

EVOLUZIONE DI SCARPATA IN ROCCIA PER DISTACCO DI BLOCCHI CASO DI STUDIO SU UN VERSANTE IN CALCARI CRISTALLINI

M. Cravero⁽¹⁾ - G. Iabichino⁽¹⁾ - V. Piovano⁽²⁾

⁽¹⁾CNR-Centro Studio Problemi Minerari, Torino

⁽²⁾Geologo Libero Professionista, Torino

RIASSUNTO - *Evoluzione di scarpata in roccia per distacco di blocchi: caso di studio su un versante in calcari cristallini* - Il Quaternario, 7(1), 1994, 457-464 - Il caso di studio illustra l'analisi di alcuni dissesti per frana, al fine di formulare ipotesi sull'evoluzione di un versante roccioso. Il lavoro si riferisce ad un versante in calcari cristallini del Giurese (Alpi sud-occidentali), interessato da attività estrattiva di Carbonato di Calcio ad elevata purezza, su fronte gradonato di altezza pari a 120 m circa. I singoli gradoni del fronte di abbattimento hanno un'altezza media di 10 m e sono oggetto di dissesti per frana (prevalentemente scivolamenti) con distacco di grossi blocchi fino a dimensioni dell'ordine di 200 m³. L'assetto strutturale del sito è stato riconosciuto e definito in dettaglio sulla base di misure dirette, integrate da rilevazione su supporto fotografico a grande risoluzione. I parametri geometrici delle discontinuità strutturali rilevate a scala di affioramento caratterizzano il versante come segue: a) giacitura delle superfici di clivaggio a franapoggio (55°) più inclinata del pendio (38°); b) giunti di frattura associabili a quattro famiglie con inclinazioni medie da 0° a 82°, lunghezze medie da 0,7 m a 1,5 m ed intensità media di fratturazione compresa tra 0,1 e 1,4 m⁻¹. Sui dissesti in esame è stato riconosciuto che la genesi dei blocchi è legata al particolare assetto strutturale delle discontinuità: principalmente alla giacitura che controlla i processi di scivolamento nonché a due famiglie di fratture che ulteriormente delimitano la forma e la dimensione dei blocchi. La caratterizzazione dei dissesti è stata anche effettuata su mappe sintetiche consentendo determinazioni della morfometria dei blocchi di frana.

ABSTRACT - *Rock slope evolution due to blocks failure: a case study on a slope in crystalline limestone* - Il Quaternario, 7(1), 1994, 457-464 - The paper reports on a case of a slope in crystalline limestone in the southwestern Alps, quarried for the production of high quality CaCO₃. The limestone, of Jurassic age, is in tectonic contact with a phylladic schist, and is densely jointed and fractured. The excavation front — about 120 m high — is subdivided into benches; each bench is 10 m high and has a face dipping 70°. Quarrying is carried out under unfavourable conditions of interaction between excavation faces and natural discontinuities: some benches near the contact zone between limestone and schist, were severely damaged by failure processes (mainly sliding) with the collapse of large (up to 200 m³) rock blocks. A 3D statistical model is presented as obtained on the basis of geological-structural data (scan-line sampling of joints) of the quarry site integrated by high resolution photographs. Geometric parameters of discontinuities at the outcrop scale characterizing the slope are: a) attitude of pseudo-schistosity planes conformable to the slope with dip angle equal to 55°, which is steeper than the mountain side dipping 38°; b) 4 families of fractures are present dipping from 0° to 82° on the average and having an average trace length of 0.7 to 1.5 m; fracturing degree is from 0.1 to 1.4 m⁻¹. Actual failure features as compared to the simulated ones show that *in-situ* failures are characterized by means of spherical (equal area and/or equal angle) projections of possible combinations of the discontinuity planes delimiting rock blocks. Single blocks are delimited — depending on free surfaces — by 2-3 discontinuity planes; aggregation of two or more single blocks, which is favoured by a pervasive jointing, gives rise to composite blocks of great size and very complex shape, which are strictly defined by the combination of fractures satisfying kinematic conditions. The unfavourable attitude of pseudo-schistosity planes controls the sliding of failed blocks. In particular, elaborated methods give information on the type of instability which may occur and on volumes of rock involved.

Parole chiave: Meccanica delle rocce, attività estrattive, modificazioni ambientali, rischio

Key words: Rock mechanics, quarrying, environmental modifications, hazard

1. INTRODUZIONE

Le attività estrattive nella loro normale evoluzione, modificano progressivamente e rapidamente le aree in cui o su cui si sviluppano, sommando i loro effetti a quelli prodotti dalla evoluzione geologica. La sovrapposizione della regolare geometria delle coltivazioni a quella dei luoghi modifica localmente le condizioni di sforzo preesistenti sulle discontinuità naturali causando, a volte, indesiderati fenomeni di instabilità. Risulta quindi evidente la dipendenza delle migliori condizioni di esercizio della attività estrattiva, dalla buona conoscenza dell'assetto geologico-strutturale delle formazioni utili.

Nell'ultimo decennio, al fine di valutare preventivamente la possibilità di innesco di dissesti lungo fronti di abbattimento variamente disposti nei confronti dello stato di fratturazione naturale, sono stati messi a punto diversi schemi di interpretazione statistica e tecniche di elaborazione geometrica dei principali descrittori dello stato di fratturazione naturale. In particolare le metodologie indicate consentono la individuazione dei possibili tipi di instabilità ed i contorni di massima estensione dei volumi rocciosi coinvolti.

Il presente lavoro esamina il caso di una cava a cielo aperto in cui una porzione della coltivazione è condotta con una sfavorevole interazione tra i fronti di abbattimento ed i sistemi naturali di discontinuità. Sulla base di dati ottenuti mediante il rilievo geologico-strutturale dell'area di cava, integrato da opportuna documentazione fotografica, è stato realizzato un modello statistico tridimensionale e sono state confrontate le modalità di dissesto riscontrate nella realtà con quelle riprodotte mediante le simulazioni.

2. GIACIMENTO ED ATTIVITA' ESTRATTIVA

Il giacimento oggetto di coltivazione è costituito da un banco di marmo del Giurese, derivante da metamorfismo di calcari lastroidi, poggianti, in contatto tettonico, su scisti filladici anch'essi attribuibili al Giurese. Il marmo presenta una pseudo stratificazione, evidenziata da letti centimetrici con diverse tonalità di grigio, quasi mai fissile ad eccezione della base del banco al contatto con gli scisti, dove i giunti sono ben evidenziati e continui.

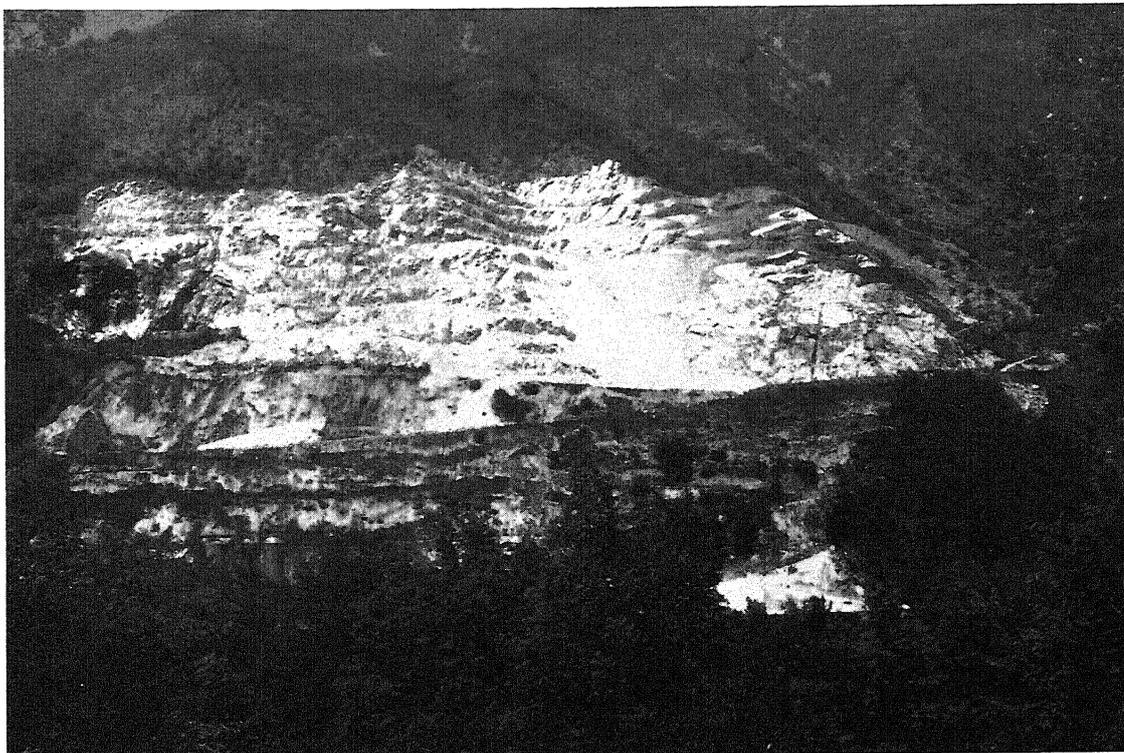


Fig. 1 - Veduta d'insieme della attività estrattiva.
General view of the open-pit quarry.

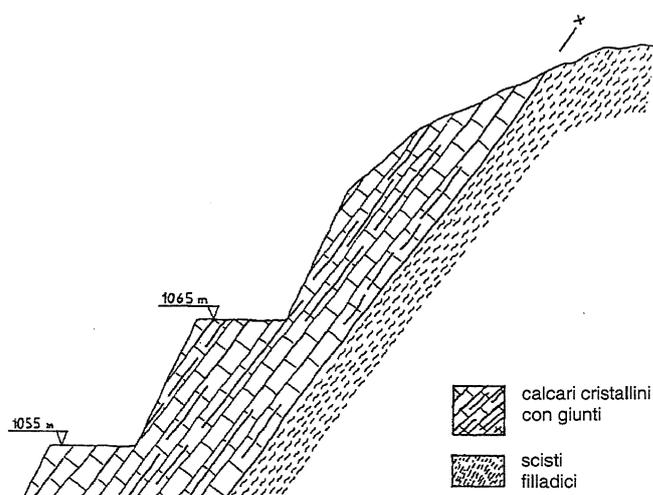


Fig. 2 - Sezione geologica schematica della zona di contatto.
Schematic geological section of the contact zone between phylladic schists (dashed area) and jointed crystalline limestone (squared area).

Il versante in esame è stato sede di attività estrattive, di modeste proporzioni, sin dalla fine del 1700; a questo periodo risalgono infatti le prime coltivazioni di pietra ornamentale (calcare cristallino), localmente condotte. Dal 1970 la società esercente, modificando l'obiettivo della produzione dalla pietra ornamentale al carbonato di calcio ad elevata purezza ($> 99\%$), ha attuato una sistematica coltivazione per gradoni su fronte unico lungo circa 200 m ed esteso tra le quote 935 m e 1085 m s.l.m. (Fig. 1). L'abbattimento, effettuato con esplosivo, è seguito dai processi di frantumazione e comminuzione condotti negli adiacenti impianti di trattamento. La produzione annuale ammonta a circa 60.000 m³ di *tout venant*.

L'approssimarsi del fronte di cava alla zona di contatto tettonico ha evidenziato, recentemente, la ricorrenza di importanti dissesti favoriti dalla locale fissilità del banco di calcari (Fig. 2). Al fine di limitare tali episodi, il progetto della coltivazione è stato successivamente modificato sino alla attuale configurazione che prevede l'abbattimento su due fronti A e B, rispettivamente esposti a Sud ed a Est.

3. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-STRUTTURALE

I dati geologico-strutturali necessari per la realizzazione del modello statistico provengono essenzialmente dalle pareti su cui sono stati osservati i fenomeni di dissesto. In particolare sono state rilevate le giaciture, le lunghezze di traccia e le spaziature delle discontinuità inoltre sono state condotte osservazioni sulla persistenza, la forma e la rugosità delle stesse.

Le giaciture, come usuale, sono state misurate mediante bussola sia a campione casuale sia lungo gli allineamenti utilizzati per il rilievo delle lunghezze di traccia e delle spaziature. Sono state anche elaborate le fotografie di alcuni tratti di parete, di accesso difficoltoso, evidenziando le singole fratture per la successiva digitazione. Sulle mappe digitate si è poi proceduto alla estrazione di campioni, parzializzando l'area osservata in finestre rettangolari e circolari in accordo ai metodi di analisi statistica utilizzati (Fig. 3).

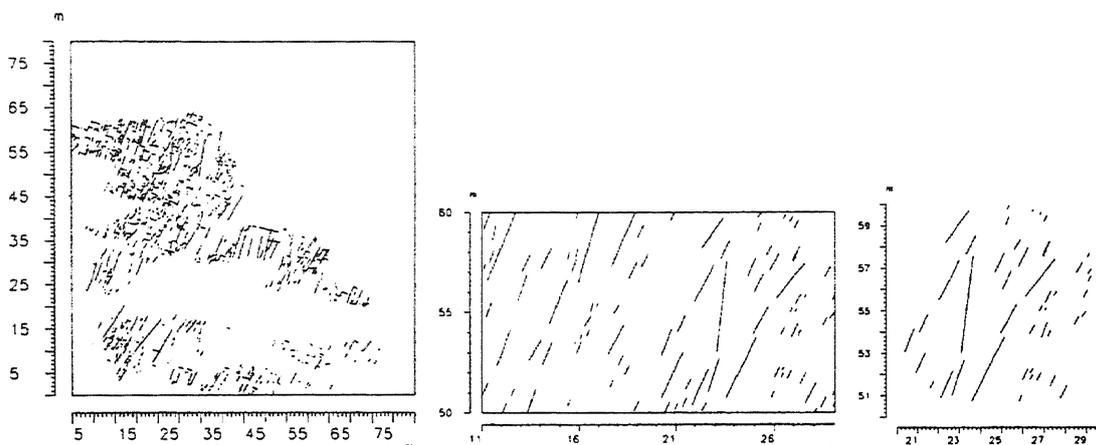


Fig. 3 - Finestre campione circolare e rettangolare utilizzate per l'analisi statistica dei dati provenienti dalle mappe digitate.
Circular and rectangular windows for the statistical analysis of data from digitized maps.

L'analisi delle giaciture (oltre 600 osservazioni), condotta su proiezione equal-area, ha permesso la separazione di 5 famiglie di discontinuità, ben evidenziate dalle curve isodensità (Fig. 4), nonostante la non uniforme distribuzione dei dati. La densità dei poli sensibilmente differente è conseguenza della dimensione del supporto osservabile e della sua orientazione relativa in rapporto alle discontinuità. Non si è comunque proceduto ad alterazioni delle frequenze con pesi inversamente proporzionali alla qualità del campionamento (Terzaghi, 1965; Grossmann, 1978). La caratterizzazione delle famiglie è stata eseguita valutandone giacitura media e dispersione in accordo alla distribuzione di Fisher (Tab. 1).

La stima dell'estensione planare delle discontinuità fa riferimento, in primo luogo, alle tracce visibili in parete e richiede successivamente ipotesi, a priori, sulla forma e sul tipo di distribuzione statistica delle dimensioni base delle discontinuità stesse (ad es. raggio per discontinuità circolari, lato, rapporto dimensionale tra i due lati, angolo compreso ed angolo di incidenza per discontinuità a parallelogrammo).

Al fine dell'inferenza delle dimensioni base delle discontinuità, la lunghezza delle tracce rilevate in parete (su allineamenti, generalmente misurando le semilunghezze di traccia ($l/2$), o da finestre) viene classificata mediante istogrammi (Fig. 5) eventualmente confrontabili con distribuzioni teoriche (Priest & Hudson, 1981; Baecher, 1983) o, con minore informazione, viene ridotta alla conoscenza delle sole media e varianza ricavabili ad esempio mediante stime non parametriche (Phal, 1981; Andersson & Dverstop, 1987).

Assumendo una distribuzione delle dimensioni base delle discontinuità di tipo log-normale, è stato possibile valutarne i parametri caratteristici imponendo la minimizzazione della statistica tra gli istogrammi sperimentali delle lunghezze di traccia delle diverse famiglie ed i corrispondenti ottenuti dal modello statistico (Warburton, 1980).

I risultati delle elaborazioni, condotte per discontinuità di tipo circolare (ipotesi accettabile per le famiglie F3, F4, F5), sono raccolti nella Tabella 1. Si osserva invece che per le famiglie F1 ed F2 il raggio equivalente descrive efficacemente solo la dimensione minore. Una stima analoga dell'altra dimensione non è stata possibile a causa del ridotto numero di osservazioni, insufficiente per l'elaborazione statistica ma utile per la valutazione del rapporto di allungamento.

Le spaziature tra discontinuità o il loro reciproco (frequenze) costituiscono una misura basilare e agevolmente rilevabile dell'intensità di fratturazione della massa rocciosa.

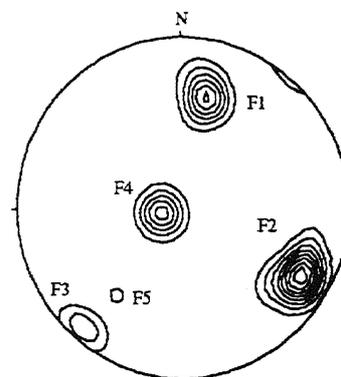


Fig. 4 - Curve di isodensità (2%-16%) ottenute dal conteggio dei poli con cella mobile.
Isodensity (2%-16%) curves from the mobile cell counting of poles.

Tabella 1 - Statistica dei parametri descrittivi delle famiglie di discontinuità (α = direzione di immersione; β = immersione; K = coefficiente di Fisher; \hat{l} , \hat{r} = media delle lunghezze di traccia e dei raggi; $\hat{\sigma}_l$, $\hat{\sigma}_r$ = deviazioni standard; E.R. = rapporto di allungamento; P32 = intensità di fratturazione).

Statistics of characteristic parameters of discontinuity families (α = dip strike; β = dip angle; K = Fisher's coefficient; \hat{l} , \hat{r} = mean value of trace lengths and of radius; $\hat{\sigma}_l$, $\hat{\sigma}_r$ = standard deviations; E.R. = extension ratio; P32 = fracturing degree).

Fam.	α (°)	β (°)	K (-)	\hat{l} (m)	$\hat{\sigma}_l$ (m)	\hat{r} (m)	$\hat{\sigma}_r$ (m)	E.R. (-)	P32 (1/m)
F1	194	55	171	5.43	6.76	4.18	3.61	4.0	2.05
F2	299	71	80	1.51	1.90	0.88	0.98	2.5	1.48
F3	40	82	233	0.73	0.69	0.64	0.43	1.0	0.24
F4	74	10	167	0.89	0.26	0.75	0.57	1.0	0.65
F5	37	55	130	0.96	1.21	0.80	0.80	1.0	0.10

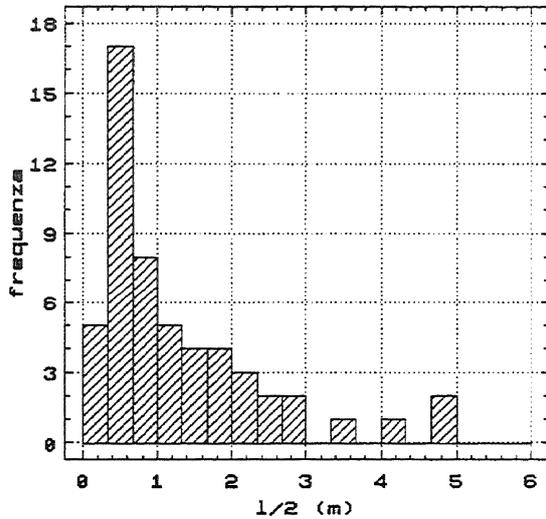


Fig. 5 - Istogramma delle semilunghezze di traccia per la famiglia F2.
F2 family: histogram of trace semilengths.

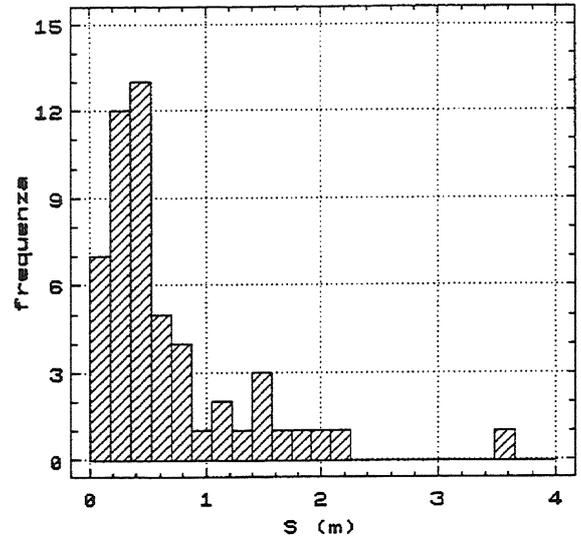


Fig. 6 - Istogramma delle spaziature per la famiglia F2.
F2 family: histogram of spacing.

Ovviamente i dati del rilievo raccolti su parete offrono, in generale, un'informazione parziale (ad es. spaziature apparenti) che può essere completata pesando le osservazioni mediante le direzioni delle famiglie di discontinuità (spaziature reali). Un esempio di distribuzione delle spaziature per la famiglia F2 è indicato nella Figura 6.

Un'ulteriore misura dell'intensità di fratturazione è data dalla densità areale media delle lunghezze di traccia in parete valutabile sommando i contributi, rapportati all'area osservata, relativi a ciascuna famiglia. Tali misure sono state utilizzate per stimare l'intensità media di fratturazione volumica P32 (area di frattura/volume) da attribuire alle singole famiglie. Nel caso in esame le stime di P32 (Tab. 1) sono state eseguite applicando alle spaziature rilevate su allineamenti, opportuni coefficienti calibrati su modelli statistici 3D (Dershowitz & Herda, 1992).

In sintesi le discontinuità riconosciute sul sito sono classificabili in 5 famiglie: superfici di clivaggio (F1) caratterizzate da elevata continuità nella parte inferiore del fronte di cava (al di sotto della quota 1075 m), più discontinue nella parte superiore; fratture molto inclinate (F2) di media continuità (lunghezza max <10 m); fratture suborizzontali (F4), sfalsate, di ridotta continuità (lunghezza max. <3m); fratture subverticali (F3) disperse e discontinue (lunghezza max <5 m) e, con giacitura simile, rare fratture discontinue (F5).

La descrizione del campo delle fratture, così ottenuta, può essere definita "disaggregata" (Dershowitz & Einstein 1988), in quanto non contiene elementi sufficienti a caratterizzare in modo completo la struttura geometrica d'insieme (collocazione delle fratture, terminazioni, morfologia dei blocchi elementari) della massa rocciosa ma ne specifica separatamente gli aspetti usualmente recepiti in sede

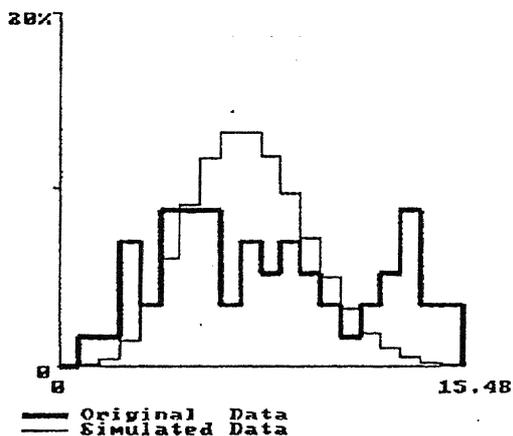


Fig. 7 - Istogramma della distribuzione dei centri di traccia ottenuta dalla simulazione.
Histogram of the distribution of trace centres as obtained from simulation.

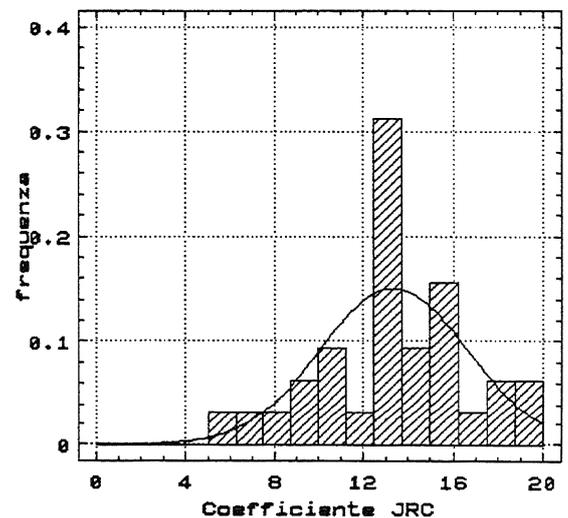


Fig. 8 - Istogramma del coefficiente di rugosità dei giunti.
Histogram of joint roughness coefficients.

di caratterizzazione geomeccanica. Per la modellazione 3D è pertanto necessaria la valutazione dei descrittori di struttura sopra specificati. La Figura 7 indica ad esempio che la distribuzione della densità locale dei centri di traccia è accettabilmente descritta dalla distribuzione di Poisson, pertanto la collocazione dei centri delle fratture sembra derivare da un processo di posizionamento di tipo uniforme.

Un ulteriore aspetto della caratterizzazione è costituito dalla valutazione della rugosità delle fratture. Questa grandezza, fondamentale per le verifiche di stabilità, è stata misurata mediante il pettine di Barton (Barton & Choubey, 1977), sia in sito sulle superfici delle discontinuità messe in luce dai dissesti, sia in laboratorio su campioni di calcare carotati da blocchi contenenti fratture. Il campione osservato (Fig. 8) produce una distribuzione che si attesta su valori piuttosto elevati del coefficiente di rugosità ($JRC > 10$). Su alcune superfici di clivaggio di grande estensione sono inoltre stati rilevati profili longitudinali (lungo la massima pendenza, con lunghezza ≈ 10 m), utilizzando un distanziometro ad onde, per ottenere informazioni sulla topografia delle superfici esposte: a scala di scansione decimetrica risulta evidente una sostanziale planarità delle grandi superfici di rottura.

4. MODELLAZIONE GEOMETRICA DEL RETICOLO DELLE DISCONTINUITA'

La modellazione geometrica di un volume rappresentativo di massa rocciosa è stata condotta su un cubo di generazione di 35m di lato. Il reticolo di fratture, ottenuto per sovrapposizione di 5 processi aleatori, indipendenti, di collocazione dei centri delle fratture (con densità di probabilità uniforme, così da modellare la distribuzione dell'intensità di fratturazione in aderenza alla distribuzione di Poisson), è stato generato in accordo al modello migliorato di Baecher (Baecher *et al.*, 1977). Le singole discontinuità, che nella formulazione base del modello hanno forma circolare, nelle realizzazioni ora presentate sono schematizzate da poligoni a 6 lati, generati in accordo ai parametri statistici della Tabella 1. Il modello, prodotto mediante il modellatore 3D FracMan (Dershowitz *et al.*, 1992), consente di rispettare le probabilità condizionali dei modi di terminazione evidenziate nell'analisi statistica delle mappe di traccia delle fratture. In rapporto alla considerevole estensione del modello la generazione e la trattazione statistica delle simulazioni risulta molto onerosa (una realizzazione contiene, in media, oltre 150.000 fratture), essa è tuttavia necessaria per offrire una discreta libertà di campionamento dei banchi di coltivazione entro il cubo generatore. Per tener conto del differente grado di persistenza delle discontinuità tra la porzione di parete inferiore, dove le superfici di clivaggio sono virtualmente continue in direzione, e la parte superiore della parete, dove le superfici di distacco assumono generalmente estensione limitata e sono abbastanza chiaramente separate, è stato necessario incorporare tali caratteristiche in due differenti modelli: il primo simula la parte di parete inferiore, l'altro quella superiore. Le mappe di traccia utilizzate per la previsione della morfometria dei blocchi instabili, sono state ottenute posizionando il tipico banco di coltivazione entro il reticolo delle discontinuità simulate. La Figura 9 riporta gli schemi dei due cubi generatori e le mappe di traccia (parete e pedata raddrizzate sullo stesso piano) corrispondenti ad un particolare posizionamento del banco di coltivazione. E' evidente la forte differenza di tessitura prodotta dai due modelli in accordo alle variazioni di continuità osservate in parete.

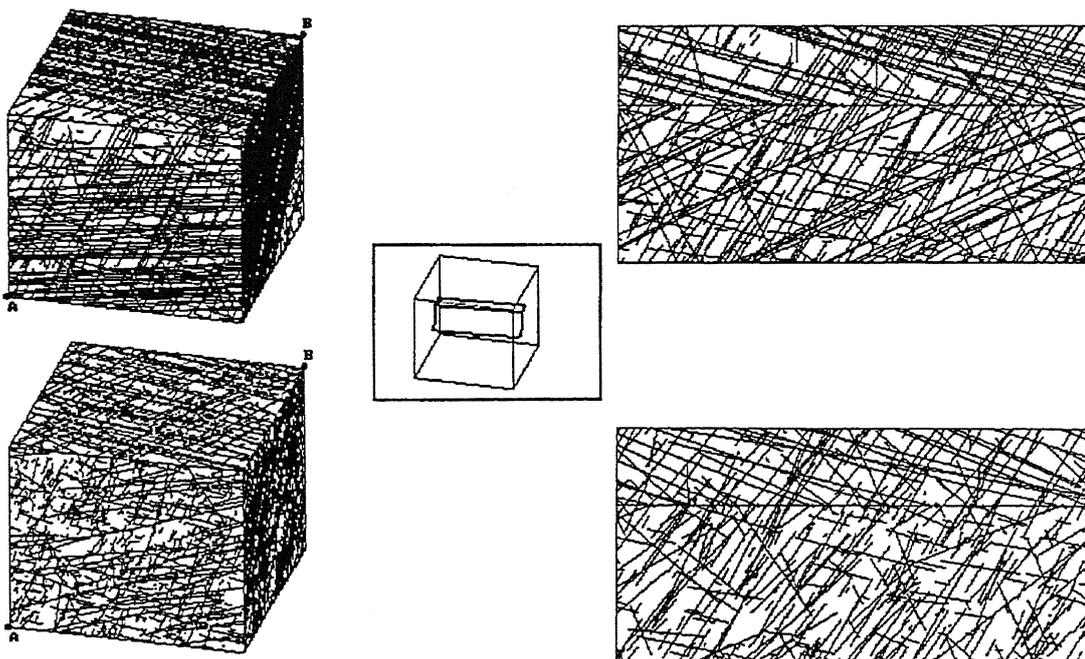


Fig. 9 - Modello statistico del fronte di abbattimento Nord: a) parte alta, b) parte bassa e relative sezioni orientate secondo la direzione dei gradoni.
 Statistical model of the northern excavation front. a) upper portion; b) lower portion and sections along benching direction.

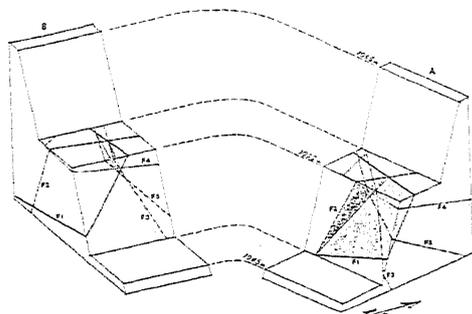


Fig. 10 - Prospetto schematico dei fronti di cava con le tracce delle famiglie di discontinuità.

Schematic plan of excavation fronts with traces of discontinuity families.

presiedono alla formazione dei dissesti descrivendone le tipologie che è stato possibile ricostruire esaminando, in sito e su fotografia, le superfici messe in luce dai distacchi di dimensione significativa (qualche m^3).

La carta dei dissesti (Fig. 11) costruita sulla fotografia del settore A indica chiaramente che le grandi superfici planari (giunti di clivaggio F1) costituiscono le superfici di scivolamento su cui sono avvenuti i collassi di blocchi di maggiore estensione (anche $> 200 m^3$). Lo schema evidenzia inoltre un recente cedimento che ha coinvolto un intero banco di coltivazione (altezza 10 m, pedata 5 m). L'azione instabilizzante è dovuta essenzialmente al peso dei blocchi anche se si può ritenere che le operazioni di abbattimento giuochino un ruolo di innesco o, di anticipazione dell'evento franoso. La morfologia delle superfici di clivaggio e la loro minore continuità nella direzione di max immersione indicano peraltro che i distacchi provocano la rottura di ponti di roccia e che si sviluppano coinvolgendo più blocchi elementari. In totale

sono stati osservati più di 160 dissesti, classificati in accordo ai cinematismi ammissibili rappresentabili nelle proiezioni sferiche come nella proiezione equiarea standard (Fig. 12) o, con maggiore efficacia, nella proiezione stereografica estesa a tutto il piano (Goodman & Shi, 1985) o nella proiezione emisferica inclinata (Priest, 1985). L'istogramma della Figura 13 mostra la ripartizione tra i differenti tipi di blocchi. Si deve in proposito osservare che queste differenti tipologie corrispondono in realtà ad un solo meccanismo di scivolamento, quello sui piani F1, ma presentano forme differenti in funzione delle possibili combinazioni dei piani di separazione appartenenti alle altre famiglie. L'eventualità di dislocazioni generate da cinematismi differenti come lo scivolamento sui piani F1, F3 e F1, F5 è da ritenere remota in quanto la pendenza delle linee di intersezione tra tali piani è molto ridotta. Inoltre pur sviluppandosi un effetto cuneo, risulta evi-

dente che la resistenza al taglio che si mobilita sui piani di scivolamento, è sicuramente più elevata del valore minimo necessario per assicurare la stabilità del blocco.

Una previsione delle massime aree coinvolte dai possibili dissesti è stata ottenuta analizzando con un procedimento automatico le mappe delle simulazioni (Fig. 9). La tecnica di scansione della

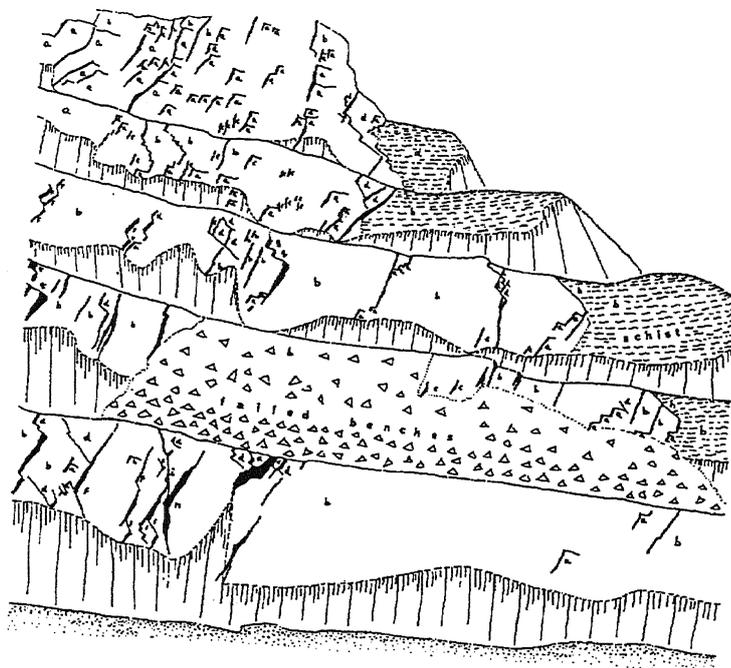


Fig. 11 - Carta dei dissesti.
Failure chart.

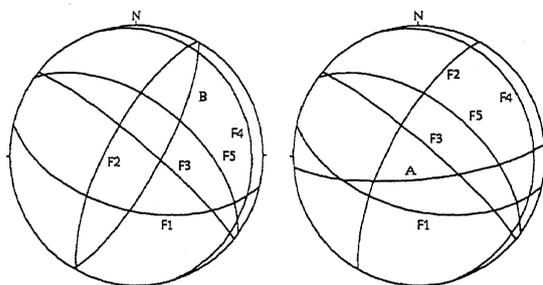


Fig. 12 - Proiezione equiarea dei piani medi delle famiglie di discontinuità (F1-F5) con i fronti di abbattimento A e B.

Equal area projection of median planes of discontinuity families (F1-F5) and A and B excavation fronts.

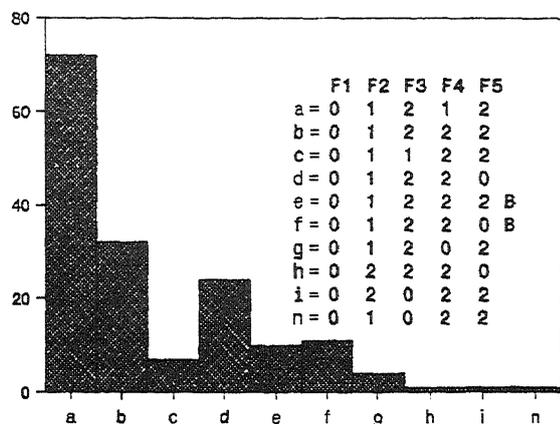


Fig. 13 - Istogramma delle occorrenze delle tipologie dei dissesti osservate in sito e codici dei possibili cinatismi ricavati dalla proiezione stereografica estesa a tutto il piano.

Frequency histograms of in-situ types of failure and codes of possible displacements as obtained from the whole plane hemispheric projection.

particolare attraverso l'esame delle proiezioni sferiche (equiarea e/o equiangola). I blocchi elementari sono generalmente delimitati, in funzione delle pareti libere, da due o tre piani di discontinuità e l'aggregazione di più blocchi elementari, facilitata dalla pervasività delle fratture, genera blocchi composti di grande estensione e di forma molto complessa, univocamente definiti dalle combinazioni di fratture che soddisfano le condizioni di rimovibilità. L'analisi delle mappe di traccia, ottenute

dalla simulazione 3D del reticolo di frattura naturale, rappresenta, come evidenziato da questo studio, una efficace metodologia di analisi o di previsione della potenzialità di dissesto, aderente, grazie alle tecniche di modellazione statistica, alla tessitura del reticolo di fratture naturali.

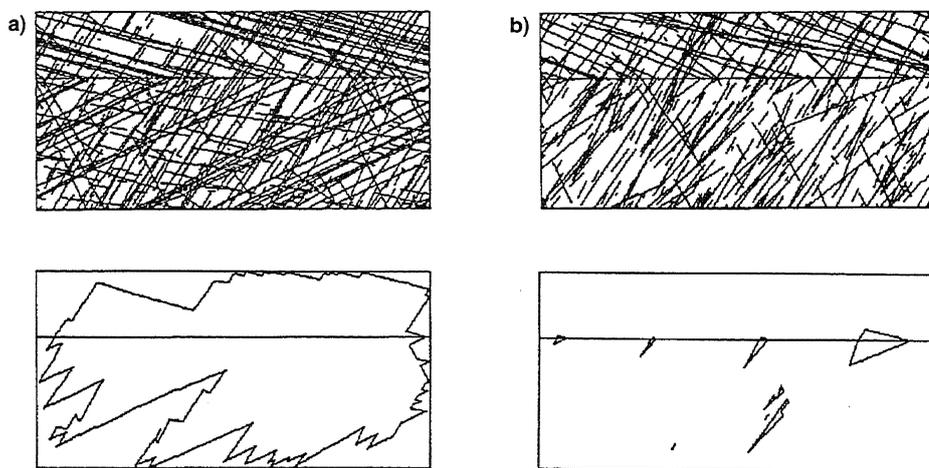


Fig. 14 - Mappe del massimo solido rimovibile ottenute applicando la teoria dei blocchi a sezioni orientate del modello statistico. a) parte alta di cava; b) parte bassa.

Maps of the removable maximum block obtained by applying the oriented section blocks theory of the statistical model: upper portion (a) and lower portion (b) of the quarry.

mappe segue un algoritmo codificato in base alla teoria dei blocchi (Shi *et al.*, 1985), che identifica i contorni dei poligoni chiusi elementari formati dalle intersezioni delle tracce e successivamente ne determina l'involuppo massimo. L'analisi pratica delle mappe simulate, costituite da migliaia di tracce, ha richiesto la messa a punto di una tecnica di memorizzazione e analisi delle matrici di incidenza necessarie al citato algoritmo, in grado di gestire la topologia di mappe ad alta densità di connessioni tra le tracce.

I risultati dell'analisi forniscono una immagine aderente ai fenomeni osservati (forme ed estensione dei blocchi composti identificati in sito); un esempio di previsione per le due porzioni di parete del settore A è indicato nella Figura 14.

6. CONCLUSIONI

Lo studio dei fenomeni di instabilità descritti mostra che i dissesti identificati in sito possono essere caratterizzati mediante le possibili combinazioni dei piani di discontinuità che delimitano i blocchi, in

BIBLIOGRAFIA

- Andersson J.A., Dverstorp B., 1987 - *Conditional Sim-ulations of Fluid Flow in Three-Dimensional Net-works of Discrete Frac-tures*. Water Resources Res., **23**, 10, 1876-1886.
- Baecher G.B., Lanney N.A. & Einstein H.H., 1977 - *Statistical Description of Rock Properties and Sam-pling*. Proc. 18th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Keystone, Colorado, 5C1-1 - 5C1-8.
- Baecher G.B., 1983 - *Statis-tical Analysis of Rock Mass Fracturing*. Math-ematical Geology, **15**, 2.
- Barton N. & Choubey V., 1977 - *The shear strength of rock joints in theory and pratice*. Rock Mechanics, Springer Verlag, vol. 10, p. 1-54.
- Dershowitz W.S. & Einstein H.H., 1988 - *Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models*. Rock Mechanics and Rock Engineering, **21**, 21-51.

- Dershowitz W.S & Herda H.H., 1992 - *Interpretation of Fracture Spacing and Intensity*. Proc. 33rd U.S. Symp. on Rock Mechanics, Santa Fe, New Mexico, 757-766.
- Dershowitz W., Lee G., Geier J. & Hitchcock S., 1992 - Golder Associates Inc., Redmond, WA, FRACMAN version 2.3, user documentation.
- Goodman R.E. & Shi G. H., 1985 - *Block theory and its application to rock engineering*. Prentice Hall, Inc., London, 338 pp.
- Grossmann N.F., 1978 - *Influencia das Descontinuidades na Deformabilidade dos Macicos Rochosos*. Contribucao para o Estudo da Comportimentacao dos macicos rochosos, 1 Relatorio, LNEC, proc. 45/13/4944, Lisboa, p. 197 & AI-AIII.
- Pahl P.J., 1981 - *Estimating the Mean Length of Discontinuity Traces*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **18**, 221-228.
- Priest S.D. & Hudson J.A., 1981 - *Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **18**, 183-197.
- Priest S.D., 1985 - *Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics*. George Allen & Unwin, Sydney, 124 pp.
- Shi G.H., Goodman R.E. & Tinucci J.P., 1985 - *Application of block theory to simulated joint trace maps*. Proc. Int Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Bjorkliden (Sweden), 367-383.
- Terzaghi R., 1965 - *Sources of Error in Joint Surveys*. Geotechnique, **15**(3), 287-304.
- Warburton P.M., 1980 - *A Stereological Interpretation of Joint Trace Data*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **17**, 181-190.