad alta tensione. Cabine di trasformazione.	Elettrodotti al servizio del centro abitato.	
<i>Gasdotti</i>		Serbatoi. Linea principale.	
<i>Infrastrutture varie</i>	Emergenze architettoniche.	Linee telefoniche. Fognature	Impianti sportivi scoperti. Infrastrutture turistiche

Tab.13 - Costo economico sociale degli elementi a rischio nei centri abitati (PROVINCIA DI MODENA & GNDICI U.O.2.9, 1994).

## 7. VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ

Secondo le definizioni date in sez.2.2, la vulnerabilità, esprime il grado di perdita prodotto su un elemento a rischio e, pertanto, essa dipende sia dal tipo di elemento a rischio che dall'intensità del fenomeno franoso. In pratica la vulnerabilità esprime il raccordo che lega l'intensità del fenomeno alle sue possibili conseguenze. Formalmente la vulnerabilità può essere espressa in termini di probabilità condizionata (EINSTEIN, 1988):

$$V = P(\text{danno} \mid \text{evento});$$

ovvero dalla probabilità che l'elemento a rischio subisca un certo danno dato il verificarsi di un evento franoso di data intensità. Nello stesso tempo la vulnerabilità deve includere anche una misura della severità del danno.

Secondo MORGAN *et alii* (1992), la valutazione completa della vulnerabilità è espressa dal prodotto delle seguenti tre quantità (tutte espresse in una scala da 0 a 1):

$$V = V_s \cdot V_T \cdot V_L \quad \text{dove:} \quad (7.1)$$

$V_s$  è la probabilità di impatto spaziale, ovvero la probabilità che un elemento a rischio sia interessato dalla frana, dato il verificarsi di quest'ultima (es. probabilità che una colata rapida di detrito coinvolga un determinato edificio).

$V_T$  è la probabilità di impatto temporale, che esprime la variabilità degli attributi dell'elemento a rischio nel tempo (es. probabilità che l'edificio sia occupato al momento della frana).

$V_L$  è la probabilità di perdita della vita di ogni occupante dell'elemento oppure la proporzione del valore dell'elemento colpito che viene persa.

Oltre all'intensità del fenomeno e alla tipologia di elemento a rischio, nella definizione della vulnerabilità entrano in gioco fattori, di difficile parametrizzazione, legati all'organizzazione sociale della regione in esame (PANIZZA, 1988). A parità di altre condizioni infatti la vulnerabilità è minore laddove sono attivati i programmi di prevenzione e di emergenza.

La valutazione della vulnerabilità si può basare su criteri statistici, nel caso di fenomeni ripetibili e frequenti. Per esempio nel caso dei crolli si può stimare su base statistica la probabilità che il distacco di un masso produca un determinato danno su un edificio.

In generale tuttavia la stima della vulnerabilità si basa su criteri essenzialmente soggettivi. Molti operatori includono implicitamente in tale stima una valutazione dell'imprevedibilità del fenomeno; altri invece vi includono, sempre implicitamente, considerazioni sul valore degli elementi a rischio. E' importante tuttavia, per una migliore valutazione dei parametri in gioco nella definizione del rischio, tenere separati i concetti di pericolosità, vulnerabilità e di valore degli elementi a rischio.

E' opportuno inoltre differenziare la vulnerabilità in base al tipo di elemento esposto a rischio. Per ogni tipologia di elemento a rischio è diversa la dipendenza della vulnerabilità dall'intensità del fenomeno. In particolare si seguono approcci completamente differenti a seconda che l'interesse sia centrato sulla vulnerabilità umana o su quella di beni ed attività.

## 7.1 Vulnerabilità della vita umana

Nel caso in cui l'elemento a rischio sia rappresentato dalla vita umana la vulnerabilità può essere espressa dalla probabilità che, dato il verificarsi dell'evento franoso si possano avere morti, feriti o senzatetto. La vulnerabilità è pertanto direttamente proporzionale alla densità di popolazione di una zona esposta a rischio (FELL, 1994).

Nell'ambito dei progetti PER, il DRM (1990) fissa i valori di probabilità di avere morti, feriti e senzatetto in relazione all'intensità del fenomeno franoso (Tab.14). Tali valori di probabilità possono essere usati direttamente per esprimere la vulnerabilità.

Danno	H <sub>0</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>
morti	0	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>
feriti	0	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
senzatetto	0	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>

Tab.14 - Probabilità di conseguenze sul piano umano per i diversi tipi di intensità definiti in Tab.1 (DRM, 1990).

Se si esprime l'intensità del fenomeno in base alla velocità di spostamento, il limite oltre il quale la vita umana può essere direttamente vulnerata (possibilità di morte o ferimento) è stato fissato da HUNGR (1981) e MORGENSTERN (1985) a 1 m/s, corrispondente alla velocità della corsa. DEL PRETE *et alii* (1992) propongono di dimezzare tale limite considerando l'inevitabile tempo di reazione e gli elementi più vulnerabili (anziani, bambini, etc.). CRUDEN & VARNES (1994) riducono ancora tale limite a 0.05 m/s (circa 3 m/min) in modo da considerare la possibilità di completa evacuazione della zona a rischio (Tab.3).

## 7.2 Vulnerabilità di beni ed attività

Nel caso in cui l'elemento a rischio sia costituito da un bene immobile o dal quadro delle attività economiche ad esso associate, la vulnerabilità esprime la percentuale del valore economico che può essere pregiudicata dal verificarsi del fenomeno franoso. A seconda del livello di dettaglio a cui si opera può essere quantificata la vulnerabilità dei singoli edifici oppure quella di un'area omogenea di utilizzo del territorio.

Nel caso di un singolo immobile la valutazione della vulnerabilità si basa sulla stima dei danni. Una misura della severità del danno è fornita dall'impegno economico necessario per il ripristino della situazione precedente al dissesto. In prima approssimazione il danno può essere:

- a) estetico;
- b) funzionale;
- c) strutturale.

Scale di severità dei danni sugli edifici sono state proposte da TOMLINSON *et alii* (1978), relativamente a problemi di fondazioni, e da ALEXANDER (1989), per danni provocati da frane di diversa tipologia. Tali scale permettono di quantificare l'entità relativa dei danni, tuttavia non sono correlate con l'intensità del fenomeno o con la tipologia di edificio, per cui non permettono una stima della vulnerabilità. Un tentativo in questo senso è presentato dal DRM (1990), il quale propone una scala di gravità del danno (Tab.15) che, anche se meno dettagliata di quelle precedentemente citate, esprime il danno in termini di percentuale del costo dell'edificio. Tale percentuale esprime quindi una misura della vulnerabilità. Il grado di danno è correlato con l'intensità del fenomeno e con le caratteristiche costruttive come mostrato in Tab.16.

Grado di	% del valore della	Tipo di danno
----------	--------------------	---------------

danno	costruzione	
1	qualche %	Danni leggeri non strutturali . La stabilità non è pregiudicata
2	10 -30	Fessurazioni dei muri
3	50 - 60	Deformazioni importanti. Fessure largamente aperte. Evacuazione necessaria
4	70 - 90	Cedimento parziale dei pavimenti, breccie nei muri, disarticolazione delle pareti. Evacuazione immediata.
5	100	Distruzione totale. Recupero impossibile

Tab.15- Scala convenzionale della severità dei danni (ispirata alla scala Mercalli). (DRM, 1990)

Intensità	Tipo	A	B	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
E <sub>1</sub>	scivolamento	5	3-4	2	1 -2
	colamento	2 - 5	1-3	1 -2	1
	crolo	4 -5	3-5	3 -5	2 -3
E <sub>2</sub>	scivolamento	5	5	3 -5	3 -5
	colamento	3 - 5	1 - 4	1 -3	1
	crolo	5	5	5	4 -5
E <sub>3</sub>	scivolamento	5	5	4 - 5	4 -5
	colamento	5	3 - 5	1 -5	1 -5
	crolo	5	5	5	5
E <sub>4</sub>	scivolamento	5	5	5	5
	colamento	5	5	5	5
	crolo	5	5	5	5

Tab.16 - Valutazione relativa del danno provocato da frane di diverso tipo ed intensità, in funzione delle caratteristiche delle costruzioni esposte. Il danno è espresso in base alla Tab.15, l'intensità in base alla Tab.2.

**A** = costruzioni vetuste, di qualità mediocre, prive di fondazioni ed elementi strutturali di raccordo, costruite al di fuori dalle consuete norme (es. abitazioni rurali). In questa categoria rientrano anche le costruzioni di tipo **B** qualora esse siano state soggette a degrado degli elementi strutturali.

**B** = edifici tradizionali in muratura o prefabbricati leggeri senza struttura in cemento armato (villette monofamiliari o piccoli condomini).

**C** = edifici di buona qualità realizzati in calcestruzzo o con elementi prefabbricati provvisti di armatura. La categoria è divisa in due sotto-classi:

**C<sub>1</sub>** = corrisponde ad un edificio singolo di modeste dimensioni;

**C<sub>2</sub>** = corrisponde ad un condominio di almeno tre piani.

A livello di pianificazione urbanistica e territoriale, per esempio a scala comunale, è impraticabile considerare la vulnerabilità dei singoli edifici, per cui si può tentare di associare delle particolari percentuali di danno alle zone omogenee di utilizzo del territorio in funzione dell'intensità del fenomeno. Per la redazione delle carte di vulnerabilità del PER, il DRM (1990) ha predisposto la Tab.17 da utilizzarsi per la valutazione del grado di perdita sui beni e le attività a rischio il cui costo è espresso in Tab.12.

FELL (1994) fornisce una scala descrittiva per la vulnerabilità relativa alla perdita di proprietà, illustrata in Tab.18; tale scala può essere impiegata per associare un valore numerico ad una valutazione soggettiva del grado di perdita.

Zone di uso del suolo	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
zona agricola	70	90	100
abitazioni isolate	60	90	100
gruppi di case	36	80	100
grandi insediamenti	10	60	90
zona artigianale, industriale o commerciale	40	80	100
centri urbani	50	80	90 - 100

Tab.17 - Grado di danneggiamento in % per zona omogenea di utilizzo del suolo in funzione dell'intensità del fenomeno definita in Tab.2.

Vulnerabilità di beni ed attività	V
Estremamente elevata	$V \geq 0.9$
Elevata	$0.5 \leq V < 0.9$
Media	$0.1 \leq V < 0.5$
Bassa	$0.05 \leq V < 0.1$
Molto bassa	$V < 0.05$

Tab.18 - Scala di vulnerabilità di beni ed attività proposta da FELL (1994).

## 8. VALUTAZIONE DEL RISCHIO

La determinazione del rischio, inteso come rischio totale secondo le definizioni date in sez.2.2, prevede la parametrizzazione e la combinazione di una serie di fattori di natura socio-economica e geologico-ambientale, la cui valutazione richiede spesso l'interazione di diverse professionalità e competenze (geologi, ingegneri, urbanisti, amministratori, etc.). Le tre diverse componenti del rischio (pericolosità, vulnerabilità e valore degli elementi a rischio) possono pertanto essere determinate con un diverso grado di dettaglio a seconda delle competenze degli operatori e delle informazioni ottenibili sul territorio.

In alcuni casi può essere necessario limitarsi ad una sintesi parziale delle informazioni, valutando anziché il rischio totale, il danno potenziale o il rischio specifico, definiti in sez.2.2.

### 8.1 Rischio totale

Il rischio totale è dato per un determinato elemento a rischio e per una data intensità del fenomeno dal prodotto della pericolosità per la vulnerabilità per il valore dell'elemento a rischio; pertanto il rischio può essere espresso in maniera formale da:

$$R(I;E) = H(I) V(I;E) W(E) \quad (8.1)$$

E' opportuno differenziare diverse tipologie di rischio a seconda dell'elemento considerato:

- rischio associato alla vita umana*: espresso dal numero atteso di morti, feriti o senzatetto per anno, oppure dal loro valore economico;
- rischio associato a beni immobiliari*: espresso dal numero atteso di edifici danneggiati per anno oppure dall'estensione attesa di terreno perduto per anno, oppure dall'atteso costo dei danni prodotti;
- rischio associato ad attività economiche*: espresso dall'atteso costo delle perturbazioni inflitte alle attività economiche;
- rischio associato a beni di pubblico interesse*: espresso dall'atteso costo delle perturbazioni ai servizi pubblici ed ai beni ambientali.

Esprimendo tutte le quantità in termini monetari e possibile definire un rischio globale dato dalla somma algebrica dei costi associati ad ognuna delle diverse componenti.

## 8.2 Danno potenziale

In base alle definizioni della sez.2.2, il *danno potenziale*  $W_L$  tiene conto del valore degli elementi a rischio e del loro potenziale grado di perdita o di danneggiamento, funzione delle caratteristiche degli elementi stessi e dell'intensità del fenomeno. La valutazione del danno potenziale richiede quindi soltanto sommarie indicazioni sull'intensità della frana (che influenza la vulnerabilità) ed è in gran parte basata sulle caratteristiche degli elementi a rischio. Tale valutazione può essere pertanto effettuata da urbanisti o amministratori.

L'unità di misura del valore delle perdite è la stessa impiegata per la quantificazione del valore degli elementi a rischio, ovvero il numero o l'estensione delle unità danneggiabili oppure il costo previsto dei danni.

Dal danno potenziale può essere stimato il rischio facendo delle ipotesi sulla ricorrenza dei fenomeni (pericolosità), in base alla relazione:

$$R(I;E) = W_L(I;E) H(I) \quad (8.2)$$

La metodologia per la valutazione del rischio nel progetto PER (DRM, 1985, 1988, 1990) prevede la definizione dettagliata di un valore delle perdite potenziale (identificato impropriamente con il termine "vulnerabilità") rispetto ad uno o più eventi di riferimento di determinata pericolosità e intensità.

In generale il danno potenziale può essere espresso in termini monetari da:

$$W_L = N w V \quad (8.3)$$

dove  $N$  è il numero di elementi esposti a rischio,  $w$  il loro costo unitario e  $V$  la loro vulnerabilità.

La valutazione del danno potenziale è differenziata secondo le diverse tipologie di elemento a rischio:

- danno potenziale riferito alla vita umana  $W_{Lh}$ : che indica la possibilità che un fenomeno produca morti, feriti o senzatetto;
- danno potenziale in termini di beni ed attività economiche  $W_{Le}$ : che indica il valore economico dei danni e delle perturbazioni al quadro delle attività economiche (beni e occupazione);
- danno potenziale in termini di beni di pubblico interesse  $W_{Lp}$ : che indica le perturbazioni del quadro delle strutture e infrastrutture di pubblica utilità (strade, ospedali, scuole, etc.)

Ognuna delle tre quantità è valutata separatamente in base alle intensità di riferimento, così come definite nelle Tab.1 e 2. Inoltre il danno potenziale viene valutato per ogni zona omogenea di utilizzo del territorio definita nell'ambito dei Piani Regolatori Comunali. Integrando i valori relativi alle diverse zone omogenee si ottiene il danno potenziale totale nel Comune.

Il danno potenziale associato alla vita umana  $W_{Lh}$  è calcolato con la seguente espressione:

$$W_{Lh}(zona) = N [(w V)_{morti} + (w V)_{feriti} + (w V)_{senzatetto}] \quad (8.4)$$

dove  $N$  è il numero di persone residenti entro la zona considerata,  $w$  il valore monetario unitario degli elementi a rischio così come definito in Tab.11 e  $V$  la vulnerabilità di ognuno di questi (così come definita in Tab.14).

Il danno potenziale a livello comunale è dato da:

$$W_{Lh}(comune) = S [W_{Lh}(zona) A] \quad (8.5)$$

dove  $A$  è un coefficiente che tiene conto dell'afflusso maggiore di persone in zone turistiche, pari a 1.3 in zone turistiche e ad 1 in quelle non turistiche.

Il danno potenziale in termini di beni e delle attività economiche  $W_{Le}$  è calcolato con la seguente espressione:

$$W_{Le}(zona) = S [(w V)_{beni} + (w V)_{attività}] \quad (8.6)$$

dove  $S$  è l'area della zona considerata,  $w$  il costo degli elementi a rischio per unità areale, così come definito in Tab.11 e  $V$  la vulnerabilità di ognuno di questi (così come definita in Tab.17).

Il danno potenziale a livello comunale è dato da:

$$W_{Le}(\text{comune}) = S [W_{Le}(\text{zona}) C] \quad (8.7)$$

dove  $C$  è un coefficiente che tiene conto della densità di installazioni effettive rapportate alla popolazione comunale.

Il danno potenziale in termini di beni di pubblico interesse  $W_{Lp}$  è calcolato con la seguente espressione:

$$W_{Lp}(\text{zona}) = k W_{Le}(\text{zona}) + D \quad (8.8)$$

dove  $k$  è un coefficiente che dipende dall'intensità del fenomeno e  $D$  un coefficiente che tiene conto del numero e del valore delle installazioni di pubblico interesse nella zona.

Il danno potenziale a livello comunale è dato semplicemente da:

$$W_{Lp}(\text{comune}) = S W_{Lp}(\text{zona}) \quad (8.9)$$

### 8.3 Rischio specifico

Il *rischio specifico*  $R_s$  esprime il grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di data intensità (sez.2.2). Per una determinata tipologia di elemento a rischio  $E$  e per una data intensità  $I$  il rischio specifico è dato dal prodotto della pericolosità per la vulnerabilità (eq.2.9) ed è pertanto espresso in termini di probabilità annua.

Il rischio specifico, a differenza del danno potenziale, è un parametro basato principalmente sul fenomeno. La sua determinazione è pertanto comune fra i tecnici specialisti nel campo della stabilità dei versanti.

Dal rischio specifico può essere stimato il rischio totale in base alle informazioni sul valore degli elementi a rischio, in base alla relazione:

$$R(I;E) = R_s(I;E) W(E) \quad (8.10)$$

La determinazione del rischio specifico è particolarmente importante in quanto permette di stimare le conseguenze dei fenomeni franosi indipendentemente dal numero e dal valore economico dagli elementi a rischio.

## 9. RISCHIO ACCETTABILE

La definizione di soglie di rischio accettabile è particolarmente importante nell'ambito delle attività di prevenzione e di programmazione dello sviluppo del territorio. Infatti questa consente di individuare le priorità di intervento e di decidere i criteri di gestione del rischio che saranno descritti nella sez.10. In base all'obiettivo perseguito ed al tipo di dati disponibili le soglie accettabili possono essere definite in termini di rischio totale oppure di rischio specifico. Inoltre, nel campo della progettazione di opere di ingegneria, è diffuso un tipo di approccio più semplice in base al quale vengono definite delle soglie accettabili in termini di "probabilità di rottura", definita in sez.5.1.7, prescindendo dal quadro formale di analisi del rischio presentato in sez.2.2.

### 9.1. Rischio totale accettabile

La definizione di un livello di rischio totale accettabile è estremamente complessa in quanto dipende, oltre che dalla probabilità di conseguire il danno, anche dal complesso quadro degli elementi a rischio. D'altra parte in molti casi è spesso fondamentale specificare completamente il rischio totale, anziché limitarsi a valutare quello specifico. Ad esempio nel caso in cui si voglia identificare una soglia di rischio accettabile per la vita umana, l'opinione pubblica sembra disposta ad accettare probabilità più elevate di eventi con poche vittime, rispetto ad eventi più rari con numerose vittime. In questo caso il numero di

persone esposte, che definisce l'elemento a rischio, ha una marcata influenza sulle soglie di accettabilità.

Ancora più problematico è definire a priori dei livelli di rischio totale da impiegare per la zonazione del territorio ai fini della pianificazione urbanistica. La scelta di tali livelli deve essere necessariamente effettuata a livello locale tenendo conto della specificità del quadro socio-economico di ogni zona. Questa differenziazione su base locale determina tuttavia il problema dell'impossibilità del confronto fra "carte del rischio" redatte in zone diverse. A questo scopo può essere utile delineare delle linee generali per la scelta, di volta in volta, delle classi di rischio da impiegare per la zonazione.

A questo concetto si ispirano i regolamenti per la redazione dei PER in Francia, i quali prescrivono una zonazione del territorio in tre classi di rischio (DRM, 1988):

ZONA ROSSA: esposta a fenomeni franosi di elevata intensità e con elevata probabilità di occorrenza in cui non sono impiegabili metodologie di protezione ed in cui l'espansione urbanistica è interdetta.

ZONA BLU: esposta a fenomeni franosi con intensità e probabilità di occorrenza moderate; possono essere intraprese misure di prevenzione del rischio per i beni esistenti prima della pubblicazione del Piano; queste non devono prevedere un costo superiore al 10% del valore monetario dei beni.

ZONA BIANCA: senza pericolosità prevedibile in cui non è adottata alcuna prescrizione.

## 9.2. Rischio specifico accettabile

Il rischio specifico può, in certi casi, essere impiegato, più agevolmente del rischio totale, per la definizione di soglie di rischio accettabile.

STARR (1969), sulla base dell'interpretazione di dati statistici sulle vittime di incidenti e malattie, propone un livello standard di rischio specifico accettabile pari a  $R_s=10^{-6}$  per anno. Più recentemente, FELL (1994), sempre sulla base di statistiche relative a vittime di infortuni, osserva che l'opinione pubblica sembra tollerare elevati livelli di rischio ( $R_s=10^{-2} \div 10^{-4}$  per anno) quando è esposta volontariamente (es. incidenti stradali, infortuni sul lavoro o nello sport) mentre quando si trova sottoposta a rischio involontario (es. incendi, calamità naturali, crolli di opere d'ingegneria), tollera livelli molto più bassi ( $R_s=10^{-5} \div 10^{-6}$  per anno).

Nel caso di frane in versanti naturali, quando la popolazione esposta è consapevole dei rischi, la tolleranza è elevata, comparabile con quella dei casi di rischio volontario. In queste situazioni WHITMAN (1984) indica un rischio specifico accettabile pari a  $10^{-2}$  per anno. Più recentemente FELL (1994) stima un rischio specifico annuo accettabile pari a  $10^{-2}$ , per danni alle proprietà, e pari a  $10^{-3}$ , per la vita umana. Nel caso di pendii artificiali invece i livelli di rischio tollerati sono dell'ordine di quelli del rischio involontario ( $R_s = 10^{-5}$  per anno). Intorno a tale valore, o addirittura più basso, dovrebbe essere anche il rischio accettabile nel caso di frane naturali soggette ad interventi di stabilizzazione.

Un'altra considerazione, associata al concetto di rischio volontario o involontario, è data dal fatto che occorre distinguere fra il rischio specifico accettabile da un singolo individuo in una zona esposta al pericolo di frana, da quello della popolazione nel suo insieme. Ad esempio, in base ad i dati del Ministero dei Lavori Pubblici (CATENACCI, 1992), si può stimare che la probabilità globale di morte a causa delle frane in Italia, nel periodo 1945-1990, è di circa  $10^{-6}$  per anno per persona. Tale dato risulta comparabile con le soglie di rischio specifico involontario accettabile. In zone franose tuttavia la popolazione si trova esposta, più o meno consapevolmente, a livelli di rischio superiori di alcuni ordini di grandezza.

FELL (1994) ha proposto una scala del rischio specifico relativo ai danni alle proprietà, illustrata in Tab.19, che può essere impiegata per un'interpretazione dei risultati di una zonazione del rischio del territorio o per confronti fra livelli di rischio di problemi diversi.

Rischio specifico	R <sub>s</sub> (annuo)
Estremamente elevato	R <sub>s</sub> ≥ 0.1
Elevato	0.02 ≤ R <sub>s</sub> < 0.1
Medio	0.005 ≤ R <sub>s</sub> < 0.02
Basso	0.001 ≤ R <sub>s</sub> < 0.005
Molto basso	R <sub>s</sub> ≤ 0.001

Tab.19 - Scala di rischio specifico per beni ed attività proposta da FELL (1994).

### 9.3 Probabilità di rottura accettabile

Nel contesto delle analisi di affidabilità (*reliability analysis*) (sez.5.1.7) esistono dei livelli codificati di “probabilità di rottura” accettabile. Tali valori si differenziano in base alla tipologia ed al numero di elementi a rischio e, pertanto, tengono implicitamente conto della vulnerabilità; in tal senso essi possono essere considerati come misure di rischio accettabile. Tuttavia, a differenza del rischio accettabile discusso in sez.9.1 e 9.2, in questo caso il fattore tempo non è preso direttamente in considerazione. Le soglie accettabili vengono infatti confrontate direttamente con i valori di probabilità di rottura (probabilità che il fattore di sicurezza sia minore o uguale all'unità) determinati con analisi di tipo probabilistico. Il carattere aleatorio del fattore di sicurezza è solo una conseguenza delle incertezze nella stima dei parametri che entrano in gioco nella stabilità dei pendii, per cui la probabilità di rottura non può essere associata direttamente ad una probabilità di occorrenza.

Nel campo dell'ingegneria civile esistono diversi criteri di definizione delle probabilità di rottura tollerabili. La CIRIA (Associazione per la Ricerca e l'Informazione nell'Industria delle Costruzioni degli USA) ha per esempio proposto i seguenti criteri:

$$a) \text{ Criterio sociale: } P_{a(s)} = K_s \frac{n_d}{1000 n_r} \quad (\%) \quad \text{dove:} \quad (9.1)$$

$K_s$  è una costante che dipende dal tipo di opera e dal suo utilizzo sociale;  
 $n_d$  è il tempo di servizio del sistema;  
 $n_r$  è il numero di persone esposte a rischio nel tempo  $n_d$ .

$$b) \text{ Criterio economico: } P_{a(e)} = 100 \frac{b}{2.3 C E_i} \quad (\%) \quad \text{dove:} \quad (9.2)$$

$b$  è una costante che dipende dal tenore di vita della popolazione (pari a 0.06 negli USA per l'anno 1982-83);  
 $E_i$  è il costo iniziale in dollari della costruzione;  
 $C$  è un coefficiente che esprime il il costo delle conseguenze di una rottura in rapporto al costo iniziale dell'opera (per cui è una misura della vulnerabilità di quest'ultima).

$$c) \text{ Criterio socio-economico: } P_{a(se)} = 100 b \frac{K_s}{2.3 q n_d^2} \quad (\%) \quad \text{dove:} \quad (9.3)$$

$q$  è il valore medio in dollari fissato dalle assicurazioni per la vita umana. (pari a 100 000\$ negli USA per l'anno 1982-83).

KIRSTEN & MOSS (1985) hanno adattato i criteri della CIRIA alla stabilità dei pendii in roccia fornendo i valori dei coefficienti necessari e delle soglie di rischio sulla base di una classificazione empirica dei pendii, basata sulla durata di esercizio, sull'uso sociale e sulla minima sorveglianza richiesta (Tab.20).

PRIEST & BROWN (1983) hanno proposto alcuni criteri per l'interpretazione delle analisi probabilistiche della stabilità dei versanti in roccia. In base al tipo di pendio e agli elementi a rischio, essi hanno definito diversi valori soglia per il valore medio del fattore di sicurezza  $E(F)$ , della probabilità di rottura  $P(F<1)$ , e della probabilità che  $F<1.5$  (Tab.21). A seconda che uno, due o tutti e tre i criteri siano soddisfatti, gli autori forniscono un'interpretazione del comportamento del pendio e consigliano strategie per la mitigazione del rischio (Tab.22).

Cat.	Durata di esercizio	Uso sociale	Min. sorveglianza richiesta	$K_s$	$n_d$ (anni)	$n_r$	$P_{a(s)}$ (%)	$P_{a(se)}$ (%)
1	PRATICAMENTE ZERO	Accesso vietato	Osservazione continua con strumenti sofisticati	12000	0.4	0.064	75	75
2	ESTREMAM. CORTA (miniere a cielo aperto temporanee)	Accesso fortemente prevenuto	Osservazione continua con strumenti sofisticati	5600	1	0.16	35	5.6
3	MOLTO CORTA (pendii temporanei in miniere a cielo aperto)	Accesso attivamente prevenuto	Osservazione continua con strumenti sofisticati	2400	2.5	0.4	15	0.38
4	CORTA (pendii semi-temporanei in miniere a cielo aperto, cave o lavori civili)	Accesso prevenuto	Osservazione continua con semplice strumentazione	1200	6.25	1.0	7.5	0.018
5	MEDIA (pendii semi-permanenti)	Accesso scoraggiato	Osservazione volutamente superficiale	460	16	2.56	2.5	0.031
6	LUNGA (pendii quasi permanenti)	Accesso permesso	Osservazione occasionale	160	40	6.4	1.0	$10^{-4}$
7	MOLTO LUNGA (pendii permanenti)	Accesso libero	Nessun controllo	30	100	16	0.19	$3 \cdot 10^{-6}$
8	LUNGHISSIMA (sicuro impatto con l'ambiente e minaccia per la vita umana)	Accesso libero	Nessun controllo	6	250	40	0.0038	$10^{-7}$
9	ESTREMAM. LUNGA (maggior impatto sull'ambiente; seria minaccia per la vita umana)	Accesso libero	Nessun controllo	1	625	100	0.0063	$2.6 \cdot 10^{-9}$

Tab.20 - Criteri per la valutazione della probabilità di rottura accettabile nei pendii in roccia (da KIRSTEN & MOSS, 1985). La probabilità di rottura accettabile secondo il criterio economico è indipendente dalla categoria del pendio ed è pari a  $P_{a(e)}=0.00013\%$ .

Classe	Conseguenze	Elemento a rischio	CRITERI		
			$E(F)$	$P(F<1.0)$	$P(F<1.5)$
1	Non serie	Gradoni di cava Modesti scavi (H<50m) non adiacenti a strade	1.3	0.1	0.2
2	Moderate	Pendii di natura permanente o semi-permanente	1.6	0.01	0.1
3	Molto serie	Pendii medio elevati (H>50m) adiacenti a strade o sottostanti ad installazioni	2.0	0.003	0.05

Tab.21 - Rischio accettabile valutato in base ad analisi probabilistiche (da PRIEST & BROWN, 1983).

CRITERI			Interpretazione
F medio	P(F<1.0)	P(F<1.5)	
V	V	V	STABILE
V	F	V	il rischio può o non può essere accettabile; il livello di rischio può essere ridotto con un programma di monitoraggio
V	V	F	
F	V	V	il livello di rischio può essere ridotto con una modesta riprofilatura del pendio
F	V	F	INSTABILE: il livello di rischio può essere ridotto solo con una sostanziale riprofilatura del pendio, o con il consolidamento della roccia; il monitoraggio può essere necessario
F	F	V	
F	F	F	

Tab.22 - Interpretazione del livello di rischio e strategie di mitigazione sulla base dei criteri illustrati in Tab.21 (da PRIEST & BROWN, 1983): V = criterio soddisfatto; F = criterio non soddisfatto.

## 10. GESTIONE DEL RISCHIO

La zonazione del rischio in un dato territorio, costituisce la base della gestione del rischio (*risk management*); questa prevede l'interpretazione delle informazioni ed il quadro delle decisioni operative per l'eventuale riduzione del rischio (*risk mitigation*). La fase gestionale è di natura essenzialmente politico-amministrativa; tuttavia il ruolo dei tecnici e della comunità scientifica è fondamentale nell'individuazione delle priorità di intervento e nella messa a punto delle strategie di mitigazione.

L'esempio più completo di gestione del rischio è rappresentato dai piani di esposizione al rischio (PER) che in Francia sono una parte integrante dei documenti di pianificazione urbanistica e regolano l'uso del territorio a livello di piani regolatori comunali. Appropriate misure per la mitigazione del rischio, differenziate in base alla tipologia del fenomeno, sono elencate nella normativa nazionale associata ai PER (DRM, 1987).

In aree caratterizzate da elevati valori di rischio, sono possibili due strategie di gestione:

- 1) **aumento delle soglie di rischio accettabile**: perseguibile essenzialmente attraverso l'informazione (es. installazione di segnaletica di allarme, uso dei mezzi di comunicazione di massa); si è infatti discusso come le soglie di rischio consapevole (volontario) tollerato sono in genere molto più elevate rispetto a quelle di rischio involontario (anche di tre ordini di grandezza in termini di rischio specifico).
- 2) **mitigazione (riduzione) del rischio**: realizzabile attraverso attività di prevenzione delle conseguenze dei fenomeni franosi.

La *mitigazione del rischio* può essere a sua volta attuata secondo tre strategie:

- a) **riducendo la pericolosità**: l'incidenza delle frane in una determinata zona può essere ridotta in due modi:
  - i) intervenendo sulle cause della franosità descritte in sez.3.1, per esempio mediante opere di bonifica e di sistemazione idrogeologica del territorio, oppure attraverso la razionalizzazione delle pratiche agricole o di utilizzo del suolo.
  - ii) intervenendo direttamente sui fenomeni franosi esistenti al fine di prevenire la loro riattivazione o limitare la loro evoluzione, mediante interventi di disaggio o di stabilizzazione. La stabilizzazione di una frana può realizzarsi attraverso la riduzione delle forze destabilizzanti (es. riprofilatura o gradonatura) o l'incremento di quelle resistenti (drenaggio, trattamento chimico-termico, iniezioni di cemento, chiodature, tiranti, gabbionate, muri di sostegno, palificate, etc.).

- b) riducendo gli elementi a rischio:** tale strategia si esplica soprattutto in sede di pianificazione territoriale e di normativa, nell'ambito delle quali possono essere programmate le seguenti azioni:
- i) evacuazione di aree instabili e trasferimento dei centri abitati franosi;
  - ii) interdizione o limitazione dell'espansione urbanistica in zone instabili;
  - iii) definizione dell'utilizzo del suolo più consona per le aree instabili (es. prato-pascolo, parchi, etc.)
- c) riducendo la vulnerabilità:** la vulnerabilità può essere ridotta mediante interventi di tipo tecnico oppure intervenendo sull'organizzazione sociale del territorio:
- i) consolidamento degli edifici, che determina una riduzione della probabilità di danneggiamento dell'elemento interessato dalla frana;
  - ii) installazione di misure di protezione quali reti o strutture paramassi (parapetti, gallerie, rilevati o trincee), in modo da determinare una riduzione della probabilità che l'elemento a rischio venga interessato dalla frana (senza tuttavia limitare la probabilità di occorrenza di questa);
  - iii) messa a punto di sistemi di allarme, che limitano la probabilità che la vita umana sia vulnerata dall'evento franoso;
  - iv) organizzazione di piani di emergenza e di soccorso, al fine di limitare il più possibile i danni prodotti dalla frana.

La valutazione del rischio totale, in termini di costo annuo atteso dei danni, permette di scegliere fra le diverse strategie di mitigazione attraverso analisi costi - benefici. Al costo di ogni intervento può essere associato infatti un beneficio in termini di riduzione del rischio, espresso dalla diminuzione del costo annuo dei danni provocati dalle frane. Può così anche essere previsto il numero di anni nel quale il costo dell'intervento viene ammortizzato.

## 11. CONCLUSIONI

Nella presente nota è stata presentata una revisione delle metodologie per la valutazione del rischio di frana e delle sue componenti. Tale revisione ha evidenziato che nonostante l'UNESCO abbia codificato una precisa terminologia per la definizione dei diversi parametri che concorrono alla definizione del rischio, esiste ancora una notevole differenziazione di terminologia e metodologia. Questo lavoro è un tentativo di inquadramento delle diverse esperienze, italiane ed internazionali, entro un comune schema formale. Nella definizione di tale schema si è cercato di essere il più possibile consistenti con la terminologia dell'UNESCO, anche se alcune precisazioni ed interpretazioni sono state necessarie. Lo schema formale, illustrato in Fig.14, prevede la seguente successione di livelli di studio:

- 1) **Descrizione dello stato della natura:** nell'ambito del quale vengono raccolti i dati sulle cause dei fenomeni franosi (fattori della franosità) e sugli effetti (frane passate e presenti);
- 2) **Valutazione dell'intensità:** in cui le frane vengono distinte in base al grado di severità, basato il più possibile su caratteri fisico-meccanici propri del fenomeno;

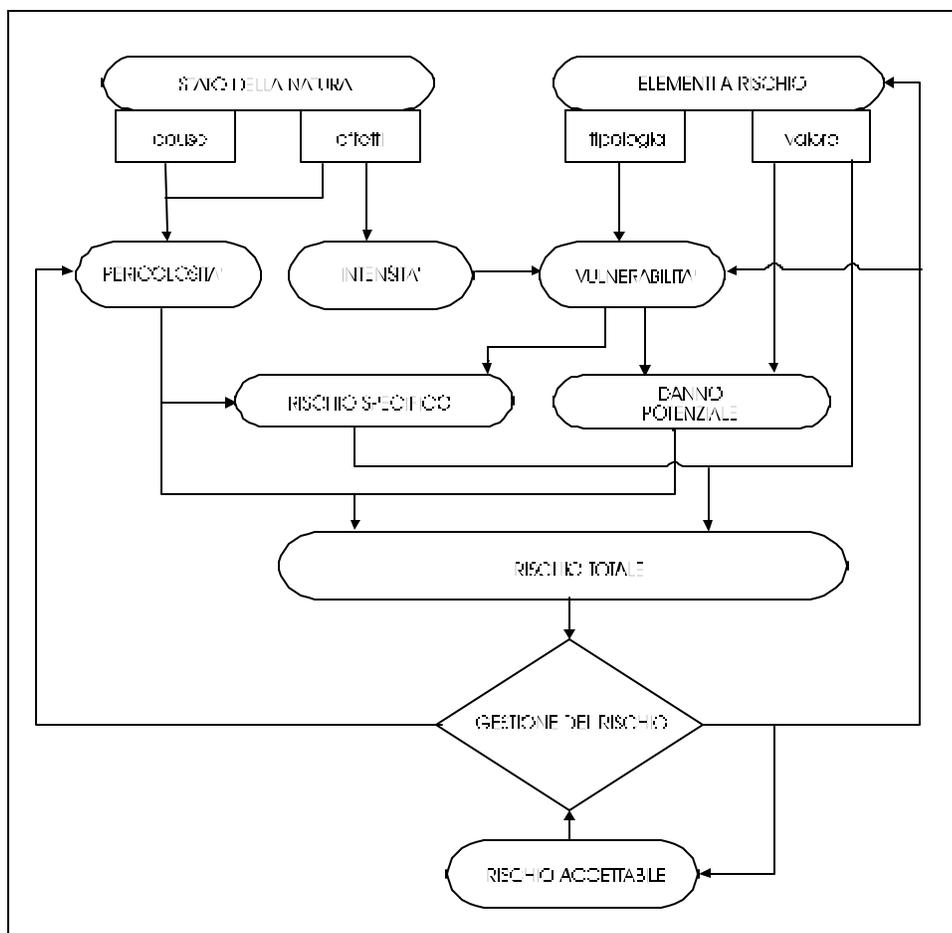


Fig.14 - Schema formale per l'analisi del rischio di frana.

- 3) **Valutazione della pericolosità:** in cui, per ogni intensità del fenomeno, viene stimata una probabilità di occorrenza in ogni punto della zona considerata;
- 4) **Definizione degli elementi a rischio:** in cui viene delineato il quadro socio-economico della regione in esame e, per ogni tipologia di elemento, viene valutata la quantità di unità esposte e, eventualmente, il loro valore economico;
- 5) **Valutazione della vulnerabilità:** nell'ambito della quale, per ogni tipologia di elemento a rischio e per ogni intensità del fenomeno, viene definito un grado di perdita;
- 6) **Valutazione del rischio (risk assessment):** consiste nella combinazione delle informazioni sulla pericolosità del fenomeno, sulla vulnerabilità e sul valore degli elementi a rischio. La valutazione del rischio è pertanto l'oggetto delle attività di "previsione" così come definita dalla legge 24/2/1992 n.225;
- 7) **Definizione del rischio accettabile:** in cui vengono definite delle soglie di rischio tollerabile sulla base di fattori di tipo socio-ambientale;
- 8) **Gestione del rischio (risk management):** può essere attuata, a seconda dei casi, intervenendo nei confronti della pericolosità, della vulnerabilità, degli elementi a rischio o del rischio accettabile. La gestione del rischio è pertanto l'oggetto delle attività di "prevenzione" così come definita dalla legge 24/2/1992 n.225.

Nell'ambito di tale schema ogni parametro può essere valutato soggettivamente sulla base dell'esperienza o oggettivamente sulla base di precisi caratteri fisico-meccanici associati al fenomeno o socio-economici associati agli elementi a rischio.

*Il lavoro è stato svolto nell'ambito delle attività della linea 2 del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche - Pubbl. N.846*

## BIBLIOGRAFIA

- ALEXANDER D. (1989) - *Urban Landslides*. Progress in Physical Geography. **13**(2), 157-191.
- AMADESI E. & VIANELLO G. (1978) - *Nuova guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti*. Mem.Soc.Geol.It., **19**, 53-60.
- AMADESI E., VIANELLO G., BONFATTI G., PIGNONE R. & PRETI D. (1977) - *Guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti. Regione Emilia Romagna*. MB T6. Ed.Pitagora., Bologna, 72pp.
- AMANTIM., CARRARA A., CASTALDO G., COLOSIMO P., GISOTTI G., GOVI M., MARCHIONNA G., NARDI R., PANIZZA M., PECCI M. & VIANELLO G. (1992) - *Linee guida per la realizzazione di una cartografia della pericolosità geologica connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti alla scala 1:50.000* versione Preliminare. Presidenza del Consiglio dei Ministri. Servizio Geologico. 47pp.
- AMBRASEYS N.N. (1977) - *On the response of structures to travelling waves*. Proc. CENTO Seminar on Earthquake Hazard Minimization, Teheran, 410-414.
- ANTOINE P. (1977) - *Réflexions sur la cartographie ZERMOS et bilan des expériences en cours*. BRGM Bull., Sect.III, N.1-2, 9-20.
- AZIMI C., DESVARREUX P., GIRAUD A. & MARTIN-COCHER J. (1982) - *Méthode de calcul de la dynamique des chutes de blocs: application à l'Etude du Versant de la Montagne de La Pale (Vecors)*. Bull. Liason Labor. Ponts et Ch., **122**, 93-102.
- BARTON M.E. & THOMPSON R.I. (1986) - *A model for predicting groundwater response to meteorological changes*. Groundwater in Engineering Geology. Geol. Soc. Eng. Group. Spec. Pub., **3**, 299-311.
- BERTINI T., CUGUSI F., D'ELIA B. & ROSSI-DORIA M. (1984) - *Climatic conditions and slow movements of colluvial covers in central Italy*. Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, Toronto (Canada), **1**, 367-376.
- BERTINI T., CUGUSI F., D'ELIA B., LANZO G., ROSSI-DORIA M. (1992) - *Slow movements investigations in clay slopes*. Proc. 6th Int. Symp. on Landslides, Christchurch (New Zealand), 329-334.
- BERTOCCI R., CANUTI P., CASAGLI N., GARZONIO C.A. & VANNOCCI P. (1994) - *Landslides on clay and shale hillslopes in Tuscany (Italy)*. In: HANEBERG W.C. & ANDERSON S.A. (eds) "Clay and Shale Slope Instability". Boulder, Colorado. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, **10**. In press.
- BIENIAWSKI Z.T. (1974) - *Geomechanics Classification of rock masses and its application in tunnelling*. Proc. 3rd Cong. ISRM, Denver, **2A**, p.27.
- BISHOP A.W. & MORGENSTERN N.R.(1960) - *Stability coefficients for earth slopes*. Géotechnique, **10**, 129-150.
- BOSI C. (1978) - *Considerazioni e proposte metodologiche sulla elaborazione di carte della stabilità*. Geol. Appl. & Idrogeol., **13**, 245-281.
- BOSI C., DRAMIS F. & GENTILI B. (1985) - *Carte geomorfologiche di dettaglio ad indirizzo applicativo e carte di stabilità a base geomorfologica*. Geol. Appl. & Idrogeol., **20**(2), 53-62.
- BRABB E.E. (1984) - *Innovative approaches to landslides hazard mapping*. Proc. IV Int. Symp. on Landslides, Toronto, **1**, 307-324.
- BRABB E.E., PAMPEYAN E.H. & BONILLA M.G. (1972) - *Landslide susceptibility in San Mateo County, California*. USGS Misc. Field Investigation Map, MF-360.
- CAINE N. 1980 - *The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows*. Geografiska Annal, **62A**, 23-27.
- CAMPBELL R. H. (1973) - *Isopleth map of landslide deposits, Poit Dume quadrangle, Los Angeles County California*. U.S. Geol.Surv.Misc. Map MF-535.
- CANCELLI A. & NOVA R. (1985) - *Landslides in soil and debris cover triggered by rainfall in Valtellina (Central Alps-Italy)*. Proc. IV Int. Conf. & Field Workshop on Landslides, Tokio, 267-272.
- CANNON S.H. & ELLEN S.D. (1988) - *Rainfall that resulted in abundant debris flow activity during the storm*. In: "Landslides, floods and marine effects of the storm of Jan 3-5, 1982, in the S.Francisco Bay region, California". USGS Prof. Papers., **1434**, 27-35.

- CANUTI P., DRAMIS F. & ESU F. (1992) - *Le condizioni di instabilità dei pendii nei centri abitati. Principi e criteri generali ad uso degli Uffici Tecnici di Enti Pubblici*. CNR-GNDICI Pubbl. n.544, Tecnoprint, Bologna. 100pp.
- CANUTI P., FOCARDI P., GARZONIO C.A. (1985) - *Correlation between rainfall and landslides*. Proc. 27th I.G.C., Moscow. Bull. IAEG., **32**, 49-54.
- CANUTI P., GARZONIO C.A., RODOLFI G. & VANNOCCI P. (1985) - *Stabilità dei versanti nell'area rappresentativa di Montespertoli (Firenze)*. Carta di attività delle forme e di densità dei fenomeni franosi. Tipografia S.EL.CA. Firenze.
- CAPECCHI F. & FOCARDI P. (1988) - *Rainfall and landslides: research into a critical precipitation coefficient in an area of Italy*. Proc. 5th Symp. on Landslides, Lausanne, 1131-1136.
- CARRARA A. & MERENDA L. (1974) - *Metodologia per un censimento degli eventi franosi in Calabria*. Geol. Appl. & Idrogeol., **9**, 237-255.
- CARRARA A. (1983) - *Multivariate Methods for landslide hazard evaluation*. Mathematical Geol., **15**(3), 403-426.
- CARRARA A. (1984) - *Landslide hazard mapping: aims and methods*. Association Francaise de Géographie Physique. Colloque de CAEN, 141-151.
- CARRARA A., AGNESI V., MACALUSO T., MONTELEONE S., PIPITONE G., REALI C. & SORRISO-VALVO M. (1985) - *Modelli matematici per la valutazione della pericolosità connessa con i fenomeni di instabilità dei versanti*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **10**(2) I, 63-91.
- CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V. & REICHENBACH P. - (1991) - *GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. Earth Surface Processes and Landforms, **16**, 427-445.
- CASAGLI N. & PINI G. (1993) - *Analisi cinematica della stabilità di versanti naturali e fronti di scavo in roccia*. Atti 3° Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori di Geologia Applicata. Potenza. In stampa
- CASAGLI N., PINI G. & TARCHIANI U. (1994) - *Valutazione del rischio di frana nella falesia di Talamone (GR)*. Atti del 4° Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori del Gruppo Geologia Applicata. In stampa
- CASCINI L. & VERSACE P. (1986) - *Eventi pluviometrici e movimenti franosi*. Atti XVI Conv. Naz. di Geotecnica, Bologna, **3**, 171-184.
- CASCINI L. & VERSACE P. (1988) - *Relationship between rainfall and landslide in a gneissic cover*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **1**, 565-570.
- CATENACCI V. (1992) - *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Servizio Geologico Nazionale. Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia, 301pp.
- CHANDLER R.J. & PEIRIS T.A. (1989) - *Further extension to the Bishop & Morgenstern stability charts*. Ground Engineering, May 1989, 33-38.
- CHANDLER R.J. (1984) - *Recent european experience of landslides in over-consolidated clays and soft rocks*. Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, Toronto, **1**, 61-78.
- CHOWDHURY R.N. (1984) - *Recent developments in landslides studies: probabilistic methods*. Proc 4th Symp. on Landslides, Toronto, **1**, 209-228.
- CNR-GNDICI & REGIONE EMILIA-ROMAGNA (1993) - *Atlante dei centri abitati instabili dell'Emilia-Romagna. Inquadramento generale*. CNR, Roma, 66pp.
- COTECCHIA V. (1978) - *Evoluzione dei versanti, fenomeni franosi e loro controllo (P.F. "Conservazione del suolo": S.P. "Fenomeni franosi")*. Mem.Soc.Geol.It., **19**, 29-51.
- COTECCHIA V., LENTI V., SALVEMINI A. & SPILITORO G. (1986) - *Reactivation of the large Buoninvente slide by the Irpinia earthquake of 23 Nov. 1980*. Proc. of the Int.Symp. on "Engineering Geology Problems in Seismic Area", Bari, Geol. Appl. Idrogeol., **21**(4), 217-243.
- CREPELLANI T., NARDI R. & SIMONCINI C. (1988) - *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna, 185 pp.
- CROZIER M.J. (1984) - *Field assessment of slope instability*. In: BRUNSDEN & PRIOR (eds.) "Slope Instability", John Wiley & Sons Ltd., Chichester, chp.4, 103-142.
- CRUDEN D. M. (1991) - *A simple definition of a landslide*. IAEG Bull., **43**, 27-29.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1994) - *Landslides Types and Processes*. In: "Landslides: Investigation and Mitigation". Transportation Research Board. National Academy of Sciences. In press.
- D'ELIA B., ESU F., PELLEGRINO A. & PESCATORE T.S. (1985) - *Some effects on natural slope stability induced by 1980 Italian earthquakes*. Proc. 11th ICSMFE, S.Francisco, **4**, 1943-1949.
- DE GRAFF J., CANUTI P. (1988) - *Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices*. IAEG Bull., **38**, 61-71.

- DEL PRETE M., GIACCARI E. & TRISORIO-LIUZZI G. (1992) - *Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata*. Pubbl. n.841 - GNDICI. 84pp.
- DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE (1992) - *Rischio Idrogeologico*. Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento della Protezione Civile. Ufficio Stampa.
- DRM- - Délégation aux Risques Majeurs (1985) - *Catalogue de mesures de prévention, Mouvements de Terrains*. Plan d'Exposition aux risques. Rapport Administratif et technique provisoire. Premier Ministre. 443 pp.
- DRM- Délégation aux Risques Majeurs (1985) - *Mise en oeuvre des Plans d'Exposition aux Risques naturels prévisibles*. Plan d'Exposition aux risques. Rapport Administratif et technique provisoire. Premier Ministre.
- DRM- Délégation aux Risques Majeurs (1987) - *Clauses réglementaires - Fiches informatives. Mouvements de terrain*. Plan d'Exposition aux risques. Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques. La Documentation Française. 119pp.
- DRM- Délégation aux Risques Majeurs (1987) - *Mesures de prévention. Mouvements de terrain*. Plan d'Exposition aux risques. Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques. La Documentation Française. 529pp.
- DRM- Délégation aux Risques Majeurs (1988) - *Evaluation de la vulnérabilité*. Plan d'Exposition aux risques. Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques. La Documentation Française. 112pp.
- DRM- Délégation aux Risques Majeurs (1990) - *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs*. Secrétariat d'État auprès du Premier ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs. La Documentation Française. 143pp.
- DUTI - Détection et Utilisation des Terrains Instables (1985) - *Rapport final*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 229pp.
- EINSTEIN H.H. (1988) - *Special Lecture: Landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **2**, 1075-1090.
- FALCETTA J.L. (1985) - *Etude cinématique et dynamique de chutes de blocs rocheux*. These, INSA, Lyon.
- FELL R. (1994) - *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Canadian Geotechnical Journal, **31**(2), 261-272.
- FELL R., CHAPMAN T.G. & MAGUIRE P.K. (1991) - *A model for prediction of piezometric levels*. In: R.J. CHANDLER (ed.) "Slope Stability Engineering", ICE, London. 37-42.
- FUKUZONO T. (1985) - Proc. 5th Int. Conf. & Field Workshop on Landslides, Tokio, 145-150.
- GENEVOIS R. & TECCA P.R. (1987) - *Analisi probabilistica della stabilità dei versanti: applicazione per la realizzazione di una carta della pericolosità nella media valle del Fiume Tammaro (BN)*. Atti Convegno "Le Scienze della Terra nella Pianificazione Territoriale", Chieti, Mem. Soc. Geol. It., **37**(1), 157-170.
- GENEVOIS R., ROMEO R.W. & SCARASCIA MUGNOZZA G.M. (1987) - *Un approccio probabilistico all'analisi di stabilità di versanti in roccia*. Geologica Romana, **26**, 262-286.
- GNFG (1987) - *Cartografia della pericolosità connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti*. A cura di CARRARA A., CARTON A., DRAMIS F., PANIZZA M. & PRESTININZI A. Boll. Soc. Geol. It., **106**, 199-221
- GOODMAN R.E. & BRAY J.W. (1976) - *Toppling of rock slopes*. Proc. Speciality Conf. on Rock Engineering for Foundations & Slopes. ASCE, Boulder (Colorado), **2**, 201-234.
- GOODMAN R.E. (1976) - *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*. West Publ. Co., St.Paul (USA). 472pp.
- GOODMAN R.E. (1980) - *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons Ltd., New York, 562 pp.
- GOVI G. (1977) - *Photo interpretation and mapping of landslides triggered by the Friuli earthquake*. IAEG Bull., **15**, 67-72.
- GOVI M. & SORZANA P.F. (1980) - *Landslide susceptibility as a function of critical rainfall amount in Piedmont basins (NW Italia)*. Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, **14**, 43-61.
- GUMBEL E.J. (1967) - *Statistics of extremes*. Columbia University Press, New York.
- HARR M.E. (1987) - *Reliability based design in civil engineering*. Mc Graw Hill Book Co., New York.
- HARTLÉN J. & VIBERG L. (1988) - *General report: evaluation of landslide hazard*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **2**, 1037-1058.
- HEIM A. (1932) - *Bergstruz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth, Zürich, 218pp.
- HOEK E. & BRAY J.W. (1981) - *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London. 357pp.
- HSÜ K. (1975) - *Catastrophic debris stream (sturzstorm) generated by rockfalls*. Bull. Geological Society of America, **86**, 129-140.
- HANSEN A. (1984) - *Landslide Hazard Analysis*. In: BRUNSEN D. & PRIOR D.B. "Slope Stability". John Wiley & Sons. Chp. **13**, 523-602.
- HUDSON J.A. & HARRISON J.P. (1994) - *Principles of Engineering Rock Mechanics*. In press.

- HUMBERT M. (1976) - *Le cartographie en France des Zones Exposées à des Risques liés aux Mouvements du Sol* - Cartes ZERMOS. IAEG Bull., **16**, 80-82.
- HUMBERT M. (1977) - *La Cartographie ZERMOS. Modalités d'établissement des cartes des zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol*. BRGM Bull., Serie II, Sect. III, n.1/2, 5-8.
- HUNGR O. (1981) - *Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements*. PhD Thesis. University of Alberta.
- HUTCHINSON J.N. (1970) - *A coastal mudflow on the London Clay cliffs at Beltinge, North Kent*. Géotechnique, **20**, 412-438.
- HUTCHINSON J.N. (1987) - *Mechanisms producing large displacements in landslides on pre-existing shears*. 1st Sino-British Geol. Conf., Tapei, Memoir of the Geological Survey of China, **9**, 175-200.
- HUTCHINSON J.N. (1988) - *General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **1**, 3-36.
- HUTCHINSON J.N. (1993) - *Some aspects of the morphological and geotechnical parameters of landslides, with examples drawn from Italy and elsewhere*. Atti 2° Conv. Naz. Giovani Ricercatori Geologia Applicata, Viterbo. Geologica Romana (in stampa).
- IVERSON R.M. & MAJOR J.J. (1987) - *Rainfall, groundwater flow and seasonal movement at Minor Creek Landslide, NW California: physical interpretation of empirical relations*. Geol. Soc. Am. Bull., **99**, 579-594.
- JIBSON R.W. (1989) - *Debris flows in Southern Puerto Rico*. Geol. Soc. Am. Spec. Pub., **236**, 1-13.
- JOHN K.W. (1968) - *Graphical stability analysis of slopes in jointed rock*. Jour. Soil Mech Found. Div. Proc. ASCE, **94**, SM2, 497-526.
- KEEFER D.K. (1984) - *Landslides caused by earthquakes*. Bull. Geol. Soc. Am., **95**, 406-421.
- KIRSTEN H.A.D. & MOSS A.S.E. (1985) - *Probability applied to slope design - case histories*. Rock Masses: Modeling of Underground openings. Probability of failure. Fracture of intact rock (edited by C.H. DOWDING). ASCE, New York, 106-121.
- KLUGMAN M.A. & CHUNG P. (1976) - *Slope-stability study of the regional municipality of Ottawa-Carleton, Ontario, Canada*. Ontario Geol. Survey Misc. Paper, **MP 68**, 13pp.
- LEE E.M., MOORE R., BRUNSDEN D. & SIDDLE H.J. (1991) - *The assessment of ground behaviour at ventor, Isle of Wight*. In: R.J. CHANDLER (ed.) "Slope Stability Engineering", ICE, London. 207-212.
- LEGGE 24/02/1992 n.225 - Istituzione del Servizio Nazionale della Protezione Civile.
- LEMOSS L., SKEMPTON A.W. & VAUGHAN P.R. (1985) - *Earthquake loading of shear surface in slopes*. Proc. 11th ICSMFE, S.Francisco, **4**, 1955-1958.
- LERNER D.N. (1986) - *Predicting piezometric levels in steep slopes*. Groundwater in Engineering Geology. Geol. Soc. Eng. Group. Spec. Pubbl., **3**, 327-333.
- LUCINI P. (1969) - *Un metodo grafico per la valutazione della franosità*. Mem. Note Ist. geol. Appl., Napoli, **2**, 1-14.
- MAIONE U. & MOISELLO U. (1981) - *Appunti di idrologia*. La Goliardica Pavese. 2° Edizione., 251pp.
- MAJOR G., ROSS-BROWN D. & KIM H.J. (1978) - *A general probabilistic analysis for three-dimensional wedge failures*. Proc. 19th U.S. Rock Mech. Symp, Mackay School of Mines, Nevada, 45-56.
- MARKLAND J.T. (1972) - *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected*. Imperial College Rock Mechanics Research Report, **19**.
- MATHESON G.D. (1983) - *Rock stability assessment in preliminary site investigations - Graphical Methods*. Transport and Road Research Laboratory Report, **1039**, 30 pp.
- MATHESON G.D. (1989) - *The collection and use of field discontinuity data in rock slope design*. Q. J. Eng. Geol., **22**, 19-30.
- MATICHARD Y. & POUGET P. (1988) - *Pluviométrie et comportement de versants instables*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **1**, 725-728.
- McMAHON B.K. (1975) - *Probability of failure and expected volume of failure in high slopes*. Proc. 2nd Australia - New Zealand Conf. Geomechanics, Brisbane, 308-317.
- MORGAN G.C., RAWLINGS G.E. & SOBKOWICZ J.C. (1992) - *Evaluating total risk to communities from large debris flows*. In: Geotechnique and natural hazard. BiTech. Publishers, Vancouver B.C., 225-236.
- MORGENSTERN N.R. (1985) - *Geotechnical aspects of environmental control*. Proc. 11th ICSMFE, S.Francisco, **1**, 155-186.
- MULDER H.F.H.M. (1991) - *Assessment of landslide hazard*. Geograph. Sci. Fac., Elinkwijk Utrecht, 150pp.
- NARDI R., PUCCINELLI A., D'AMATO AVANZI G. & TRIVELLINI M. (1987) - *Valutazione del rischio da frana in Garfagnana e nella Media Valle del Serchio (Lucca). 2): Carta geologica e carta della franosità degli elementi "Sillico", "Castelnuovo Garfagnana", "Cascio", "Castelvechio Pascoli", "Gallicano", "Barga", "Fornaci di Barga" e "Ghivizzano" (scala 1:10.000)*. Boll. Soc. Geol. It., **106**, 819-832.

- NERC - NATIONAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL (1975) - *Flood studies report*. Vol.1.
- PANIZZA M. (1988) - *Geomorfologia Applicata*. La Nuova Italia Scientifica.
- PASQUERO M. (1987) - *Dinamica della caduta massi rocciosi nello studio della stabilità dei versanti*. Tesi di Laurea, Politecnico di Torino.
- PELLEGRINO A., GUERRICCHIO A., LAZZARI S., NORA B. & VALENTINI G. (1993) - *La previsione delle frane ed i piani di emergenza*. CNR-GNDICI. Rapporto interno.
- PERROT A. (1988) - *Cartographie des risques de glissements en Lorraine*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **2**, 1217-1222.
- PITEAU D.R. & CLAYTON R. (1977) - *Discussion on paper: "Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data" of Cundall P.A., Voegele M.D. & Fairhurst C.* Proc 16th Symp. on Rock Mechanics. University of Minnesota. ASCE. 62-63.
- PITEAU D.R. & PECKOVER F.L. (1978) - *Engineering of Rock Slopes*. In: Schuster R. L. & Krizek R. J. ed., *Landslides analysis and control*. Transportation Research Board, Special Rept. **176**, Nat. Acad. of Sciences. 218-225
- PRIEST S.D. & BROWN E.T. (1983) - *Probabilistic analysis of rock slopes*. Trans. Inst. Min. Metall., **A92**(1), A1-A12.
- PROVINCIA DI MODENA & GNDICI U.O.2.9 (1994) - *Proposta di una carta del rischio da frana per il centro abitato di Sestola (Appennino modenese)*. CNR-GNDICI - Linea 2 "Previsione e prevenzione di eventi franosi a grande rischio" - Programma Speciale SCAI. 37pp.
- PROVINCIA DI MODENA & GNDICI U.O.2.9 (1994) - *Proposta di una carta del rischio da frana per il centro abitato di Lama Mocogno (Appennino modenese)*. CNR-GNDICI - Linea 2 "Previsione e prevenzione di eventi franosi a grande rischio" - Programma Speciale SCAI. 46pp.
- RADBRUCH-HALL D.H., COLTON R.B., DAVIES W.E., LUCCHITTA I., SKIPP B.A. & VARNES D.J. (1982) - *Landslide overview map of the Conterminous United States*. USGS Prof. Papers 1183, US Gov. Printing Office, 25pp.
- RENNOLLS K., CARNELL R. & TEE V. (1980) - *A descriptive model of the relationships between rainfall and soil water table*. Journal of Hydrology, **47**, 103-114.
- RITCHIE A.M. (1963) - *Evaluation of rockfall and its control*. Highway Research Record, **17**, 13-28.
- ROMANA M. (1985) - *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics. Zacatecas. 49-53.
- SANGREY D.A., HARROP-WILLIAMS W., KLAIBER J.A. (1984) - *Predicting groundwater response to precipitation*. J. Geotech. Eng.ing, ASCE, **110**(7), 957-975.
- SASSA K. (1988) - *Special Lecture: Geotechnical model for the motion of landslides*.- Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides, Lausanne, **1**, 37-55.
- SASSA K. (1992) - *Access to the dynamic of landslides during earthquakes by a new cyclic loading high-speed ring apparatus*. 6th Int. Symp. on Landslides, Christchurch (New Zealand), **3**, in press.
- SCAVIA C., BARLA G. & VAI L. (1988) - *Analisi di tipo probabilistico*. Atti dei cicli di Conferenze "Meccanica e Ingegneria delle Rocce". Politecnico di Torino, **12**, 1-27.
- SCHEIDEGGER A. E. (1973) - *On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides*. - Roch Mechanics, **5**, 231-236.
- SEED H.B. (1968) - *Landslides during earthquake due to soil liquefaction*. Terzaghi lecture, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, **94**, SM5.
- SEED H.D. & IDRIS I.M. (1967) - *Liquefaction of saturated sands during cyclic loading*. Proc. ASCE, **92**, SM6, 69-84.
- SKEMPTON A.W. & DELORY F.A. (1957) - *Stability of natural slopes in London Clay*. Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech., London, **2**, 378-381.
- SKEMPTON A.W., LEADBEATER A.D. & CHANDLER R.J. (1989) - *The Mam Tor landslide, North Derbyshire*. Phil. Trans. Royal Society London, **A 329**, 503-547.
- STARR C. (1969) - *Social benefit versus technological risk; what is our society willing to pay for safety?* Science, **165**, 1232-1238.
- TALOBRE J. (1957) - *La Mécanique des Roches appliquée aux Travaux Publics*. Dunod, Paris. 444pp.
- THORNTHWAITE C.W. (1948) - *An approach towards a rational classification of climate*. Geogr. Rev. American Geogr. Society, **55**, 94.
- TOBUTT D.C. & RICHARDS E.A. (1979) - *The reliability of earth slopes*. Int. Journal of Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, **3**(4), 323-354.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (1982) - *Goals and tasks of the landslide part of a ground failure hazard reduction program*. U.S. Geological Survey Circular 880, 49pp.

- UNESCO (1973-1979) - *Annual summaries of information on natural disasters*. 1971-75. Paris, UNESCO.
- UNO T., ARAI H. & SHIBAYAMA M. (1977) - *Models for predicting ground water level*. 11th ICSMFE, **3**, 495-598.
- VALERA J.E. & DONOVAN W.C. (1977) - *Soil Liquefaction Procedures. A review*. J. Geol. Eng. Div. ASCE, **103**.
- VARNES D.J. & IAEG Commission on Landslides (1984) - *Landslide Hazard Zonation - a review of principles and practice*. UNESCO Paris. 63pp.
- VARNES D.J. (1978) - *Slope movements. Types and processes*. In: SCHUSTER R.L. & KRIZKER R.J. (eds) "Landslides: analysis and control". Nat. Acad. of Sciences, Trasp. Res. Board, Washington, Special Report **176**, 11-35.
- VOIGHT B. (1988) - *Material science law applies to time forecast of slope failure*. Landslide News, **3**, 8-11.
- WHITMAN R.V. (1984) - *Evaluating calculated risk in geotechnical engineering*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, **110**(2); 145-188.
- WIECZORECK G.F. (1982) - *Map showing recently-active and dormant landslides near La Honda, Central Santa Cruz Mountains, California*. USGS Misc. Field Studies. Map 1422. US Gov. Printing Office, Washington DC, Scale 1:4,800.
- WIECZORECK G.F. (1984) - *Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction*. IAEG Bull., **21**(3), 337-342.
- WIECZOREK G.F. & SARMIENTO J. (1988) - *Rainfall, piezometric levels and debris flows near La Honda, California, in storms between 1975 and 1983*. In: "Landslides, floods and marine effects of the storm of Jan 3-5, 1982, in the S.Francisco Bay region, California". USGS Prof. Papers., **1434**, 43-63.
- WP/WLI - International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1990) - *A suggested method for reporting a landslide*. IAEG Bull., **41**, 5-12.
- WP/WLI - International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1991) - *A suggested method for a landslide summary*. IAEG Bull., **43**, 101-110.
- WP/WLI - International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1993) - *A suggested method for describing the activity of a landslide*. IAEG Bull., **47**, 53-57.
- WP/WLI - International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1994) - *Multilingual Glossary for Landslides*. In press.
- WRIGHT R.H., CAMPBELL R.H. & NILSEN T.H. (1974) - *Preparation and use of isopleths maps of landslide deposits*. Geological Society of America. Geology, **2**(10), 483-485.
- YONG R.N., ALONSO E., TABBA M.M. & FRANSHAM P.B. (1977) - *Application of risk analysis to the prediction of slope instability*. Canadian Geotechnical Journal, **14**(4), 540-543.