

# PROCESSI GRAVITATIVI DI INSTABILITÀ IN ROCCIA

## ALCUNI CASE HISTORIES

Prof. Ing. P. Lunardi \* - Dott. Geol. P. Foldi \*\*

### PROCESSI GRAVITATIVI DI INSTABILITÀ IN ROCCIA (Su versanti e fronti di scavo)

Alcuni Case Histories

#### Introduzione

I processi di instabilità in roccia sono costituiti da tutti i fenomeni naturali in cui si sviluppano, per diverse cause, deformazioni più o meno complesse all'interno di masse rocciose, la cui evoluzione dipende strettamente dalle nuove configurazioni di equilibrio a cui tende il mezzo geologico fratturato.

Nell'ambito dei processi di instabilità si possono distinguere differenti tipologie deformative la cui evoluzione può variare da estremamente lenta a rapidissima e in cui le masse coinvolte risultano variabilissime sia geometricamente sia volumetricamente.

Paradossalmente possono essere considerati tali e al limite superiore dimensionale i processi di fagliazione che causano i terremoti o i movimenti neotettonici.

Per processi gravitativi di instabilità in roccia si intendono i processi che deformano masse rocciose sotto l'azione della forza di gravità che può essere definita come motore principale, associata a molteplici altre cause considerabili come secondarie.

Tra esse possono essere distinte per esempio l'azione idrostatica, quella criostatica e quella sismica, e addirittura in frequenti casi l'azione di disturbo indotta da azioni antropiche (scavi, carichi, vibrazioni, ecc.). In tutti i casi le azioni secondarie modificano la configurazione tensionale dell'ammasso roccioso provocando la ricerca di un nuovo

**N**el presente articolo vengono illustrati i principali processi di instabilità in roccia attraverso la rassegna fotografica di alcuni casi reali affrontati dagli scriventi; vengono descritte le classificazioni in uso corrente e le modalità e i criteri con cui sono operate le suddivisioni in tipologie di instabilità.

*I processi di instabilità sono spiegati evidenziandone le caratteristiche strutturali predisponenti e le cause principali che le innescano. In particolare con riferimento ai casi reali osservati sono individuate le peculiarità di carattere geologico-geomeccanico tipiche dei vari modelli esaminati.*

*In corrispondenza di tali modelli sono illustrate i metodi di analisi geomeccanica normalmente in uso e/o utilizzati nel caso in oggetto.*

*La rassegna non vuole essere esaustiva data l'estensione e la complessità della materia.*

*Infine a completamento della memoria vengono ricordati alcuni casi eclatanti di processi di instabilità di rilevanti dimensioni.*

equilibrio che si esplica attraverso processi deformativi di vario tipo. L'evoluzione deformativa può avvenire sia nell'ambito del campo di elasticità del mezzo sia sconfinandolo, ovvero entrando nel campo elasto-plastico o elasto-fragile con lo sviluppo di fenomeni deformativi spesso tali da non potere più considerare il mezzo come unitario (i.e. caso di distacco o crollo di masse rocciose, ecc.).

Il caso appena considerato si verifica allorché nel corso dell'evoluzione dell'equilibrio tensionale del mezzo vengono superati i limiti di resistenza dello stesso provocando un fenomeno di rottura (Rock-Failure).

L'evoluzione dei processi di riequilibrio

tensionale avvengono, soprattutto nel caso considerato ovvero in «superficie», attraverso migrazioni delle tensioni in direzione delle zone più rigide dell'ammasso a scapito delle zone e/o superfici strutturalmente più «deboli», dove invece si incanalano i processi deformativi.

Per questo l'assetto strutturale dell'ammasso roccioso riveste importanza fondamentale nello sviluppo delle instabilità tant'è che solo raramente è possibile individuare processi che coinvolgono unicamente la matrice rocciosa integra.

Invero si verifica spesso il caso in cui le deformazioni lungo le discontinuità strutturali invocano rotture lungo i setti di roccia integra costringendo processi deformativi «secondari» (Intact Material Failure, Hoek & Bray, 1977; Classification of Failure Modes of Rock Slopes, Aydan et Alii, 1989, 1991).

Generalmente nei processi gravitativi di superficie prevalgono, a causa della sensibile differenza di resistenza e deformabilità tra matrice e giunti, tipologie di instabilità definibili come «strutturali».

E' il caso di tutte quelle rotture che si esplicano mediante deformazioni lungo le discontinuità strutturali siano esse di tipo «primario» (stratificazione, scistosità, contatti formazionali, ecc.) ovvero singenetiche, siano di natura «secondaria» ovvero postgenetiche (faglie, fratture di tensione o di taglio, ecc.).

E' principalmente a queste tipologie che viene dedicata questa breve rassegna.

#### Stato delle conoscenze

Lo studio delle tipologie di instabilità in roccia è proceduto di pari passo con l'evoluzione delle conoscenze nella meccanica delle rocce applicata sia alle opere di ingegneria civile (strade montane, dighe, prevenzione delle catastrofi, ecc.) sia ai grandi scavi di superficie dell'attività estrattiva a cielo aper-

\* Docente di Consolidamento e Difesa del suolo, Università di Parma  
\*\* Responsabile Servizio Geologico-Geomeccanico, RockSoil SpA

to (Open Pit Mines, Quarries).

Grande impulso a tali conoscenze proviene dalla necessità di ottimizzare il rapporto costi-benefici nell'ambito dell'estrazione mineraria a cielo aperto.

Di particolare rilevanza risultano gli studi condotti dalla scuola Anglo-Sudafricana (John Bray, Evert Hoek) compendiate nelle pubblicazioni della Istitution of Mining and Metallurgy (Rock Slope Engineering, 1974).

Hoek & Bray distinguono in particolar modo alcune tipologie di instabilità in funzione del cinematismo di rottura imposto dalle condizioni strutturali in cui versa l'ammasso roccioso.

In particolare vengono distinti:

- **Scivolamento planare (Plane Failure):** rottura lungo una discontinuità a direzione subparallela al versante e immersione a franappoggio;

- **Scivolamento tridimensionale (Wedge Failure):** rottura su due superfici di discontinuità a direzione obliqua rispetto al versante e linea di intersezione disposta a franappoggio;

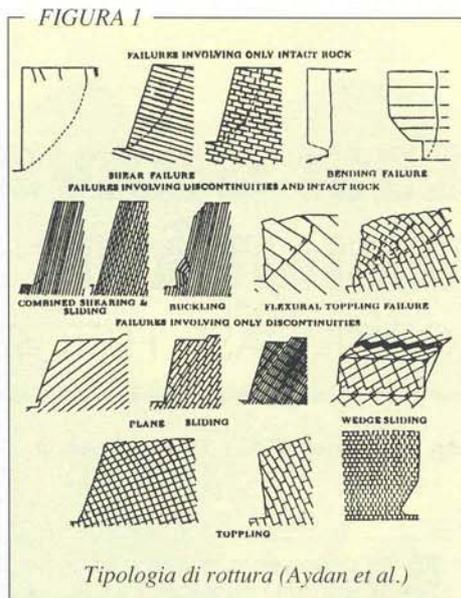
- **Ribaltamento (Toppling Failure):** si esplica attraverso la rotazione di colonne o blocchi di roccia separati da discontinuità molto inclinate disposte a reggiappoggio;

- **Scivolamento circolare (Circular Failure):** la rottura avviene lungo una superficie che approssima la forma circolare e si verifica in strutture altamente fratturate fino a caotiche.

Aydan et Alii nel loro lavoro «Classification of Failure Modes of Rock slopes» individuano diverse tipologie di rottura differenziate in funzione dello stato fratturativo dell'ammasso e delle strutture e/o materiali coinvolti nel processo deformativo (Aydan, 1992).

In particolare si distinguono (Fig. 1):

a) **Tipologie di rottura coinvolgenti la sola roccia intatta - Classe I:**



- 1) Rottura a taglio
- 2) Rottura a flessione
- b) **Tipologie di rottura coinvolgenti sia le discontinuità sia la roccia intatta - Classe II:**
  - 1) Rottura combinata a taglio e scivolamento
  - 2) Rottura per carico di punta
  - 3) Ribaltamento flessionale
- c) **Tipologie di rottura coinvolgenti le sole discontinuità - Classe III:**
  - 1) Rottura a scivolamento:
    - 1.1) Scivolamento planare
    - 1.2) Scivolamento tridimensionale
  - 2) Rottura a ribaltamento
  - 3) Rottura combinata a scivolamento e ribaltamento

Varnes (1978) esamina il problema delle instabilità in roccia soprattutto da un punto di vista qualitativo e descrittivo sulla base del fenomeno nel suo complesso; egli, nell'ambito dei movimenti di versante in roccia, distingue diversi processi in funzione del tipo di movimento prevalente osservato.

Oltre ai già citati movimenti per scorrimento o scivolamento (Slides) e ribaltamento (Topples), vengono individuati:

- **Crolli (Falls):** in essi prevale la deformazione nel mezzo aereo ovvero la caduta libera di blocchi rocciosi da una parete subverticale;
- **Frane per espansione laterale (Lateral Spreads):** sono deformazioni che caratterizzano una massa rocciosa fratturata sovrastanti coltri argillitiche rifluenti; non si riconosce una superficie basale di scorrimento e neppure una zona di deformazioni plastiche che invece interessano le sottostanti coltri argillitiche;

- **Colamenti di roccia (Rock Flow):** comporta movimenti differenziali estremamente lenti fra unità che mantengono la loro struttura originale; le deformazioni si esplicano lungo fratture fra esse non collegate o attraverso modificazioni strutturali simili a quelle osservate nei movimenti dei fluidi viscosi;

- **Valanga per crollo di roccia (Rock Fall Avalanche):** si tratta di una frana complessa ed è caratterizzata più che da una tipologia di instabilità particolare dall'estrema velocità con cui il fenomeno si manifesta.

La peculiarità essenziale della classificazione dei movimenti franosi del Varnes è l'individuazione della velocità con cui i fenomeni si esplicano che, nella scala riportata, varia da 6 cm/anno (estremamente lento) a 3 m/secondo (estremamente rapido).

## Quadro fenomenologico

L'analisi delle classificazioni in uso corrente nell'ambito della descrizione delle diverse tipologie di rottura porta a compendiare il quadro fenomenologico in forma organica e sintetica nella successiva Tab. 1.

La tabella presenta 10 tipologie di processi di instabilità in cui i primi sette rappresentano i casi dove l'assetto delle discontinuità

TABELLA 1		TABELLA DEI PRINCIPALI PROCESSI DI INSTABILITA' IN ROCCIA								
PROCESSI DI INSTABILITA'	ASSETTO STRUTTURALE PREVAL.			EVOLUZIONE			METODI DI ANALISI			
	Stratific/scist	Fratturato	Caotico	Lenta	Media	Rapida	Equilibrio limite	Elementi finiti	Elementi distinti	
1- Scivolamento planare (plane failure)	▲	△			△	▲	▲			
2- Scivolamento tridimensionale (wedge failure)	▲	▲			△	▲	▲			
3- Ribaltamento flessionale (flexural toppling)	▲			▲			△	▲		
4- Ribaltamento flessionale di blocchi (block-flexural toppling)	▲	△			▲			△	▲	
5- Ribaltamento di blocchi (block toppling)	▲	▲				▲			▲	
6- Crollo (rockfall or cliff failure)	▲	△				▲	△	▲		
7- Carico di punta su consequent slope (buckling)	▲			▲	▲	▲	▲	△		
8- Scivolamento circolare (circular failure)			▲		▲		▲	△		
9- Espansione laterale (lateral spread)	▲	△		▲			△	▲		
10- Colamento di roccia / Valanga di roccia (rock flow / rock avalanche)	△	△	▲			▲	▲			
▲ Carattere principale							Compendiati da			
△ Carattere secondario							- HOEK & BRAY, 1977 - VARNES, 1978 - AYDAN et ALII, 1989, 1991, 1992			

principali nonché la loro persistenza svolgono un ruolo fondamentale nello sviluppo dei fenomeni deformativi.

Negli ultimi tre casi (8,9,10) le deformazioni primarie avvengono all'interno di masse in cui non esiste una struttura orientata preferenziale (casi 8, 10) o in masse basali a comportamento plastico (caso 9).

Nel quadro compaiono tre caratteri (assetto, evoluzione, analisi) suddivisi ulteriormente in sottocaratteri compilati per ogni tipo di processo elencato

Vengono descritti preliminarmente sia i processi di instabilità sia i loro caratteri propri relativamente ad assetto ed evoluzione.

## 1) Scivolamento planare (Plane Failure)

Il fenomeno (Fig. 2) appare descritto compiutamente da Hoek & Bray; consiste nello scivolamento di una massa rocciosa su una superficie preesistente generalmente rappresentata da un piano di stratificazione, di scistosità o da una faglia (Foto 1).

Tale cinematismo si sviluppa quando sus-

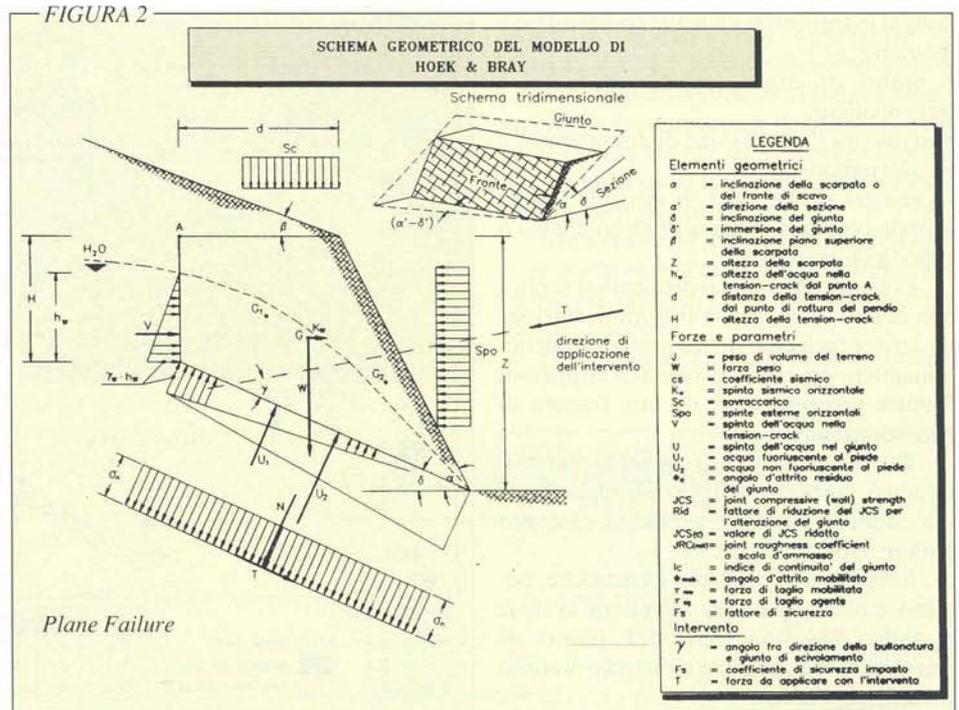


Foto 1 - Scivolamento planare (Ravedis)

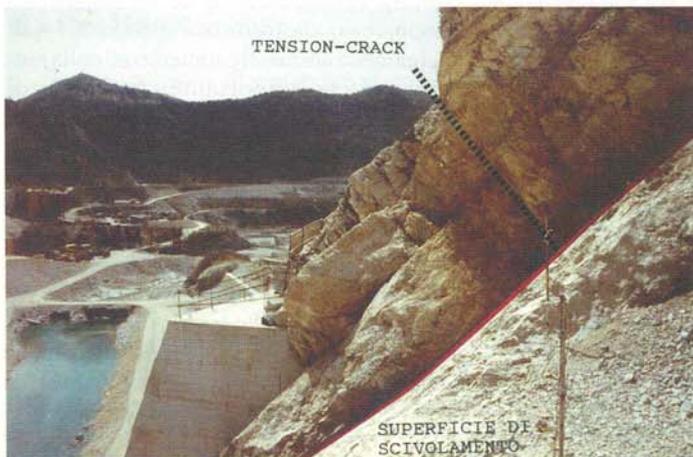
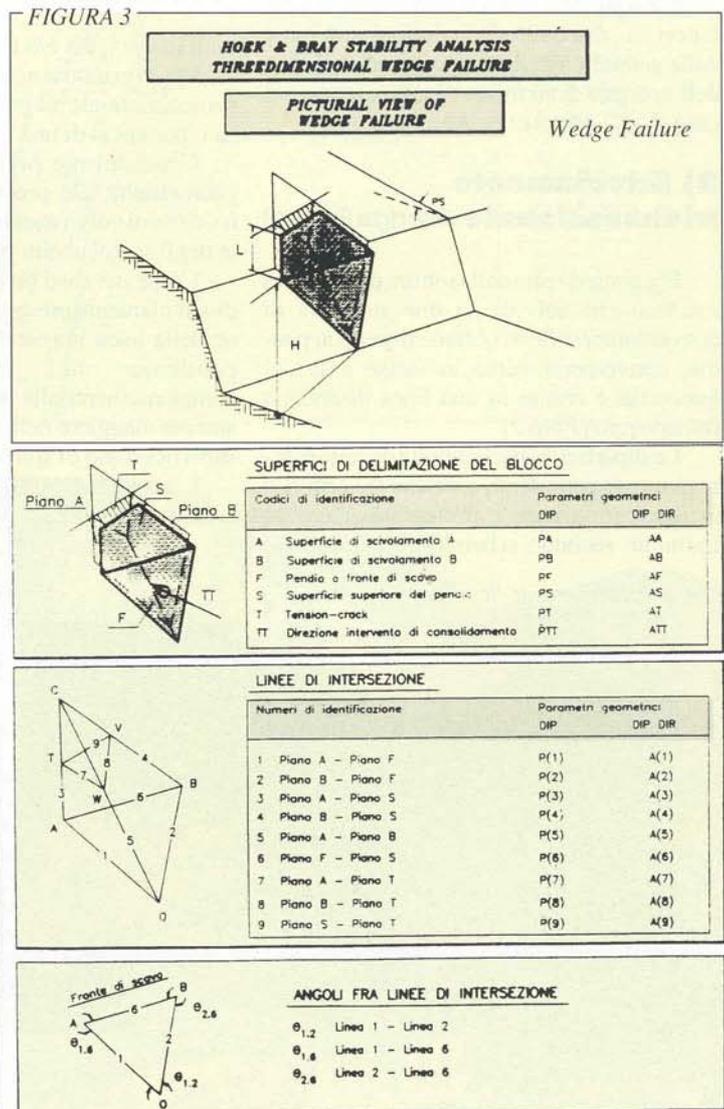
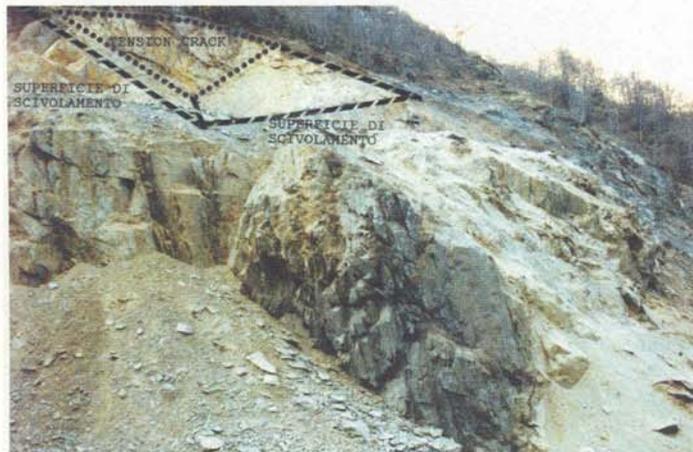


Foto 2 - Scivolamento tridimensionale (Bema)



## Prefabbricati e Strutture

sistono le seguenti principali condizioni geometriche:

- piano di discontinuità disposto a franappoggio
- angolo tra l'immersione di discontinuità e pendio minore di  $20^\circ$
- presenza di superfici di svincolo statico laterale costituite da piani di discontinuità o superfici topografiche.

Generalmente lo scivolamento si esplica con la creazione di una fessura di trazione posteriore (svincolo statico posteriore) denominata tension-crack costituita da un piano di frattura preesistente o da una frattura di neoformazione.

Talora il piano di scivolamento può configurarsi come l'involuppo di superfici di discontinuità disposte a gradini (Stepped Failure, Hoek & Bray).

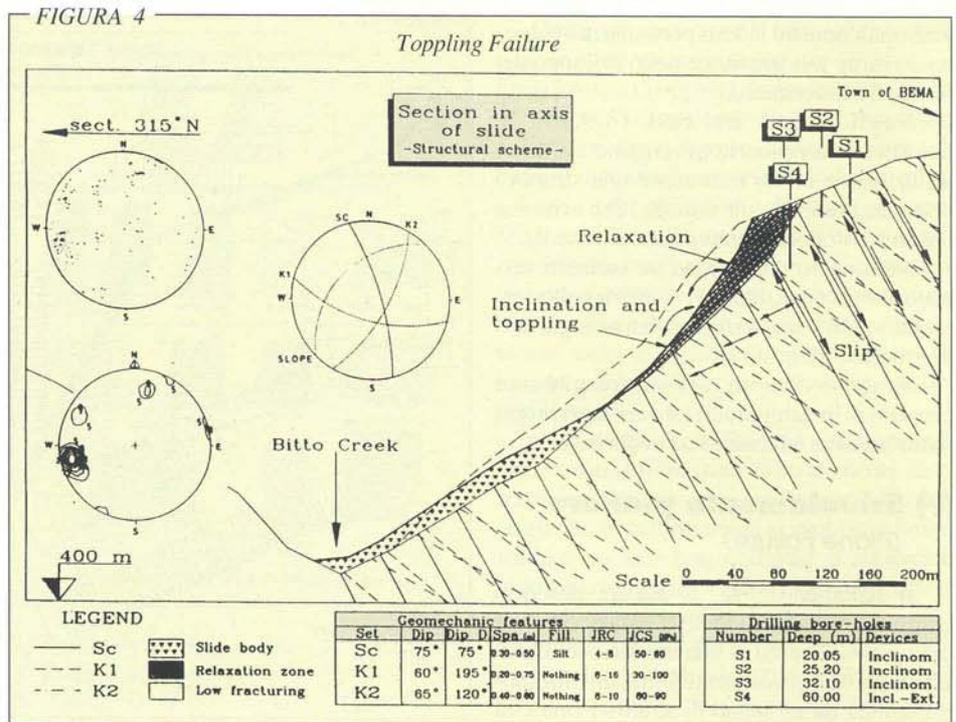
In assenza di pressioni idrostatiche, peraltro molto importanti, la rottura avviene quando l'inclinazione del piano di scivolamento è superiore all'angolo di attrito della discontinuità.

L'evoluzione del fenomeno dipende dai fattori di disequilibrio indotti al sistema e dalla geometria dello stesso: rapida nel caso dell'apertura di un fronte di scavo, media nel caso di un versante naturale.

### 2) Scivolamento tridimensionale (Wedge Failure)

È caratterizzato dalla rottura di un diedro roccioso che scivola su due superfici di discontinuità (Fig. 3) oblique rispetto al pendio, convergenti verso lo stesso e la cui intersezione risulta in una linea disposta a franappoggio (Foto 2).

Le superfici di discontinuità devono essere piuttosto persistenti, caso che si verifica o in rocce stratificate e fratturate o in rocce fratturate secondo schemi strutturali ricor-



renti in tipi ignei e/o metamorfici.

Per ovvi motivi non ricorrono superfici di svincolo laterale ma può verificarsi la presenza (sporadica) di una tension-crack.

Generalmente per le sue caratteristiche geometriche tale processo interessa masse rocciose di volume inferiore a quelle coinvolte negli scivolamenti planari.

Come nel caso precedente la condizioni di scivolamento presuppone che l'inclinazione della linea intersezione sia minore della pendenza del pendio misurata complanarmente alla stessa e contemporaneamente maggiore dell'angolo di attrito delle superfici (caso di spinte idrostatiche nulle).

L'evoluzione presenta gli stessi caratteri del caso precedente.

### 3-4-5) Ribaltamento (Toppling)

I processi di instabilità per ribaltamento possono essere definiti come processi di «instabilità rotazionale» o di «disequilibrio colonnare» o «lastriforme» (Broili, 1974).

Interessa ammassi caratterizzati dalla presenza di un'importante famiglia di discontinuità (per persistenza e caratteristiche meccaniche) disposta a reggipoggio con elevata inclinazione (Fig. 4).

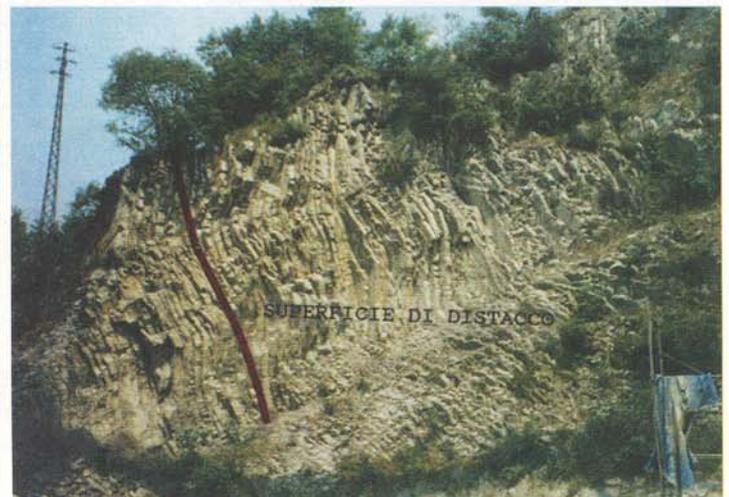
L'instabilità si manifesta attraverso la rotazione dei blocchi e/o lastre attorno a una base fissa. La variabilità di tale base caratterizza i tre sottotipi di ribaltamento:

- **Ribaltamento flessionale (Flexural Toppling):** è tipico di rocce resistenti caratterizzate da stratificazione o scistosità dove gli

Foto 3 - Ribaltamento flessionale (Ravedis)



Foto 4 - Ribaltamento flessionale di blocchi (Barro)



effetti consistono nella flessione di lastre e/o prismi colonnari (solidi caratterizzati da una dimensione prevalente) fino alla rottura degli stessi (Foto 3).

Si può notare abbastanza frequentemente in rocce altamente fissili (slates) o in masse a fratturazione colonnare da raffreddamento subaereo;

- **Ribaltamento flessionale di blocchi (Block Flexural Toppling):** questo tipo di ribaltamento si manifesta mediante una flessione pseudocontinua in prismi colonnari allungati suddivisi da numerosi giunti trasversali (Foto 4);

- **Ribaltamento di blocchi (Block Toppling):** si verifica quando singole colonne rocciose sono divise da giunti ortogonali ad elevata spaziatura; la base della rottura risulta meglio definita rispetto al ribaltamento flessionale poiché si configura come una scalettatura in salita verso la sommità del pendio (Foto 5).

Tutti i fenomeni di ribaltamento sono contraddistinti da un'evoluzione di tipo retrogressivo ovvero il processo di instabilità si propaga partendo dal piede verso monte.

La velocità evolutiva risulta variabile e crescente passando dal ribaltamento flessionale (lento) al ribaltamento a blocchi (rapido).

## 6) Crollo (Rockfall)

Tale condizione di instabilità si realizza quando esistono condizioni particolari di libertà del sistema consistenti in un'assoluta mancanza di vincoli statici inferiormente e lateralmente a porzioni di fronti di roccia subverticali.

Il processo di rottura avviene per distacco di masse rocciose prismatiche in corrispondenza di fratture preesistenti o di neoformazione subparallele alla parete o, nel caso di porzioni aggettanti, di fratture suborizzontali presenti al tetto dei prismi (Foto 6).

Quest'ultimo è il caso delle formazioni sedimentarie dove lo scalzamento al piede provoca stati di trazione nelle masse sovrastanti tali da innescare la rottura lungo piani di stratificazioni suborizzontali e conseguente crollo della massa (Fig. 5).

Il primo caso ricorre in ammassi scarsamente suddivisi e con elevate caratteristiche di resistenza in grado di sviluppare pareti subverticali di elevata altezza.

L'evoluzione del dissesto è rapidissima.

## 7) Carico di punta (Buckling)

Denominato anche «fenomeno di instabilità flessionale» (Giani, 1988) si verifica sui pendii cosiddetti «consequent slope» (AA. anglosassoni) ovvero dove il versante è con-



Foto 5 - Ribaltamento di blocchi (Bema)

formato secondo una superficie di discontinuità di elevata estensione e dove un'altra struttura della stessa famiglia separa una sottile lastra rocciosa; detta lastra risulta caricata in modo tale da sviluppare tensioni flessionali al piede dove si ha l'incastro alla base del versante (Foto 7).

Il fenomeno può essere assimilato al carico di punta di una trave che si deforma e si rompe per sforzi di flessione (flambage per gli AA. francesi).

Perché il meccanismo di carico si espliciti

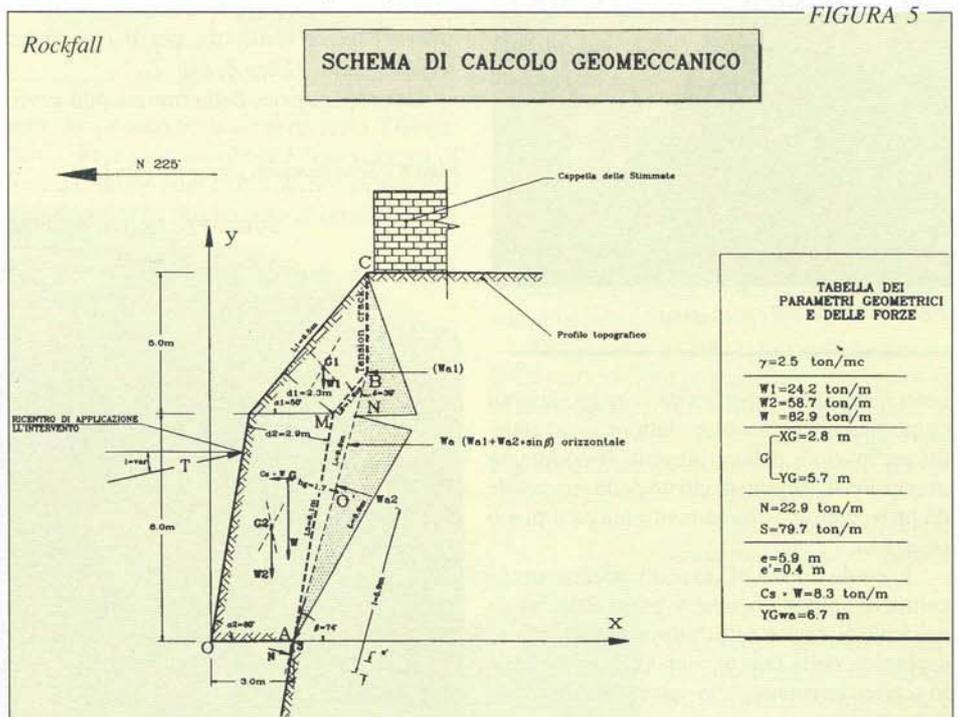
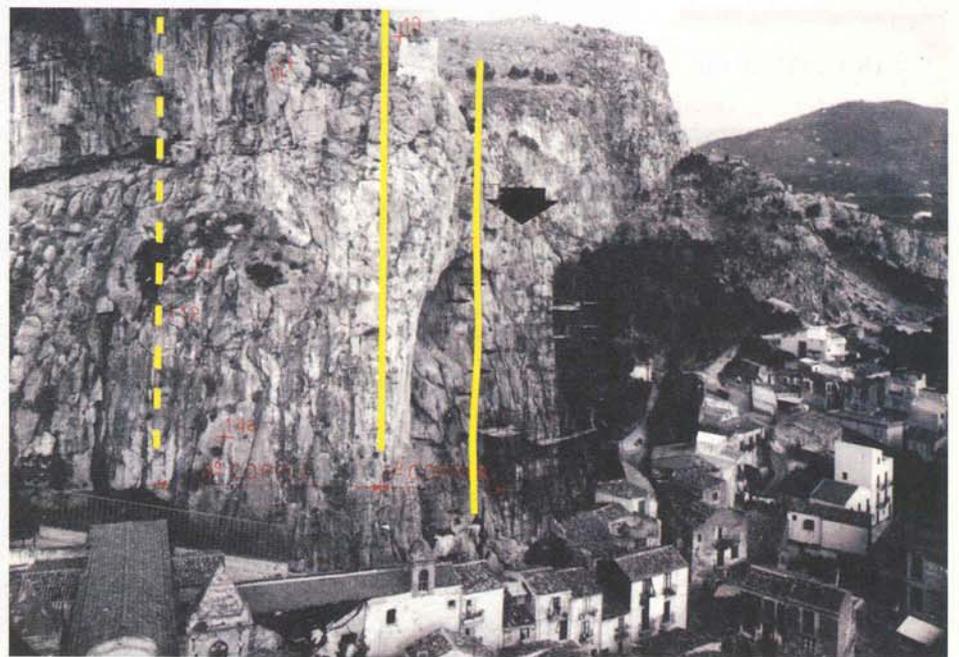


Foto 6 - Crollo (Cefalù)



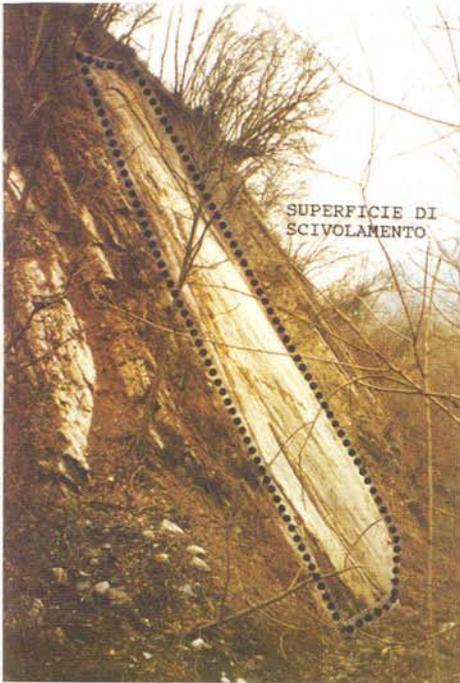


Foto 7 - Carico di punta (Iseo)

**8) Scivolamento circolare**  
(Circular Failure)

Le condizioni predisponenti a tale tipologia sono individuabili in un'estrema fratturazione della massa rocciosa o allorquando essa è costituita da materiale a bassa resistenza.

Il fenomeno di rottura secondo superfici subcircolari può avvenire anche in corrispondenza di versanti fortemente estesi in rapporto al reticolo fratturativo presente; si tratta quindi di un fenomeno che risente in maniera piuttosto evidente del decadimento delle caratteristiche di resistenza per il cosiddetto «effetto scala» (Foto 8, Fig. 7).

La propagazione della frattura può avvenire inizialmente da una discontinuità preesistente per coinvolgere successivamente tutta la massa nel suo complesso.

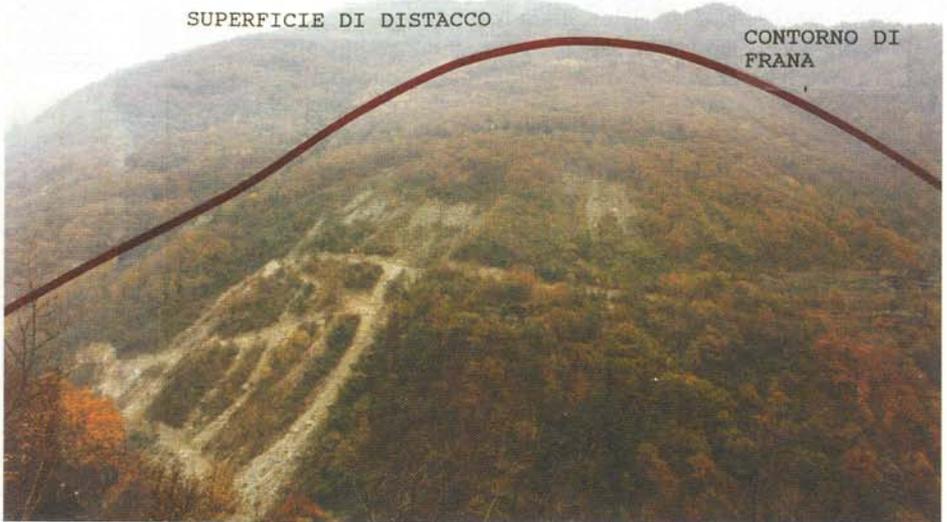
Tale fenomeno contraddistingue i cosiddetti «Sackung» («Deep Seated Mass Rock Creep») che consistono in frane di versante di grosse dimensioni.

Può avvenire anche in rocce tenere, in rocce a struttura caotica o in rocce molto alterate. L'evoluzione può essere considerata a media velocità.

**9) Espansione laterale**  
(Lateral Spread)

Lo schema di Fig. 8 illustra molto chiaramente lo scenario geologico in cui si esplica il fenomeno deformativo denominato con

Foto 8 - Scivolamento circolare (Spriana)



sono necessarie superfici di svincolo laterali (superfici di distacco) e, fattore essenziale, un'inclinazione della struttura di discontinuità maggiore all'angolo di attrito della stessa tale da provocare lo scivolamento lungo il piano (Fig. 6).

L'evoluzione del dissesto occupa tutti i campi di velocità poiché si passa dalla bassa velocità di carico alla rottura rapida, talora esplosiva, della fase terminale, dove avviene lo scarico tensionale e lo scivolamento finale della lastra.

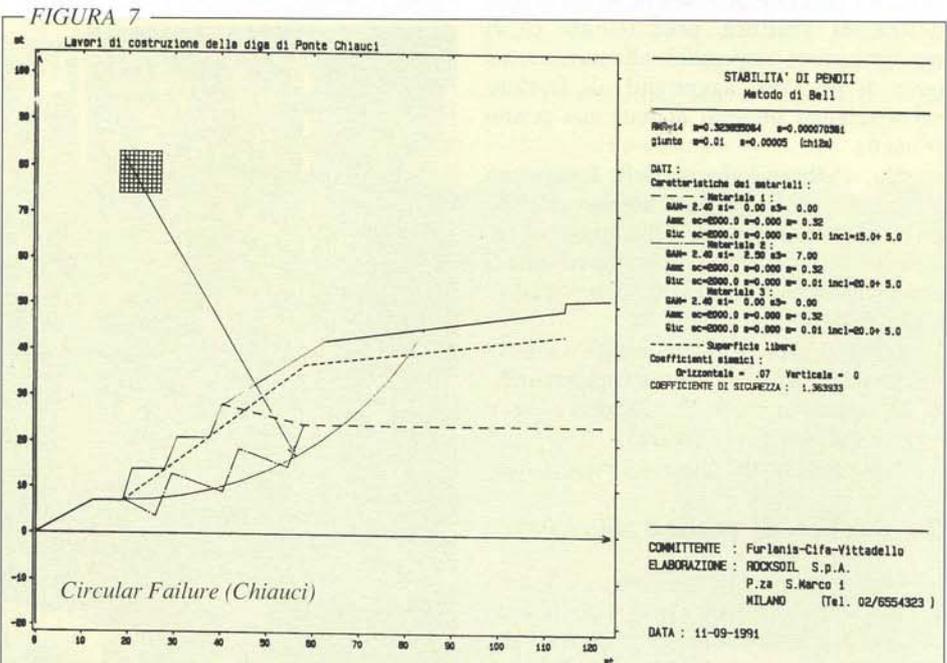
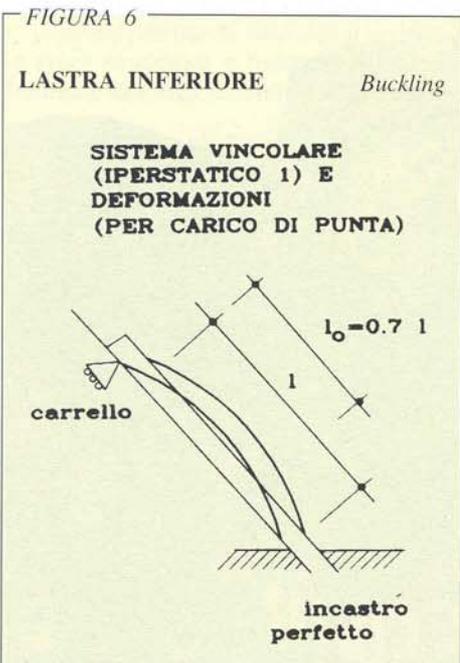


FIGURA 8

Lateral spread  
(Verna)

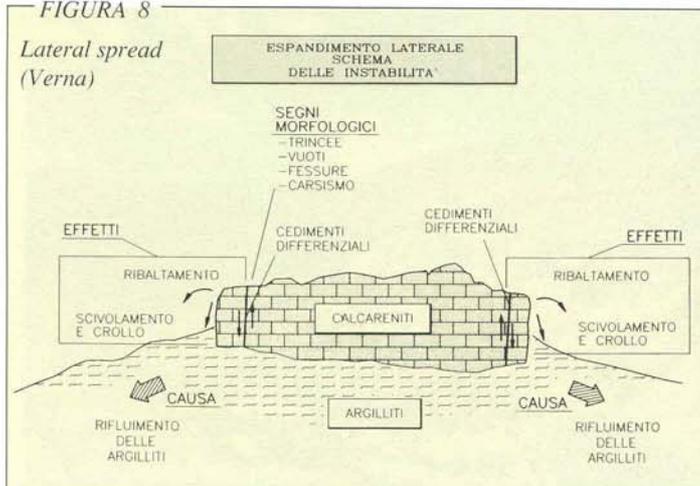


Foto 9 - Espansione laterale (Verna)

espansione laterale.

Esso consiste in una lenta migrazione di ingenti masse rocciose appartenenti a una serie generalmente sedimentaria stratificata e fratturata secondo grosse fessure subverticali; i prismi e le colonne rocciose isolate dalle discontinuità preesistenti o da fratture di neoformazione «derivano» lentamente e secondo una dinamica centrifuga (dal nucleo della serie) con il procedere delle deformazioni delle coltri argillose sottostanti (Foto 9) (Lunardi et Alii, Frolidi, 1993).

L'appennino settentrionale e centrale è ricco di esempi di questa peculiare fenomenologia (Rocca di S. Leo, Rocca di Gradara, Pietra di Bismantova, Rupe di Orvieto, Todi, ecc.) (per Orvieto, Lunardi, 1980).

## 10) Valanga di Rocca (Rock Avalanche)

Non è una tipologia riconducibile a schemi che prevedono l'individuazione del fenomeno su basi geostrutturali e/o cinematiche, ma può essere considerato come un processo di instabilità la cui genesi può derivare da molteplici fattori e comunque si esplica in forma rapidissima coinvolgendo ingenti masse di materiale.

La denominazione designa più correttamente le modalità di dislocazione della massa che spesso corrispondono a mobilitazioni assimilabili a quelle di un flusso in cui i singoli elementi materiali sono soste-

nuti da pressioni dispersive (tipo Debris-flow). In taluni casi (Foto 10) la valanga di roccia si origina dal crollo di enormi quantità di materiale che precipitano da considerevoli altezze.

Per antonomasia la velocità di trasferimento delle masse è elevatissima.

Infine si cita il caso del crollo con scivolamento che può essere considerato come un processo di instabilità di tipo misto dove la rottura avviene pressoché simultaneamente sia lungo la superficie su cui avviene lo scorrimento sia su giunti da cui avviene il distacco (Foto 11, 12, 13) (Varnes, 1978).



Foto 10 - Valanga di roccia (Val Pola)

## Metodi di analisi

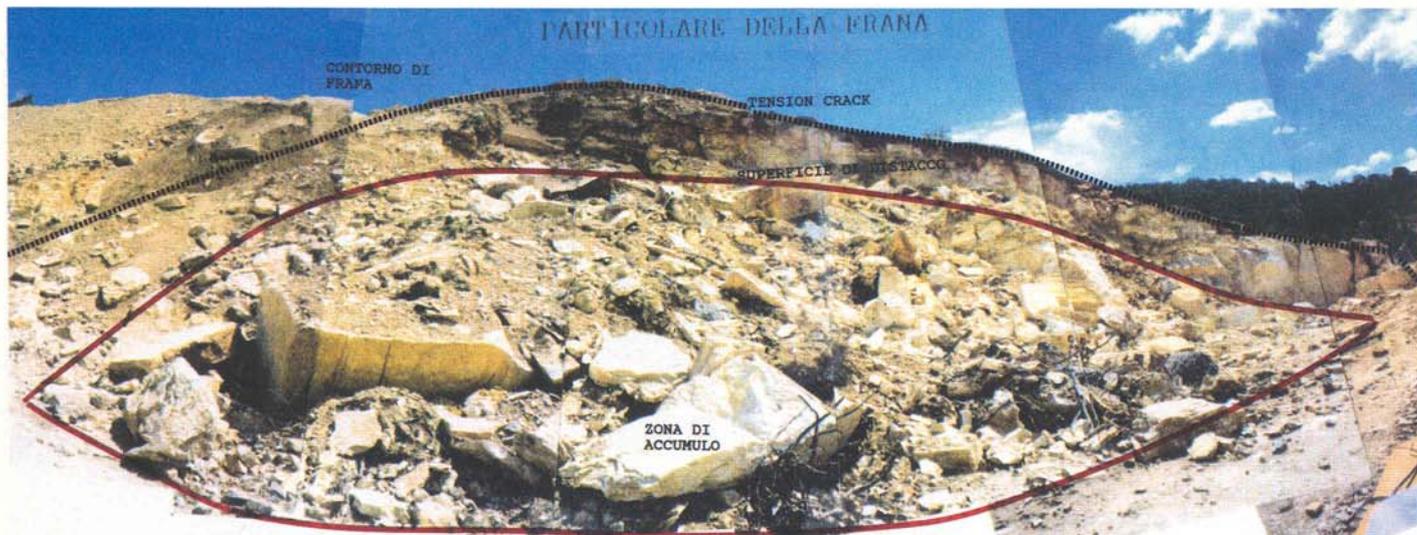
Nelle ultime tre colonne della tab. 1 sono riportati nell'ambito dei metodi di analisi le tipologie analitiche geomeccaniche più frequentemente usate nei studi di geologia applicata e geoingegneria.

Tutti i metodi citati rientrano nel campo delle elaborazioni numeriche statiche, ovvero che tengono conto solo delle azioni statiche trasformando gli eventuali impulsi dinamici in analoghe azioni pseudostatiche (es. azione sismica, pressioni idrodinamiche, ecc.).

Sono stati distinti tre principali gruppi di metodi di analisi:

A) *Equilibrio limite*: sono tutti quei metodi che valutano le condizioni statiche del corpo in esame comparando e rapportando le forze agenti con quelle resistenti senza tenere in nessun conto la deformabilità della struttura e le relative conseguenze sugli stati tensionali e la propagazione della rottura. Si sviluppano secondo un comportamento di tipo elasto-plastico del materiale e individuano un coefficiente di sicurezza del sistema definito come rapporto tra le forze resistenti e le forze agenti.

Per tale motivo i parametri richiesti sono unicamente quelli di resistenza di picco e residua del materiale e



(sopra) Foto 14 - Frana Chiauci (caso 1)

della struttura in cui si presuppone possa svilupparsi la rottura. Possono essere considerati i metodi più semplici e speditivi.

**B) Elementi finiti (Finite Element Methods, FEM):** rappresentano un approccio decisamente più sofisticato dal punto di vista matematico a determinati problemi di meccanica delle rocce (Jaeger, 1972); in particolare detti metodi numerici di analisi delle tensioni possono essere applicati a forme di anisotropia tipiche in alcune situazioni geomeccaniche (Zienkiewicz et Alii, 1967).

Per la possibilità di analizzare gli equilibri tenso-deformativi, sono idonei a cogliere numericamente i fenomeni di rottura progressiva.

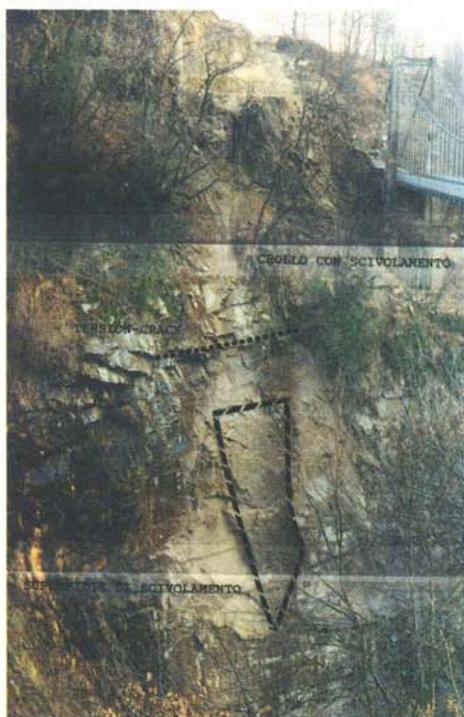
Risultano piuttosto complessi e richiedono parametri di ingresso relativi solo alle caratteristiche di deformabilità e ai vincoli del sistema se lavorano nel campo elastico e anche i parametri di resistenza se si sviluppano nel campo di elasto-plasticità.

Vengono utilizzati per problemi di natura piuttosto complessa laddove il comportamento dell'ammasso risulta omogeneo nell'insieme e non influenzato da particolari strutture di anisotropia meccanica (piani di discontinuità principali).

**C) Elementi distinti (Distinct Element Methods, DEM):** il metodo ideato e messo a punto all'inizio degli anni settanta (Cundall, 1971) è costituito da un modello numerico atto a simulare grandi deformazioni in ammassi fortemente strutturati dove il comportamento complessivo risulta influenzato in modo pressoché totale dalle discontinuità.

Successivamente, sul termine degli anni ottanta, il metodo è stato implementato su un codice automatico di elaborazione al calcolatore (Itasca, 1988; Cundall e Hart, 1989).

E' un metodo molto efficace nella simulazione di fenomeni deformativi complessi di ampie dimensioni; per contro richiede come parametri di ingresso tutte le caratteristiche di



(Susa)

(Val Cannobina)

(sotto e a lato) Foto 11-12-13 - Crollo con scivolamento

(Bolzano)



resistenza e deformabilità delle discontinuità e in taluni casi anche della matrice integra.

Si sviluppa sia in campo statico che dinamico e si basa sulle equazioni di moto espresse in forma esplicita.

A conclusione è molto importante considerare che la semplicità o sofisticazione dei metodi di analisi deve andare di pari passo con la precisione e affidabilità dei parametri di ingresso poiché una scarsa congruenza tra le due fasi elaborative impedisce il raggiungimento del rapporto ottimale precisione del calcolo-affidabilità delle conoscenze.

Risulta concettualmente errato applicare metodi di analisi complessi in mancanza di dati affidabili a meno che si effettui un'analisi probabilistica e non deterministica.

## Cases Histories

### 1) Scivolamento planare

Si citano alcuni esempi significativi.

• **Caso 1:** nella Foto 14 si è verificata una frana di calcari stratificati secondo una tipologia di scivolamento planare.

E' stata compiuta un'analisi a ritorso (Fig. 9) mediante il modello di Hoek & Bray modificato per contemplare una tension-crack obliqua e non verticale così come osservato sul relitto del dissesto. Un'ulteriore modifica è stata apportata per valutare la distribuzione della tensione normale sul piano di scivolamento per meglio valutare l'effetto dell'eccentricità dei carichi (momenti rotatori) sulla statica del blocco.

• **Caso 2:** nel caso di Fig. 10 un fenomeno di toppling in calcari fittamente stratificati (Foto 4) è stato esaminato considerando una possibile rottura finale su una superficie scalettata (Stepped Failure) individuata dall'intersezione tra i giunti di strato e quelli ad essi normali.

• **Caso 3:** come si può osservare dalla Foto 15 il fenomeno riscontrato appare come lo scivolamento di una serie flischioide su un piano di contatto formazionale al progredire di una colata argillitica alla base che provoca lo scalzamento del supporto statico della serie stessa (Toe Undercutting) (Fig. 11).

Il caso è stato analizzato secondo un semplice modello di scivolamento planare;

### 2) Scivolamento tridimensionale

• **Caso 4:** è il caso del franamento di un cuneo tridimensionale durante lo scavo di

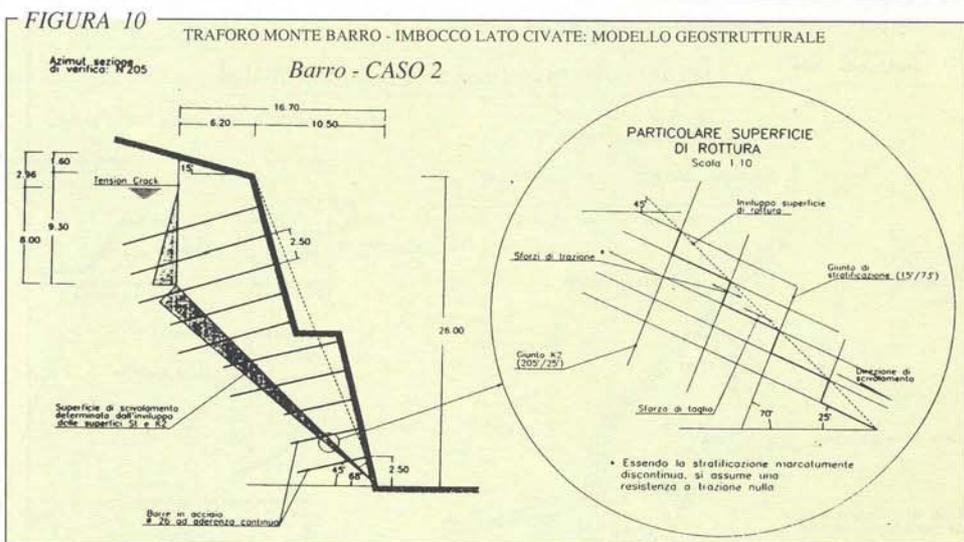
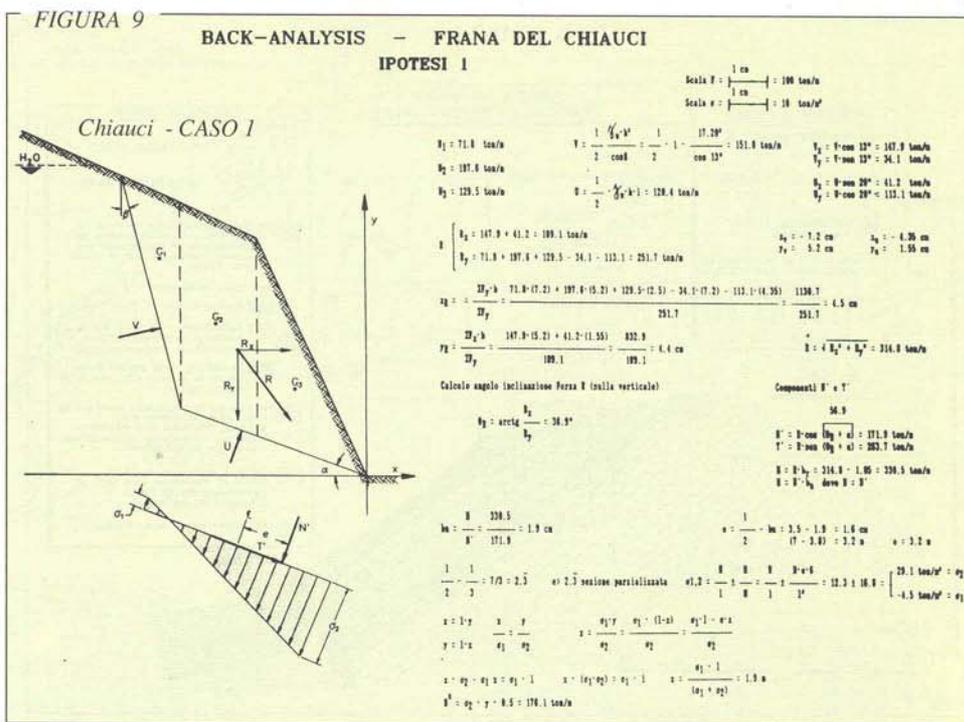


Foto 15 - Piolo (Caso 3)



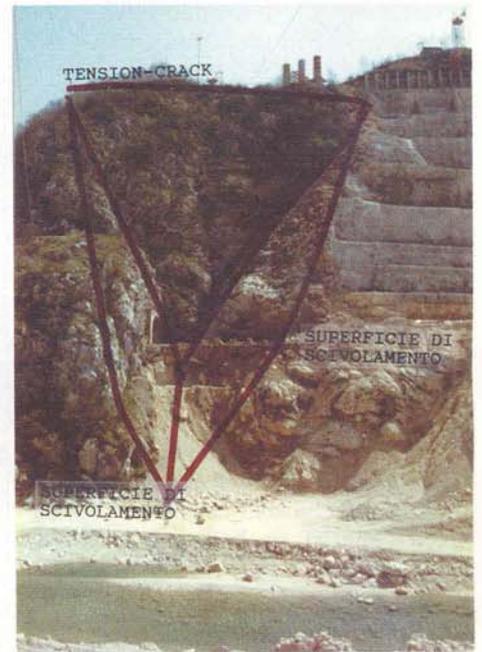
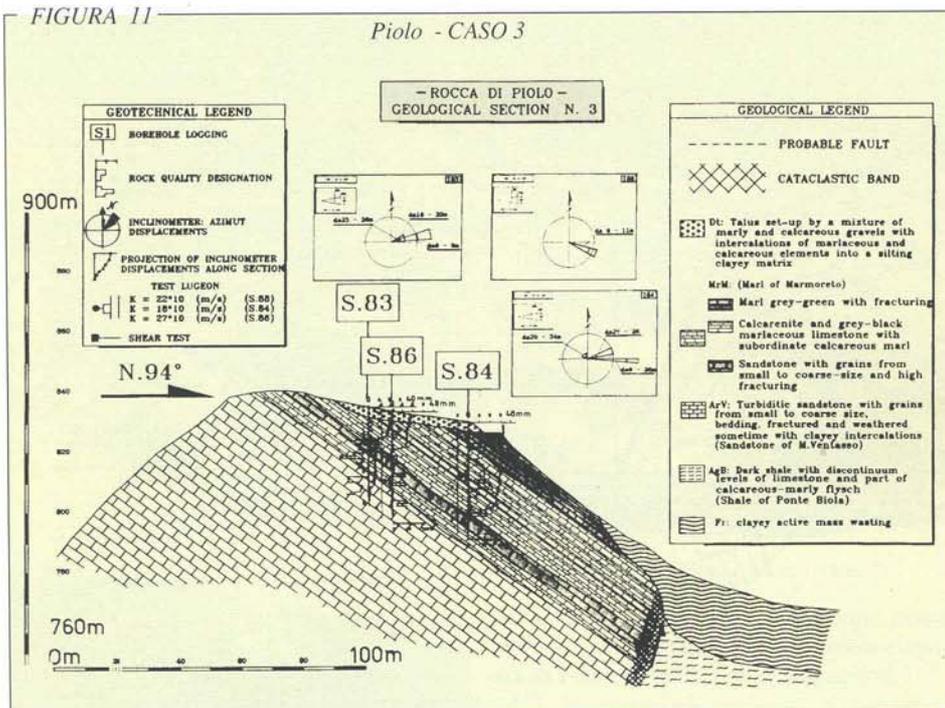


Foto 16 - Ravedis (caso 5)

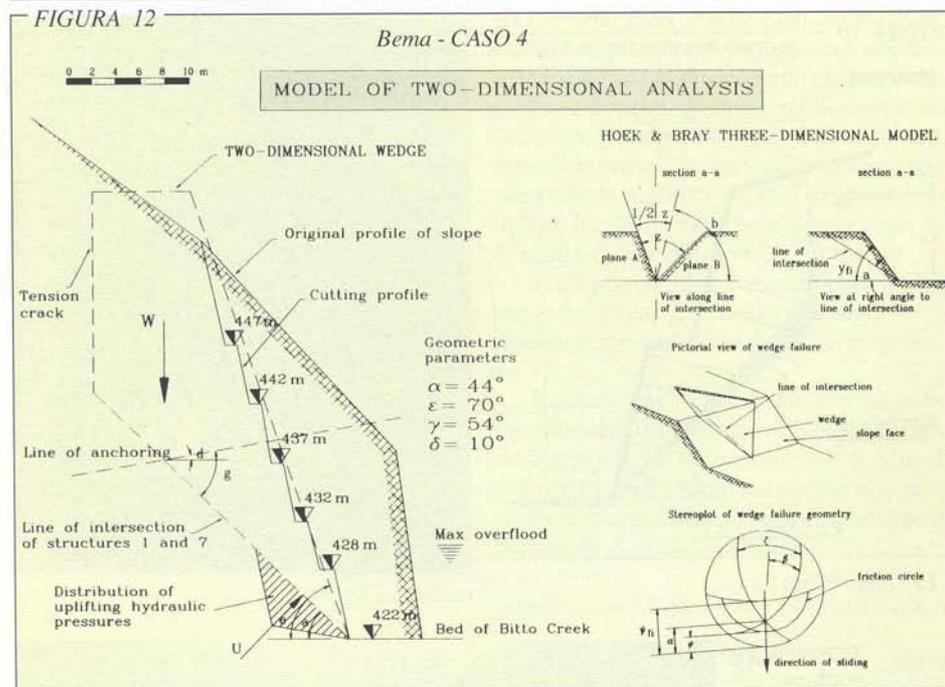
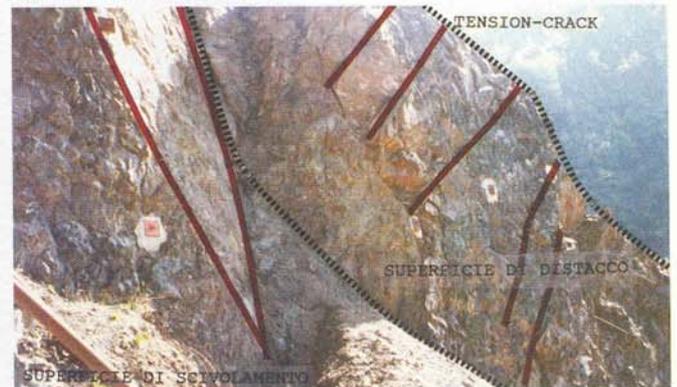


Foto 17 - Bema (caso 6)



Foto 18 - Esaro (caso 6)



uno sperone roccioso in paragneiss associati a micascisti (Foto 2).

Per le caratteristiche geometriche del cuneo (angolo di apertura tra i due piani di rottura molto elevato) è stato utilizzato un metodo di calcolo pseudotridimensionale secondo le indicazioni di Hoek & Bray (Fig. 12).

• **Caso 5:** l'intersezione tra due faglie principali (Master Faults) di una piega geologica (Lunardi, 1992, Frolidi, 1992), ha provocato in tempi remoti il rilascio tridimensionale di un cuneo di ingenti proporzioni (Foto 16).

Negli speroni rocciosi adiacenti sono state analizzate le condizioni statiche (Fig. 13) di cunei tridimensionali di potenziale rottura secondo il metodo proposto da Hoek & Bray (metodo completo).

**3-4-5) Ribaltamento**

• **Caso 6:** è il caso di un ribaltamento di blocchi verificatosi in rocce paragneissiche e





Foto 19 - Verna (caso 7)



Foto 20 - Iseo (caso 8)

micascistose dove le discontinuità molto marcate (scistosità e fratture associate) hanno provocato ingenti fenomeni franosi lungo tutto un versante (Foto 17). L'analisi è stata condotta secondo un metodo semplificato messo a punto dagli autori: il

versante è stato modellato in tre elementi colonnari che tendono a ribaltarsi e a trasmettere tali azioni secondo una forza instabilizzante a un cuneo basale soggetto ad un potenziale scivolamento planare (Fig. 14).

L'azione instabilizzante viene computata nell'ambito della verifica statica del blocco di base eseguita secondo metodi grafici mediante il poligono delle forze (Fig. 15).

Il fenomeno di toppling viene analizzato particolarmente bene attraverso l'uso degli Elementi Distinti. In taluni casi (Foto 18), per l'esame del ribaltamento flessionale di blocchi, si è ricorso al confronto tra i risultati in termini di analisi delle tensioni e quelli ricavati da più tradizionali metodi all'equilibrio limite (Prass, 1991).

**6) Crollo**

• **Caso 7:** un caso di crollo di rilevante interesse è rappresentato nella Foto 19 dove, nell'ambito di un fenomeno di espansione laterale di una placca calcarenitica, gli effetti più importanti sulle pareti della placca sono costituiti dal crollo di masse aggettanti isolate sia lateralmente sia inferiormente (Lunardi et Alii, 1993; Frolidi, 1993). Nella situazione esaminata è stato approntato un modello statico (Fig. 5) dove il sostegno del blocco aggettante è stato attribuito a forze di coesione nella discontinuità posteriore, presenti grazie a setti integri sulla superficie di giunto.

Di particolare rilevanza si evidenzia lo studio delle azioni rotatorie per individuare la distribuzione delle tensioni sul giunto poste-

FIGURA 17

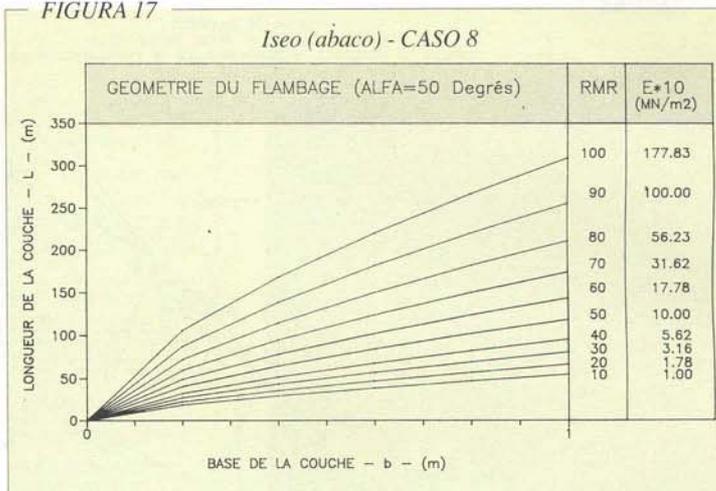
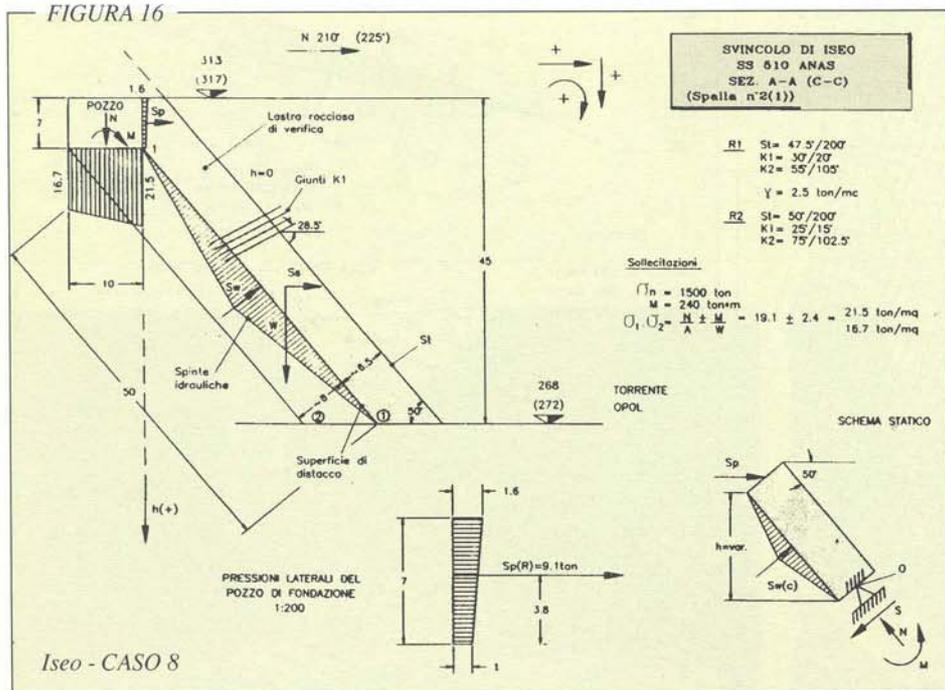


FIGURA 16



riore e conseguentemente la potenzialità di un fenomeno misto di ribaltamento e crollo.

### 7) Carico di punta

• **Caso 8:** si riporta il caso di un pendio in calcari sottilmente stratificati in cui la superficie del versante si materializza con una superficie di stratificazione (Foto 20) (Consequent Slope per gli AA. anglosassoni).

L'analisi alla rottura per carico di punta alla base dello strato è stata sviluppata con un modello originale messo a punto per l'occasione (Fig. 16); in esso si considera una lastra di profondità unitaria soggetta a carico di punta dove vengono analizzate le tensioni di compressione, taglio e momento rotatorio alla base posizionata ad altezze via via crescenti così da individuare la loro distribuzione lungo lo sviluppo del pendio.

Lo scopo è quello di individuare le zone che si rompono per flessione. Il calcolo è stato sviluppato in forma matriciale.

Un altro approccio al problema è costituito dallo sviluppo della teoria di Eulero per i solidi colonnari caricati in punta che fornisce il carico critico di rottura per buckling mediante il quale, conoscendo le caratteristiche geometriche e meccaniche del solido, è possibile ricavarne la lunghezza critica (verifica della stabilità) (Muller, 1974).

Nel caso in oggetto con questo metodo è stato costruito l'abaco di Fig. 17 valido per il caso esaminato.

### 8) Scivolamento circolare

• **Caso 9:** nella Foto 21 si individua un fenomeno franoso verificatosi in corrispondenza di una morena cementata considerabile come una roccia tenera. Il metodo di analisi

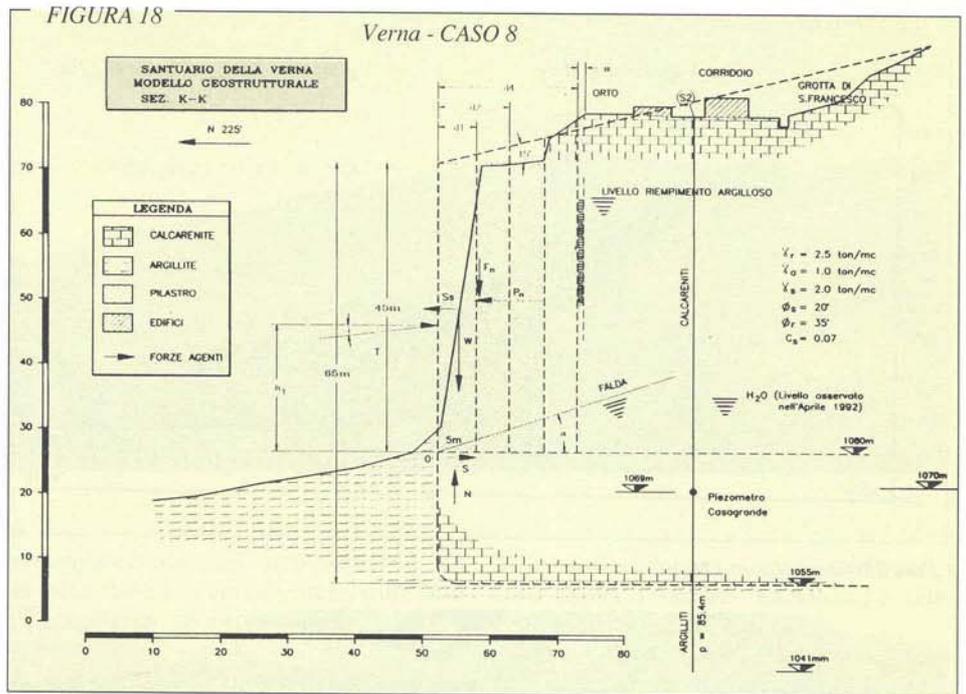


Foto 21 - Carnia (caso 9)



Foto 22 - Vajont (caso 11)



FIGURA 19

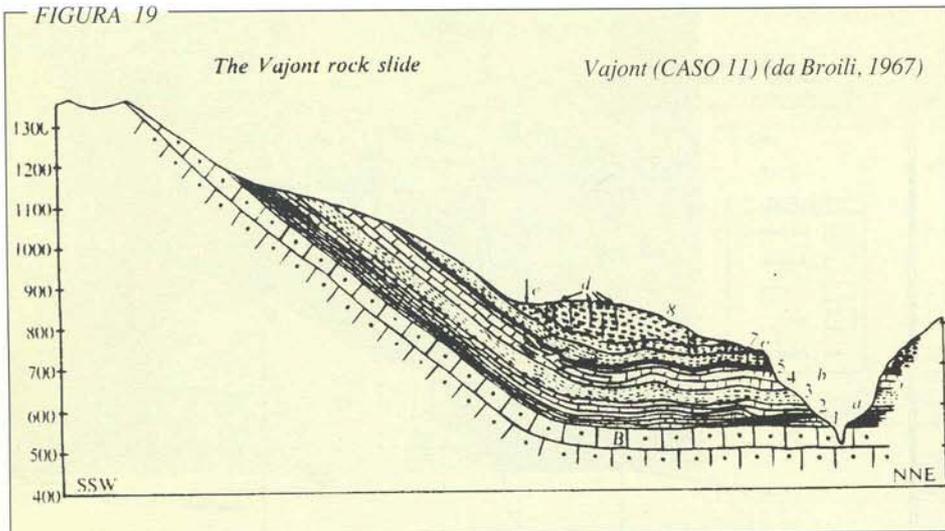
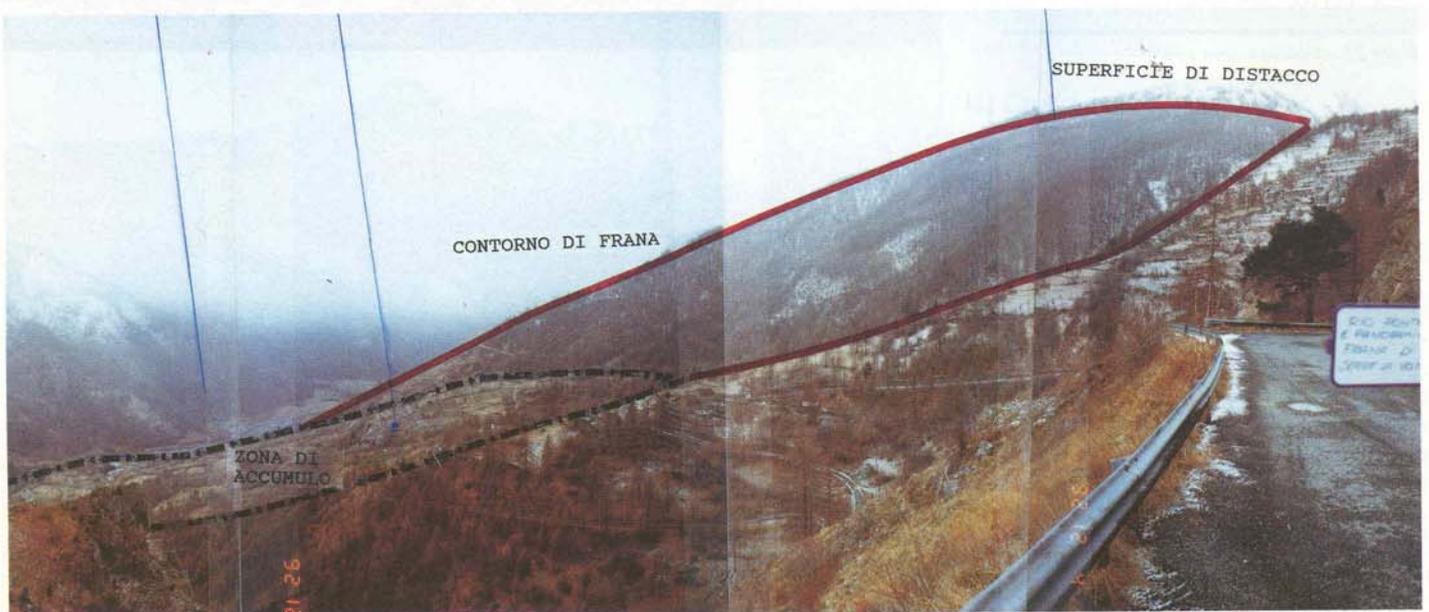


Foto 23 - Bema (caso 12)



Foto 24 - Serre La Voute (caso 13)



utilizzato è quello classico utilizzato nella meccanica dei suoli (superficie subcircolare e divisione in conci) (come nella Fig. 7).

L'unica differenza per le rocce è che spesso si inserisce una tension-crack al ciglio superiore della superficie di scivolamento.

## 9) Espansione laterale

Il metodo più frequentemente utilizzato per esaminare questi fenomeni è costituito dagli Elementi Finiti in cui è possibile simulare numericamente i due materiali a diversa rigidità e conseguentemente le distribuzioni di tensione all'interno di quello più rigido.

Queste evidenziano superfici subverticali parallele alla parete sottoposte a notevoli sforzi di trazione che provocano l'apertura delle discontinuità preesistenti o di fessure di neoformazione (Lembo Fazio & Ribacchi, 1988).

• **Caso 10:** il caso in oggetto (Foto 9) è stato esaminato con un metodo all'equilibrio limite che ha considerato la possibilità di rottura alla base dei pilastri monolitici per compressione ed eventuali trazioni per eccentricità di carico (Fig. 18).

Di particolare rilevanza in detto studio è il calcolo della spinta provocata dai riempimenti detritici all'interno delle fessure che talora raggiungono aperture dell'ordine metrico (Froldi, 1993).

## Casi eclatanti

Si ritiene che possa essere di notevole interesse l'illustrazione di casi eclatanti di processi di instabilità gravitativa in roccia.

Vengono illustrati alcuni importanti fe-



nomeni franosi e il relativo certo o supposto meccanismo d'instabilità:

• **Caso 11:** la frana del Vajont (1963) (BL) (Foto 22), tristemente famosa, è un caso eclatante di rottura per scivolamento planare (Rock Slide, Muller; 1964, 1968) avvenuta su una superficie di sovrascorrimento tettonico.

La massa, appartenente alla serie triassico-cretacea di Monte Toc e dislocata attraverso l'evento, risulta pari a circa 300 milioni di mc. (Pellegrino, 1986) (240 M mc. secondo Mencl, 1966).

La superficie di scorrimento, a inclinazione variabile e decrescente verso il basso (concava), ha mantenuto l'originale assetto strutturale-morfologico all'interno delle masse franate (Fig. 19) (Broili, 1967).

• **Caso 12:** la frana di Bema (Foto 23) (SO) verificatasi nel 1872 e riattivatasi nell'Agosto-Settembre 1987, costituisce indubbiamente un bell'esempio di fenomeno di

ribaltamento con successivo crollo (Fig. 4); la frana, il cui volume è di circa 2 milioni di mc. presenta un'evoluzione continua e retrogressiva.

Interessa terreni appartenenti alla formazione degli «Gneiss di Morbegno» (parascisti e gneiss).

• **Caso 13:** è costituito dalla frana di Serre la Voute (Foto 24) (TO) nella Val di Susa; può essere considerata come una frana a superfici multiple subcircolari con una discolazione di circa 285 milioni di mc. (Pellegrino, 1986)

(Fig. 20). Si sviluppa nei terreni metamorfici della «Seria d'Ambin» (micascisti) e nelle coltri moreniche superficiali.

Si è verificata nel 1728 e risulta, nelle zone di accumulo frontale, tutt'ora in movimento soprattutto dove insiste l'azione erosiva del F. Dora Riparia.

• **Caso 14:** come nel caso precedente la frana di Quarto (Foto 25) presso Sarsina (FO), verificatasi (1825?) in terreni flyschiodi appartenenti alla serie «Marmoso Arenacea», può essere considerata come a superfici mul-

(sopra)  
Foto 25 - Quarto (caso 14)

(a lato)  
Foto 26 - Allocco (caso 15)

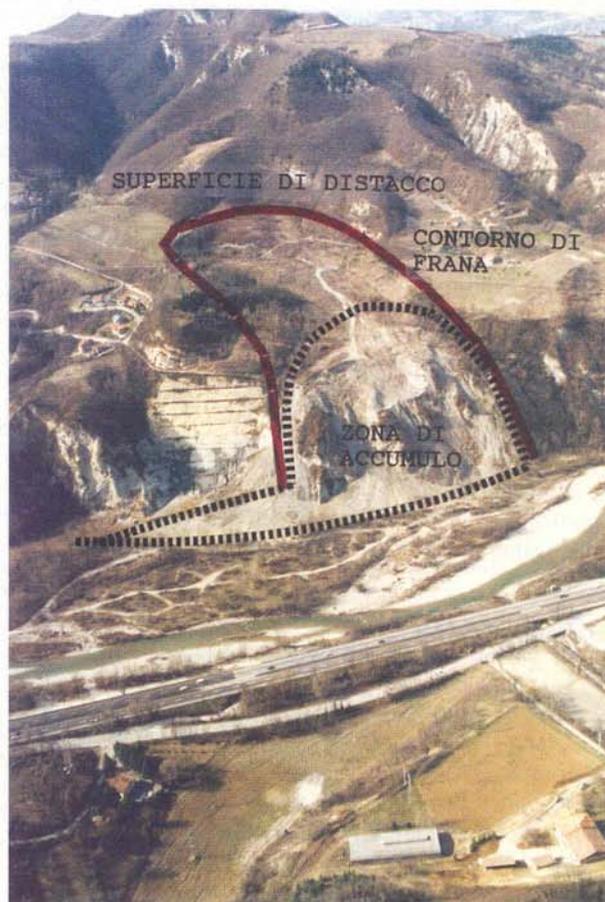
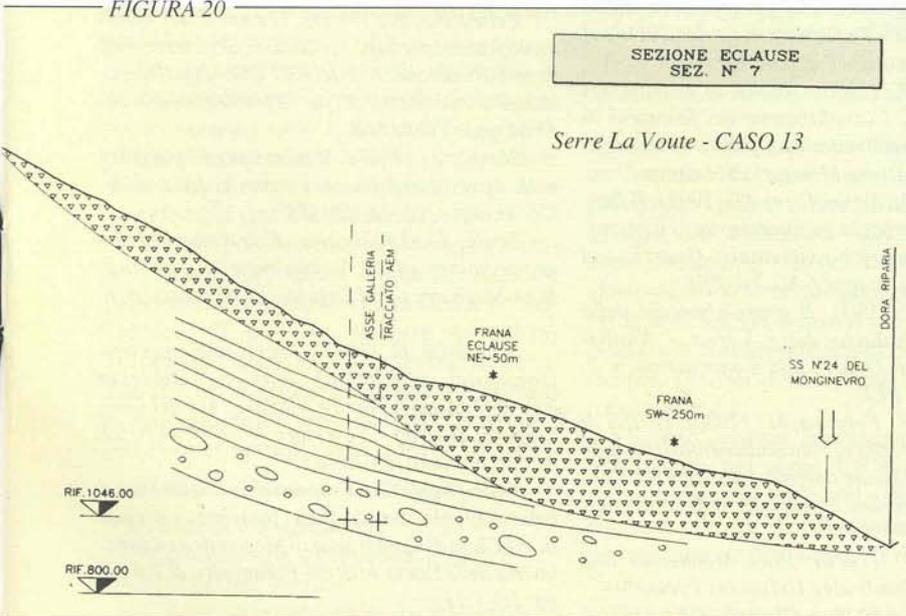


FIGURA 20



tiple subcircolari; il suo volume è pari a circa 60 milioni di mc. Da quanto conosciuto sembra stabilizzata.

• **Caso 15:** è il caso di una frana a superfici multiple subcircolari presente in località Allocco (BO) presso Sasso Marconi (Foto 26).

Si sviluppa nei terreni molassici della formazione delle «Marne di Antognola» costituiti da successioni di marne e livelli di arenarie debolmente cementate. E' nota dall'ultima decade e continua ad evolversi soprattutto nelle zone frontali dove le arenarie si liquefanno e formano ingenti cono detritici basali.

• **Caso 16:** è costituito dalla frana di Spriana (SO) nella Val Malenco (Foto 8) e interessa i terreni metamorfici della formazione degli «Gneiss di Monte Canale» e depositi morenici sovrastanti. E' conosciuta dal 1834 e presenta tutt'ora movimenti rilevanti (Cancelli, 1978); può essere considerata una frana a superficie di scivolamento subcircolare.

• **Caso 17:** la frana di Monte Zandila (Foto 10) (Pizzo Coppetto), tristemente nota come Valpola, è conosciuta dagli anni settanta (Sfondrini, 1987); l'evento di rimobilizzazione catastrofica del luglio 1987 riprende una massa già scivolata su una superficie di origine tettonica determinando un crollo con valanga di roccia di enorme energia in virtù del superamento di un dislivello di quasi 1000 m (Govi, 1988).

L'evento ha dislocato masse intrusive terziarie dell'Alta Valtellina (gabbri e dioriti) per un volume di circa 40 milioni di mc.

• **Caso 18:** è rappresentato dalla frana del T. Torreggio (Foto 27) (1834?), classificabile come di crollo con valanga di roccia, comportante una dislocazione di circa 2 milioni di mc.

Ha interessato i terreni metamorfici della formazione degli «Gneiss di Monte Canale» e i sovrastanti terreni morenici.

Per concludere nella Fig. 21 sono riassunti graficamente gli schemi dei modelli di potenziale instabilità e relativi metodi di calcolo o simulazione. ■

### Bibliografia

Hoek, E. & Bray, J.W. (1977): *Rock Slope Engineering - Institution of Mining and Metallurgy, London.*

Aydan, O., Shimizu, Y., Ichikawa, Y. (1989): *The effective failure modes of rock slopes with two discontinuity sets. Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22, pp. 163-188.

Aydan, O., Ichikawa, Y., Shimizu, Y. and

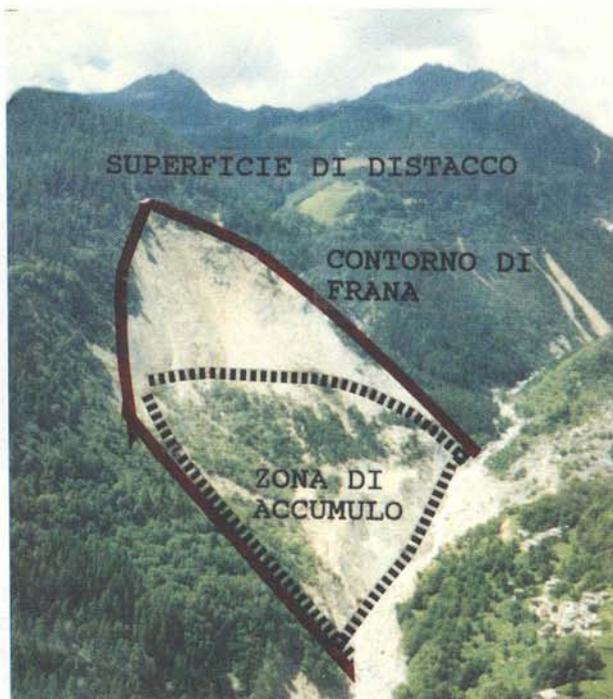


Foto 27 - Torreggio (caso 18)

Marata, K. (1991): *An integrated system for the mobility analysis of rock slopes, Proc. 7th IACMM Conference, Cairn, I, pp. 469-474.*

Aydan, O., Shimizu, Y., Kamamoto, T., (1992): *The reach of slope failures. Proceed. of the Sixth International Symposium «Landslides - Glissements de terrain» 10-14 February 1992 Christchurch - New Zeland, VI, pp. 301-306.*

Varnes, D.J., (1978): *Slope movement types and processes, in «Landslides: Analysis and Control», Special Report n. 176, Schuster R.L. e Krizek R.J. (eds), Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., pp. 11-33.*

Broili, L., (1974): *Il Corso sulla meccanica delle rocce. Caratteristiche tecniche della massa rocciosa e suo comportamento meccanico nei problemi geostatici. CNR padova.*

Giani, G.P., (1988): *Analisi di stabilità dei pendii parte I: Classificazione dei fenomeni di instabilità, pendii naturali e fronti di scavo in roccia. Associazione Mineraria Subalpina.*

Lunardi, P., Aiello, E., et alii (1993): *Il Santuario della Verna: la geingegneria ed il restauro dei beni storico-ambientali. Quarry and Construction n. 7, pp. 66-80, Ed. PEI.*

Froldi, P. (1993): *Il consolidamento della rupe del Santuario della Verna - Analisi geomeccaniche. Quarry and Construction, n. 7, pp. 81-92, Ed. PEI.*

Lunardi, P., Fornaro, M., (1980): *Criteri di scelta per interventi di consolidamento della rupe di Orvieto e proposte operative. Atti del 14° Convegno di Geotecnica. Firenze 28-31 Ottobre. AGI Vol. 1, pp. 219-229.*

Jaeger, C., (1972): *Rock Mechanics and Engineering Cambridge University Press.*

Zienkiewicz, O.C. e Cheung, Y.K., (1976):

*The finite element method in structural and continuum mechanics. London.*

Cundall, P., (1971). *A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems. Proc. Intl. Symposium on Rock Fracture. Nancy, France, Paper 11-8.*

Itasca, (1988): *Universal Distinct Element Code (UDEC) version IGCI.3, Itasca Consulting Group, Inc. 1313 5th street SE, Minneapolis 55414, USA.*

Cundall, P., Hart, T., (1989). *Numerical modeling of discontinua. Kenyote address, Ist U.S. conference on discrete element methods (DEM).*

Lunardi, P., (1992): *Serbatoio di Ravedis: la progettazione geomeccanica nelle grandi infrastrutture idrauliche. Aspetti progettuali, tecnologici e normativi, Quarry and Construction n. 7, pp. 71-79, Ed. PEI.*

Froldi, P., (1992): *Serbatoio di Ravedis: il ruolo della caratterizzazione geostrutturale-geomeccanica nella progettazione delle grandi opere di scavo. Quarry and Construction n. 7, pp. 80-93, Ed. PEI.*

Prass.r.l. (1991): *Sbarramento Alto Esaro - 8ª perizia. Adeguamento delle opere alle prescrizioni del voto n. 511 del 25.01.90 - «Relazione sul dissesto in sponda sinistra».*

Muller, L., (1974): *Rock Mechanics. Springer Verlag.*

Lembo-Fazio, A. & Ribacchi, R., (1988): *Modelli di comportamento e metodi di analisi: scelta dei parametri. Secondo ciclo di Conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle rocce. MIR '88, Politecnico di Torino, pp. 8.1 - 8.28.*

Muller, L. (1964): *The rock slide in the Vajont Valley - Rock Mechanics & Engineering Geology, 2, pp. 148 - 213.*

Muller, L. (1968): *New considerations on the Vajont Slide - Rock Mechanics & Engineering Geology, 6, pp. 1-91.*

Pellegrino, A., (1986): *L'analisi dei movimenti franosi per la progettazione degli interventi di stabilizzazione. Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica VIII, pp. 121-149 Bologna 14-16 Maggio 1986. AGI.*

Menci, V., (1966). *Mechanics of landslides with special reference to the Vaiont slide. Geotechnique, pp. 18:329+337.*

Broili, L. (1967): *New Knowledge on the geomorphology of the Vajont slide slip surface. Rock Mechanics and Engineering Geology, 5, n. 1.*

Sfondrini, G. (1987). *Previsione e prevenzione dei movimenti franosi. Dissesto idrogeologico. Prevenire o subire. Atti del Convegno di Sondrio - Novembre 1987 - CAI (Club Alpino Italiano), pp. 16-63.*

Govi, M., (1988): *Processi di instabilità naturale; tipologie, distribuzione, frequenza e pericoli. «Il Ciclo di Conferenza di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce MIR 88 Politecnico di Torino pp. 1.1-1.11.*