

# APPUNTI DI GEOLOGIA APPLICATA

## Capitolo 4

### LA DINAMICA DEI VERSANTI

A Cura di V. Francani e C. Rampolla

#### **1. Premessa**

Il territorio italiano è soggetto a un esteso stato di dissesto idrogeologico, che consiste in una rapida modificazione del rilievo per l'erosione delle acque della rete idrografica superficiale (dissesto idrogeologico in senso stretto) e ad opera delle acque sotterranee, spesso causa di frane di piccole o grandi dimensioni (connesse soprattutto a debolezza del sistema terreno-acque sotterranee). A questa propensione al dissesto si è cercato di porre rimedio attuando una serie di prescrizioni legislative, oggi raccolte in una legge per la difesa del suolo che costituisce un buon punto di partenza per il risanamento del territorio. In tale prospettiva è opportuno che si proceda con una costante integrazione tra le esperienze dell'idraulica, dell'idrogeologia e della geotecnica; in questo scritto si vuole soprattutto evidenziare il contributo della geologia e dell'idrogeologia applicata, tenendo ben presente che esse formano solo una parte delle discipline che concorrono alla soluzione dei più importanti problemi in questa complessa materia. Nel contesto delle discipline che si occupano del territorio appare di primaria importanza che gli esperti dell'ambiente sappiano correttamente svolgere un ruolo decisivo nell'impostazione dei programmi per la conservazione del suolo. Gli studi tendono ad un traguardo ben preciso: identificare prima dell'evento franoso, che potrebbe comportare vittime e danni irreparabili, il luogo e l'entità del dissesto. Tale operazione permette di elaborare progetti di difesa con opere di ingegneria e in caso di irreparabilità, almeno lo sgombero della popolazione che ne può essere colpita. La prima fase per il riconoscimento di una possibile frana comporta lo studio geologico di superficie, che consente di visualizzare l'andamento delle discontinuità e quindi di comprendere come avviene il moto dei blocchi che compongono il corpo di frana. Su tale problematica in tutte le nazioni europee e negli Stati Uniti sono stati eseguiti studi approfonditi, che hanno portato all'elaborazione di una metodologia di prevenzione basata su una cartografia della dissestabilità del territorio tendente a porre in evidenza il diverso grado di pericolo che incombe sulle aree esaminate. A questa cartografia viene unito un sistema di controllo e di allarme. Altri aspetti, quali quelli agronomici e pedologici o legati alla subsidenza e alle valanghe, sono trattati in modo più differenziato.

In questo elaborato si esamineranno gli studi necessari per affrontare i pericoli connessi alle frane e all'erosione accelerata dei versanti, che sono quelli di più elevato interesse sociale ed economico nel nostro paese, dando particolare spazio agli aspetti che permettono di comprendere le modalità di evoluzione dei dissesti e di intraprendere una corretta pianificazione per la difesa dei versanti.

#### **Definizione frana:**

[www.engeology.eu](http://www.engeology.eu)

Si intende lo spostamento naturale verso il basso e verso l'esterno, più o meno rapido, di cospicue masse di materiali terrosi e rocciosi secondo la classificazione di Varnes (1978), escludendo subsidenza, valanghe e slavine. Infatti sotto l'effetto della gravità, ogni volume di terreno o roccia tende a portarsi da una posizione a più elevata energia potenziale ad una a energia più bassa.

Si riportano di seguito le principali definizioni suggerite da diversi autori:

- i. "rapido spostamento di una massa di roccia, terreno residuale o sedimenti, adiacenti ad un pendio, con movimento del centro di gravità della massa stessa verso il basso e verso l'esterno" [Terzaghi, 1950]
- ii. "movimento verso il basso e verso l'esterno di materiali (rocce e terreni naturali, materiali di riporto, o combinazioni di più materiali) formanti un pendio" [Varnes, 1958]
- iii. "movimento di masse di terreno o di roccia lungo un pendio, risultante da una rottura per taglio ai limiti della massa in movimento" [Skempton & Hutchinson, 1969]

## 1.1. Legislazione ambientale

Il dissesto idrogeologico rappresenta in Italia un problema di notevole rilevanza e attualità, si pensi che il rischio frane e alluvioni interessa praticamente tutto il territorio nazionale (il 70% del totale dei comuni italiani, di cui 1.700 a rischio frana, 1.285 a rischio di alluvione e 2.596 a rischio sia di frana sia di alluvione).

Per fronteggiare questi problemi sono state elaborate una serie di normative per la prevenzione del rischio idraulico e idrogeologico e la difesa del suolo, della popolazione e degli altri elementi vulnerabili. Si riportano i riferimenti principali:

- L. 183/1989 norme per la difesa del suolo e istituzione autorità di bacino (in seguito all'alluvione Valtellina '87)
- L. 267/1998 Conversione in legge del DL 180/1998 "Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi in Campania"
- L. 365/2000 Conversione in legge del DL 279/2000 "interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile, nonché a favore delle zone della regione Calabria danneggiate dalle calamità idrogeologiche di settembre ed ottobre 2000".
- D.lgs.152/1999 disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento
- Direttiva 2000/60 direttiva quadro in materia di acque
- Direttiva 2007/60 direttiva relativa alla valutazione e gestione dei rischi di alluvione
- D.Lgs.152/2006 - Testo Unico Ambientale

Negli ultimi vent'anni il riferimento che permane è la legge 183/89, che propone obiettivi significativi quali: il risanamento delle acque, la razionale gestione e fruizione delle risorse idriche e la tutela degli aspetti ambientali. Tale legge ha introdotto in Italia il concetto di **bacino idrografico** al fine di poter superare la frammentazione delle competenze tra enti e amministrazioni differenti, permettendo l'instaurarsi di collaborazioni tra Stato e Regioni.

Il bacino idrografico (secondo la L. 183/89) è definito come il territorio dal quale le acque pluviali o di fusione delle nevi e dei ghiacciai, defluendo in superficie, si raccolgono in un determinato corso d'acqua, ivi compresi i suoi rami terminali, con le foci in mare ed il litorale marittimo prospiciente. In Italia la legge quadro europea è stata recepita tramite il decreto legislativo n. 152 del 3 Aprile 2006, che all'articolo 64 ha ripartito il territorio nazionale in otto distretti idrografici prevedendo per ogni distretto la stesura di un piano di gestione ed attribuendone la competenza alle autorità di distretto idrografico. Negli ultimi decenni lo Stato, attraverso il C.N.R. con la collaborazione delle Università, ha fatto sì che le istituzioni periferiche (Regioni, Province e Comuni) potessero disporre di **banche-dati** che fornissero da una parte un quadro conoscitivo del territorio sufficientemente esaustivo e dall'altra organi tecnici di riferimento e controllo, in grado di affiancare le Amministrazioni nella corretta gestione dei territori di competenza.

E' in questa ottica che si inseriscono il **Progetto I.F.F.I.** (Inventario Fenomeni Franosi Italiani), il **Programma S.C.A.I.** (Studio dei Centri Abitati Instabili), il **Progetto A.V.I.** (Abitati Vulnerabili Italiani), i **Piani regolatori generali comunali – PRGC** (servono a prevedere le caratteristiche di sviluppo della popolazione e dell'economia sul territorio comunale ed, in base a questi, fornire le linee guida' per la realizzazione delle opere pubbliche e per gli interventi dei privati), i **Piani di Governo del Territorio – PGT** (strumento urbanistico introdotto in Lombardia dalla legge regionale lombarda n.12 dell'11 marzo 2005. Il PGT ha sostituito il Piano Regolatore Generale come strumento di pianificazione urbanistica a livello comunale e ha lo scopo di definire l'assetto dell'intero territorio comunale) e soprattutto l'istituzione delle **Autorità di Bacino regionali** (si tratta di soggetti autonomi di diritto pubblico, a composizione mista, che costituiscono la sede del coordinamento sul territorio delle funzioni statali, regionali e provinciali).

Esistono 6 Autorità di bacino di rilievo nazionale (Po, Adige, Alto Adriatico (Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, Arno, Tevere e Liri-Gariagliano-Volturno) e 16 Autorità di rilievo interregionale (11 sul versante adriatico e 5 sul versante tirrenico). Tutti i bacini idrografici che non rientrano nelle precedenti categorie sono classificati come regionali (cfr. Sicilia).



## **2. La classificazione delle frane**

Come si è detto nella premessa si tende a distinguere i dissesti idrogeologici ( quelli in cui il ruolo preponderante è giocato dall'azione delle acque superficiali) dalle frane.

Tale distinzione in molte circostanze non appare del tutto valida, considerando che il ruolo delle acque superficiali è quasi sempre di primo piano, si dovrà quindi accettare tale definizione come strumento di lavoro e primo orientamento. Inizialmente prenderemo in considerazione le frane e le molteplici classificazioni sviluppate nel tempo.

Di grande praticità è la classificazione di *Desio (1973)*, basata sulle modalità di sviluppo del movimento, che distingue cinque tipi fondamentali di frane:

- Crollo
- Scivolamento
- Scoscendimento
- Colamento
- Smottamento

Tale classificazione ha consentito una prima elaborazione degli interventi sulle frane, portata a termine da una commissione nazionale negli anni '60, di grande interesse ed utilità pratica.

In seguito sono state elaborate altre classificazioni per le frane, delle quali la più attuale e considerata è quella di *Varnes (1978)*, che si basa sul tipo di movimento e sul tipo di materiale coinvolto. Questa classificazione fu tradotta e commentata poi da Carrara, D'Elia e Semenza (1983).

Considerando le modalità con cui la frana si sviluppa la classificazione di Varnes si articola in sei classi principali:

- Crollo
- Ribaltamento
- Scivolamento traslazionale
- Scivolamento rotazionale ( scoscendimento)
- Espansione laterale
- Colata
- Frane complesse (combinazione di più tipi)

Ognuna di queste sei classi è poi suddivisibile in sottoclassi a seconda che il movimento coinvolga *blocchi di roccia, detriti o porzioni di terreno*, per un totale di 18 tipi di frane possibili.

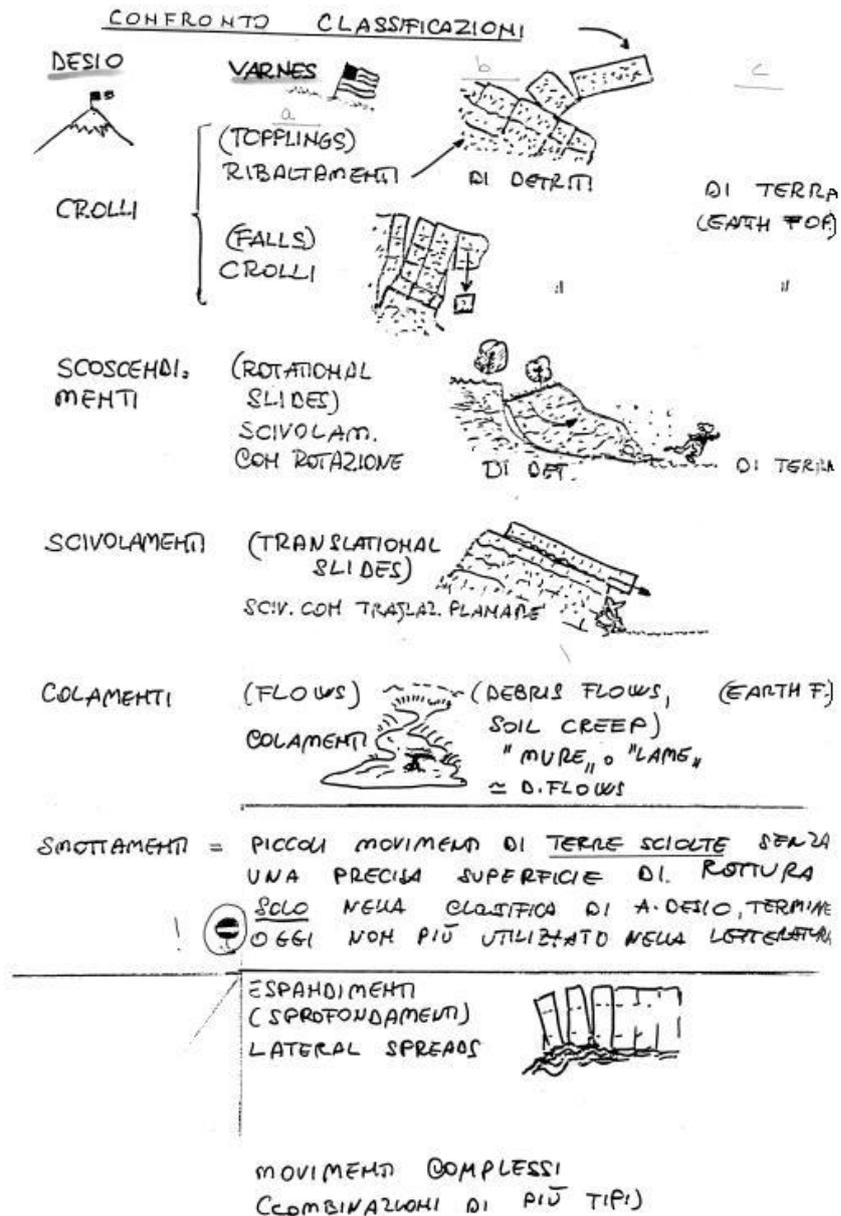


Figura - Confronto tra la classificazione di Desio (1973) e di Varnes (1978)

Prima di descrivere nel dettaglio i diversi tipi di frane secondo la classificazione di Varnes (1978) è utile descrivere brevemente le cause di un movimento franoso.

Si distinguono due tipologie di cause di un dissesto: **predisponenti** e **scatenanti**.

**Cause predisponenti:** cause proprie dell'ambiente naturale, cioè dovute alle caratteristiche litologiche, strutturali, tessiturali e alla giacitura.

**Cause scatenanti:** dovute a precipitazioni intense, attività sismica, sollecitazioni cicliche, sovraccarichi, rimozione supporto laterale e variazioni piezometriche ( $\Delta u$ )

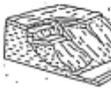
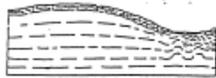
L'instabilità si verifica quando i fattori che controllano l'evoluzione del rilievo portano il versante a un punto di crisi, che può dipendere :

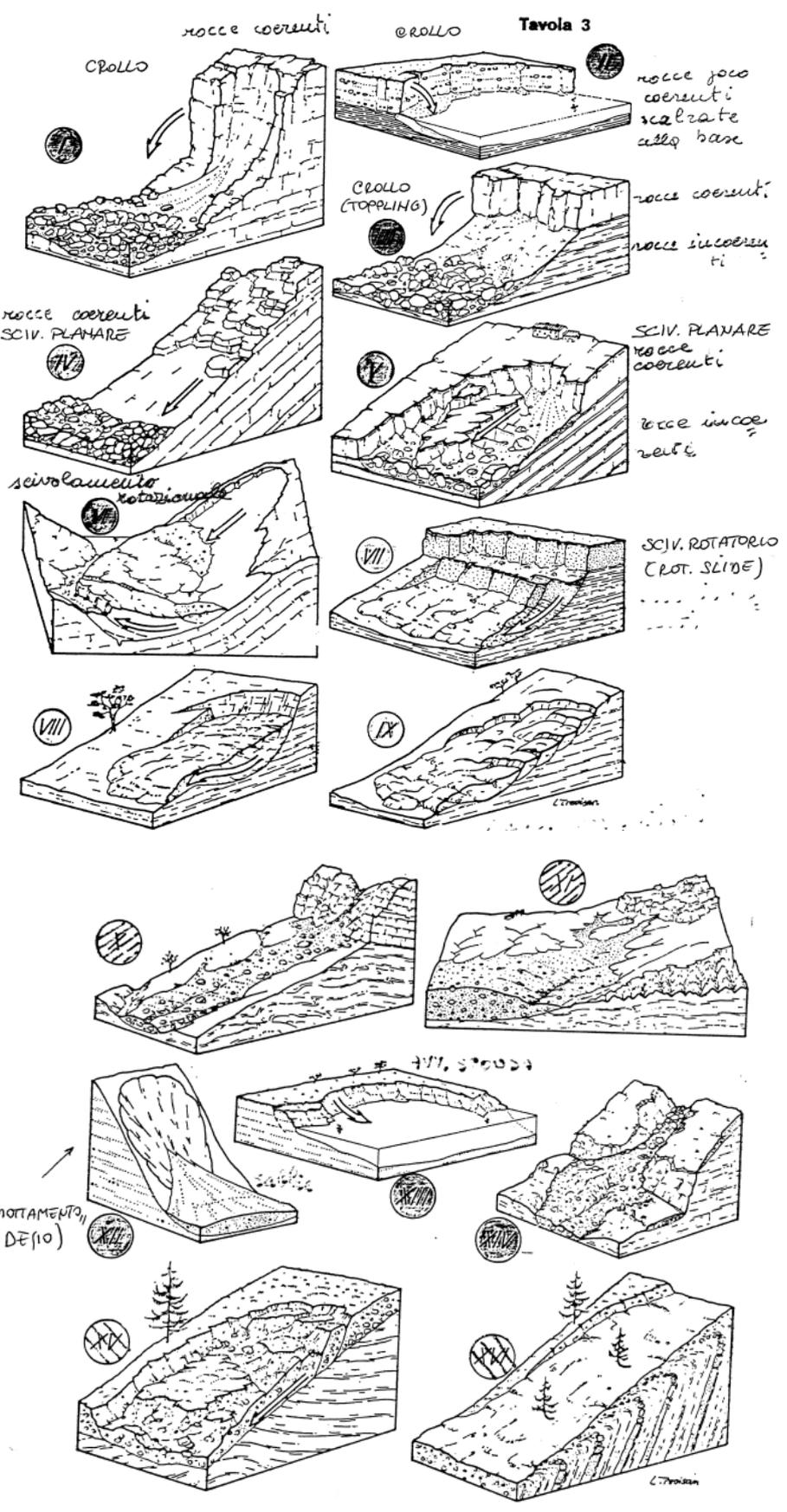
- a) dall'invasione di un ambiente su quelli contermini
- b) dal superamento delle condizioni di equilibrio compatibili con le caratteristiche tecniche dei terreni (ad esempio delle pendenze massime tipiche dei diversi terreni)
- c) dalla connessione per un evento accidentale o per azioni antropiche, di due ambienti prima separati, che porti i fenomeni che agivano solo su alcune porzioni del territorio a svilupparsi contemporaneamente sulla stessa area.

Un esempio dell'evento a) può essere il caso di una falda di detrito alimentata da fenomeni di crollo lungo una parete rocciosa, che finisca per invadere un'area in forte erosione, riducendo la sezione di flusso di un fiume. Questo fatto può determinare il temporaneo arresto dell'erosione e una sua successiva ripresa con piene molto dannose una volta che lo sbarramento naturale viene distrutto. Un esempio dell'evento b) è costituito dal superamento della massima altezza compatibile con la stabilità del versante, quando un corso d'acqua incide profondamente una valle; in questo caso si sviluppa una frana. Infine, il caso c) può essere rappresentato dall'apertura di una strada che pone in connessione un'area a prevalente deposizione (ad esempio una falda di detrito soggetta a una sensibile alimentazione di materiali provenienti sia dal trasporto operato da acque non incanalate sia da crolli di massi dalle pareti rocciose) con una a prevalente erosione; lungo la strada potremo ad esempio avere il passaggio di volumi d'acqua o di detriti di entità tale da compromettere la stabilità del versante.

### **Classificazione movimenti franosi di Varnes :**

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	Rocce lapidee	Terre sciolte	
		grossolane	fini
<b>Crollo ( Falls)</b>	Crolli	Crolli di detriti	Crolli di terre (earth falls)
<b>Ribaltamento (topplings)</b>	Rib. di roccia	Rib. di detriti	Rib. di terra
<b>Scivolamento rotazionale – scoscendimento (rotational slides)</b>	scoscendimenti di roccia (Rock slumps)	Scosc. di detriti	Scosc. di terra
<b>Scivolamento traslazionale, o scivolamento in s.s. (translational slides)</b>	Sc. di roccia	Sc. di detriti	Sc. di terra
<b>Espansione laterale (lateral spreads)</b>	Esp. di roccia	Esp. di detriti	Esp. di terra
<b>Colata ( flows)</b>	C. di roccia (deep creep)	C. di detriti (debris flow)	C. di terra
		Soil creep	
<b>Frane complesse</b>			

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	ROCCIA	DETRITI	TERRA
● CROLLO	crollo di massi 	crollo di detriti	crollo di terra
● RIBALTAMENTI	ribaltamento di colonna di roccia 	ribaltamento di detriti 	ribaltamento di terra
● COLAMENTO SLITTAMENTO	traslazionale: slittamento di roccia 	scivolamento di detriti	slittamento di terra 
	traslazionale: scivolamento di blocchi di roccia 	slittamento di detriti 	scivolamento di blocchi detriti 
● ESPANSIONE PROFONDA LATERALE	sprofondamento di blocchi di roccia 		sprofondamento di terra 
● COLATE	colata di roccia 	colata di detriti 	colata di sabbia 
		soliflusso  replazione di suolo  valanga di detriti  colata di blocchi detritici 	colata di terra 
● FENOMENI COMPLESSI	srotolo di roccia - colata detritica - valanga di detriti 	scivolamento e ribaltamento di roccia  scivolamento e crollo di roccia 	rigonfiamento di versante  sprofondamento - colata di terra 

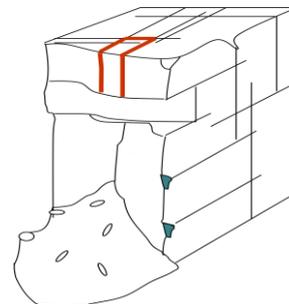


Principali aspetti morfologici delle frane

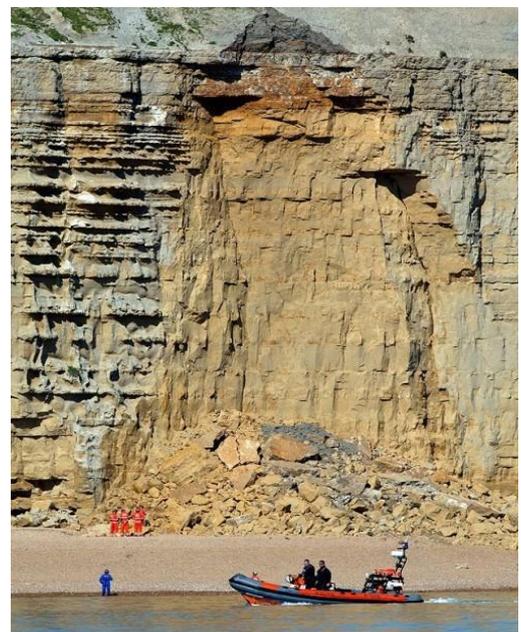
a. **Frane di crollo (fall)**

→ In roccia ( rock fall)

→ In terra sciolta ( debris fall)

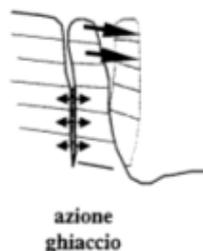
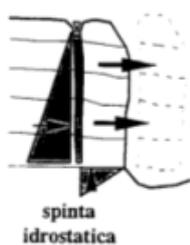


Sono frane caratteristiche di pendii estremamente ripidi, con pareti subverticali. I blocchi di roccia, più raramente di terreno, si staccano dal versante e cadono per gravità; la massa di materiale coinvolto si muove prevalentemente in aria. Il distacco del materiale può derivare o dalla presenza di superfici di frattura che si sviluppano in risposta a tensioni dovute alla gravità oppure allo scalzamento che si può manifestare alla base del pendio in seguito all'azione del moto ondoso o del vento. Lo sviluppo delle fratture entro la roccia è favorito dalla pressione che l'acqua di infiltrazione esercita sulle pareti delle stesse fratture. Quando si supera il punto di equilibrio dell'ammasso, ovvero quando lo stesso non è più in grado di autosostenersi, non avendo più sufficiente compattezza o non più sostenuto alla base, si verifica il crollo. Il materiale prodotto dal crollo può formare un detrito di falda ammassato contro il versante oppure, nel caso sia dotato di maggiore mobilità, può costituire lobi o lingue *di detrito con confini più ampi*.



**Cause predisponenti:** assetto geologico - strutturale e litologia.

**Cause scatenanti:** pressione idrostatica all'interno delle discontinuità, crioclastesi (gelo-disgelo), bioclastesi (radici delle piante), sottoescavazione, scalzamento al piede (corsi d'acqua o moto ondoso) e azione eolica.



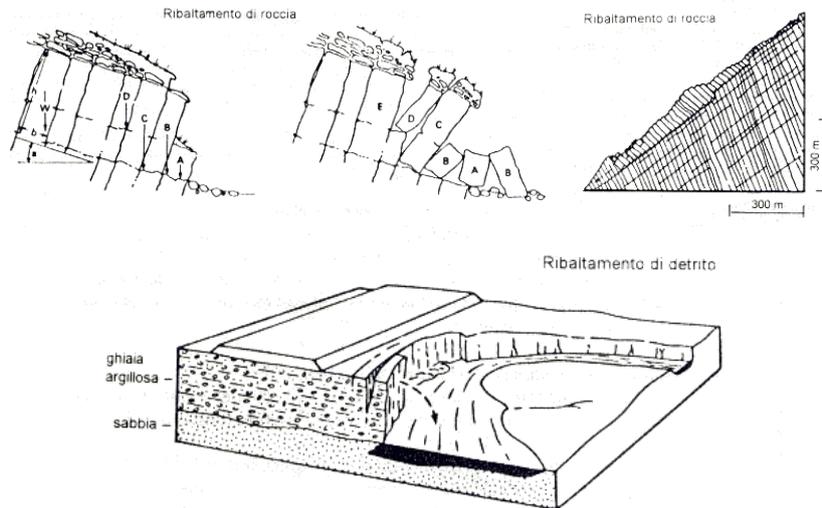
Esempi di cause scatenanti

**b. Frane di ribaltamento  
(toppling)**

→ In roccia (rock topple o toppling)

→ In terra sciolta ( debris topple)

Queste frane si generano quando si ha la rotazione attorno ad un punto di blocchi di roccia o terreno in seguito all'azione della forza di gravità, delle spinte esercitate da blocchi adiacenti o dell'acqua presente nelle fratture.



Avvengono quasi esclusivamente in roccia, ed in particolare si verificano quando le discontinuità sono disposte a reggi poggio con inclinazione prossima alla verticale.

Questo particolare assetto geostrutturale determina la suddivisione dell'ammasso roccioso in blocchi nei quali il baricentro cade al di fuori dei blocchi stessi. Se il movimento non è frenato da un ostacolo può evolvere in un crollo o in uno scorrimento.

Nei detriti sono molto rare, ma comunque possibili.



**Cause predisponenti:** assetto geologico - strutturale e litologia.

**Cause scatenanti:** pressione idrostatica all'interno delle discontinuità, crioclastesi (gelo-disgelo), bioclastesi (radici delle piante) e scalzamento al piede (corsi d'acqua o moto ondoso).

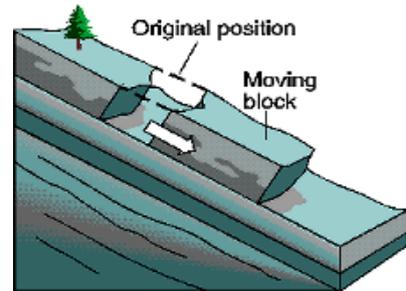
### c. Frane di scivolamento

In questo tipo di frane si verifica lo slittamento di materiale lungo una superficie ben definita che può essere piana o curva. La morfologia della superficie determina il tipo di movimento che può essere di traslazione (piana) o di rotazione (curva). Si verificano quasi sempre in versanti costituiti da strati disposti a franappoggio, facenti parte di formazioni stratigrafiche eterogenee.

- **Frane di scivolamento per traslazione (slide)** → In roccia = rock slide  
→ in terra sciolta = debris slide

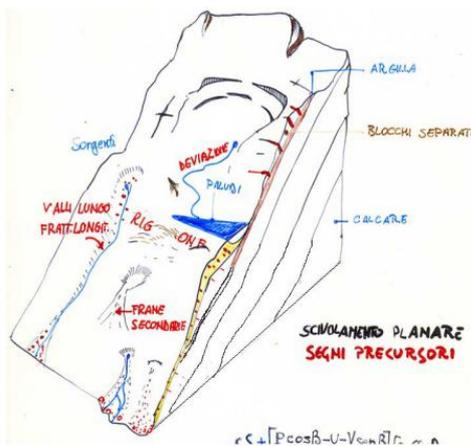
Questo tipo di frana coinvolge un singolo blocco o più blocchi che costituiscono però un insieme omogeneo poco deformato.

Il movimento avviene lungo una superficie di debolezza, che può essere rappresentata da una faglia, da un giunto di fessurazione o di stratificazione, un orizzonte debole, un limite tra roccia e detrito o tra strati di diversa composizione litologica.



**Cause predisponenti:** presenza di un livello di debolezza, elevata pendenza del versante.

**Cause scatenanti:** eventi meteorici intensi, sollecitazioni sismiche e scalzamento al piede (corsi d'acqua)

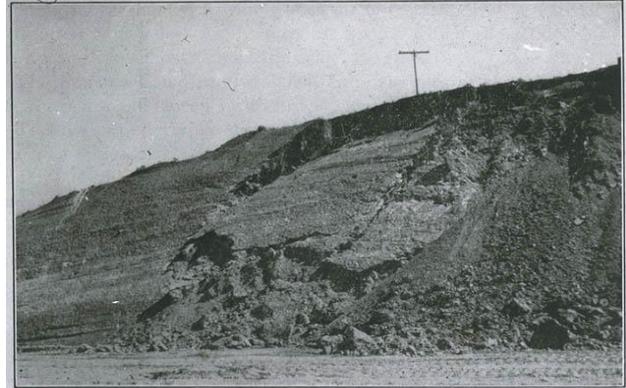
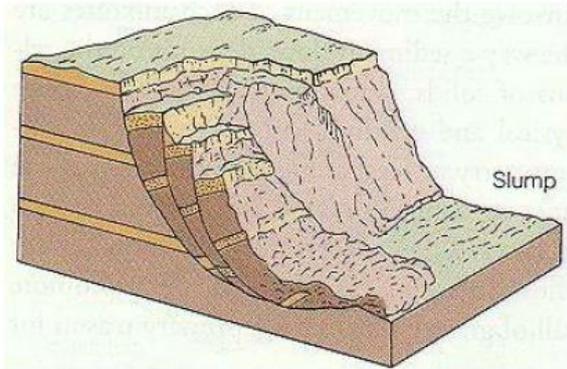


Nelle figure esempi di scivolamento planare. La figura a sinistra mostra tutti i sintomi precursori del collasso del versante per scivolamento. Nelle due foto: a) in alto i sintomi di movimento nei livelli superiori del terreno (smottamenti e frane secondarie), b) in basso si riconoscono le fratture verticali parallele al pendio che interessano l'ammasso roccioso in frana e il proseguimento sul versante sotto forma di fessure nel terreno e rigonfiamenti

- **Frane di scivolamento per rotazione o scoscendimento (slump)**

- In roccia = rock slump
- in terra sciolta = debris slump

In questo tipo di frana il movimento avviene lungo una superficie curva ed ha un comportamento rotazionale. Sono frane frequenti, che avvengono sia in roccia che terreni.



**Cause predisponenti:** presenza di un livello di debolezza.

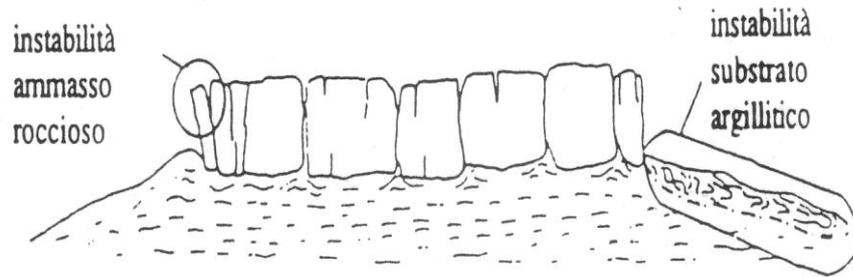
**Cause scatenanti:** eventi meteorici intensi, sovraccarichi sulla sommità del pendio, sollecitazioni sismiche e scalzamento al piede (corsi d'acqua)



#### **d. Frane di espansione laterale ( lateral spreads)**

Sono frane dovute ad una distensione che si genera fra blocchi rocciosi o di terra sciolta in seguito allo sviluppo di sforzi di taglio. Si verifica essenzialmente in rocce sovrapposte a materiale plastico. Si possono riconoscere due modalità evolutive:

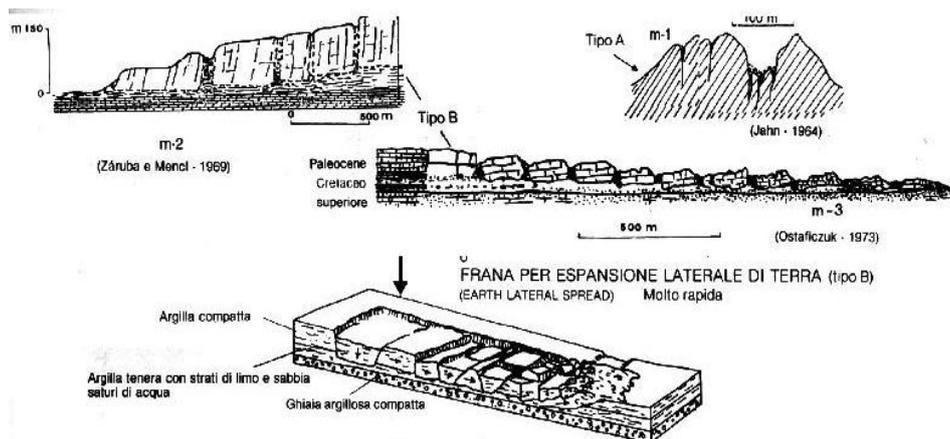
- Movimento legato a fenomeni distensivi che generano una non ben definita superficie di taglio. Può avvenire anche in corrispondenza di una zona a comportamento plastico.
- Il movimento coinvolge materiale coerente, sia in roccia che terreno, in seguito al comportamento plastico del materiale sottostante.



In pratica la massa rigida esercita una pressione sui terreni plastici sottostanti che tendono a refluire lateralmente provocando il crollo della massa rigida.

Il meccanismo di rottura è comunque complesso ed include rotazioni, traslazioni e colamenti.

- **Cause predisponenti:** sovrapposizione di materiale a comportamento rigido (roccia) su materiale a comportamento plastico (argilliti)
- **Cause scatenanti:** non esistono vere e proprie cause scatenanti; le stesse cause predisponenti determinano il verificarsi del fenomeno su lunghi archi di tempo. Piogge intense e sollecitazioni sismiche (con conseguente fluidificazione del materiale plastico) possono sicuramente accelerare il processo.

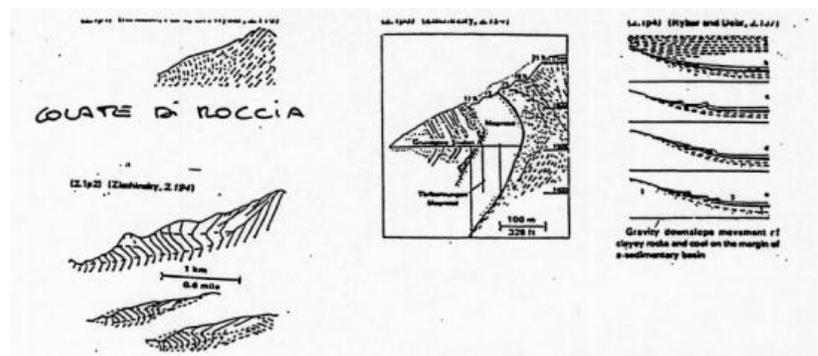


## e. Frane di colamento (flows)

Le frane di colamento hanno caratteristiche e modalità evolutive differenti a seconda che avvengano in roccia, in detriti o terreni.

- Frane di colamento in roccia ( flow in bedrock)

Si tratta di vere e proprie deformazioni plastiche che coinvolgono talvolta interi pendii, i quali si muovono con grande lentezza ma continuità, come un liquido molto viscoso. Generalmente non esiste un limite netto tra la zona di frana e

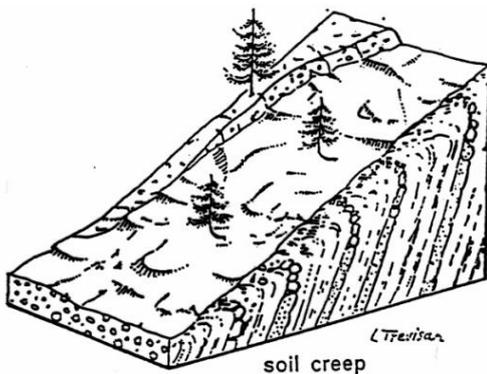


quella che non subisce movimento. Spesso si possono osservare nicchie irregolari e linee di frattura frastagliate che identificano superfici di distacco parziali e frammentarie. Il piano di scorrimento non è ben definito e i tipi litologici coinvolti sono formazioni prevalentemente argilliti che, marnose o filladiche.

- Frane di colamento in terre sciolte o detriti

Le colate detritiche o in terreni sciolti sono **flussi viscosi** di terreno sciolto fluidificato senza vere e proprie superfici di scivolamento; si sviluppano spesso lungo le aste torrentizie, dando luogo a trasporti in massa di dimensioni eccezionali, grazie alla notevole capacità di rimobilizzazione del materiale che contraddistingue il fenomeno

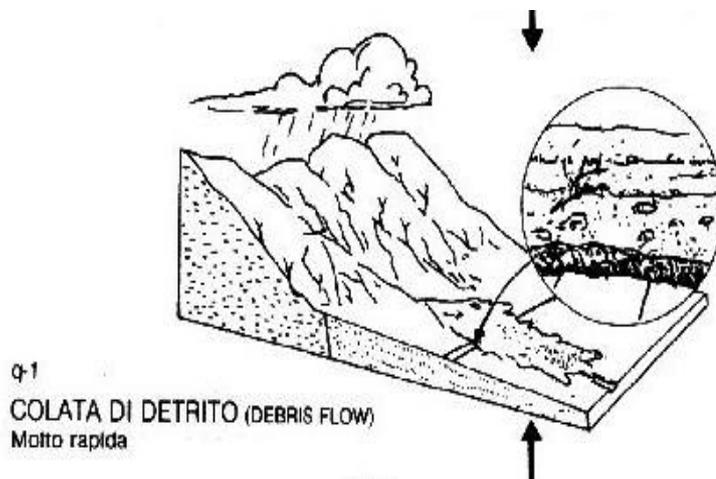
- **Cause predisponenti:** elevate pendenze, disponibilità di materiale mobilizzabile
- **Cause scatenanti:** piogge intense e prolungate



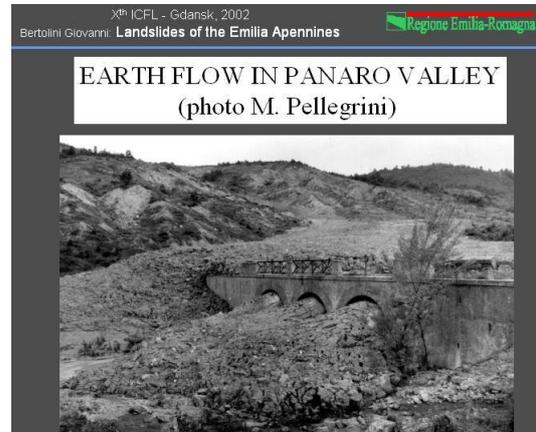
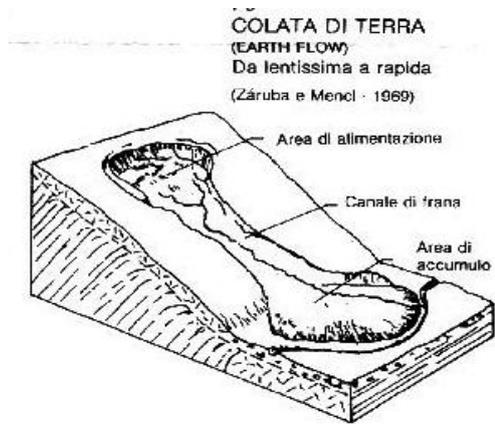
Il movimento varia da estremamente rapido ad estremamente lento.

A seconda del tipo di terreno coinvolto e della velocità di movimento si dividono in:

- Colate di detrito (DEBRIS FLOW): sono movimenti che si verificano improvvisamente, con notevole rapidità e sono caratterizzati da una presenza d'acqua rilevante (rapporto tra acqua e materiale 1:1). Si innescano in seguito a piogge torrenziali, e possono trasportare anche massi di notevoli dimensioni, data l'elevata velocità e l'elevata densità del fluido. Generalmente il materiale si incanala lungo gli impluvi.



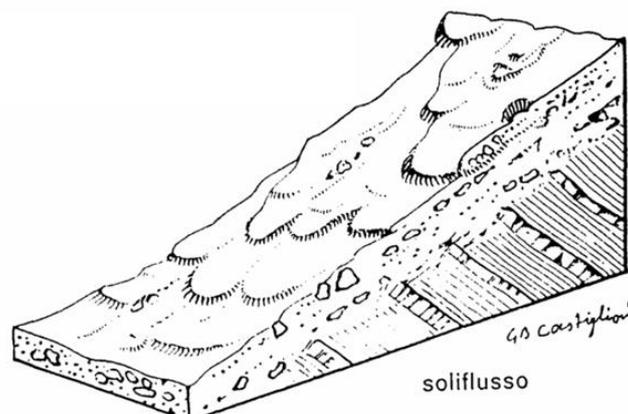
- Colate di terra (EARTH FLOW) e colate di fango (MUD FLOW): avvengono in terreni sciolti fini (sabbie limi ed argille). La velocità è molto variabile, ma quasi sempre inferiore a quelle delle colate di detrito. È variabile anche il contenuto d'acqua.



- Valanghe di detrito (DEBRIS AVALANCHES): sono simili ai debris flow ma hanno velocità da molto ad estremamente rapida.



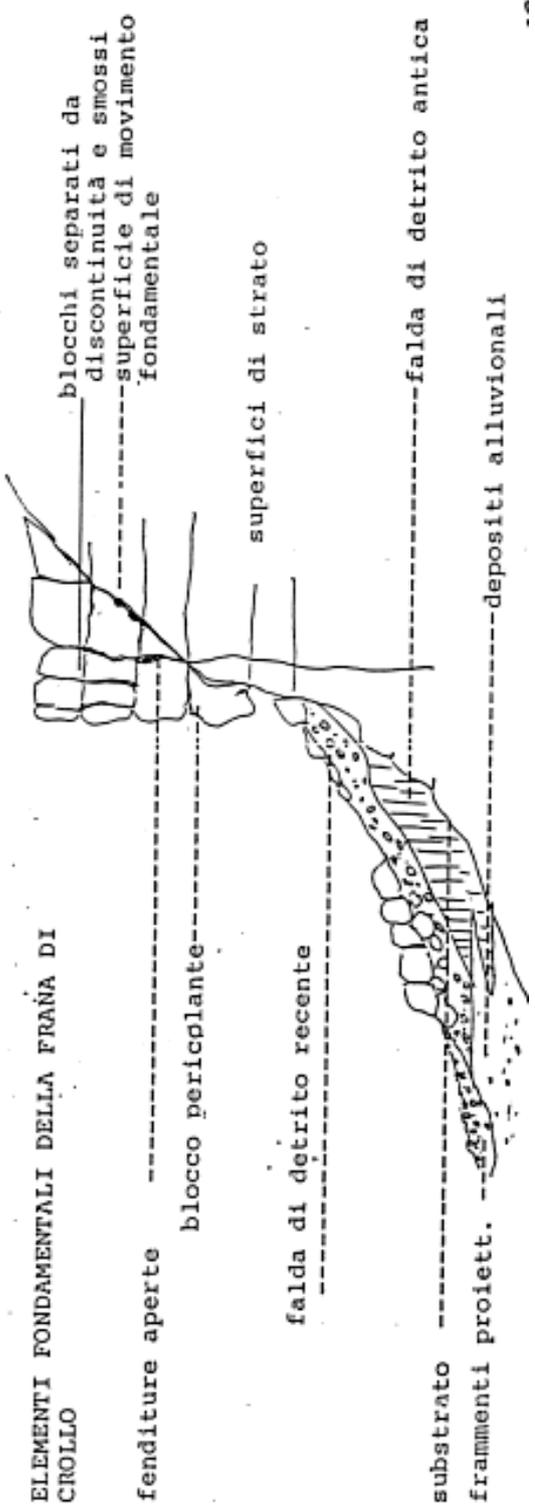
- Soliflusso: è un caso particolare di frana di colamento. Una certa massa di terreno molto imbevuta d'acqua è interessata da un colamento lento simile al moto di una massa molto viscosa; si manifesta generalmente su ampie porzioni di versante, con lobi, ondulazioni, decorticazioni e terrazzetti.



ELEMENTI FONDAMENTALI DI UNA FRANA DI AMMOLLIMENTO (FLOW)



ELEMENTI FONDAMENTALI DELLA FRANA DI CROLLO



## f. Frane complesse

In questo tipo di frane i movimenti derivano dalla combinazione di uno o più dei tipi di frana descritti in precedenza. Si ha comunque la predominanza di uno sugli altri.

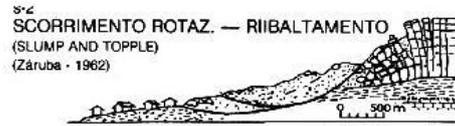
### VI - COMPLESSI (COMPLEX)

Il movimento risulta dalla combinazione di due o più dei cinque tipi principali sopra descritti. Molte frane sono complesse, ma generalmente un tipo di movimento predomina, spazialmente o temporalmente, sugli altri.

#### ESEMPLI



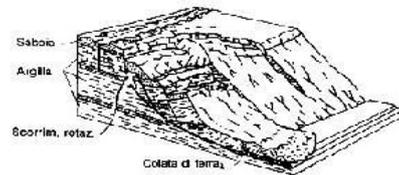
5-1 CROLLO DI ROCCIA — COLATA DI DETRITO (ROCK FALL-DEBRIS FLOW (ROCK FALL AVALANCHE))  
Estremamente rapido  
(Secondo Heim - 1932 - Elm, Svizzera, 1881)



5-2 SCORRIMENTO ROTAZ. — RIIBALTAMENTO (SLUMP AND TOPPLE)  
(Záruba - 1962)



5-3 SCORRIMENTO TRASLATIVO DI BLOCCHI — CROLLO DI ROCCIA (ROCK SLIDE - ROCK FALL)  
(Nemček, Pešek e Rybar - 1972)



5-5 SCORRIMENTO ROTAZIONALE - COLATA DI TERRA (SLUMP - EARTH FLOW)



5-4 INARCAMENTO E RIGONFIAMENTO VALLIVO (CONVERGING AND VALLEY SWELLING)  
Colamento (in profondità), con conseguenti movimenti superficiali (espansione laterale, ribaltamento e scorrimento);  
Struttura normale suborizzontale  
Cespugli da espansione laterale

Quasi tutte le colate lente di terreni sciolti coerenti sono complesse, in quanto lungo i fianchi e la superficie basale è presente una netta superficie di taglio, mentre la distribuzione del e velocità entro il materiale spostato può essere tipica del e deformazioni visose.

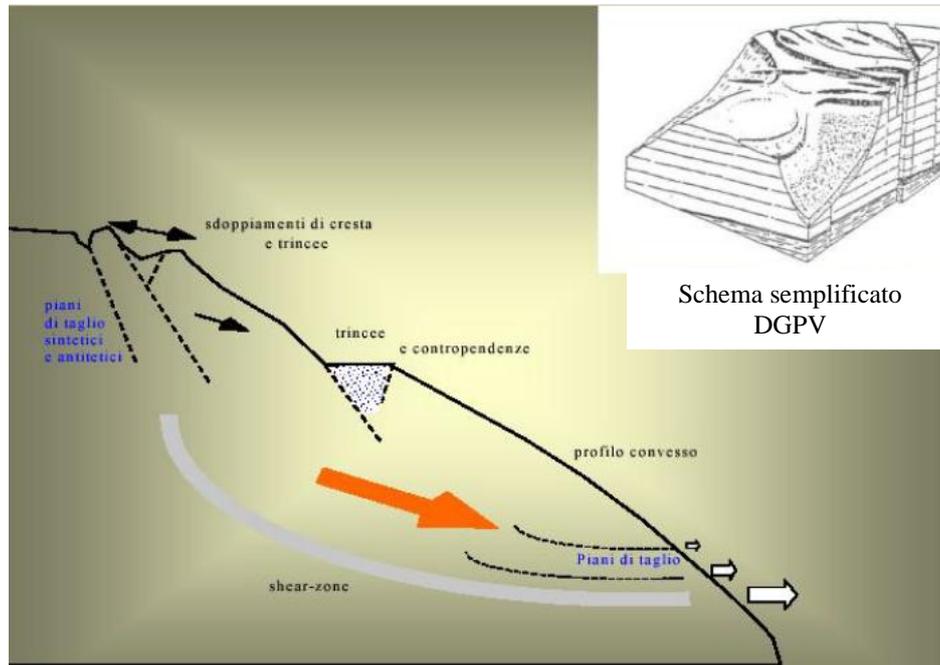


Frana della Val Pola del 1987 ( Valtellina)

## g. Deformazioni Gravitative Profonde Versante (DGPV)

Negli ultimi decenni sono state studiate a lungo un altro tipo di dissesto: le Deformazioni Gravitative Profonde di Versante o DGPV (Deep-seated gravitational slope deformation - DGSD). Con questo termine si designano solitamente fenomeni gravitativi (cioè indotti dalla gravità) di grandi dimensioni che interessano anche interi versanti in profondità, che possono avere un'evoluzione molto lunga.

Normalmente il termine designa un movimento che non si localizza su una superficie, ma che interessa in maniera evidente la parte più alta del versante perdendo la sua evidenza verso la base del versante.



In genere, come principali caratteristiche di questi processi vengono indicate:

- la mancanza di una superficie di rottura ben definita ,
- la presenza, in profondità, di zone che consentono il movimento attraverso un'intensa microfratturazione dell'ammasso roccioso oppure tramite deformazioni viscosi (Radbruch-Hall, 1978; Mahr, 1977),
- velocità di deformazione molto bassa, ( ma possono presentare manifestazioni collaterali con sviluppo rapido),
- creste doppie,
- trincee (trenches),
- contropendenze sui versanti,
- vallette parallele al versante,
- rigonfiamento della parte bassa del versante (versante convesso).

Le loro dimensioni impediscono con i mezzi attualmente a disposizione qualsiasi tipo di controllo, quando incombono su abitati o strutture vengono tenute sotto controllo con sistemi di monitoraggio.

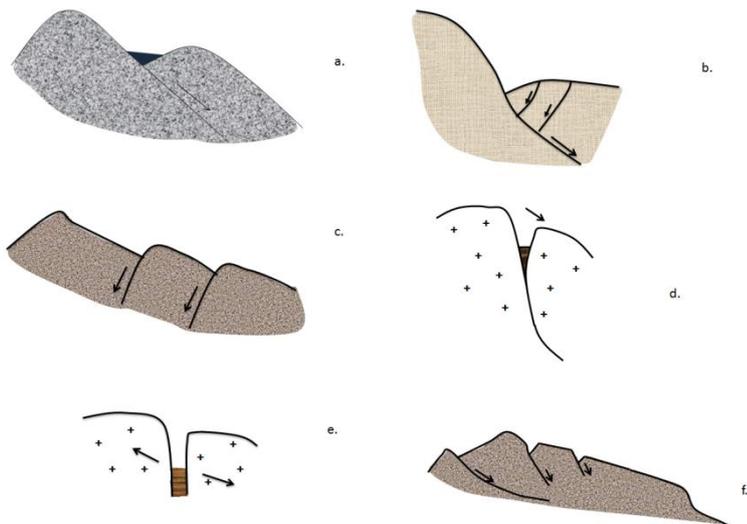
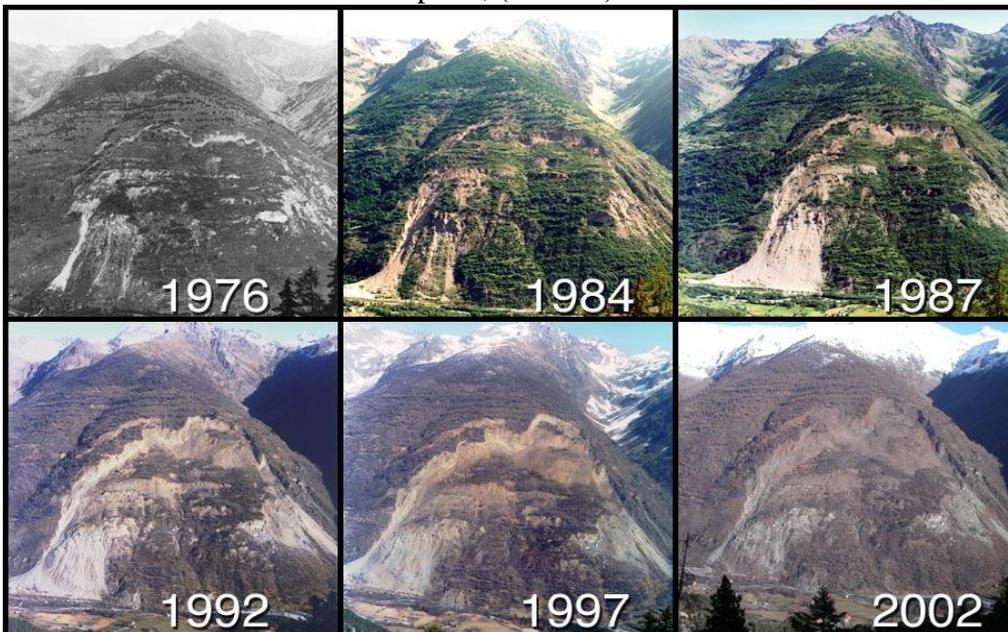


Figura : alcuni dei più caratteristici elementi morfologici associati alle DGPV: sdoppiamenti di cresta (a); scarpate (b); controscarpate (c); trenches (d, e); rigonfiamenti (f)



Figura - Trincea

Evoluzione della frana di La Clapière, (Francia)



Una preliminare valutazione in merito alla stabilità per i diversi fenomeni franosi ( ribaltamenti, scivolamento planare, ...) di un pendio roccioso può essere fatto attraverso le proiezioni stereografiche e il test di Markland. Per tale motivo si rimanda alla parte di rilevamento geologico – strutturale.

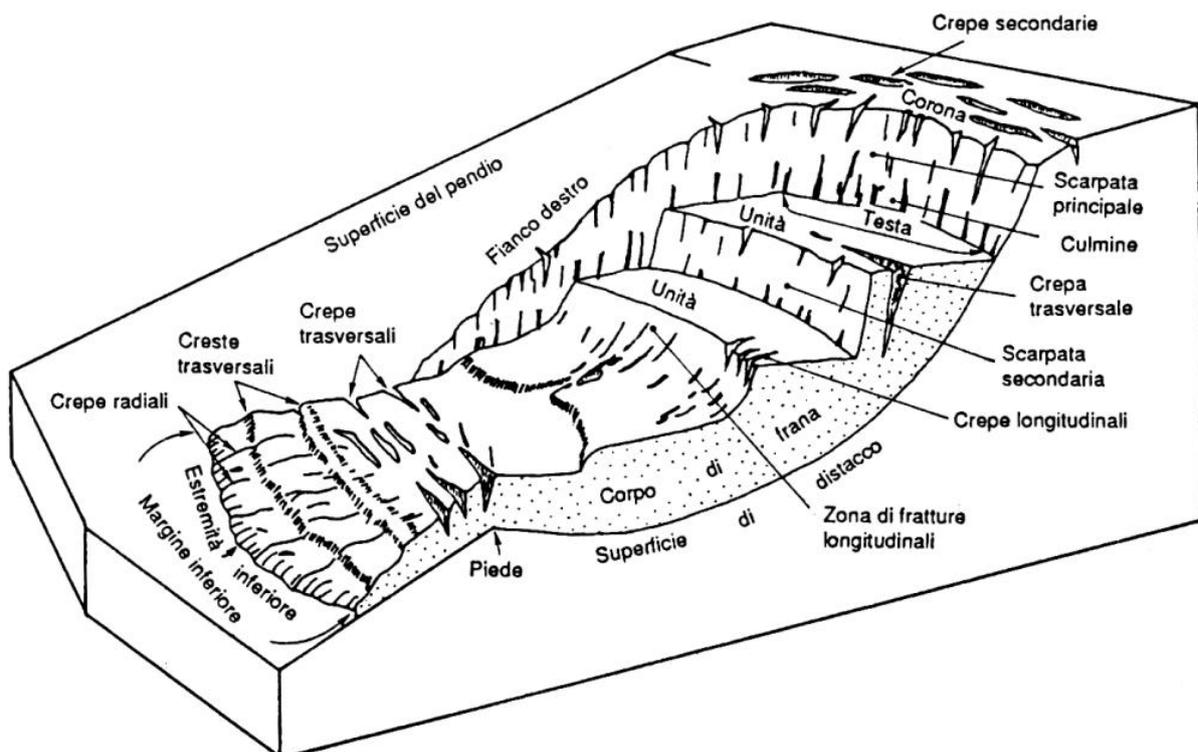
## 2.1. Nomenclatura

Una frana è composta da varie parti, ciascuna identificata con un proprio termine specifico. Sempre facendo riferimento a quanto proposto da Varnes nel 1978, in una frana, per esempio di scivolamento, già avvenuta, si possono distinguere una **zona di distacco**, **zona di transito** e una **zona di accumulo**.



La zona di innesco è caratterizzata da elevate pendenze ( $>20^\circ$ ) e grande disponibilità di materiale, la zona di transito è lunga e stretta, con pendenze intermedie ( $10^\circ-15^\circ$ ). Infine la zona di accumulo è caratterizzata da basse pendenze ( $<5^\circ-6^\circ$ ), forma lobata con blocchi dispersi in una matrice limoso-sabbiosa.

Nell'ambito di ciascuna zona si possono poi individuare diversi elementi morfologici, come visibile nella seguente figura.



Nella **zona di distacco (zone of depletion, zone d'affaissement)**, che è l'area entro la quale il materiale si trova a quota inferiore rispetto alla sua porzione originaria, si riconoscono:

- Coronamento o corona (Crown, couronne): materiale rimasto in posto, adiacente alle parti più alte della scarpata principale.
- Nicchia di distacco o Scarpata principale (Main Scarp, escarpement principal): parte sommitale della frana da cui ha origine il distacco del materiale, è individuata da una superficie molto ripida, con profilo arcuato, che delimita l'area adiacente quasi indisturbata.
- Superficie di rottura o di distacco ( Rupture Surface, surface de rupture): superficie lungo la quale avviene il movimento. È costituita dalla scarpata principale e dal suo prolungamento al di sotto del materiale franata. Il margine inferiore è quasi sempre sepolto è quindi di difficile individuazione.
- Corpo principale ( Main body, corps): settore della frana che ricopre la superficie di rottura. È delimitato superiormente dalla scarpata principale e inferiormente dal margine inferiore della superficie di rottura. Entro il corpo principale si possono distinguere:
  - Testata o testa ( Head, tête): parte più alta della frana a contatto con la scarpata principale.
  - Scarpate secondarie (Minor scarp, escarpement secondaire): superfici ripide che interrompono la continuità del materiale franato. Sono il prodotto di movimenti differenziali che si sviluppano all'interno del corpo di frana.
  - Zone di trazione: caratterizzate dallo sviluppo di fratture di trazione, prodotte dallo stiramento che si verifica all'interno del corpo di frana. Possono essere trasversali o longitudinali.



Nella **zona di accumulo (zone of accumulation, zone d'accumulation)**, che è l'area entro la quale il materiale si trova a quota superiore rispetto a quella della superficie originaria del versante. Sono presenti:

- Piede ( foot, pied): porzione della frana che si è mossa oltre l'unghia della superficie di rottura.
- Superficie di separazione (surface of separation; surface de separation): superficie lungo la quale si ha il contatto tra il materiale franato e quello sottostante in posto, indipendentemente dal fatto che in prossimità della stessa vi sia stata o meno rottura.
- Materiale accumulato (Displaced material, masse affaissée): materiale che si è spostato dalla sua posizione originaria e che si è accumulato più a valle. Insieme al corpo principale costituisce il corpo della frana.
- Fronte della frana o unghia( Toe, front): margine inferiore del materiale franato, situato alla maggiore distanza dalla scarpata principale.

ZONA DI ACCUMULO:  
meno inclinata del  
pendio originario



RIGONFIAMENTO AL  
PIEDE DELLA FRANA

Si è considerato questo tipo di frana perché è quello più completo sotto l'aspetto morfologico, in quanto mostra chiaramente tutte le deformazioni prodotte dal movimento del terreno nel corso dell'evolversi del movimento franoso.

Gli studi geologici sui dissesti servono per due scopi:

- Ricostruire il “modello fisico” dell'ammasso roccioso interessato,
- Chiarire i fenomeni naturali che agiscono su di esso e i loro effetti sull'evoluzione del versante.

Ai fini dei progetti di opere civili e della difesa dai dissesti è inoltre di estrema importanza l'identificazione dei fenomeni in atto e di quelli potenziali. A tale scopo verrà dedicata particolare cura nel corso di geologia applicata.

## **2.2. Successione di fasi, prevedibilità delle crisi e controllo della dinamica dei versanti**

I fattori che determinano le crisi sono molteplici, e comportano dapprima lunghi periodi di stabilità, poi fasi brevi di intensa erosione (erosione accelerata) o addirittura di frane. Al termine di queste crisi, il versante che era stato lentamente portato allo squilibrio, avrà assunto un profilo topografico nuovo, in equilibrio con gli agenti modificatori del rilievo.

Il tal modo il rilievo evolve con ritmi molto incostanti: fasi di apparente stabilità molto lunghe alle quali succedono crisi brevi e intense; si sono esaminate regole e leggi per la previsione di tali crisi, ed è oggi possibile formulare modelli previsionali discretamente attendibili.

Le catastrofi naturali alle quali assistiamo, sono determinate dalla mancanza di notizie su molta parte della storia geologica del sito; infatti le crisi si riproducono spesso con intervalli più che decennali, e con il tempo se ne perde il ricordo.

Tuttavia catastrofi naturali apparentemente imprevedibili, troverebbero spiegazione se la storia geologica dei siti venisse compiutamente esaminata o ricostruita, in modo da poter chiarire quali elementi rivelino le tendenze degli agenti modificatori del rilievo e permettano di correggerle prima che gli eventi dannosi abbiano a manifestarsi.

Lo studio della dinamica dei versanti consente di evidenziare i segnali di crisi e di monitorarli, in modo da avere sempre presente lo stadio evolutivo del rilievo.

A tale proposito, una teoria (dovuta a Voight) sostiene che per gran parte dei movimenti franosi si assiste ad una evoluzione asintotica di alcuni segnali di instabilità. Ad esempio, nel tempo le dimensioni dell'apertura delle fenditure lungo la parte alta di un versante, misurato con estensimetri, è cresciuto con velocità via via maggiore fino al collasso, in corrispondenza della zona di frana di Val Pola (Sondrio) nel 1987.

L'esperienza dimostra che è impossibile che tutte le frane evolvano con la legge suggerita da Voight; tuttavia questa tendenza si manifesta in molti casi; ad esempio, nel corso delle fasi finali della frana del Vajont, gli strumenti registrarono una continua accelerazione dei movimenti del terreno verso il basso. E' quindi estremamente utile monitorare, cioè sorvegliare in continuo misurando uno o più parametri significativi, le aree nelle quali si sono identificati elementi che lascino presagire l'avvenuto innesco di una crisi.

La sorveglianza del territorio implica quindi la ricerca dei segnali di crisi incipienti, che possono ripercuotersi su aree più o meno vaste. Si deve infatti tener presente che ogni dissesto può essere *circoscritto*, così da essere pienamente riassorbito all'interno dell'ambiente in cui si manifesta (ad esempio un cambiamento di pendenza lungo un pendio di detrito, di pochi metri quadrati), oppure *esteso*, come sarebbe nel caso in cui il franamento comportasse l'occlusione della sezione di flusso di un corso d'acqua, amplificandone le piene.

Il rilevamento dei segnali di crisi avviene tramite *l'ispezione diretta* delle aree sotto controllo, oppure mediante *l'esame delle fotografie aeree* che vengono, a distanza di qualche anno, prodotte dalle regioni e da altri Enti per molteplici usi.

L'esame dei rilevamenti aerei abbinato alle ispezioni in loco fornisce solitamente ottimi risultati, in specie se si sono prese in considerazione e confrontate le cartografie dei dissesti e dei segnali di movimento del suolo relative a una lunga successione temporale (venti-trent'anni).

Queste operazioni sono relativamente semplici, e permettono di raggiungere un notevole dettaglio, in quanto permettono di abbracciare aree molto vaste, e di osservarne le reazioni in seguito a eventi meteorologici e interventi antropici noti, così da interpretarne anche quantitativamente l'evoluzione morfologica.

### **2.3. Cenni sulla morfometria**

Alcuni aspetti geometrici delle frane rivestono interesse nella loro descrizione. Tra questi:

- S → Spessore apparente
- L → Lunghezza della superficie di rottura
- M → Lunghezza totale del movimento

Di particolare interesse è il rapporto  $\frac{S}{L}$  in quanto L risulta facilmente valutabile nella maggior parte dei casi, al contrario di S.

Secondo Skempton, per superfici di rottura poco profonde,  $\frac{S}{L}$  assume valori compresi tra 3-4% per versanti con pendenza compresa tra 12° e 30°. Per scosendimenti profondi, invece, il rapporto sale al 15-27% su pendenze dei versanti analoghe alle precedenti.

Ulteriori studi consentono di suddividere, a seconda del tipo di movimento, i rapporti  $\frac{S}{L}$ , ottenendo i seguenti valori percentuali:

Tipo movimento	S/L (%)
colamento	2.4 - 0.8
Scivolamento per traslazione	5.0 – 7.0
scosendimento	18.2 – 24.2

### 3. Comportamento dei terreni in frana

Si analizzeranno ora le cause possibili dei dissesti che avvengono nei terreni, distinguendo cause esterne al dissesto e cause interne ad esso.

- Cause esterne (hanno a che fare con il contesto)
  - Cambiamenti geometrici del versante dovuti ad erosione o sottoescavazioni, scavi artificiali che portano a variazioni dell'altezza dei versanti, della loro lunghezza o pendenza.
  - Aumento della pressione sul terreno ( sovraccarichi, costruzioni, deposito di materiali).
  - Diminuzione della pressione sul terreno (erosione, incisione, asportazioni di terreno).
  - Scosse e vibrazioni ( esplosivi, terremoti).
  - Depressione piezometrica, cambiamenti nel regime degli afflussi idrici (precipitazioni, fusione neve o ghiacci, infiltrazione da corsi d'acqua .....
- Cause interne (hanno a che fare con il materiale coinvolto, cambiano le condizioni interne di stabilità)
  - Alterazione.
  - Allontanamento e rottura progressiva della roccia conseguente ad espansione laterale o fessurazione ed erosione.
  - Erosione sotterranea, cioè asportazione dei granuli più fini di terreno ad opera delle acque sotterranee.

## 4. Caratterizzazione geologico tecnica dei terreni

Allo scopo di comprendere l'evoluzione dei dissesti, è utile esaminare i parametri tecnici degli ammassi rocciosi che governano l'equilibrio del versante.

La resistenza al taglio dei terreni dipende infatti da tre fattori:

- Attrito,
- Entità della pressione normale alla superficie,
- Coesione.

Sono di particolare interesse anche:

- Resistenza residua,
- Stato di sovraconsolidazione
- Dilatanza (misura della variazione di volume che si verifica quando si sviluppano sforzi di taglio).

Esamineremo ora rapidamente il significato di tali parametri:

### a. Attrito

Quando una forza  $N$  agisce su una superficie di rottura, e non vi sono fluidi su tale superficie, può incrementarsi la forza di taglio  $T$  fino a determinare, al raggiungimento di un valore  $T_f$ , lo spostamento del blocco superiore.

Le osservazioni portano a concludere che il rapporto  $T_f/N$  è una costante; nell'intervallo di pressioni nel quale la roccia non presenta altre deformazioni, all'aumentare di  $N$  aumenta proporzionalmente  $T_f$ .

Il rapporto  $T_f/N$  si definisce coefficiente di attrito e viene espresso con il simbolo  $\mu$

$$\mu = T_f/N$$

Se si indica con  $A$  la superficie di contatto tra i blocchi, si definisce pressione normale  $\sigma$  il rapporto  $N/A$ , e sforzo di taglio  $s$  il rapporto  $T/A$ .

$$s = \sigma \cdot \operatorname{tg}\phi$$

$$\sigma = N/A$$

$$s = T/A$$

Risulta evidente che il grafico  $s/\sigma$  è rappresentato da una retta di equazione:

in cui

$$\operatorname{tg}\phi = \mu$$

Il coefficiente di attrito  $\mu$  rappresenta la resistenza al movimento determinata da diversi fattori, fra i quali predomina l'attrito.

Tali condizioni sono disturbate dalla *presenza di acqua* all'interno del terreno e dalle *irregolarità dei giunti*.

Presenza di acqua:

la pressione normale è trasmessa attraverso il contatto tra le particelle, quando esiste una pressione idrostatica, questa tende ad allargare i vuoti tra le particelle, respingendo l'una dall'altra.

Denominata  $u$  la pressione dell'acqua, la pressione normale  $\sigma$  che effettivamente si trasmette è data dalla relazione:

$$\sigma = N - u$$

Irregolarità dei giunti:

Mentre il giunto ha una giacitura parallela al piano sul quale avviene il movimento, alcune sue irregolarità formano con il piano della discontinuità un angolo  $\alpha$ , cosicché il blocco superiore per muoversi deve spostarsi salendo con una pendenza  $\alpha$ .  
In tal caso la resistenza al movimento è data dalla relazione:

$$s = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi + \alpha)$$

Se il senso di movimento è diverso da quello di salita lungo il piano che ha inclinazione  $\alpha$ , la precedente relazione deve essere corretta come segue:

$$s = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi + \alpha \cos \beta)$$

in cui  $\beta$  è l'angolo formato con la direzione del movimento e l'immersione dell'irregolarità. Nel caso in cui il movimento avvenga verso il basso (cioè nel senso della discesa lungo il piano con inclinazione  $\alpha$ ) la relazione precedente diventa:

$$s = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi - \alpha)$$

#### b. Coesione

La coesione rappresenta la resistenza che tende a mantenere uniti tra loro gli elementi costitutivi del terreno; viene misurata in forza per unità di superficie (MPa o  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). Alcuni autori fanno dipendere la coesione dall'attrito, inglobando nel fenomeno dell'attrito anche gli effetti stabilizzanti prodotta tra la coesione tra granuli. In realtà è meglio mantenere la distinzione tra i due fenomeni, considerando il loro diverso comportamento nelle condizioni naturali ed artificiali.

- Coesione apparente: tiene conto sia dei legami elettrochimici nella matrice di terreno sia la coesione dovuta alla tensione superficiale all'interfaccia acqua-aria nei suoli insaturi.

#### c. Resistenza al taglio dei materiali

La resistenza al taglio di un materiale è la resistenza alla rottura che il materiale è in grado di opporre se sottoposto a sforzi di taglio. Essa dipende sia dallo stato di sollecitazione cui il materiale è sottoposto, sia dalla natura, tessitura e struttura dei materiali stessi. Per questo motivo è necessario trattare separatamente la resistenza al taglio nei terreni e nelle rocce.

- Resistenza al taglio nei terreni:

Il **criterio di Mohr-Coulomb** è il criterio maggiormente utilizzato per la descrizione delle modalità di rottura dei terreni sottoposti a sforzi di taglio.

Tale criterio presuppone che esista un legame di proporzionalità diretta tra gli sforzi normali efficaci applicati sulla superficie di movimento e la resistenza al taglio del materiale a rottura:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi'$$

$\tau$  = resistenza al taglio del materiale ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$c'$  = coesione efficace del terreno ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$\sigma$  = sforzo normale agente sulla superficie di movimento ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$u$  = pressione neutra dell'acqua sulla superficie di movimento ( $\text{kN/m}^2$ )  
 $\sigma - u = \sigma'$  sforzo normale efficace agente sulla superficie di movimento  
 $\phi'$  = angolo di attrito interno efficace del terreno

- Resistenza al taglio negli ammassi rocciosi

La resistenza al taglio dei materiali rocciosi è differente, per significato e modalità di misura, a seconda che si faccia riferimento a una roccia intatta o a un ammasso roccioso. La resistenza al taglio di un campione di roccia intatta dipende unicamente dalla natura del materiale, mentre la **resistenza al taglio di un ammasso roccioso** è funzione sia della natura del materiale, sia delle caratteristiche dei sistemi di discontinuità. La resistenza al taglio lungo una *superficie di discontinuità* perfettamente *piana* e cementata dipende dalla coesione del materiale cementante e dall'attrito tra le due parti a contatto del provino. Vale il criterio di rottura di *Mohr-Coulomb*:

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$$

Se, come avviene frequentemente, le superfici dei giunti non sono perfettamente piane, ma presentano un certo grado di rugosità, allora è necessario tenere conto dell'effetto di tale fattore nel calcolo della resistenza al taglio lungo le superfici stesse. La rugosità di una superficie di frattura agisce aumentando la resistenza al taglio lungo la superficie stessa, poiché aumenta l'angolo di attrito del materiale.

*Barton (1973)* propone un'equazione empirica per il calcolo della *resistenza al taglio* su giunti scabri non cementati:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} (\phi_b + JRC \operatorname{Log} JCS / \sigma_n)$$

- **JRC (Joint Roughness Coefficient)** è un **coefficiente di rugosità del giunto**, variabile da 0 (giunto a superficie planare e levigata) fino a 20 (giunto a superficie ondulata e rugosa) → **pettine di Barton**.



- **JCS (Joint Wall Coefficient Strength)** è un coefficiente che esprime la **resistenza a compressione monoassiale** lungo la superficie del giunto. ⇨ **Point Load Strength Test** o **martello di Schmidt** direttamente sulla superficie di frattura
- $\phi_b$  (**angolo di attrito di base**) è funzione unicamente della natura della roccia ⇨ **tilt test**

- $\sigma_n$  è lo **sfuerzo normale** agente sulla superficie del giunto (Barton suggerisce di porre  $\sigma_n = 0,1$  MPa per giunti superficiali).

L'equazione di Barton è valida e verificata sperimentalmente se il rapporto  $\sigma_n/\sigma_j = 0,01 \div 0,3$ . Se  $\sigma_n/\sigma_j < 0,01$ , il rapporto  $s_j/s_n$  l'equazione tende all'infinito e perde di validità. La resistenza al taglio lungo discontinuità scabre è, inoltre, influenzata dalla composizione e dallo spessore del materiale eventualmente presente all'interno delle discontinuità. A questo proposito, Goodman (1970) ha dimostrato che se lo spessore del **materiale di riempimento** è uguale o maggiore della massima ampiezza delle ondulazioni, allora la resistenza al taglio lungo il giunto sarà funzione della coesione e dell'angolo di attrito del materiale di riempimento stesso.

#### d. Resistenza residua

Quando un movimento franoso si innesca cambiano anche alcune condizioni fisiche del terreno; in particolare coesione, attrito, permeabilità, condizione della piezometria e morfologia del versante.

Appare utile distinguere il comportamento del terreno lungo le diverse superfici di movimento. Si hanno infatti due tipi di spostamento:

- Movimenti di apertura della roccia, dovuti alla trazione che tende a separare un blocco dall'altro nel corso di fenomeni di rotazione e di scivolamento.  
In questi movimenti la coesione tra un blocco e l'altro si oppone all'apertura.
- Moti di rottura che generano superfici di discontinuità lungo i settori della roccia e del terreno che slittano gli uni a contatto degli altri, nei punti in cui la resistenza al taglio è inferiore a quella di equilibrio.  
In questi movimenti si oppongono alla rottura sia la coesione sia l'attrito.

Lungo tutte queste superfici avviene un rilassamento dei granuli e dei blocchi (nelle rocce), che tendono tutti verso un equilibrio compatibile con le nuove condizioni. Il più delle volte il riassetto comporta una tendenza all'accatastamento dei blocchi e delle particelle tabulari secondo tre schemi:

- 1) Casi in cui il materiale fine è predominante sui blocchi planari e consiste nella tendenza di questi ultimi a disporsi in modo complanare con la superficie lungo la quale si manifesta il movimento.
- 2) Casi in cui predominano gli elementi tabulari, che possono parzialmente ricoprirsi in modo da favorire il mantenimento di un attrito sensibile, anche se inferiore a quello precedente l'inizio del moto.
- 3) Addensamento dei blocchi e dei granuli che, per effetto dei moti del terreno soprastante, possono almeno localmente acquisire superiore a quello che avevano in precedenza. Tale incremento di attrito si può tradurre in un aumento della resistenza al taglio, soprattutto quando i fenomeni sono molto lenti e permettono la graduale espulsione di acqua dagli interstizi, e una diminuzione della porosità dando luogo ad una consolidazione naturale dei terreni.

Può quindi accadere che il rilassamento dei granuli e dei blocchi si opponga in modo sensibile al movimento, favorendo il mantenimento di una certa resistenza, **detta resistenza residua** del terreno.

e. Sovraconsolidazione

Se si applicano dei carichi sui terreni, specialmente su quelli compressibili come le argille o i limi, si può creare uno stato di consolidazione anomalo, con riduzione dell'indice dei pori (% di terreno occupato dal vuoto rispetto al volume occupato dal solido) e della porosità, che conferiscono una addizionale resistenza ai terreni che hanno subito tali effetti.

Analoghe condizioni possono essere determinate da carichi artificiali che hanno agito a lungo; dalla evaporazione che, eliminando lentamente l'acqua dagli interstizi, ha consentito l'avvicinamento delle superfici dei grani creando un'aggiuntiva resistenza, oltre che dall'incremento del carico dovuto alla deposizione di ulteriori sedimenti.

Questo incremento di resistenza, analogo a quello che si otterrebbe in tempo minore con l'imposizione di un carico artificiale su un terreno normalmente consolidato, fa sì che i terreni sovraconsolidati resistano in modo migliore, rispetto ai terreni normali, ai carichi inferiori a quelli responsabili del loro stato. Tuttavia, superati i valori di resistenza dovuti ai carichi reimposti, essi si comportano in modo analogo ai terreni normali.

Appare pertanto molto importante costruire la curva deformazione-carichi, in modo da poter riconoscere correttamente la natura dei terreni e i carichi ad esso imponibili per mantenere gli equilibri dei versanti.

## 5. Organizzazione degli studi geologici sulla a stabilità dei versanti

Le indagini necessarie per la stima della stabilità dei versanti si possono raggruppare in quattro categorie:

1. Classificazione geologica dei vari tipi di movimento in atto, indagini cartografiche, analisi geomorfologica e idrogeologica, controllo dei movimenti ed identificazione delle cause.
2. Caratterizzazione geologico tecnica dei terreni. Essa prevede una successione di operazioni, quali:
  - Campionamento dei terreni,
  - Prove di laboratorio: prove drenate e non drenate sui terreni fini per determinare  $\phi$  e  $c$ ; misure della resistenza al taglio residua con scatola di Casagrande e triassiale; resistenza al taglio delle rocce con apparecchi triassiali speciali..
  - Prove sul terreno comprendenti, comprendenti prove in situ con "vane test" per le argille ( per determinare la coesione non drenata); penetrometrie per terreni fini e sabbie ( da non confondere con i sondaggi meccanici); prove sulle rocce.
3. Ricostruzione del modello fisico dei terreni, in vista del calcolo della stabilità dei versanti.
4. Identificazione dei metodi per il ripristino o la conservazione della stabilità.

Si raccomanda per completare meglio le conoscenze sull'argomento la lettura di testi e dispense, quali ad esempio "Geologia applicata" di Scesi, Papini e Gattinoni, Milano.

## 6. Studio dei dissesti e delle frane

Come indicato in precedenza, occorre realizzare delle carte che rendano evidente la distribuzione sul territorio dei dissesti; occorre perciò eseguire uno studio geologico- tecnico dei versanti per identificare l'estensione delle aree in movimento e di delimitare quelle a rischio.

A tale riguardo occorre tenere presente che sia le frane, sia i dissesti idrogeologici in senso stretto possono interessare aree molto estese e coinvolgere volumi di terreno non indifferenti.

### 6.1. Identificazione dei dissesti idrogeologici e delle frane

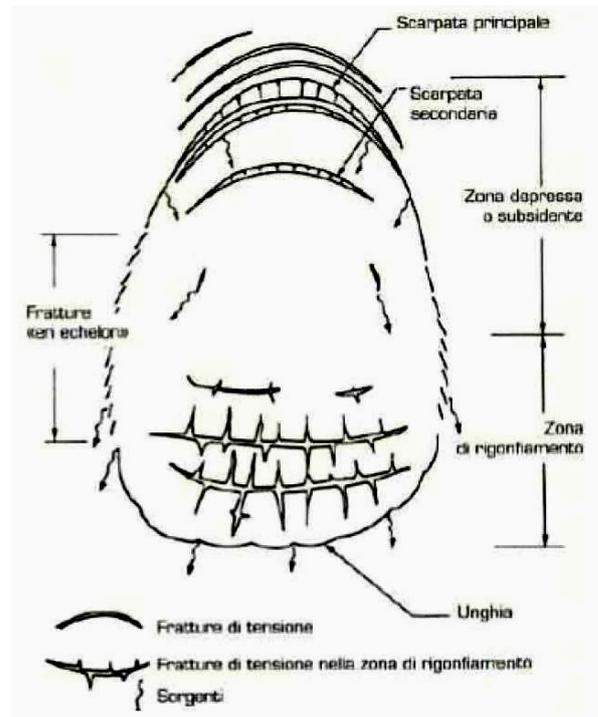
Frane e dissesti idrogeologici si differenziano solo poco dopo la loro origine, che ha quasi sempre la sua partenza in deformazioni superficiali. Infatti i due fenomeni iniziano nello stesso modo: da un piccolo distacco superficiale del terreno, definito smottamento secondo la classificazione di Desio, o da un analogo movimento di blocchi quando il movimento interessa un ammasso roccioso. In tali casi zolle o piccoli volumi di terreno (o blocchi), a seconda della litologia del versante, danno luogo ad una piccola deformazione del pendio, che si manifesta con la tendenza al distacco dell'area situata a monte e all'accavallamento su quella a valle. Di conseguenza il versante è esposto a sforzi di trazione nella parte superiore del tratto in dissesto e a sforzi di compressione nella parte inferiore; si formeranno quindi fenditure arcuate nella parte superiore, fenditure parallele al movimento iniziale e ortogonali ad esso nelle altre parti. A questo punto frane e dissesti idrogeologici seguono evoluzioni diverse.

- Nei **dissesti** idrogeologici il distacco di materiale è generalmente conseguente all'azione erosiva delle acque superficiali; nei casi peggiori essa finisce con l'accumulare i detriti erosi dal versante sul fondo degli alvei, dove le piene possono improvvisamente riprendere tutto il materiale accumulato nel tempo e riversarlo più a valle, in colate miste ad acqua, fango e detriti molto pericolose, in quanto capaci di ricoprire in pochi attimi aree molto estese.
- Nelle **frane** avverrà il distacco di grandi volumi di materiale, soprattutto a causa dell'appesantimento del terreno dovuto alla presenza di acqua sotterranea e alle pressioni da essa esercitata.

L'evoluzione delle frane può essere molto lenta ( spostamenti di pochi centimetri l'anno) a molto veloce (cm al giorno) a catastrofica.

In ogni caso essa è ben delineata per marcati cambiamenti nella morfologia dei versanti:

- Formazione di fenditure profonde spesso arcuate, in corrispondenza della parte alta della frana;
- Formazione di fenditure laterali, che si trasformano spesso in canali di scolo superficiali e sotterranei;
- Rigonfiamenti della massa in frana;
- Variazioni nell'assetto dell'idrografia superficiale sul corpo di frana;
- Nascita di frane secondarie, localizzate sul fronte di frana, cioè lungo il margine inferiore.



Tali intense variazioni nella morfologia dipendono da movimenti a contatto tra massa in frana e roccia in posto (superficie di movimento o rottura), e sono di proporzioni tali da permettere un "monitoraggio" cioè una osservazione in

continuo dei movimenti, al fine di comprendere dimensioni del moto franoso e la sua velocità. Tale velocità normalmente tende ad essere bassa nei primi stadi evolutivi, per poi accrescersi fino ad arrivare ai massimi in prossimità del momento del collasso.

## 6.2. Generalità sull'evoluzione delle frane e dei dissesti

Per identificare e delimitare i movimenti franosi occorre saper riconoscere i pendii instabili e a valutarne il grado di instabilità con criteri morfologici, cioè in base all'aspetto del versante, e geologici; solo successivamente si potrà, mediante indagini in sito, eseguire analisi quantitative sulla stabilità.

Nella seguente figura 6.2a è visibile una frana di scivolamento già avvenuta e la nomenclatura delle varie parti: nicchia di distacco, fronte, corpo della frana, fenditure laterali, interne, di taglio e di trazione.

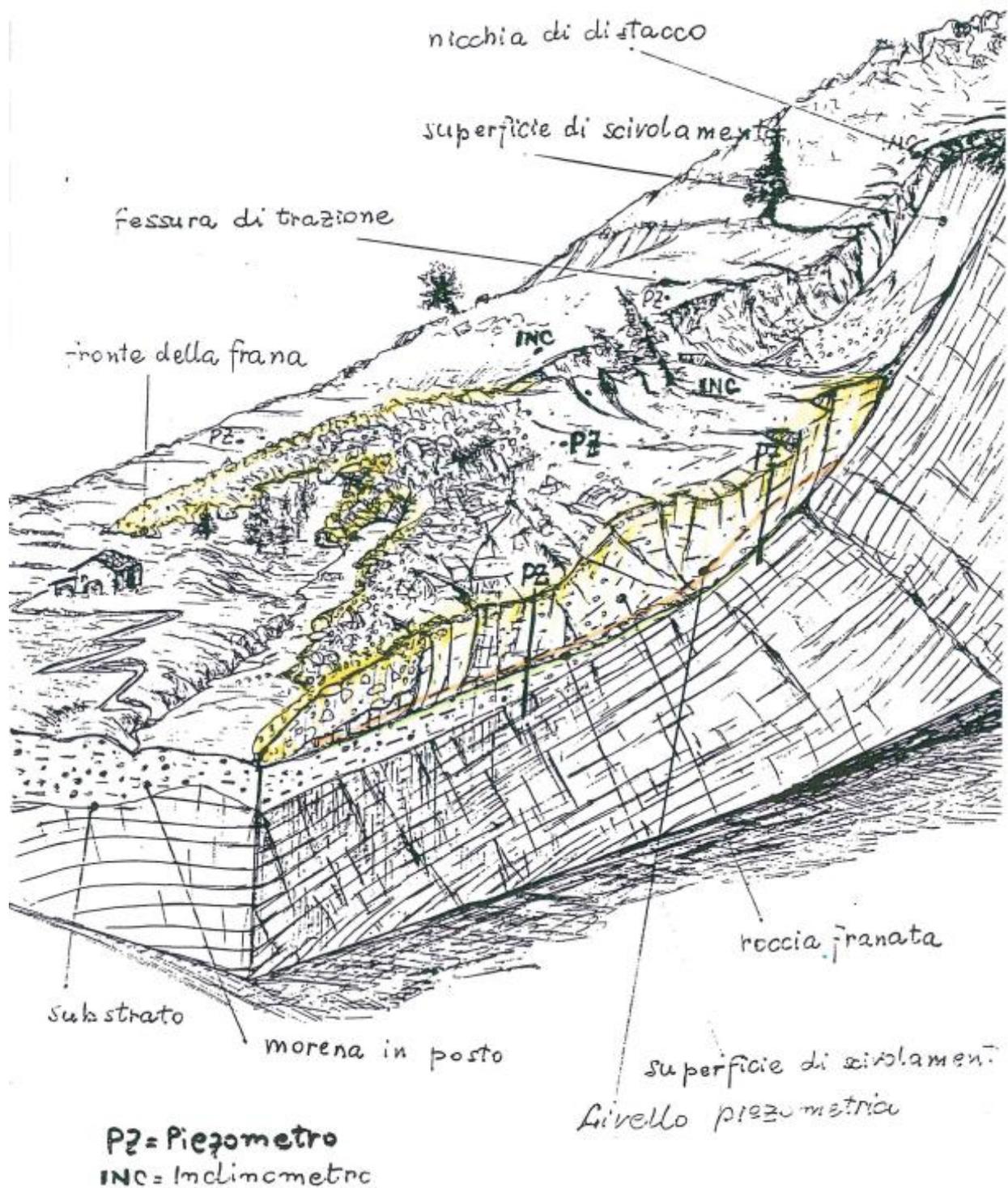


Figura 6.2a

L'immagine mostra anche la superficie di movimento, l'avanzamento del fronte al di sopra della morena in posto, le fenditure ad arco disposte intorno alla nicchia di distacco e il loro andamento in profondità. Sono inoltre indicati i movimenti degli elementi fondati sul terreno superficiale (p.e. gli alberi) che mostrano nelle vicinanze della frana distinte tracce di spostamento o di rotazione o di oscillazione.

Tale tipo di frane è quello più completo sotto l'aspetto morfologico, in quanto mostra chiaramente tutte le caratteristiche deformazioni prodotte dal movimento del terreno nel corso del moto franoso.

In figura 6.2b il movimento franoso si differenzia nella sua evoluzione da un dissesto i., in quanto in uno stadio iniziale della sua esistenza si ha il prevalere dei fenomeni dettati dall'esistenza di acque sotterranee rispetto a quelli determinati da quelle superficiali.

Infatti il dissesto idrogeologico e la frana, come detto in precedenza, iniziano allo stesso modo: da un piccolo distacco superficiale di terreno (smottamento), che ha forma indefinita ed irregolare, e presenta zolle e piccoli volumi di terreno che scendono lungo le superfici di fenditure già in precedenza descritte.

Tali fenditure, utili per delineare la presenza di un movimento nel terreno superficiale, generalmente hanno una forma rettilinea o arcuata con ampiezza tra una parte e l'altra di 2-3 cm; la lunghezza varia da poche decine di cm a qualche metro. Esse producono la possibilità di distacchi del terreno nel corso dello smottamento, a causa dell'appesantimento del terreno durante le piogge, alla diminuzione degli attriti lungo le fenditure e alla diminuzione della coesione del terreno.

Nel corso di questa prima fase la massa di terreno tende ad assottigliarsi ( per trazione) nella parte alta, e a rigonfiarsi ( per accumulo di materiale) nella parte bassa, assumendo una caratteristica forma a "goccia".

A questo punto dissesto i. e frana subiscono fenomeni diversi.

In un **dissesto** , le acque superficiali confluiscono nella vallecola che si forma, approfondendola. Se i terreni sono (1) argillosi, il dissesto evolve prima verso il calanco, poi verso la frana di colamento, se invece sono (2) limoso-sabbiosi, è più facile l'evoluzione verso un approfondimento e allargamento del dissesto, che diviene una "rovina" ( cioè una vallecola priva di terreno con copertura vegetale) che va man mano allargandosi ed approfondendosi.

In questo modo nasce una serie di vallette affluenti verso la prima, che ripetono l'evoluzione della prima finché l'intero versante sarà interessato forme denominate di "erosione accelerata", poiché in pochi anni si passa da una situazione di relativo equilibrio e con copertura vegetale, a un terreno scoperto con smottamenti e "rovine" estese su tutto il fianco vallivo. Il problema maggiore associato a questa tendenza evolutiva è che si accumulano sul fondo valle ingenti masse detritiche.

Nel corso delle maggiori piene questi detriti vengono presi dalle acque superficiali e trascinati verso valle dalla massa d'acqua mista a terriccio e detriti, abbattendosi non solo sull'alveo del torrente, ma fino dove arrivano le acque che riescono ad esondare. In alcuni casi si sviluppano colate di acqua mista a fango dette "mure" che traboccano dagli argini dei torrenti e invadono il cono di deiezione, area spesso intensamente abitata.

Lo smottamento può passare allo stadio di **frana** attraverso un processo diverso. Infatti se le acque superficiali non sono in grado di incidere la massa "smottata" e di allargare il settore soggetto all'erosione ( per le caratteristiche del terreno o per la mancanza di precipitazioni idonee), sono le acque sotterranee ad avere la prevalenza fra i fattori di instabilità.

L'infiltrazione di acque superficiali o di provenienza meteorica determina un processo più lento di progressiva diminuzione della coesione e dell'attrito che consente un iniziale movimento della massa. La massa instabile diviene sempre più estesa per il cedere di alcuni comparti, le fenditure si allargano, aumenta la permeabilità facilitando così la circolazione idrica. Si verifica allora un rapido incremento delle condizioni di instabilità, con rigonfiamenti sul fronte della massa in procinto di franare, un movimento lento ma generalizzato lungo una superficie di movimento e l'individuazione progressiva della nicchia di distacco.

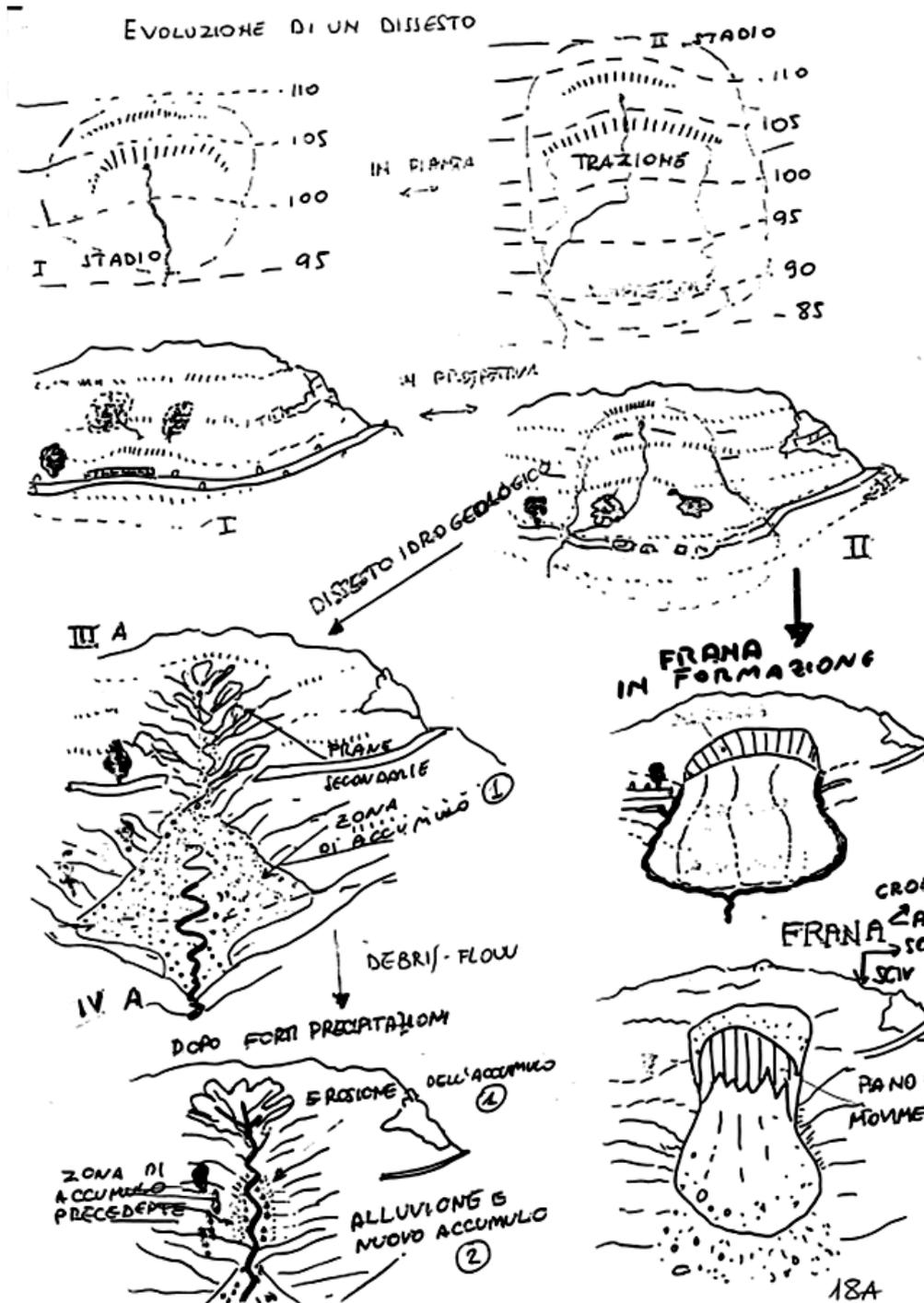


Figura 6.2b

Tale degrado progressivo si accompagna ad un aumento del peso del versante per l'accumulo di acqua ed alla diminuzione delle resistenze di attrito lungo la superficie di movimento. Se il movimento non si arresta per la presenza di ostacoli (p.e. contropendenza versante) o per interventi artificiali, verrà ad affiorare il piano di movimento nella parte alta del versante, si verificheranno franamenti parziali sul fronte, appariranno sorgenti e altre si esauriranno per il cambiamento della rete idrica sotterranea. Infine, dopo piogge anche non particolarmente violente, può verificarsi il franamento. Occorre sottolineare che le frane in roccia assumono spesso tendenze diverse, come si vedrà nei paragrafi riguardanti le frane di crolli e di scivolamenti in roccia.

### 6.3. Classificazione dei criteri geologici e morfologici per l'identificazione della stabilità dei versanti

Uno dei criteri adottati per individuare la predisposizione all'instabilità di un versante è quello proposto da Bailey (1972):

MOLTO INSTABILE	DUBBIO	STABILE
Pendenze molto alte, con nette superfici di movimento	Pendenze alte, senza superfici di movimento	Tutti gli altri casi
Versante interessato da recenti movimenti franosi, ancora attivi	Antiche frane, non riattivate o senza tracce di riattivazione	
Versante adiacente a settori interessati da frane recenti e attive		
Versante interessato da frane antiche con tracce di riattivazione		

Questo criterio consente di valutare la vulnerabilità del versante in modo semplice; tuttavia è solo con una serie di successivi censimenti, eseguiti anche con l'ausilio di foto aeree, che consentono di raccogliere i maggiori dati sull'esposizione del versante all'instabilità.

I rilevamenti vengono compiuti accertando l'esistenza delle condizioni riassunte nella seguente tabella, che indica nella colonna di sinistra gli elementi morfologici atti ad evidenziare l'instabilità del versante, e in quella di destra quelli favorevoli a garantire la stabilità del pendio stesso.

INDICAZIONI MORFOLOGICHE DI CONDIZIONI DI STABILITÀ O INSTABILITÀ DEI VERSANTI	
VERSANTE INSTABILE	VERSANTE STABILE
Scarpate, terrazzi, gradini con elevate pendenze	idem con profilo arrotondato
Crepacci e depressioni prive di depositi secondari	idem rimpinti di sedimenti
Movimenti secondari di masse sul pendio	Nessun movimento secondario
Fenditure con superficie solcata da strie di movimento	Assenza di strie di movimento o fenomeni di erosione e alterazione delle fenditure
Superficie di rottura fresche dei blocchi rocciosi	Superfici alterate
Sistema idrografico disordinato, con molte pozze e zone paludose	sistema di drenaggio ben integrato
Assenza di suolo agrario sulle sup. di rottura	presenza di vegetazione a lenta crescita
Vegetazione diversa all'interno e all'esterno del versante	identità di vegetazione dentro e fuori dal versante
Alberi inclinati senza crescita verticale	alberi inclinati con crescita recente in verticale, o alberi dritti

In questa fase di censimento vengono redatte carte geomorfologiche, destinate a evidenziare la distribuzione dei diversi tipi di dissesti, che indicano la posizione dei seguenti elementi:

- Zone di accumulo di detriti alla base dei versanti
- Aree con eccesso di alluvionamento sul fondo dei corsi d'acqua
- Coni di deiezione e detrito, fasce di detrito
- Calanchi, orli di erosione, terrazzamenti
- Fenditure del terreno
- Rigonfiamenti
- Avvallamenti lungo le isoipse, atti a dare luogo a contropendenze
- Nicchie di distacco
- Sorgenti temporanee
- Zone di inumidimento del suolo con creazione di soliflusso
- Antiche frane
- Aree in frana attuale; se in roccia posizione delle nicchie di distacco dei blocchi
- Opere di sostegno dei versanti e di regolazione dei corsi d'acqua
- Zone di variazione con vegetazione
- Zone con variazione di inclinazione degli alberi o con cedimenti nelle opere esistenti

INDICAZIONI DELLO STATO  
DI INSTABILITÀ

SCARPATE, TERRAZZI, GRADINI CON ELEVATE PENDENZE



CREPACCI E DEPRESSIONI APERTE, SENZA RIEMPIM



TALORA CON SIE  
DI MOVIMENTO

MOVIMENTI DI MASSE ISOLATE SUL PENDIO,  
FALDE DI DETRITO ISOLATE



SUPERFICI DI rottura DI ROCCE NON ALTERATE

SISTEMA IDROGRAFICO DISORDINATO CON POZZE,  
RISTAGHI, FREQUENTI VARIAZIONI NEL TEMPO

VEGETAZIONE DIVERSA RISPETTO AL RESTANTE PENDIO

AVVALLAMENTI, RIGONFIAMENTI IRREGOLARI

ALBERI INCLINATI

Tali carte permettono di avere un quadro aggiornato dello stato di dissesto ed hanno quindi grande valore nelle indagini sulla stabilità dei versanti.

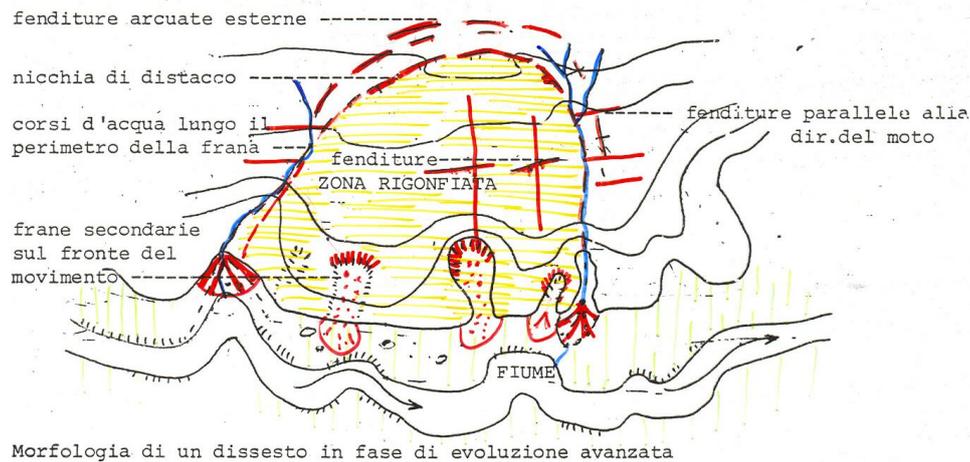


Figura 6.3

Nella figura 6.3 è possibile identificare l'esistenza di un dissesto nella parte centrale dell'area. Si nota infatti:

- Nicchia di distacco nella parte alta del versante, accompagnata da fenditure ad arco che ne prefigurano il futuro sviluppo
- Fenditure laterali che proseguono la nicchia anche sui fianchi del movimento franoso, di fenditure longitudinale e trasversali
- Rigonfiamenti e contropendenze, dovute a fenditure trasversali
- Al fronte i rigonfiamenti aumentano la pendenza, e contemporaneamente aumentano l'apertura delle fenditure, cosicché vi si manifestano i numerosi dissesti secondari che caratterizzano il fronte di frana
- Al piede del pendio, dove esiste un corso d'acqua, possono svilupparsi fenomeni erosivi ; si hanno talora forme di erosione accelerata che variano le caratteristiche del materiale ( p.e. i "calanchi" nei terreni argillosi, le "piramidi" nei terreni morenici...)

## 6.4. Delimitazione del corpo franoso e indagini geologiche

Delimitare il corpo franoso serve al fine di individuare e attuare misure di salvaguardia, e quindi ridurre l'entità dei danni a centri abitati, infrastrutture, vie di comunicazione.

Occorre quindi riconoscere e delimitare dei dissesti in atto o potenziali, definire dei cinematismi agenti e della loro possibile evoluzione, individuare le cause predisponenti e scatenanti, e determinare le proprietà geotecniche e geomeccaniche dei materiali coinvolti.

A tale scopo occorre seguire un iter che comprende:

- acquisizione dei dati (⇒ conoscenza del territorio),
- realizzazione di un archivio informatizzato dei dati riguardanti gli eventi oggetto dell'analisi,
- applicazione di metodologie per la definizione del grado di pericolosità di una certa area e conseguente modellazione dei fenomeni in atto. Loro verifica sia in condizioni naturali che con eventuali interventi,
- scelta progettuale degli interventi finalizzata alla pianificazione del territorio.

La fase di *acquisizione dei dati* comprende rilievi di superficie del corpo franoso (rilievo geomorfologico, geo-litologico, geologico-strutturale, prove di laboratorio, geodetico-topografico-fotogrammetrico, idrografico, pluviometrico) e indagini profonde (prove in sito, prove di laboratorio, monitoraggio movimenti profondi, indagini idrogeologiche).

Nel corso del rilevamento geologico viene verificata quale è l'area che può essere definita "in frana" in base alle osservazioni morfologiche. Esso comprende le seguenti fasi:

- rilevamento geologico di dettaglio, evidenziando gli affioramenti e i limiti tra le unità litologiche, realizzando una carta geologica;
- rilevamento geomorfologico
- stesura di sezioni geologiche dirette ad indicare la giacitura delle discontinuità
- prospezioni dirette e indirette ( perforazioni, prospezioni geofisiche...)
- posa in opera di una strumentazione per il rilevamento di movimenti. Nel caso di moti rapidi ( p.e. 1 cm al mese) si usano capisaldi da controllare con metodi topografici, per moti più lenti invece si usano inclinometri, estensimetri ecc...

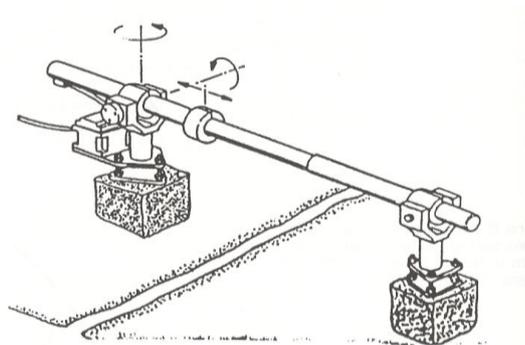


Figura - Estensimetri per la misura dello spostamento nelle tre direzioni

Per verificare con esattezza l'estensione, i limiti e la profondità, occorre disporre sul terreno di **capisaldi topografici** (paline segnaletiche), delle quali sia possibile riconoscere i movimenti orizzontali, verticali e rotatori. I rilevamenti vengono eseguiti in intervalli di tempo preordinati (nei casi più gravi giornalmente), mediante accurate indagini topografiche. Questi rilievi consentono di conoscere in ogni istante se il suolo si sta rigonfiando, estendendo, fratturando ..., con quale velocità e in che senso avvengono tali movimenti

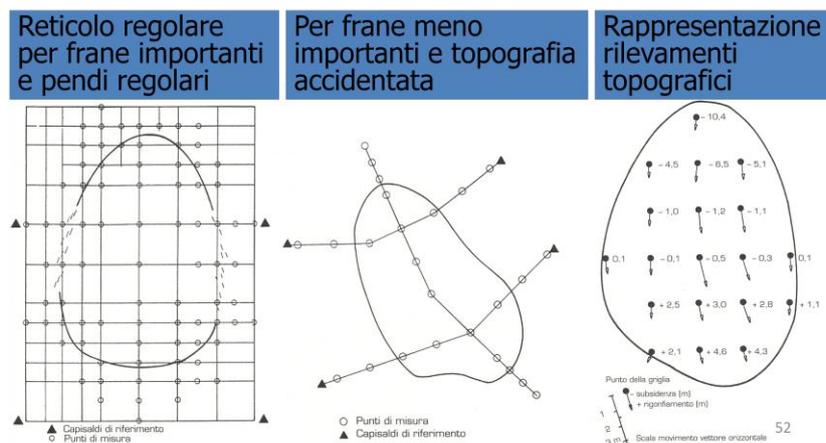


Figura - Il posizionamento di capisaldi topografici, i cui spostamenti sono misurabili tramite rilevamenti eseguiti con GPS o con teodoliti, permette di visualizzare le modificazioni plano-altimetriche dei versanti.

Le letture della velocità e dello spostamento nelle diverse direzioni vengono riprodotte su grafici che permettono analisi di dettaglio del fenomeno.

Per determinare il volume dell'ammasso in frana e ricostruire la superficie del movimento della frana si attuano delle **perforazioni**, che permettono di campionare il terreno recuperando dei campioni di materiale che forniranno indicazioni sulla qualità della roccia, il loro aspetto e la posizione delle superfici di movimento interne alla frana.

La superficie di movimento o di rottura può essere costituita:

- da un livello particolarmente debole ( argilla, argilliti sature, miloniti...) per costituzione litologica
- da superfici di frattura o livelli particolarmente fratturati
- da una superficie liscia ricoperta da terreni permeabili o con caratteristiche tecniche inferiori alla roccia dove avviene il movimento.

Alcuni segni sui campioni prelevati inoltre permettono di riconoscere la superficie di movimento:

- superfici perfettamente lisce (spesso annerite) e diagenizzate. Per esempio in un'argilla queste superfici possono presentarsi come argilloscisti neri in scaglie con superfici brillanti
- brecce di frizione, roccia triturata, pieghettature caoticizzate,
- strie nel senso di movimento (si riscontrano in molte frane, sono dovute all'incisione di corpi più resistenti contenuti nella frana).

Le perforazioni rilevano inoltre la presenza di acqua, se essa viene riscontrata, occorre controllare nel tempo la piezometria (un innalzamento della falda comporta un accrescimento dell'instabilità). Si può anche ricorrere all'installazione di **inclinometri**, cioè attrezzature che rilevano le deformazioni nel tempo; sono tubi infissi nel terreno che si deformano a causa degli spostamenti del terreno lungo le superfici di movimento della frana.

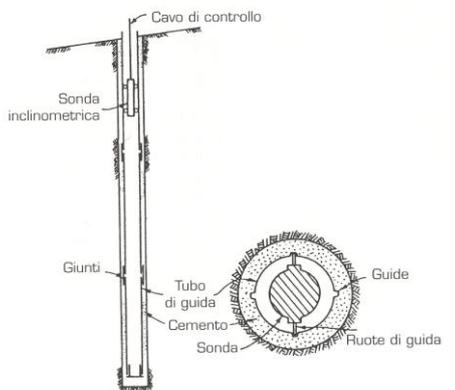
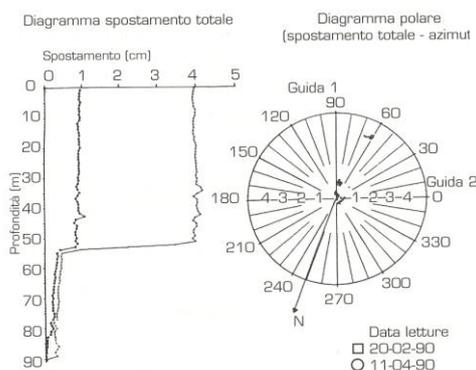


Figura – Inclinometro

Da l'entità degli spostamenti dalla relazione

$$D = L \sin b$$

dove  $L$  è la lunghezza del tratto percorso dallo strumento con inclinazione  $b$ ; la loro funzione maggiore è quella di permettere di identificare la *profondità della superficie di rottura principale*, oltre la quale non vi sono altre superfici di movimento attuale della frana.



Altre indagini utili sono:

- messa in posto di **piezometri** per il controllo della falda e delle suo oscillazioni

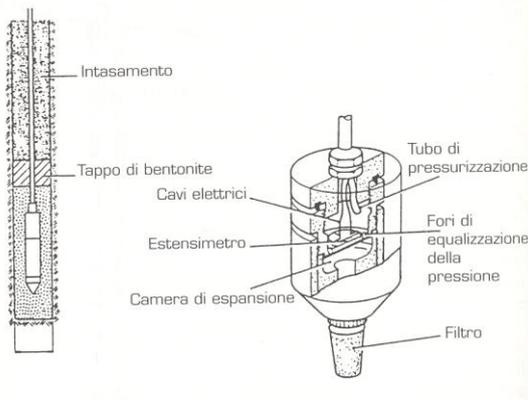


Figura - Piezometro.

Permette di ricostruire le modalità di deflusso delle acque sotterranee, rivelando anche la sensibilità della falda alle precipitazioni; dal regime piezometrico si possono ricavare indicazioni circa i rapporti fra sollevamento o abbassamento della piezometria a seguito degli eventuali movimenti registrati.

- **prove penetrometriche,**
- **prospezioni geofisiche,** adatte ad evidenziare i caratteri meccanici della roccia ( p.e. il modulo elastico)
- **prospezioni geoelettriche,** per individuare l'andamento dei corpi rocciosi saturi d'acqua, o che presentano differenze di resistività elettrica rispetto ad altre unità,
- **rilievo geosismico,** per individuare lo spessore della roccia in base al rilevamento della distribuzione della velocità sismica.

Dopo un certo tempo che la frana è in atto è possibile verificare l'estensione del movimento tramite **foto aeree**, che permettono una visione panoramica della morfologia del territorio e delimitare il corpo della frana ( buona immagine dell'andamento della nicchia di distacco.

*L'organizzazione dei dati* dipende dal tipo di dato. Infatti questi dati possono essere:

- primari: provengono direttamente da ogni tipo di rilevamento. Possono essere numerici oppure grafici (foto aeree, foto da satellite ecc.),
- secondari: si tratta di dati elaborati. Possono essere numerici o grafici (DTM, immagini vettoriali ecc.).

Gli strumenti informatici che permettono di raccogliere, analizzare e successivamente elaborare le informazioni, sono i database relazionali. Si tratta di tabelle collegate tra loro in modo logico attraverso relazioni. La rappresentazione grafica avviene tramite un GIS.



## 7. Aspetti idrogeologici delle frane

Nei movimenti franosi ha notevole importanza l'esame dei dati pluviometrici, del regime delle sorgenti e della freaticimetria.

Le piogge aumentano la portata che attraversa il corpo franoso. Di conseguenza, aumentano i livelli piezometrici e il gradiente idraulico.

A seconda della struttura dell'ammasso roccioso, esso può avere una pericolosità alta o bassa. Per esempio, se le discontinuità sono poche e con un'apertura ridotta, le vie di circolazione dell'acqua sono limitate, dunque è maggiore la probabilità che il pendio sia stabile. Viceversa, se le discontinuità sono molto numerose, oppure con aperture ampie e interconnesse tra di loro, l'acqua che si infiltra ha delle maggiori possibilità di circolazione, aumentando la probabilità di instabilità del pendio.

### a. Pluviometria

Una pioggia di circa 30 mm al giorno ( nei nostri climi non è eccezionale, si sono raggiunte piogge oltre i 400 mm/giorno con produzione di alluvioni e estesi franamenti) è in grado di produrre solchi di erosione nei terreni superficiali. Piogge superiori ai 100mm/giorno producono consistenti infiltrazioni nei primi metri di terreno, che con il perdurare nel tempo, può determinare cedimenti importanti. La frequenza con la quale si ripetono piogge prolungate di notevole entità e la ricostruzione storica degli eventi franosi che si sono accompagnate, è uno degli elementi più utili per valutare la vulnerabilità di un territorio.

Le aree battute da questi eventi pluviometrici non superano in genere poche decine di km<sup>2</sup>, intorno a quest'area disastata le piogge sono minori pur potendo produrre dissesti, mentre nell'area più colpita i dissesti si contano a decine per km<sup>2</sup> ( come solchi di erosione, smottamenti), nelle aree circostanti la densità è di 1-2 dissesti per km<sup>2</sup>.

Non è raro che in una stessa valle sia colpito uno solo dei due versanti. Nella seguente tabella è evidenziata la correlazione orientativa tra tipo di dissesto e piogge per suoli limosi sabbiosi e argillosi.

Da 10 a 30mm/giorno ( per 1 giorno)	Modesti solchi di erosione, qualche riattivazione di piccole frane
Da 10 a 30mm/giorno ( per 2-3 gg consecutivi)	Solchi di erosione, molti fenomeni di riattivazione di vecchie frane, smottamenti
Da 10 a 30 mm/giorno con suolo saturo	idem
Da 30 a 150 mm/giorno ( per 1 giorno)	Profondi solchi di erosione, accumulo materiale in alveo, esondazioni e "mure"( in piccoli bacini), frane
Da 30 a 150 mm/giorno ( per 2-3 gg consecutivi)	Idem, su bacini estesi con frane anche profonde
Oltre 150 mm/giorno	Frane profonde ed estesi alluvionamenti per il riempimento degli alvei con sedimenti di frana e per la rilevante portata dei fiumi.

La termometria ha una rilevante importanza nel determinare l'evaporazione, può quindi favorire l'eliminazione delle acque infiltrate nei mesi caldi.

b. Freatimetria e regime delle sorgenti

Occorre controllare la piezometria del corpo in frana, o almeno segnalare l'esistenza di falde nei corpi in frana.

Il regime delle falde è anche esso da tenere sotto controllo; un aumento della portata equivale ad un aumento del livello piezometrico della falda contenuta nel sottosuolo. La sparizione può significare d'altronde, modifiche nell'assetto del terreno e quindi rendere evidente una genesi o accelerazione del movimento franoso.

La presenza d'acqua diminuisce quindi la qualità dei terreni, incidendo sull'attrito interno e la coesione, aumentando il peso del materiale gravante sulla superficie di movimento.

## **7.1. Le acque come agenti modificatori dei versanti**

L'evoluzione dei versanti avviene per effetto dei processi geologici elencati dalle prime lezioni; fra essi ha particolare importanza l'azione delle acque superficiali e sotterranee, che per la loro diversa distribuzione lungo il rilievo assumono ruoli differenti.

Nella parte alta, in prossimità del crinale, fino a coprire un dislivello medio di 100 m nei nostri climi, nelle zone di media montagna (massimo 1800 m s.l.m.), la coltre detritica superficiale risulta poco spessa, cosicché le acque piovane e di fusione delle nevi tendono a scorrere in superficie o a poca profondità, negli interstizi delle rocce, dando luogo al prevalere dello *scorrimento superficiale*, dai quali derivano numerosi e vasti fenomeni erosivi e dissesti, come incisioni di valli e crolli di blocchi di roccia. Scendendo ulteriormente, allo scorrimento superficiale si viene ad accompagnare l'*infiltrazione* nel sottosuolo, che diviene un fenomeno di sempre maggiore importanza per i volumi d'acqua che vi sono impegnati, in generale per l'aumento verso le quote inferiori dello spessore dei depositi detritici permeabili.

Mentre alle quote più alte (orientativamente, in media fino a 150 m circa dal crinale) il terreno superficiale è saturo solamente durante le piogge, a quota inferiore il periodo di saturazione dei primi livelli è persistente per qualche giorno dopo le piogge, e dà spazio alla trasmissione di acqua ai livelli del suolo più profondi. Questi livelli, che in generale sono meno permeabili perché non percorsi da vuoti lasciate da radici o da vie di erosione sotterranea, si impregnano d'acqua con difficoltà ma, una volta raggiunta una certa saturazione, tendono a mantenerla più a lungo dei livelli superiori. Da circa 200 m dal crinale si hanno le prime sorgenti, che drenano gli acquiferi saturi e apportano acqua alla rete idrografica superficiale.

A questa altezza, inizia una fascia, che si estende fino al corso d'acqua principale, in cui i livelli superficiali e quelli profondi mantengono una certa saturazione per buona parte dell'anno.

Questa zona, sottoposta alternativamente a saturazione e a esaurimento, determina una serie di sorgenti e di corsi d'acqua affluenti verso il corso d'acqua principale, così da essere ben delimitabile sulle carte topografiche. Nei climi più aridi, la zona a elevata saturazione si riduce alle immediate adiacenze del corso d'acqua e della parte inferiore delle valli secondarie che vi affluiscono, oltre che all'alveo del corso d'acqua più importante; nei climi umidi la zona a elevata saturazione è piuttosto ampia, anche se solamente nella parte inferiore delle valli si raggiunge la saturazione completa.

Poiché il grado di saturazione del suolo tende ad aumentare con il diminuire delle quote, le sorgenti sono tanto più ricche e persistenti quanto più sono vicine al corso d'acqua. Lungo l'alveo non è raro assistere all'emergenza di buona parte delle acque sotterranee che percorrono il versante; queste affiorano lungo le ripe o addirittura nel letto del corso d'acqua, in allineamenti più o meno estesi (*sorgenti lineari*). Il maggiore grado di saturazione si raggiunge lungo gli alvei degli affluenti nella loro parte inferiore, e nell'alveo del corso d'acqua principale. Ovviamente, quanto più permeabile è il suolo o la roccia in prossimità dei crinali, tanto più facilmente avremo infiltrazione anche alle alte quote, e pertanto in tali occasioni l'area di maggiore circolazione idrica ha inizio a quote più alte.

Questo schema si riproduce su tutto il bacino, a quote diverse secondo l'altitudine dei crinali del bacini secondari, e secondo la permeabilità degli ammassi rocciosi, evidenziando sostanzialmente in ogni bacino la presenza di una zona, che decorre a partire da una certa quota fino all'alveo del locale ricettore, in cui la circolazione idrica sotterranea lascia tracce molto evidenti. In questo intervallo altimetrico, che dopo le precipitazioni vede la presenza di un elevato stato di saturazione di tutto il suolo, e nei periodi lontani dalle piogge e dalla fusione delle nevi risulta invece arida, il ridursi delle proprietà meccaniche del terreno superficiale in conseguenza dell'elevato stato di saturazione, favorisce il lento movimento verso il basso dei primi livelli del terreno, per qualche decimetro di spessore (*creeping*), soprattutto quando il suolo è allo stato fangoso. Compaiono allora pozze, fenditure nel suolo, e si registra anche lo spostamento di zolle di terreno. In *estate e autunno*, la tendenza alla saturazione si riduce, per l'elevata evaporazione dal suolo e traspirazione dalle piante, e il terreno superficiale è più frequentemente arido. In *inverno e primavera il terreno è quasi permanentemente saturo*. Durante le stagioni, assistiamo quindi a un perenne allargarsi e restringersi della fascia di instabilità, con una massima esposizione ai dissesti nel periodo in cui si ha contemporaneamente la fusione delle nevi e precipitazioni molto intense o molto prolungate e di elevata entità. Tutti questi fenomeni si accentuano in prossimità dei corsi d'acqua, a maggior ragione in quanto in vicinanza di essi la pendenza dei versanti aumenta per effetto dell'erosione esercitata dalle acque superficiali, e tutti i movimenti del suolo vengono accelerati. Si verificano quindi spostamenti di rilevanti volumi di terreno, fino a profondità tanto più elevate quanto maggiore è la permeabilità verticale del suolo, che danno luogo alle frane e ai fenomeni di intensa erosione (erosione accelerata) che verranno descritti nei capitoli successivi. Avremo quindi a seconda dello stato di saturazione dei diversi livelli del suolo frane superficiali e frane profonde.

### **7.1.1. Fase preliminare: influenza delle piogge**

Si consideri il caso di un bacino idrografico nel quale si renda necessario, o in funzione di uno sviluppo urbanistico, o di un progetto di vie di comunicazione, o per un piano di sistemazione, identificare l'area sulla quale si possono verificare movimenti franosi, e procedere alla loro delimitazione in vista di un risanamento.

Il procedimento più comunemente seguito per studiare le frane, che si distinguono dagli altri dissesti perché comportano lo spostamento di grandi volumi di terre o di materiale roccioso in tempi brevi, prevede una preventiva analisi dell'evoluzione dei versanti che ha portato allo stato di crisi, esaminando ad esempio la successione delle fotografie aeree dell'area, e utilizzando i dati meteorologici (piogge, nevi, temperature) del periodo antecedente il collasso del terreno per verificare quali siano gli agenti modificatori del rilievo, che possono dar luogo allo stato di crisi. Fra questi, in alcuni casi molto gravi, si possono annoverare anche i terremoti.

Le precipitazioni hanno per lo più una rilevante e spesso decisiva importanza nell'innescare delle frane. Ovviamente la pioggia di maggiore entità e di maggiore intensità è quella che reca il maggior danno: tuttavia questo danno deve essere confrontato con lo stato di saturazione del terreno, che è più alto in inverno-primavera, per la scarsa evaporazione.

Si osserva che piogge con intensità superiori ai 40 mm/h sono quasi sempre tali da generare instabilità, e si deve infatti constatare che per fortuna raramente lungo l'arco dell'intera giornata le piogge superano i 400 mm.

Sono inoltre piuttosto rare le precipitazioni che superano il 20% dell'intera pioggia annua.

Piogge di grande entità tendono a saturare i livelli profondi, mentre precipitazioni di forte intensità saturano solo i livelli più vicini alla superficie. Si è visto nel precedente paragrafo che, secondo la profondità saturata, varia anche lo spessore del terreno coinvolto nel movimento, ma sarà bene fin da ora annotare che le modalità con le quali si manifestano questi dissesti sono anche molto differenti fra loro.

### **7.1.2. Prospezioni per la delimitazione dell'area in frana**

A questa prima fase fanno seguito le prospezioni e le indagini sull'area di frana, che prendono le mosse dallo studio dei limiti dell'area interessata al movimento franoso. E' quindi necessario procedere al rilevamento di tutti i segnali dell'esistenza di una crisi nell'evoluzione del rilievo, delimitando innanzitutto le frane esistenti nell'area di interesse, con lo scopo di evidenziare l'eventuale esistenza di particolari indici di debolezza della roccia, ai quali si possa associare una elevata franosità.

Si deve quindi necessariamente ritenere che, mentre le frane superficiali sono legate preferenzialmente allo stato di saturazione del suolo, le frane profonde si verificano di preferenza nei settori dove le acque sotterranee possano penetrare in profondità e circolare nella roccia, e dove pendenze, stati di debolezza della compagine rocciosa ed erosione operata dai corsi d'acqua agiscano contemporaneamente. In particolare, si nota come il contatto calcari-ardesie fratturate produca l'emergenza delle acque sotterranee (che da rocce permeabili come i calcari passano a rocce impermeabili, in cui non possono circolare agevolmente, se non all'interno di

discontinuità aperte), e come queste siano interessate da sistemi di zone di frattura che permettono l'infiltrazione in profondità delle acque, mentre i corsi d'acqua possono esercitare la loro azione di erosione, che produce l'aumento delle pendenze e può portare al superamento delle condizioni di equilibrio.

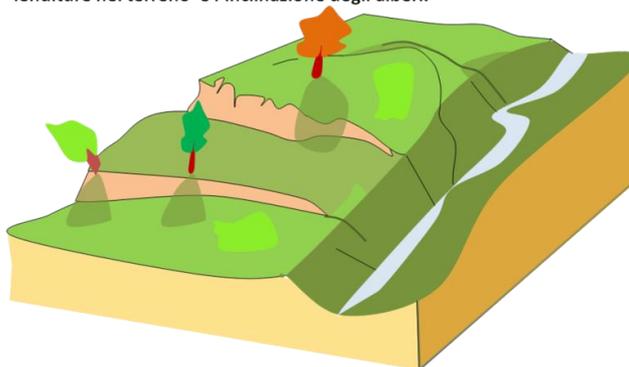
Per tali motivi la frana si localizza nel settore che più degli altri vede coincidere questi elementi.

La carta geologica dell'area di frana rappresenta quindi il passo successivo, permettendo di focalizzare l'attenzione sulle cause predisponenti il movimento franoso.

A questo punto, sarà opportuno verificare in dettaglio e cartografare l'esistenza dei segnali di crisi nella dinamica del versante.

Le frane, con l'eccezione di gran parte dei crolli, evolvono (figura) dapprima mostrando un sistema di fratture di trazione ad arco nella parte alta del versante, a cui fa seguito un rigonfiamento nella parte inferiore, anche con la genesi di contropendenze, una deformazione palese della rete idrografica, progressiva apertura di fessure negli edifici, che possono assumere anche una certa pendenza, inclinazione di alberi, scomparsa di vegetazione.

Il sintomo più evidente dei movimenti del suolo è la formazione di fenditure nel terreno e l'inclinazione degli alberi.



Inoltre il versante può non franare immediatamente, ma passare attraverso una fase di *dissesto idrogeologico*, in cui *prevale l'azione erosiva delle acque superficiali* su quella delle acque profonde, che invece, nella massima parte dei casi, predominano nel dar luogo ai movimenti franosi. Questa porta alla formazione di vallecole in cui si accumulano imponenti masse di detriti, che vengono poi prese in carico dalle piene più violente e trascinate a valle improvvisamente, con gravi conseguenze (*debris-flows*). Vanno ricercati tutti i segnali di crisi descritti, e riportati su una carta di dettaglio (almeno 1/10.000), dalla quale si potrà infine ottenere la delimitazione (figura 5.8) dell'area in cui questi si verificano. Nella medesima figura sono tabellati tutti i segnali di movimento incipiente, che vengono confrontati con i casi in cui si hanno condizioni di stabilità. Il rilevamento di questi segnali non può che essere compiuto direttamente, tramite il rilevamento geologico descritto nelle precedenti lezioni. Questa fase di delimitazione è importante, perché potremo scegliere l'area (forzatamente *più ampia* di quella che si ritiene in frana) in cui collocare tutte le strumentazioni necessarie per verificare e quantificare i movimenti.

### 7.1.3. Relazione geologica sui dissesti evidenziati

La relazione geologica ha lo scopo di identificare le aree di frana e la gravità dei dissesti, descrivere i processi geologici che controllano la dinamica del versante, e la natura delle rocce interessate; deve inoltre chiarire la costituzione del modello fisico del sottosuolo, evidenziando sia la struttura geologica e idrogeologica, sia la distribuzione e giacitura delle zone di debolezza in superficie e in profondità, e fornendo tutti gli elementi necessari per comprendere i motivi della crisi di stabilità del versante. Compito dello studio geologico è anche l'assistenza alle indagini geognostiche per il campionamento dei terreni e la messa in posa delle attrezzature necessarie per valutare l'entità dei movimenti e la profondità della superficie di rottura della frana.

L'analisi quantitativa della stabilità e la progettazione delle opere di ripristino necessita di approfondimenti e calcoli specialistici, che ricadono nelle competenze della geotecnica e della meccanica delle rocce. Pertanto, anche se la funzione dello studio geologico è ampiamente descrittiva, occupa una parte fondamentale della messa in sicurezza dei versanti, ed ha buoni risultati se compiuta in modo da completarsi con lo studio geotecnico e della meccanica delle rocce. La descrizione dei movimenti franosi è quindi indispensabile per una loro sistemazione. Per una migliore comprensione, il sito [www.geologia.dstm.polimi.it](http://www.geologia.dstm.polimi.it) riporta una serie di fotografie di strutture geologiche e di frane, con descrizione degli elementi fondamentali, che è opportuno consultare; per gli studenti interessati, è stato predisposto anche un CD contenente sia le fotografie sia una loro elementare spiegazione, disponibile presso gli uffici dei docenti.

Nelle pagine seguenti sono illustrati gli schemi di alcuni movimenti franosi di maggiore interesse, sui quali il testo riporta i dettagli delle relazioni che governano l'equilibrio dei versanti. Per tutta questa parte si rinvia quindi al testo di Rilevamento geologico-tecnico.

#### 7.1.4. Ricostruzione del corpo di frana

Una volta delimitato il corpo franoso, al fine di identificare la struttura della frana, si procede con l'impiego di perforazioni, piezometri, inclinometri, e una serie di strumenti che consentono di verificare le variazioni dell'apertura delle discontinuità (fessurimetri o estensimetri), gli eventuali abbassamenti del livello del suolo (assestimetri), gli spostamenti e le deformazioni della superficie del versante (capisaldi topografici).

Le operazioni si devono succedere nell'ordine di seguito indicato.

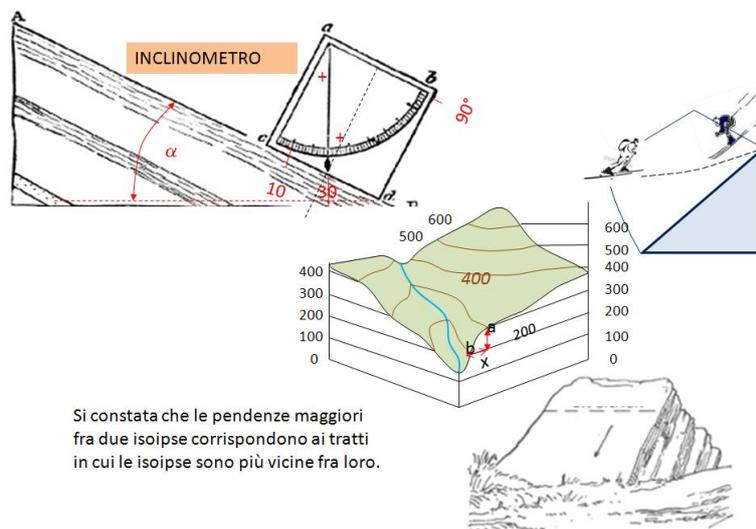
1. **Il posizionamento di capisaldi**, i cui spostamenti sono misurabili tramite rilevamenti topografici eseguito con GPS o con teodoliti, permette di visualizzare le modificazioni plano-altimetriche dei versanti.
2. **Uno studio geofisico**, in specie se condotto con l'ausilio della geosismica, darà luogo alla misurazione indiretta dei parametri elastici dei corpi rocciosi coinvolti nella frana, e di procedere a una prima delimitazione della profondità del movimento.
3. **Le perforazioni** permettono il prelievo di campioni da destinare ai laboratori geotecnici, dove gli specialisti identificheranno i parametri meccanici dei terreni e forniranno le elaborazioni relative alla stabilità del versante. Consentono inoltre di eseguire, con il metodo delle correlazioni, le sezioni geologiche necessarie per accertare e descrivere la struttura geologica del versante, evidenziando soprattutto l'andamento dei livelli deboli. A tal fine, è opportuno che essi siano posizionati lungo allineamenti che permettano la costruzione di sezioni il più possibile fedeli.

4. I **piezometri** risultano di notevole importanza, perché permettono di ricostruire le modalità di deflusso delle acque sotterranee, rivelando la sensibilità della falda alle precipitazioni; dal regime piezometrico si possono ricavare indicazioni circa i rapporti fra sollevamento o abbassamento della piezometria a seguito degli eventuali movimenti registrati.
5. Gli **inclinometri** permettono di verificare l'entità degli spostamenti dalla relazione

$$\Delta = L \sin \beta$$

dove  $L$  è la lunghezza del tratto percorso dallo strumento con inclinazione  $\beta$ ; la loro funzione maggiore è quella di permettere di identificare la *profondità della superficie di rottura principale*, oltre la quale non vi sono altre superfici di movimento della frana.

Il funzionamento di questa attrezzatura avviene con la registrazione delle inclinazioni assunte dalla sonda (calata in una perforazione lungo un tubo-guida percorso per la sua lunghezza da scanalature verticali, in cui entrano le rotelle di cui è dotato l'apparecchio).



Una volta posizionati tutti gli strumenti elencati, si possederanno tutti gli elementi per tracciare sezioni che evidenzino tutti gli elementi di interesse geologico.

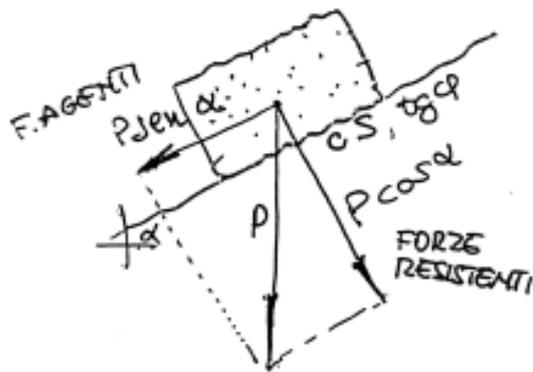
## 7.2. Fattore di sicurezza

I metodi all'equilibrio limite ipotizzano che la rottura all'interno di un pendio si realizzi se la resistenza al taglio del materiale (che si oppone al movimento), in corrispondenza di una data superficie, è inferiore alle forze tangenziali destabilizzanti (che inducono il movimento).

Si definisce fattore di sicurezza:

$$F_s = \frac{\text{resistenza al taglio del materiale}}{\text{resistenza al taglio mobilitata}} < 1$$

- $F_s > 1$   $\Rightarrow$  condizione di stabilità
- $F_s < 1$   $\Rightarrow$  condizione di instabilità
- $F_s = 1$   $\Rightarrow$  condizione di equilibrio limite



$$\text{FATTORE DI SICUREZZA} = \frac{\text{FORZE RESISTENTI}}{\text{FORZE AGENTI}}$$



$$\frac{P \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + cS + R}{P \sin \alpha}$$

$\varphi = \alpha$  IN CONDIZIONI DI EQUILIBRIO  
 PER  $c = 0$  e  $R = 0$  INFATTI:

IN EQUILIBRIO  $F_s = 1$

$$F_s = \frac{P \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + cS + R}{P \sin \alpha} \quad \text{se } c = 0 \quad R = 0$$

$$F_s = \frac{P \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{P \sin \alpha} = 1 \quad \rightarrow \quad \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi$$

NEL VARIANTE REALE  
 AGISCONO I SEGUENTI  
 FATTORI

- 1)  $K$  (IN M/S) PERMEABILITÀ
- 2)  $m_e$  (IN %) POROSITÀ
- 3) LIVELLO PIEZOM.  $y$  (M)

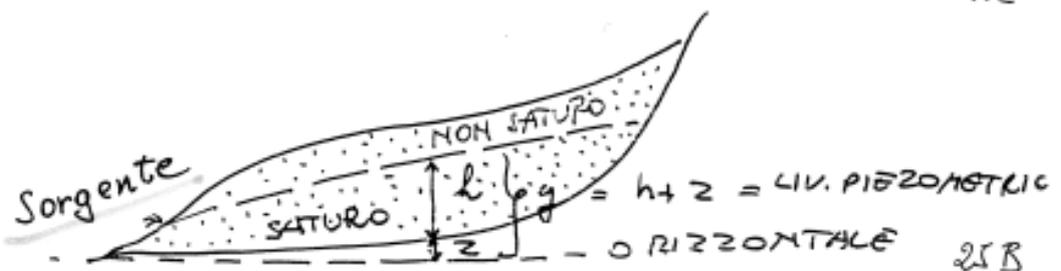
CARATT. IDROGEOLOGICHE

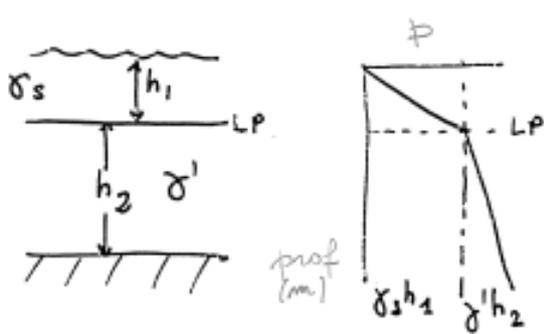
- 1) COESIONE ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ )  $c$
- 2) PESO ( $\text{Kg}$ )  $P$
- 3) ATTRETO (GRADI)  $\varphi$

CARATT. TECNICI

CAR. MORFOL. E  
GEOLGICI

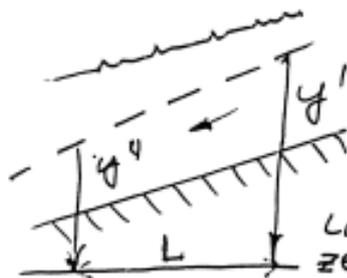
- PENDENZA DISCONTINUA
- PENDA DEL VES.
- FRATTURAZIONE





$\gamma_s$  = Peso spec. solido  
 $\gamma'$  = Peso spec. sommerso =  $\gamma_s - \gamma_w$   
 =  $\gamma_s - 1$

NEL SATURO L'INCREMENTO DI PRESSIONE EFFICACE È RIDOTTO DALLA PRESSIONE NEUTRA



• LA DIFFERENZA  $y' - y''$   
 CREA UNA PRESSIONE  
 DI FILTRAZIONE: L'ACQUA  
 SI SPOSTA VERSO  $y''$   
 E TENDE A  
 SPOSTARE  
 I GRANU

• PRESSIONE DI FILTRAZIONE TANTO MAGGIORE QUANTO MAGGIORE LA CADENTE PIEZOMETRICA  $(y' - y'')/L = i$

• SI HA UNA PORTATA DI FALDA  $Q$  PARI AL PRODOTTO DELLA SEZIONE  $A \times$  LA VELOCITÀ DI FLUSSO  $v_D$

$$Q = A \cdot v_D$$

•  $v_D$  È PROPORZIONALE A  $(y' - y'')/L$  TRAMITE IL COEFF. DI PERMEABILITÀ  $k$  :

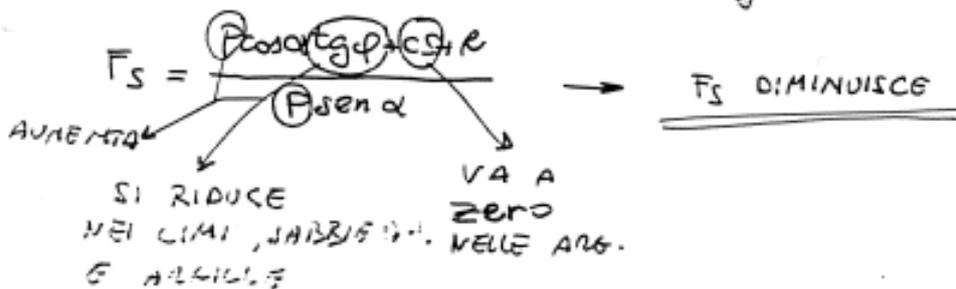
$$v_D = k i$$

$$Q = k i A$$

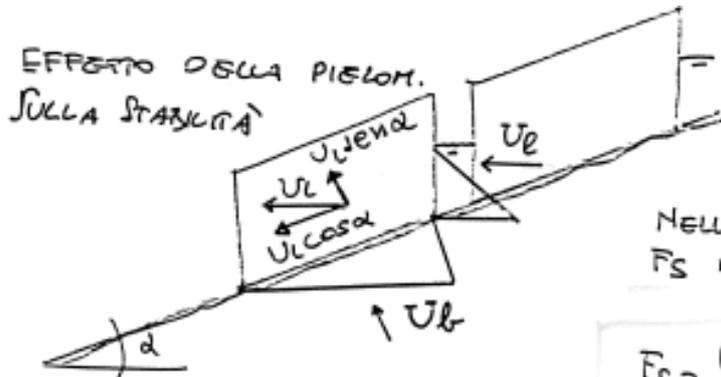
• LA PORTATA È NULLA SE LA FALDA È ORIZZONTALE

- È MASSIMA QUANDO  $k$  È MASSIMO
- CRESCE CON  $i$

N.B. → SE NEL TERRENO AUMENTA  $\gamma$  :

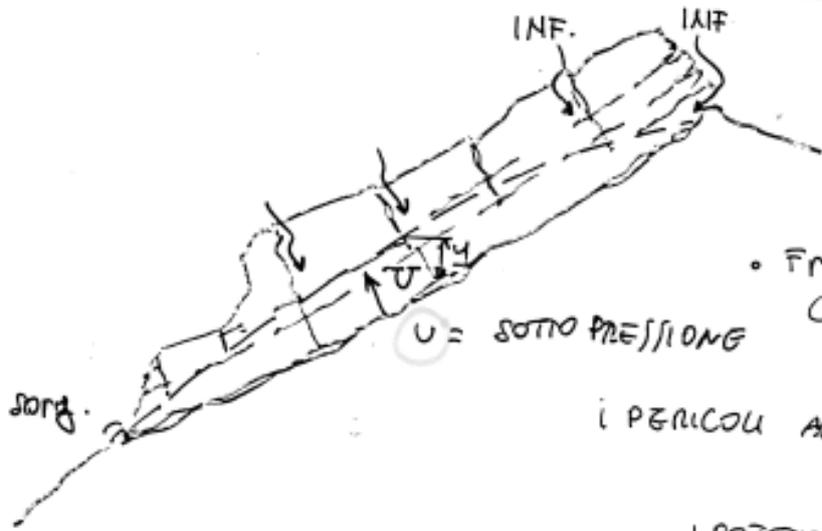


26A



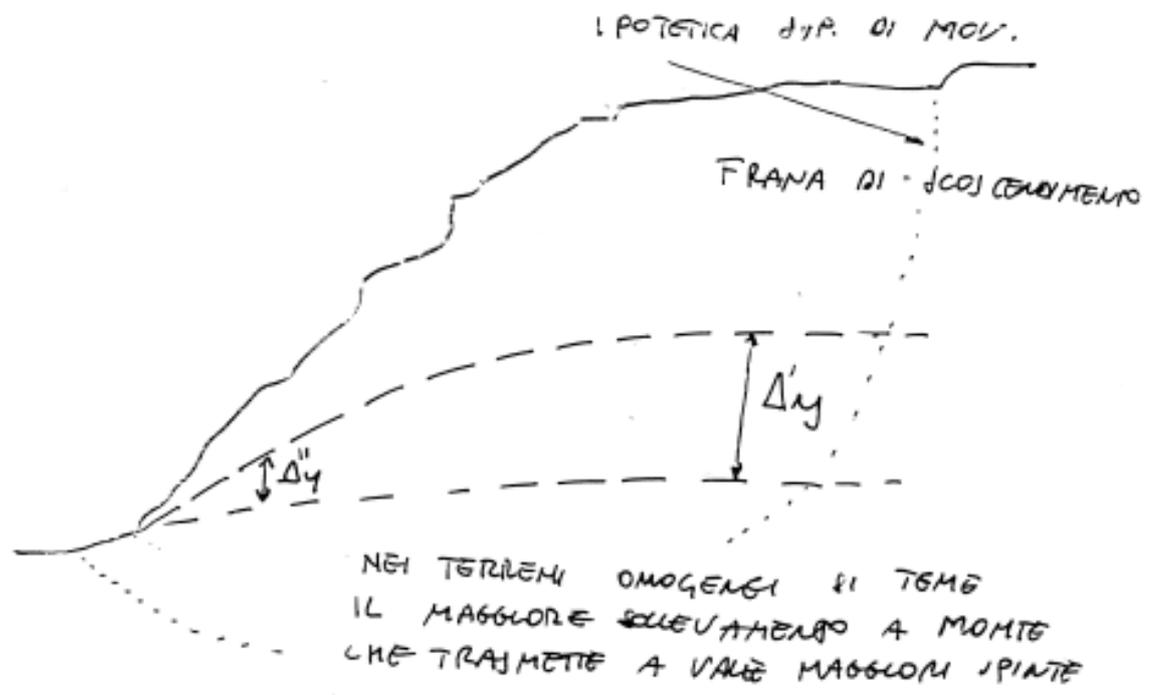
NELLE DISCONTINUITÀ CON ACQUA  
FS DIVENTA

$$F_s = \frac{(P \text{ cos } \alpha - U_B - U_L \text{ sen } \alpha) \text{ tg } \varphi}{P \text{ sen } \alpha + U_L \text{ cos } \alpha}$$



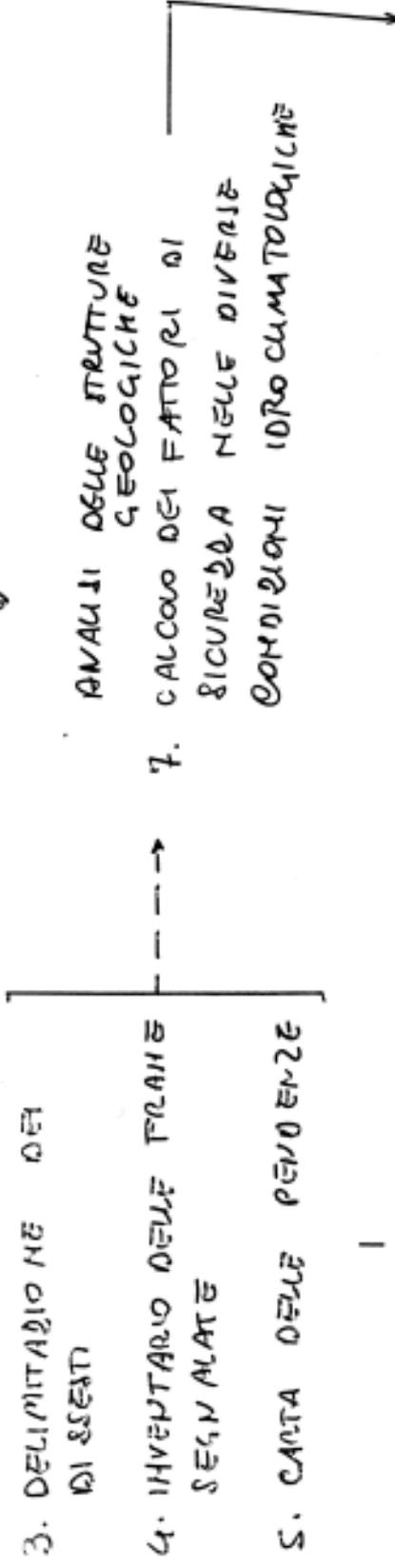
• Frana di scivolamento  
(trasl. planare)

I PERICOLI AUMENTANO CON  $y$



SCHEMA PER LA PREVISIONE DEI SITI SOGGETTI A FRANGE

1. CARTA GEOLOGICA → 2. GRADO DI ALTERAZIONE ; CLASSIFICAZIONE RMR O Q  
DEFINIZIONE C, P, RES. COMPRESIONE  
ANALISI DELLO STATO DI FRATTURAZIONE



3. DELIMITAZIONE DEI SITI  
4. INVENTARIO DELLE FRANGE SEGNALETE  
5. CARTA DELLE PRESSIONI

6. IDENTIFICAZIONE DELLE PRECIPITAZIONI DI MAGGIORE ENTITÀ CON TEMPO DI RITORNO DI 1-10-25-50-100 E OLTRE 100 ANNI  
CON PARTI COLANE ATTENZIONE A QUELLE DI MAGGIORE ENTITÀ RIFERITO ALLA MEDIA ANNUA

7. CALCOLO DEI FATTORI DI SICUREZZA NELLE DIVERSE CONDIZIONI IDROCLIMATICHE

8. VALUTAZIONE DEL RISCHIO  
( COSTO DEL RIMBORSO · PROBABILITÀ DEL DANNO · PERCENTUALE DELL'AREA COLPITA )  
DI OGNI AREA  
(es. 800 MILIONI IN 10 ANNI)

## 8. Interventi consigliati nei diversi stadi evolutivi per i diversi tipi di frana

Il procedimento per localizzare le aree di rischio consigliato è il seguente:

- A. individuare le rocce che, per natura e struttura geologica, possono immagazzinare acqua (rocce serbatoio)
- B. evidenziare dove si possono avere stati di saturazione del terreno, ad esempio per contatto fra rocce – serbatoio e terreni impermeabili
- C. verificare dove queste condizioni si sovrappongono con:
  - livelli di rocce deboli per litologia, alterazione, fratturazione
  - concentrazione di deflussi superficiali durante le piogge
  - giacitura a franapoggio minore del versante delle discontinuità o della loro combinazione (Markland)
  - tracce di movimenti in atto.

Tale operazione è valida a scala generale, per identificare la propensione al dissesto. Per indagini di maggiore dettaglio, è necessario possedere dati di terreno (rilevamenti strutturali e analisi geotecniche), anche se sostanzialmente si adottano in gran parte i criteri sopraelencati. Di seguito si illustrano i diversi interventi consigliati per i diversi tipi di frana.

### a. Frane di crollo e toppling

Nello stadio iniziale ci sono solamente fenditure che tendono ad aprirsi; occorre uno studio geologico- strutturale che evidenzi quali siano le combinazioni di discontinuità che favoriscono il movimento e quali sono le fratture che permettono il distacco della parete. In questa fase è opportuno drenare le acque, costruendo canalette sul pendio o dreni profondi (trincee) se si è in presenza di acque di falda abbastanza vicine alla falda. Nella fase iniziale sarà opportuno eliminare i blocchi più compromessi tramite disaggio, e con ancoraggi sarà possibile fissare alcuni blocchi alla parete, operazione possibile anche tramite cementazioni. Reti e cementazioni a spruzzo possono essere validamente utilizzati per blocchi di minori dimensioni. È fondamentale individuare l'estensione dell'area fratturata. Nello stadio successivo, quello di inizio movimento, la situazione è già compromessa, e l'equilibrio può essere ristabilito solo con un vasto sistema di drenaggio che può essere basato anche su tubi drenanti orizzontali, che possono raggiungere le falde profonde. Fra i rimedi utili sono consigliati in alcuni casi muri di sostegno (per casi meno gravi dove la spinta della roccia è controllabile) talora fondati su pozzi, quando occorre

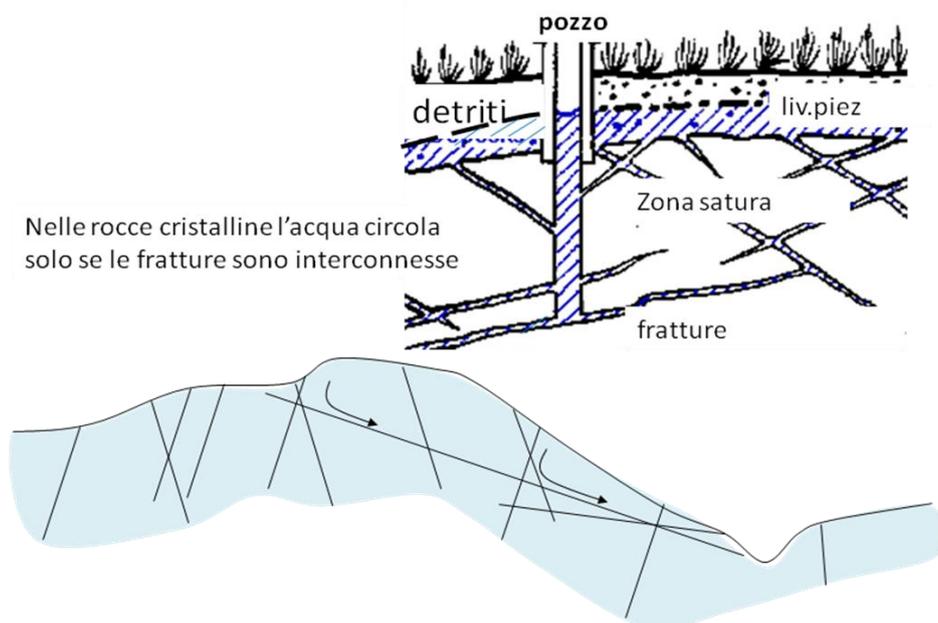
raggiungere terreni solidi profondi. Gli interventi di questo stadio e di quello successivo devono essere impostati su uno studio di stabilità che è molto complesso e richiede notevoli nozioni di geotecnica e di meccanica delle rocce. Nello stadio finale, cioè quando la frana è in via di rapida estensione e collasso ( movimento molto rapido, quindi il preavviso è solo di qualche ora), deve essere data priorità al disaggio dei massi pericolanti.



Nei movimenti franosi che interessano le rocce si è visto che ha notevole importanza la circolazione idrica. L'acqua può muoversi di moto turbolento: in tal caso la velocità è data dalla relazione:

$$V = k i^{0,5}$$

La distribuzione delle pressioni idrostatiche negli ammassi rocciosi dipende dalla disposizione delle discontinuità. In particolare, si osserva che se le fratture sono fitte e interconnesse, si forma un ammasso permeabile del tutto simile a un acquifero formato da terreni alluvionali.





Nelle rocce sedimentarie l'interconnessione è facilitata dalla fittezza delle discontinuità, in particolare dei giunti di strato, e dalla dissoluzione, ma è limitata dalla presenza di livelli impermeabili.

Si formano quindi veri e propri bacini (detti idrogeologici) contenenti i corpi idrici sotterranei, simili a quelli dei corsi d'acqua superficiali.

Interventi sulle frane di crollo:

1. reti con cemento a spruzzo e chiodatura
2. semplici reti, destinate a trattenere i blocchi di piccole dimensioni
3. bulloni, ancoraggi, tiranti per massi di dimensioni superiori a 0,5 metri cubi
4. iniezione di resine per l'occlusione e la cementazione delle fenditure
5. speroni e gabbioni per il sostegno dei massi aggettanti
6. disaggio e terrazzamento per l'eliminazione dei blocchi instabili e la riduzione delle pendenze
7. difese passive, quali reti paramassi, talora con trincee profonde (valli) per bloccare il rotolamento dei massi caduti

Gli **studi geologici** riguardano l'accertamento di tutti gli elementi che concorrono a produrre la frana, e in modo particolare la ricostruzione della giacitura e numero delle discontinuità mediante diagrammi strutturali, di notevole utilità per la progettazione degli ancoraggi, della circolazione idrica sotterranea e dello stato di alterazione dell'ammasso roccioso. Di notevole interesse risulta la presenza di rocce deboli alla base del versante, elemento che può favorire la creazione di profili a strapiombo, così come di agenti dell'erosione (corsi d'acqua, scorrimento superficiale intenso durante le piogge) e dell'alterazione che concorrono allo stesso scopo.

La raccolta di tutte queste informazioni viene utilizzata per la proposizione delle misure di riequilibrio e rafforzamento del pendio.

#### b. Frane di scivolamento planare

I sintomi della fase iniziale sono i medesimi delle frane di crollo, cosicché un accurato studio geologico e geofisico è in grado di delimitarla.

I rimedi consigliabili sono i medesimi dei precedenti, costruzione di trincee, gallerie drenanti profonde e infissione di piezometri per il controllo in continuo della falda (che influenza maggiormente questo tipo di dissesto). L'acqua può essere drenata anche con dreni sub-orizzontali. La frana di scivolamento tende a suddividersi in zolle, spesso indipendenti. Le parti di

maggior pericolosità sono quelle superiori, che franando possono convogliare nel movimento quelle inferiori sovraccaricandole, e quelle frontali, che sono in genere più aperte e instabili. I rimedi per la fase intermedia sono simili a quelli per i crolli, ma essendo le superfici meglio individuabili (cambiamenti litologici, superfici lisce, giunti argilloso-marnosi, faglie...) si possono concentrare qui gli sforzi per il drenaggio e per la consolidazione. In sede di misure di contenimento vanno bene le gabbionate e i muri. Nella fase finale la massa è in procinto di franare sono necessarie misure che consentano l'eliminazione della massima parte della frana (disgaggi, terrazzamenti) e le opere di contenimento e salvaguardia di strade, abitati, opere civili e di alvei fluviali che possono risentire del franamento.

In queste frane, le strutture predisponenti sono determinate da:

1. discontinuità o loro combinazioni a franapoggio con inclinazione minore dei versanti
2. giunti argillosi o con materiale che può acquisire bassa coesione
3. rilevante stato di fratturazione delle rocce
4. circolazione idrica lungo fratture verticali e giunti a bassa inclinazione
5. agenti erosivi al piede o lungo il versante

Invece i sintomi premonitori sono costituiti da :

1. comparsa di fessure di trazione ad arco, ortogonali e parallele all'immersione del versante
2. comparsa di roccia scoperta nella parte alta del versante, in corrispondenza della corona
3. incisione di solchi vallivi al perimetro esterno del corpo franoso
4. comparsa di sorgenti alla testata delle incisioni perimetrali
5. rigonfiamento della parte centrale del corpo di frana
6. formazione di frane secondarie sui versanti, in particolare al piede
7. cambiamento di inclinazione delle piante di alto fusto
8. diversioni della rete idrica di superficie, con impaludamenti nelle zone di rigonfiamento
9. allargamento progressivo delle discontinuità
10. accentuazione delle velocità di spostamento dei capisaldi topografici delle reti di monitoraggio
11. decadenza progressiva dei moduli elastici delle rocce
12. microsismi e boati per rottura e spostamento delle rocce

Gli interventi per questo tipo di frane sono i medesimi che si applicano ai crolli, ma si deve tener conto che, in questo caso, sono le acque sotterranee il principale agente delle frane; sono quindi i drenaggi gli interventi che hanno in questi casi la maggior incisività.

### c. Frane di scivolamento rotatorio (scoscendimento)

Le prime manifestazioni consistono in fenditure arcuate sulla parte alta del versante, e in rigonfiamenti al piede. Gli interventi della fase iniziale possono essere drenaggi superficiali e

trincee, gabbionate nella parte bassa. Sono molto utili anche le canalette e le trincee nel corpo stesso della frana, se la superficie di movimento non è profonda.

Nella fase intermedia le fenditure sono più profonde e la superficie di movimento potrà essere anche molto profonda. Si dovranno eseguire operazioni di drenaggio profondo ( speroni drenanti, dreni orizzontali, gallerie filtranti..). Sui lati si può operare con gabbionate e muri di contenimento, con eventuali fondazioni a pozzo. A questi lavori sarà consigliabile aggiungere tutte le opere previste per la fase iniziale.

Se non si individua la superficie di movimento, non si ricostruisce, con un'indagine geotecnica, la dinamica del movimento e la sua meccanica, non è possibile procedere con questi interventi.

La fase di collasso, che si preannuncia con l'accentuazione delle fenditure, movimenti parziali e la creazione di gradinate all'interno del corpo di frana, è piuttosto rapida.

Gli interventi sono sempre molto difficili, quelli di minor costo e di più rapido effetto sono quelli diretti al drenaggio delle acque contenute nella massa franante e nelle fenditure.

Questo tipo di movimento, anche se la morfologia della superficie di rottura differisce sostanzialmente da quello esaminato in precedenza, da cui lo differenziano anche la notevole omogeneità del corpo di frana, in cui non compaiono molte superfici di potenziale rottura, presenta tuttavia sintomi e rimedi analoghi.

#### d. Frane di colamento

Le frane di questo tipo, nella fase iniziale, possono essere sistemate agevolmente con drenaggi superficiali ( canalette) che impediscono il diffondersi del fenomeno erosivo. ( simile ad un vero e proprio dissesto idrogeologico). Hanno spesso una buona efficacia la deviazione delle acque superficiali, il rinverdimento,...

Il fenomeno, da molto piccolo si può allargare, e quando si produce la colata di fango è arrestabile soltanto con drenaggi profondi e con speroni drenanti ( costosissimi). Sono rare invece le occasioni in cui con semplici gabbionate e muri si riesce a bloccare temporaneamente il movimento.

Un approfondimento a parte va fatto per i cosiddetti *debris flow*, che hanno causato notevoli disastri nel territorio italiano. Essi sono colate di detrito note anche con il nome locale (Italia settentrionale) di "mure", che si verificano quando, a causa delle forti precipitazioni, i terreni vengono saturati d'acqua e trasportati a valle sotto l'effetto del flusso idrico.

I detriti coinvolti in questi movimenti sono generalmente di granulometria fine, ma in molti casi possono essere grossi massi trasportati a valle dalla corrente fangosa. Questi fenomeni di solito avvengono lungo gli alvei di corsi d'acqua temporanei nei quali si sono accumulati nel tempo sedimenti di spessore rilevante.

I debris flow sono molto frequenti e sono spesso catastrofici. Una loro ragionevole previsione può essere basata sui seguenti elementi:

- i. *Studio e controllo del grado di saturazione dei terreni*: alcuni studiosi americani hanno messo in evidenza come il terreno su forte pendenza tenda a muoversi facilmente quando si satura progressivamente di acqua. Il controllo del grado di saturazione del terreno e della conseguente pericolosità del detrito accumulato sul fianco vallivo o nell'alveo dei corsi d'acqua è comunque piuttosto difficoltoso, perché necessita di apparecchiature costose e di elaborazioni complesse che tengono conto del tipo di terreno e delle caratteristiche termo-pluviometriche dell'area.
- ii. *Su indici di rischio calcolati in base a relazioni fondate sull'esperienza*: di più larga applicabilità risulta la tecnica che consente di prevedere in base alle caratteristiche geologiche, morfologiche e idrogeologiche dell'area il grado di pericolo. La grande esperienza acquisita con l'osservazione puntuale dei fenomeni consente oggi di attribuire ad ogni elemento capace di caratterizzare il pericolo ( p.e. elevate pendenze, impluvi, granulometria fine dei sedimenti..) un punteggio; la somma dei punteggi ottenuti per ciascun indice consente di attribuire a ciascun tratto di versante una categoria di pericolo. In tal modo è possibile correlare l'entità delle piogge con il pericolo corso da ogni versante e preavvertire la popolazione interessata ogni volta che vengono superate le soglie di allarme.

Il numero di Melton è il rapporto fra dislivello fra quota massima e quota di chiusura del bacino, e la radice quadrata della sua superficie; quando viene superato il valore di 0,5 ( es. dislivello 1000 m, area 1 km<sup>2</sup>) il bacino è esposto ai debris-flows.

Un altro parametro che viene utilizzato per tale valutazione è la pendenza media dell'alveo del torrente, che se supera il 20% può dar luogo ai fenomeni indicati.

Al punto 3, sono riportati i segni precursori caratteristici:

- 1) ampia spianata o testata di valle capace di raccogliere estesi volumi idrici durante le piogge, e di convogliarli a valle, dove la condizione peggiore è quella di un avvallamento che riceva il volume d'acqua stesso e si saturi rapidamente. Il versante può anche non avere la forma di un

avvallamento; come si può verificare in molte occasioni, è sufficiente un grande volume d'acqua affluente a un versante con una massa di detrito sufficientemente permeabile, per dar luogo ai fenomeni di colamento.

- 2) fessure di trazione nel detrito
- 3) se il fenomeno avviene in un avvallamento, tracce di movimenti in parete, da cui si possono staccare masse di detrito che vanno poi a sovraccaricare il corpo di frana
- 4) sorgenti lungo il versante, a testimonianza dello stato di saturazione del detrito : è noto infatti che i movimenti franosi sono agevolati dallo stato di saturazione, come espresso dalla relazione secondo la quale il fattore di sicurezza in condizioni di saturazione è la metà di quello proprio del terreno in assenza di acqua.

Le condizioni di innesco, secondo Takahashi , per una lama d'acqua di profondità  $h$  che scorre sul detrito disposto su un substrato di pendenza  $\beta$ , il quale possiede un attrito pari a  $\text{tg } \phi$  , una concentrazione iniziale del solido rispetto al liquido pari a  $C$ , una densità immersa dei granuli pari a  $\Delta$  e un diametro dei granuli pari a  $d$ , sono le seguenti :

$$\text{tg } \alpha \text{ maggiore o uguale a } \text{tg } \phi (C \Delta)/(1 + C \Delta h/d)$$

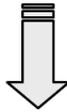
I provvedimenti consigliati da Takahashi sono i seguenti:

- a) diminuzione dell'apporto di sedimenti nell'avvallamento destinato a dar luogo alla colata, mediante terrazzamenti e briglie
- b) estrazione dell'eccesso di detrito
- c) prevenzione dei dissesti laterali, che possono appesantire il corpo di frana
- d) rete di canali di drenaggio superficiali
- e) gradoni in terra (ground-sills) cioè briglie di terra poggianti sul substrato, intese a ridurre la velocità di movimento della colata. La distanza  $w$  fra uno sbarramento e l'altro deve essere tale per cui si verifichi il rapporto :

$$1/w = \text{tg } (\alpha - \alpha_{\text{min}})/D$$

Gli angoli  $\alpha$  sono rispettivamente la pendenza reale del substrato della colata, e la pendenza minima per la quale può verificarsi il movimento, in base alla relazione precedente.

## Colate Detritiche (debris flow)



“moto di ammassi granulari costituiti da sedimenti che, presenti in forma di depositi nella porzione montana dei bacini (e originati da processi di erosione superficiale, frane, eruzioni vulcaniche), vengono mobilitati in occasioni di eventi alluvionali dando luogo alla formazione di *piene di sedimenti* che si propagano verso valle con velocità che possono talvolta raggiungere alcune decine di metri al secondo”



Nel caso il debris flow avvenga lungo gli impluvi, si parla di un trasporto di massa e non di un trasporto solido ordinario, in quanto il movimento del materiale è provocato esclusivamente dalla gravità e non dall'azione idrodinamica esercitata dall'acqua in movimento (fenomeno che prevale per il trasporto di fondo e il trasporto in sospensione).

### e. Frane di espansione

Porre rimedio a questi dissesti, che si realizzano su versanti spesso caratterizzati da pendenze elevate, è particolarmente difficoltoso, ed non è possibile sintetizzare a causa della varietà delle tipologie di movimenti.

I rimedi si collocano comunque in un complesso di interventi simile a quelli usati per le frane da crollo.

### f. Smottamenti (Desio)

Si possono considerare dissesti allo stato iniziale, rimediabili anche con i soli drenaggi e semplici gabbionate.

### g. Altri tipi di dissesti

Non solo le frane colpiscono il territorio italiano, ma anche altri fenomeni molto pericolosi come valanghe, subsidenza ed erosione accelerata.

Si ritiene opportuno soffermarsi su questi ultimi aspetti che corrispondono più da vicino alla definizione generalmente accettata di dissesto idrogeologico.

Si riconoscono i fenomeni che colpiscono gli alvei dei corsi d'acqua, che possono essere soggetti all'azione rapida della corrente che intacca profondamente gli alvei e le sponde, producendone il franamento e scalzando alla base sia le opere poste a difesa del fiume sia le costruzioni in alveo (muri e barriere contro l'erosione delle sponde, pile dei ponti...).

Analogo effetto ha l'eccessivo accumulo di sedimenti in alveo, che producendo la sua ostruzione facilita la tracimazione delle acque durante le piene.

## **Monitoraggio**

Esaminiamo alcune delle tecniche di monitoraggio che vengono abitualmente utilizzate:

- Predisposizione di "spie" per l'identificazione di movimenti lungo le superfici di discontinuità. Le spie sono materiali fragili, come il gesso, usati per gli spostamenti pressochè insensibili, e di materiali molto resistenti per la sorveglianza di spostamenti di grandi blocchi anche molto rapidi.
- Quando occorrono misure particolarmente precise si possono utilizzare i calibri "demec" che sono facilmente trasportabili e leggeri. È un calibro che consiste di due punte coniche, una fissa l'altra mobile, utilizzate per misurare la distanza tra due lamine che vengono infisse a una distanza originariamente di 150 mm ai due lati della frattura. Il calibro può valutare spostamenti dell'ordine di pochi  $\mu$ m.
- Posizionamento di estensimetri attraverso delle discontinuità.
- Posizionamento di misuratori di variazione dell'inclinazione delle discontinuità o delle superfici dell'oggetto (edificio, suolo..).

Questi apparecchi sono denominati tiltmeters. Sono apparecchiature portatili che consentono misurazioni successive della giacitura della superficie sulla quale vengono posizionati, previa collocazione su di essa di installazioni fisse.

- Stesura di una rete più o meno fitta di capisaldi i cui spostamenti possono essere identificati con buona precisione (errore non dovrebbe superare il cm) a intervalli regolari.

- Effettuazione di misure inclinometriche in fori appositamente predisposti, con inclinometri, al fine di valutare l'entità e i movimenti alle varie profondità e soprattutto in coincidenza con la superficie di rottura principale
- La misura avviene introducendo una sonda all'interno di un tubo generalmente di alluminio cementato alla roccia, con delle scanalature verticali nelle quali la sonda è obbligata a scendere. La sonda è dotata di sensori che consentono di leggere spostamenti di 0.5-1mm ogni 10m di foro.
- Normalmente le prove vengono eseguite a intervalli di tempo regolari, in modo da verificare anche la velocità di spostamento.
- Posizionamento di deflettometri. Si tratta di inclinometri che vengono fissati al terreno e che non richiedono di essere estratti per procedere alle misure. Sono costituiti da segmenti di tubi rigidi, interconnessi da snodi che consentono l'inclinazione di un segmento rispetto all'altro. I sensori in questo caso misurano gli angoli di inclinazione dei diversi segmenti e le loro variazioni nel tempo.