

DINAMICA DEI VERSANTI

A cura di V. Francani

vincenzo.francani@polimi.it

Indice

1	RICONOSCIMENTO DELLE FRANE E LORO PREVENZIONE.....	2
1.1	SCIVOLAMENTO PLANARE.....	3
1.2	SCIVOLAMENTI ROTAZIONALI	7
1.3	CROLLI.....	8
1.4	RIBALTAMENTI	9
1.5	FRANE DI COLAMENTO	10
2	STUDIO DELLE FRANE IN ATTO	11

1 RICONOSCIMENTO DELLE FRANE E LORO PREVENZIONE

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.

Una carta geologica, su cui siano indicate giacitura del versante e geometria delle discontinuità è di grande aiuto per prevedere i possibili spostamenti di volumi rocciosi.

Nel caso riportato in Figura 1, è possibile individuare detriti (in puntinato) sovrapposti a formazioni calcaree fratturate. I punti *f* rappresentano la giacitura delle faglie, i blu delle fratture e i gialli la stratificazione. Sono molto evidenti discontinuità a franapoggio con inclinazione minore del versante. Tali discontinuità sono pericolose se la loro inclinazione supera l'angolo di attrito.

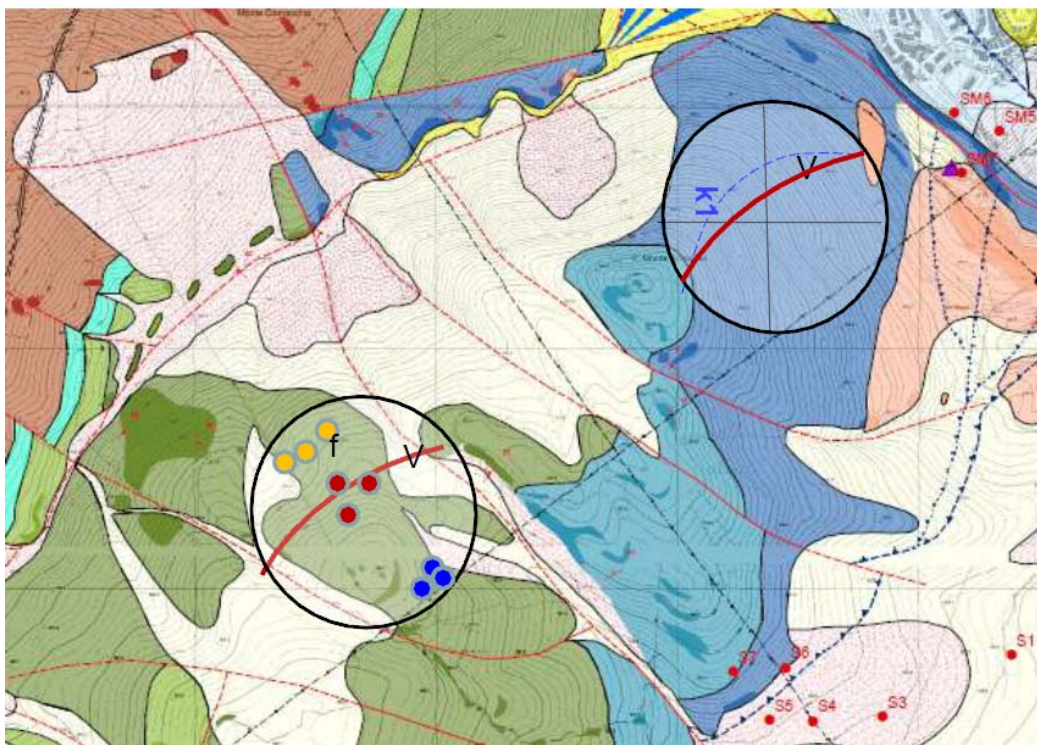








Figura 1 – Carta geologica d'esempio

Una classificazione delle frane è stata proposta da Varnes nel 1978, ed è riportata nella seguente Tabella 1.

Tabella 1 – Classificazione delle frane proposta da Varnes (1978)

BASATA SUL MOTO DEI BLOCCHI		Tipo di materiale		
		Rocce	Terreni	
			grossolani	preval. fini
Crolli 		di roccia	di detrito	di terra
Ribaltamenti 		di roccia	di detrito	di terra
Scorrimenti 	rotazionali 	di roccia	di detrito	di terra
	traslazionali	blocchi	blocchi	blocchi
Espandimenti laterali 		di roccia	di detrito	di terra
Colate 		di roccia	di detrito	di terra
Frane complesse		Combinazione di 2 o più tipi principali		

1.1 SCIVOLAMENTO PLANARE

Lo scivolamento planare coinvolge rocce, terreni non coesivi, detriti di versante (Figura 2, in Tabella 2 alcuni esempi di valori tipici di attrito per le rocce, in

Tabella 3 per i terreni); esso si manifesta mediante lo scorrimento di blocchi di roccia o lame di terreno lungo una superficie planare, che generalmente coincide con un orizzonte di debolezza (fratture, giunti di strato, superfici di contatto tra materiale di copertura e substrato roccioso).

Di solito si verifica uno scivolamento in presenza di livelli di debolezza, e di elevate pendenze del versante (Figura 3) ma il fenomeno può essere scatenato in presenza di eventi meteorici intensi, sollecitazioni sismiche o scalzamento al piede di corsi d'acqua.

Tabella 2 – Valori dei coefficienti di attrito per alcune rocce principali

TIPO	MATERIALE	PESO DI VOLUME [SATURO/SECCO] [kN/m ³]	ANGOLO DI ATTRITO DI PICCO	ANGOLO DI ATTRITO RESIDUO	COESIONE [kPa]
Rocce fratturate	Basalto	22/17	40/50		
	Gesso	13/10	30/40		
	Granito	20/17	45/50		
	Calcarea	19/16	35/40		
	Arenaria	17/13	35/45		
	Argillite	20/16	30/35		
Rocce intatte	Granito	25/30	35/45	29 – 35	35000 – 55000
	Basalto	25/30	35/45	31 – 38	35000 – 55000
	Porfido	25/30	35/45	31	35000 – 55000
	Gneiss	25/28	30/40	23 – 29	20000 – 40000
	Argilloscisti	25/28	30/40	25 – 30	20000 – 40000
	Calcarea	23/28	35/45	33 – 39	10000 – 30000
	Dolomite	23/28	35/45	27 – 37	10000 – 30000
	Arenarie	23/28	35/45	25 – 35	10000 – 30000
	Argillite	17/23	25/35	27	1000 – 20000
	Gesso	17/23	25/35	30	1000 – 20000

Tabella 3 – Valori tipici del coefficiente d’attrito per le terre sciolte

TIPO	DESCRIZIONE MATERIALE	PESO DI VOLUME [SATURO/SECCO] [kN/m ³]	ANGOLO DI ATTRITO	COESIONE [kPa]
Sabbia	Non addensata e ben selezionata	19/14	29 – 34	
	Addensata e ben selezionata	21/17	32 – 40	
	Non addensata, mal selezionata	20/16	34 – 40	
	Addensata, mal selezionata	21/18	38 – 46	
Ghiaia	Ben selezionata	22/20	34 – 37	
	Sabbia e ghiaia	19/17	45 – 48	
Argilla	Bentonite molle	13/6	7 – 13	10 – 20
	Organica molto molle	14/6	12 – 16	10 – 30
	Glaciale molle	17/12	27 – 32	30 – 70
	Glaciale dura	20/17	30 – 32	70 – 150
	Tilliti glaciali mal selezionati	23/20	32 – 35	150 – 250

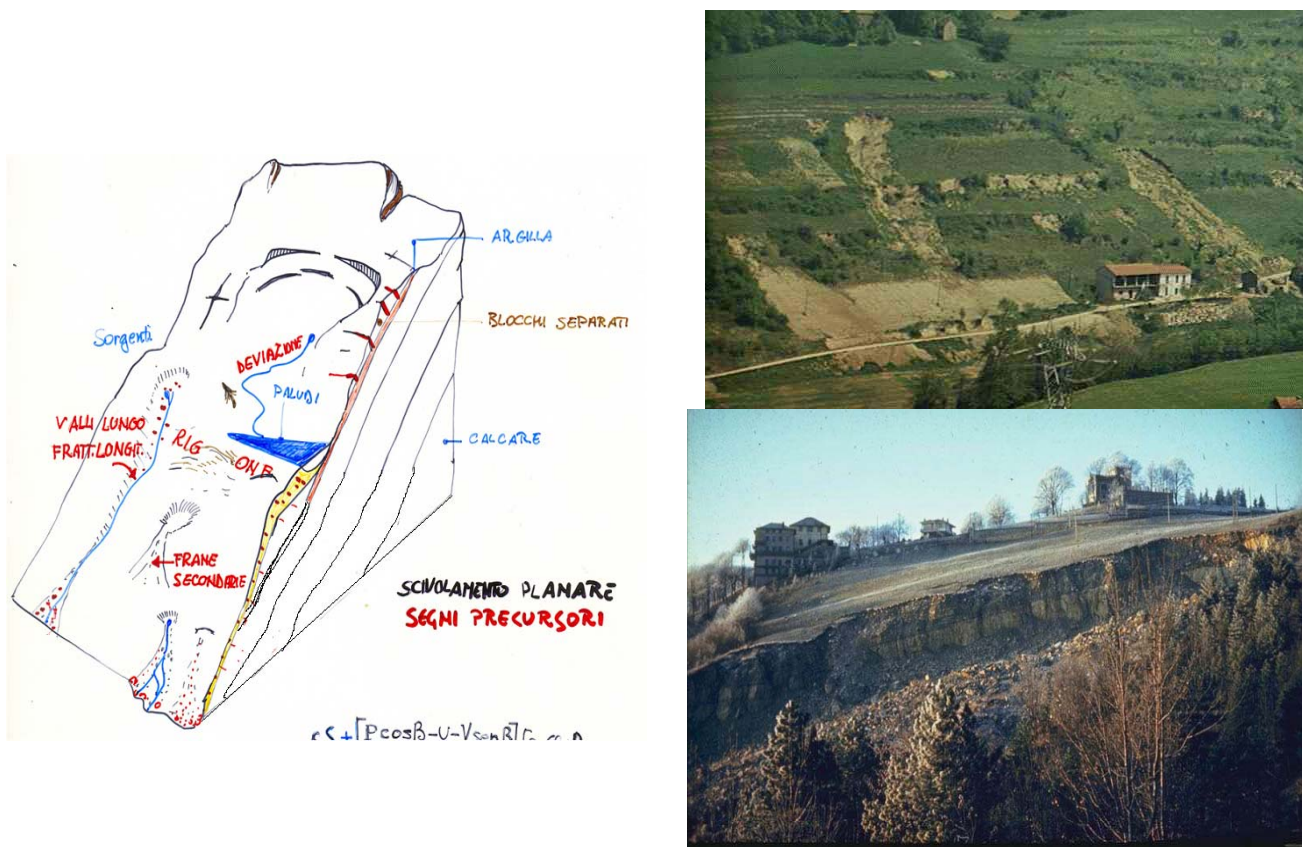


Figura 2 – Esempi di scivolamento planare. La figura a sinistra mostra tutti i sintomi precursori del collasso del versante per scivolamento. Nelle due foto si vedono : in alto i sintomi di movimento nei livelli superiori del terreno (smottamenti, frane secondarie) nella seconda si riconoscono le fratture verticali parallele al pendio che interessano l’ammasso roccioso in frana e il loro proseguimento sul versante sotto forma di fessure nel terreno e rigonfiamenti.

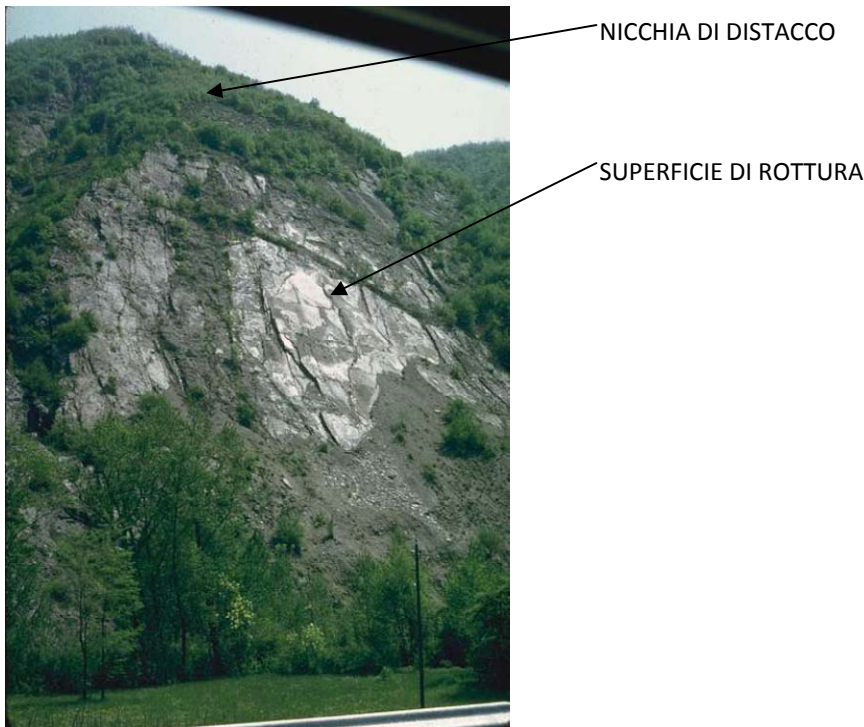


Figura 3 – Cause predisponenti di uno scivolamento planare; si riconosce la nicchia di distacco in alto con roccia alterata con fratture e la superficie di rottura in affioramento coincidente con la discontinuità.

Per calcolare l'attrito si procede dapprima alla valutazione dell'angolo di attrito di base mediante un tilt test (misurato su un giunto liscio), successivamente si procede a valutare un coefficiente di rugosità ottenuto con la comparazione del profilo di scabrezza a grafici rappresentativi delle diverse scabrezze, mediante la Relazione di Barton (1.1) meglio esprimibile mediante la (1.2):

$$\phi = \phi_b + [JRC * (\log JCS) / \sigma_n] \quad (1.1)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \quad (1.2)$$

Dove *JRC* rappresenta il *Joint Roughness Coefficient*, ossia il coefficiente di rugosità del giunto, che di solito varia tra 0 (giunto a superficie planare e levigata) e 20 (giunto a superficie ondulata e rugosa). Il valore del *JRC* si ricava tramite un profilo metro o "pettine di Burton".

Occorre distinguere l'angolo di attrito di picco (misurato sull'ammasso roccioso nelle condizioni di resistenza ottimale) e l'angolo di attrito residuo (misurato quando l'ammasso roccioso ha iniziato il suo movimento, e si presenta fratturato e liscio in corrispondenza della superficie di rottura).

Quando la roccia viene sottoposta ad un'azione di taglio lenta, che tende a produrre il moto sulla superficie di rottura, presenta un angolo di attrito compatibile con le sue caratteristiche originarie: questo angolo raggiunge il valore massimo in prove su campioni integri (*angolo di attrito di picco*).

Quando, dopo l'inizio dei movimenti lungo la superficie di rottura, gli attriti diminuiscono nel tempo, i frammenti di roccia si orientano in modo differente, e gli attriti sono inferiori (si parla in questo caso di *angolo di attrito residuo*).

È bene ricordare che l'attrito per una roccia è funzione della composizione mineralogica e del grado di arrotondamento dei minerali mentre per terre sciolte esso diviene funzione solamente delle dimensioni e del grado di arrotondamento dei granuli.

Quando, tra la roccia ed il blocco esistono terreni coesivi, quali l'argilla, si forma un legante in grado di trattenere il masso, pertanto l'equilibrio può essere garantito anche dalla coesione. Il prodotto tra coesione c e superficie di appoggio S fornisce la forza $C = cS$ che agisce per trattenere il blocco. Anche la coesione risulta differente per una roccia e un suolo: difatti nel primo caso essa dipende dai gradi di cementazione o dalla forza di attrazione tra minerali mentre nel secondo caso è dovuta a forze di natura elettrostatica.

Dunque, su un blocco insistono diverse forze:

- *Forze di trazione:* $T = P \sin \alpha$
- *Forze di resistenza:* $R = P \cos \alpha \tan \phi + cS$

Il fattore di sicurezza (FS) è un valore molto importante per capire se la roccia è stabile (>1) oppure no, e si calcola come rapporto tra le forze di resistenza e le forze di trazione (2):

$$FS = \frac{R}{T} = \frac{P \cos \alpha \tan \phi + cS}{P \sin \alpha} \Rightarrow \begin{cases} \text{se } R > T \rightarrow FS > 1 \rightarrow \text{roccia stabile} \\ \text{se } R = T \rightarrow FS = 1 \rightarrow \text{situazione all'equilibrio limite} \end{cases} \quad (2)$$

Quando il terreno è completamente secco e la coesione è nulla, la (2) diventa:

$$FS = \frac{R}{T} = \frac{P \cos \alpha \tan \phi + cS}{P \sin \alpha} = \frac{\tan \phi \cos \alpha}{\sin \alpha} = \tan \phi \tan \alpha \quad (3)$$

Questo valore assume una notevole importanza nei suoli in cui sia presente l'acqua dal momento che, con terreno completamente saturo e coesione nulla, definito come γ il peso specifico, tenendo conto della spinta di Archimede, la (2) diventa:

$$FS = \frac{(\gamma - \gamma_w) \tan \phi}{\gamma \tan \alpha} \cong 0.5 \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (4)$$

Dal momento che il peso specifico dell'acqua è circa 1, quello dei grani è circa 2.

La presenza dell'acqua gioca un ruolo determinante nel calcolo del valore del fattore di sicurezza, dal momento che la spinta che l'acqua esercita lateralmente (Figura 4, $V \cos \alpha$, rappresentato da una freccia blu) e da sotto (U) favorisce le forze che tendono a destabilizzare il blocco.

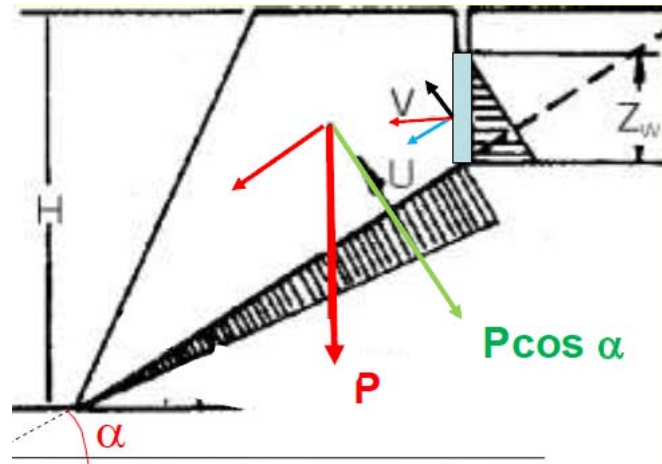


Figura 4 – Azione dell'acqua nel calcolo del Fattore di Sicurezza

In presenza di acqua, il fattore di sicurezza si calcola come

$$FS = \frac{cS + P(\cos \alpha - U - V \sin \alpha) \tan \phi}{P \sin \alpha + V \cos \alpha} \quad (5)$$

In presenza di una fessura di trazione verticale (sulla superficie del pendio oppure sul fronte del pendio), di profondità z e piena d'acqua fino ad un'altezza z_w , si possono avere varie situazioni:

- Se l'acqua è presente solo nella frattura di trazione $U = 0$;
- Se il pendio è completamente asciutto $U = V = 0$;
- Nel caso di pendio molto fratturato, saturo e caratterizzato da una notevole ricarica superficiale, si considera $\max(V)$ con $z_w = z$ e si calcola il fattore di sicurezza;
- Se la posizione della frattura non è nota a priori, è utile minimizzare F_s facendo variare il rapporto z/H , con H altezza del pendio, e variando anche il rapporto z_w/z .

In generale, comunque, si considera un'ipotesi molto gravosa, una fessura di trazione in corrispondenza della sommità del pendio, e $z_w = z$.

Un altro tipo di scivolamento planare riguarda i terreni, limitandosi a scivolamenti della coltre superficiale, detritica e di alterazione, lungo un substrato non alterato.

1.2 SCIVOLAMENTI ROTAZIONALI

Per quantificare le forze in gioco durante questo tipo di movimento, occorre fare riferimento al fatto che la superficie, che subisce una rottura di base, è di tipo circolare (Figura 5), pertanto le forze in gioco sono:

Momento delle forze destabilizzanti : $WR \sin \alpha$

Momento delle forze stabilizzanti : $R \int_A^B \tau_m ds = RC_u AB \quad (6)$

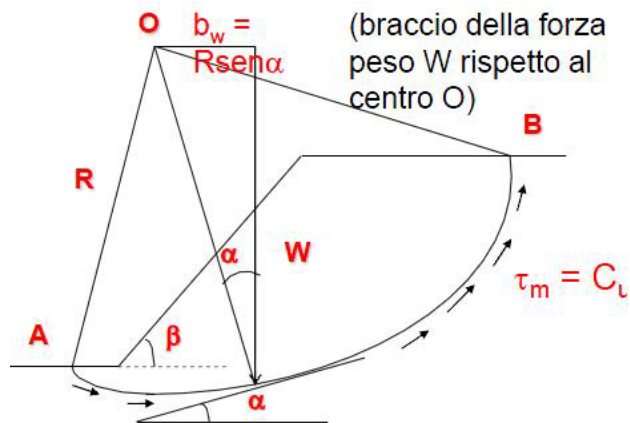


Figura 5 – Schematizzazione della superficie circolare di rottura del pendio in terreni omogenei

Quando il pendio si sviluppa su una progressione di terreni disomogenei, è necessario suddividere la porzione di terreno, sovrastante il pendio, in conci verticali in modo, all'interno di ciascuno di essi, il terreno possa dirsi omogeneo. Il fattore di sicurezza si calcola con un metodo iterativo, scegliendo, ad ogni passo, due blocchi vicini, e considerando come valore del coefficiente di sicurezza il valore minimo:

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^n C_u l}{\sum_{n=1}^n W \sin \alpha} \quad (7)$$

1.3 CROLLI

Il Materiale coinvolto in fenomeni di crollo è solitamente roccia, raramente detrito e terreni limosi con bassa cementazione; il crollo si verifica per il venir meno della coesione che consente ai blocchi di rimanere vincolati alla roccia; accade prevalentemente per fenomeni di termoclasti e per l'allargamento delle fenditure per azione del ghiaccio. Le cause predisponenti sono pareti verticali e l'ampia fratturazione (Figura 6). La termoclasti potrebbe scatenare il fenomeno.



Figura 6 – Esempio di parete soggetta a crollo

Quando il crollo avviene per il venir meno della resistenza al piede, si ha un aumento della pressione nelle discontinuità della roccia. I crolli avvengono prevalentemente in due fasi:

- 1) *Fase di preparazione*: la pressione dell'acqua produce lo spostamento di frammenti di roccia con il progressivo aumento della pressione nelle discontinuità, mentre avviene la riduzione della coesione;
- 2) *Fase di collasso*: riduzione della coesione e asportazione di frammenti determinano una condizione di squilibrio.

Altri tipi di crolli si hanno, ad esempio, per erosione alla base ad opera delle acque correnti (*scalzamento al piede*).

1.4 RIBALTAMENTI

Il materiale coinvolto è quasi sempre roccia, raramente detrito; il fenomeno avviene con la rotazione di un blocco o di una colonna, con successiva possibilità di crolli o scivolamenti (frana complessa, Figura 7);

Al superamento della resistenza R della roccia, il blocco scivola lungo la roccia stessa (avviene il crollo in seguito ad uno scivolamento, se sussiste la condizione $\tan \phi < \tan \alpha$, con α superficie di rottura); quando il blocco si trova in una posizione per cui la verticale del suo baricentro cade al di fuori dalla base del prisma, si ha il ribaltamento (avviene quando b/h dove b è la base e h l'altezza del blocco è inferiore $\text{tg} \alpha$).

Hoek e Bray hanno individuato le condizioni geometriche che favoriscono fenomeni di scivolamento e fenomeni di ribaltamento di blocchi di roccia intatta in assenza di coesione, così come rappresentato nella Figura seguente.

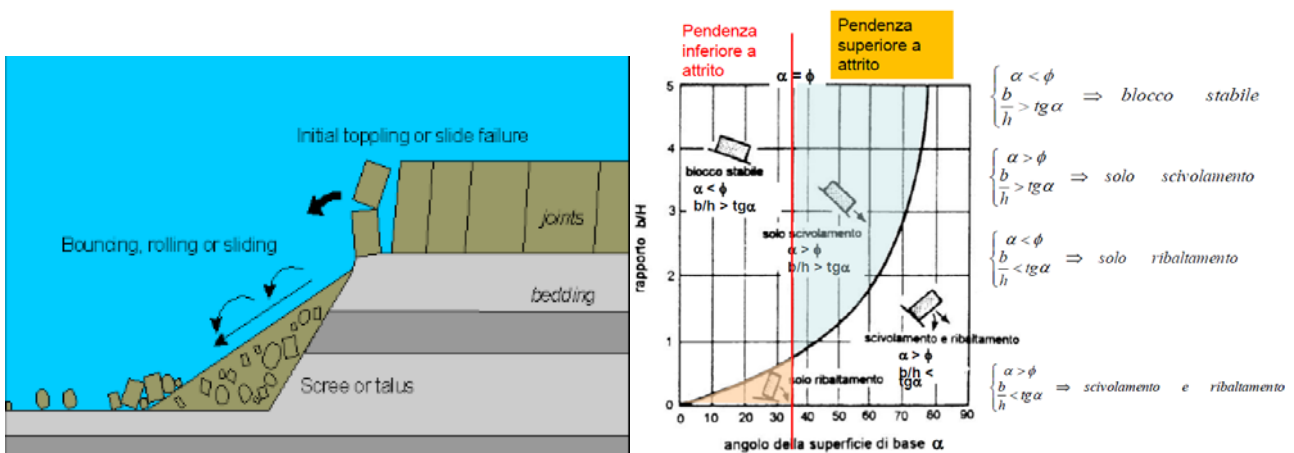
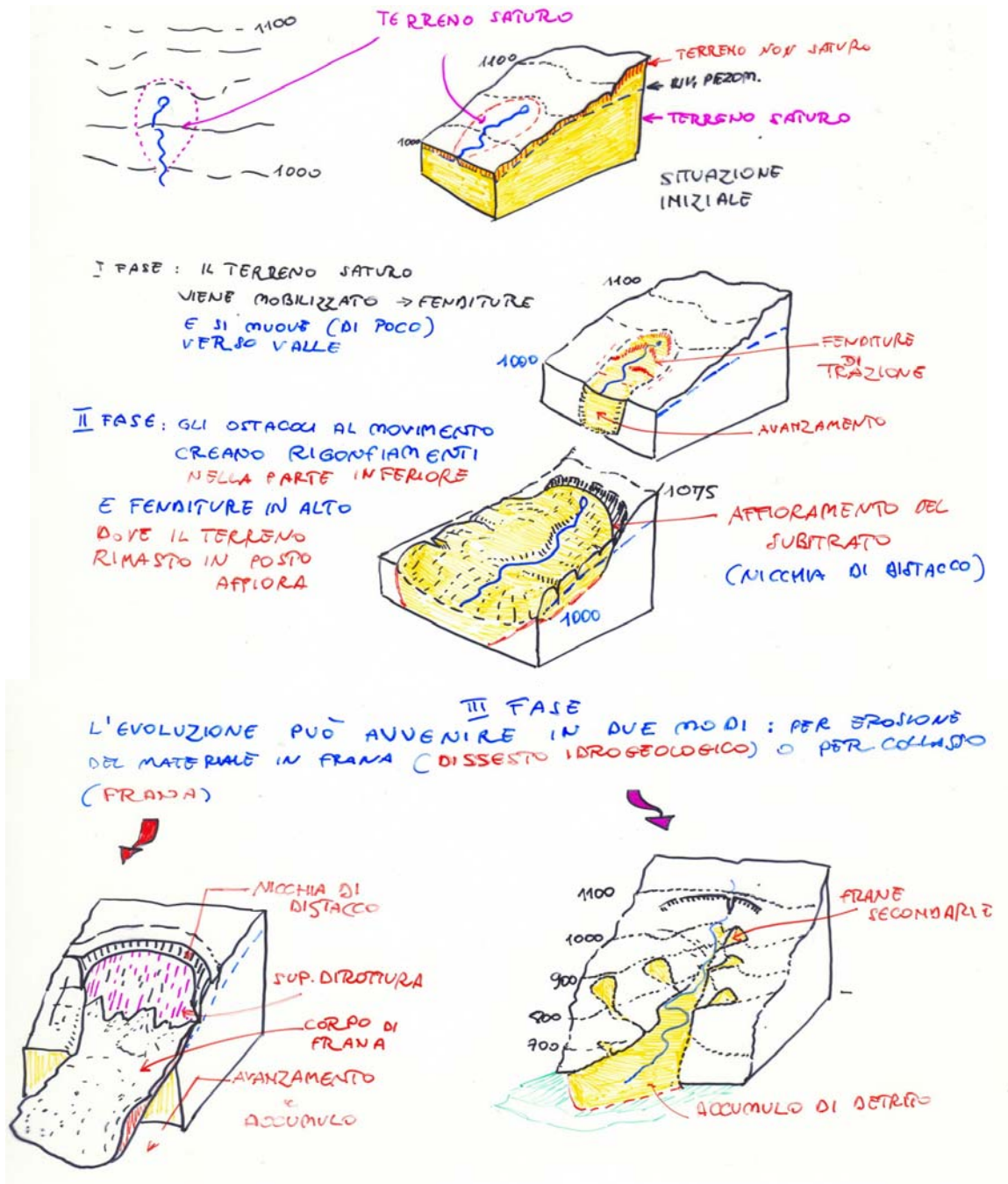


Figura 7 – Esempio di ribaltamento

1.5 FRANE DI COLAMENTO

Le frane di colamento avvengono in modo abbastanza simile in terreni argilloso – limosi, e nascono seguendo tre fasi:

- 1) *I Fase*: il terreno è saturo, e viene mobilizzato, si aprono delle fenditure e si muove, seppur di poco, verso valle;
- 2) *II Fase*: gli ostacoli al movimento creano rigonfiamenti nella parte inferiore e ulteriori fenditure in alto, laddove il terreno in quota affiora;
- 3) *III Fase*: l'evoluzione avviene sotto forma di collasso (inteso come *frana vera e propria*) oppure come erosione e accumulo di detrito (*dissesto idrogeologico*).



2 STUDIO DELLE FRANE IN ATTO

Lo studio delle frane in atto deve partire necessariamente dal rilievo geomorfologico, con il quale si possono mettere in evidenza (Figura 8):

- Nicchie di distacco principali e secondarie, eventuali indicatori cinematici atti a suggerire il senso del movimento;
- Le fessure longitudinali e trasversali
- Le zone depresse
- I segni di rigonfiamento
- Le aree di accumulo.

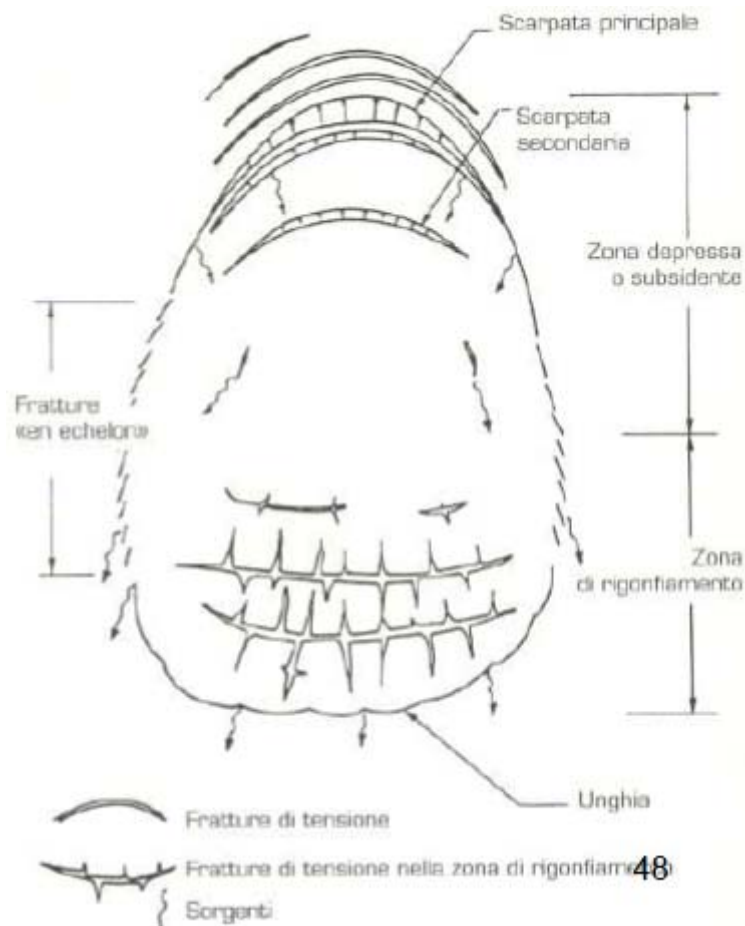


Figura 8 – Caratteristiche in evidenza con un rilievo geomeccanico

A seguito del rilievo, si costruisce un modello che consente di prevedere l'evoluzione e la velocità della frana; il modello deve essere monitorato e corretto con continuità, grazie a controlli topografici e prospezioni geognostiche.

La storia delle frane è anche di qualche decennio, in cui si hanno cospicui movimenti di masse che scendono accavallandosi e frantumandosi (ad esempio, frana di La Clapière, Francia, Figura 9)

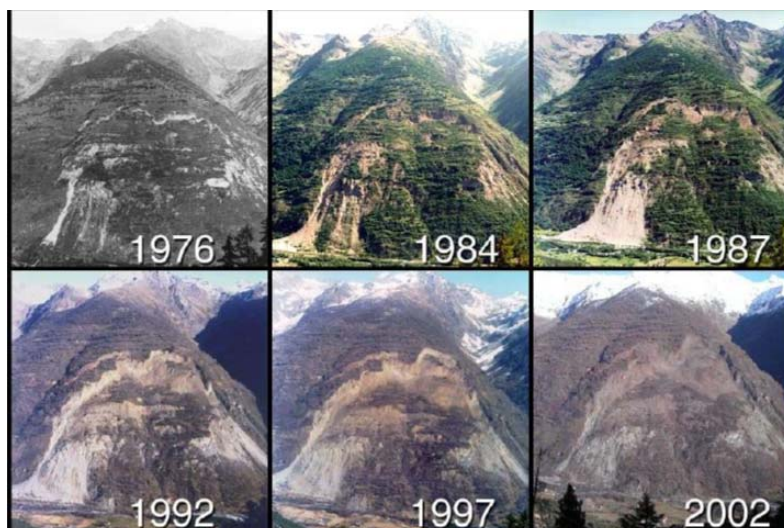


Figura 9 – Evoluzione della frana di La Clapière

In un primo studio è possibile valutare se il versante è stabile o no, secondo indicazioni puramente morfologiche; ad esempio è da ritenersi stabile un versante che ha scarpate con profilo arrotondato, crepacci riempiti di sedimenti, nessun movimento secondario con assenza di erosione ed un sistema di drenaggio ben integrato da una vegetazione a lenta crescita dentro e fuori del versante; viceversa se la vegetazione risulta assente sulla superficie di rottura con alberi inclinati senza crescita verticale ed esistono superfici di rottura fresche con strie di movimento secondario e scarpate ad elevate pendenze, si ha un versante fortemente instabile.

Per monitorare l'evoluzione di un fenomeno franoso, si fa riferimento anche alle tecniche della topografia e del telerilevamento, posizionando *capisaldi topografici*, i cui spostamenti sono misurati tramite rilevamenti con GPS o teodoliti, consentendo di monitorare le variazioni piano – altimetriche dei versanti.

Dopo aver identificato e delimitato il corpo franoso, deve esserne identificato il cinematismo, misurando entità, direzione, verso dei movimenti superficiali nelle diverse porzioni dei corpi di frana, stimando l'evoluzione di questi movimenti nel tempo, in relazione anche alle possibili cause scatenanti. Anche gli inclinometri possono dare indicazioni circa l'entità degli spostamenti di un movimento franoso mediante una semplice relazione che lega mediante una proporzionalità diretta lo spostamento con la lunghezza del tratto percorso dallo strumento con una certa angolazione. Questi strumenti permettono di individuare la profondità della superficie di rottura principale.

In particolare, si sottolinea l'importanza di strumenti come gli *estensimetri*, mediante cui misurare le aperture e gli scorrimenti lungo una discontinuità, i *distometri* per la misura dell'entità degli spostamenti nelle direzioni principali e i *piezometri*, utili per ricostruire le modalità di deflusso delle acque sotterranee, rivelando anche la sensibilità della falda alle precipitazioni; dal regime piezometrico è possibile ricavare indicazioni circa i rapporti fra sollevamento e abbassamento della falda.

Tutti questi strumenti sono utili per identificare le modalità con le quali avviene il movimento franoso a livello concettuale.

Per la completa ed efficace ricostruzione del modello concettuale del fenomeno franoso, occorre predisporre una serie di indagini profonde, il cui numero e la cui tipologia vanno decise solo in

seguito all'analisi dei dati rilevati con le indagini superficiali. Le indagini profonde devono servire per la ricostruzione della natura e delle proprietà geomeccaniche dei materiali coinvolti nel movimento e alla stima del volume dei materiali stessi. Inoltre, le indagini profonde consentono di misurare entità, direzione e verso dei movimenti dell'ammasso franoso alle diverse profondità e nel tempo, e consentono di determinare le pressioni interstiziali dell'ammasso.

Le indagini profonde possono essere:

- 1) Studi geofisici, per effettuare misurazioni indirette dei parametri elastici dei corpi rocciosi nella frana, e procedere ad una prima delimitazione della profondità del movimento in base alla ripartizione delle velocità sismiche alle diverse profondità;
- 2) Le perforazioni, invece, permettono di prelevare campioni da destinare ai laboratori geotecnici, al fine di identificare parametri meccanici e, a seguito di successive rielaborazioni, fornire un quadro circa la stabilità del versante. Lo scopo principale delle perforazioni è identificare l'andamento dei livelli deboli, pertanto è opportuno che siano eseguite laddove si ritiene che possano esserci livelli deboli, al fine di poter disegnare delle sezioni geologiche il più precise possibili.