

**Corso di aggiornamento professionale
per l'Ordine Regionale dei Geologi del Veneto**

Padova, Novembre 1998

Appunti di....

**RACCOLTA ED ELABORAZIONE DATI
PER LA CARATTERIZZAZIONE
DEGLI AMMASSI ROCCIOSI**



Matteo Berti

Dipartimento di Scienze della Terra e Geo-Ambientali

Università di Bologna

SOMMARIO

Introduzione

Generalità

1 RACCOLTA DATI

1.1 Descrizione del sito

- 1.1.1 Generalità
- 1.1.2 Geologia
- 1.1.3 Instabilità
- 1.1.4 Tipo di ammasso
- 1.1.5 Alterazione
- 1.1.6 Resistenza
- 1.1.7 Volume del blocco unitario (VRU)
- 1.1.8 Forma dei blocchi
- 1.1.9 Numero famiglie
- 1.1.10 Giacitura piano affioramento
- 1.1.11 Giacitura linea di scansione
- 1.1.12 *Censoring*

1.2 Caratteristiche delle discontinuità

- 1.2.1 Intersezione
- 1.2.2 Giacitura
- 1.2.3 Semitraccia
- 1.2.4 Terminazione
- 1.2.5 Rugosità (JRC)
- 1.2.6 Curvatura e ondulazione
- 1.2.7 Tipo
- 1.2.8 Apertura
- 1.2.9 Riempimento
- 1.2.10 Resistenza a compressione delle pareti della discontinuità
- 1.2.11 Filtrazione

2 ELABORAZIONE DATI

2.1 Cenni di statistica

2.2 Caratteristiche delle discontinuità

- 2.2.1 Orientazione
- 2.2.2 Spaziatura
- 2.2.3 Lunghezza
- 2.2.4 Terminazione
- 2.2.5 Rugosità (JRC)
- 2.2.6 Curvatura e ondulazione
- 2.2.7 Resistenza a compressione delle pareti dei giunti
- 2.2.8 Altre caratteristiche

3 BIBLIOGRAFIA

Appendice – Lucidi proiettati nel corso

Introduzione

In questo corso vengono illustrati i metodi operativi per il rilevamento delle discontinuità, basati essenzialmente sulla metodologia proposta dall'ISRM (1978), e le tecniche di analisi, elaborazione e rappresentazione dei dati raccolti basate su quanto proposto dall'ISRM(1978) e da Priest (1993).

La trattazione ha uno scolo puramente introduttivo al problema, e risulta ovviamente molto generica. Si raccomanda l'approfondimento della letteratura di settore prima dell'applicazione di qualsiasi concetto spiegato nel corso.

I riferimenti bibliografici riportati nell'ultimo capitolo, e parte dei concetti esposti nella sezione "Generalità", sono ripresi dal testo "Schede di raccolta dati per il rilevamento geologico-tecnico di ammassi rocciosi" del Dott. Nicola Casagli (Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze).

Generalità

Per ammasso roccioso si intende l'insieme di roccia intatta e piani di discontinuità. Il termine discontinuità è del tutto generico ed indica semplicemente un'interruzione nella continuità della roccia intatta; nel termine non vi è quindi nessun accenno al meccanismo genetico della frattura, che può essere sia di natura primaria (stratificazione, piani di strutture sedimentarie, ecc.) che secondaria (discontinuità tettoniche, di alterazione, di detensionamento, di raffreddamento, ecc.).

Caratteristica comune dei piani di discontinuità è una trascurabile resistenza alla trazione e valori di resistenza al taglio sensibilmente inferiori a quelli della roccia intatta. Le caratteristiche di resistenza al taglio alla scala dell'ammasso roccioso, quindi, dipendono in gran parte dalle resistenze disponibili lungo i piani di discontinuità e dall'orientazione di queste nello spazio, ed ogni analisi di stabilità riguardante ammassi rocciosi non può prescindere pertanto dal rilevamento delle superfici di discontinuità e da un'accurata descrizione delle loro caratteristiche.

Il rilevamento geologico-tecnico di un ammasso roccioso può essere condotto a diversi livelli di dettaglio in relazione al tipo di indagine condotta, al grado di approfondimento (studio preliminare, progetto di massima, progetto esecutivo), all'estensione e alle caratteristiche dell'area da esaminare.

Generalmente è necessario uno studio geologico-strutturale preliminare dell'area di intervento, e un rilevamento speditivo dell'orientazione e delle caratteristiche generali delle principali discontinuità. Tale fase deve essere finalizzata alla delimitazione dei domini di discontinuità, ovvero di aree entro cui le discontinuità presentano orientazione e caratteristiche omogenee.

Il rilevamento di dettaglio è quindi condotto separatamente su ogni distinto dominio.

Esistono due criteri fondamentali sui quali si può basare il censimento delle discontinuità (ISRM, 1978):

- 1) Criterio soggettivo: secondo il quale vengono rilevate solo le discontinuità che sembrano svolgere un ruolo importante nei riguardi delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso;

- 2) Criterio oggettivo: secondo il quale vengono campionate tutte le discontinuità che intersecano una certa linea di riferimento (linea di scansione) o che ricadono all'interno di una certa finestra (Fig.1).

L'approccio oggettivo presuppone un'elaborazione statistica dei dati, per cui richiede che il numero delle discontinuità campionate sia sufficientemente elevato da far risultare significativa tale elaborazione. Ne consegue che un approccio strettamente oggettivo richiede tempi notevolmente elevati.

L'approccio soggettivo è più rapido ed economico; tuttavia presuppone una preliminare conoscenza dell'area in esame e l'individuazione a priori dei domini di discontinuità. Inoltre esso può essere adottato solo da specialisti che possiedano un'esperienza tale da consentire l'individuazione delle discontinuità più significative.

La raccolta e l'elaborazione dei dati presentata in questo corso si riferisce ad un rilevamento oggettivo di medio dettaglio effettuato tramite linea di scansione. Riguarda pertanto l'analisi dei singoli domini di discontinuità e deve essere considerato come appartenente ad una fase successiva all'indagine preliminare speditiva.

Le condizioni ideali della parete su cui effettuare il rilievo geomeccanico sono quelle di una parete pulita, piana o comunque poco irregolare e sufficientemente grande da contenere almeno 150-300 piani di discontinuità che intersecano la linea di scansione. La lunghezza della linea di scansione è funzione diretta della spaziatura media delle discontinuità; una lunghezza di 10 m è comunque generalmente sufficiente. Come indicazione del tutto generale, per caratterizzare adeguatamente un dominio è necessario misurare 1000-2000 piani di discontinuità (150-350 misure per 5-15 stazioni).

1 Raccolta dati

Nelle sezioni seguenti sono brevemente commentati i principali parametri presi in considerazione nell'ambito del rilevamento strutturale e geomeccanico degli ammassi rocciosi. Si rimanda ai testi specifici per ulteriori approfondimenti sulle caratteristiche dei parametri descritti e per una panoramica più ampia sulle tecniche di raccolta dati.

Le descrizioni seguenti sono riferite ai campi della scheda-tipo riportata a fine testo (Scheda 1).

1.1 Descrizione del sito

1.1.1 Generalità

Nei primi riquadri vanno riportate il codice della stazione di misura, la data, l'operatore, la località e il riferimento cartografico; seguono poi il tipo di affioramento e, nel caso di versante artificiale, il metodo di scavo utilizzato.

1.1.2 Geologia

Nel campo litologia va riportato il nome formazionale, una sommaria descrizione litologica della roccia affiorante e un'indicazione della posizione della porzione affiorante nella sequenza stratigrafica o nella formazione. Vanno inoltre indicati i fattori geologici che caratterizzano il sito, sia in termini di struttura geologica generale (monoclinale, pieghe, ecc.) che di elementi particolari localmente presenti (fratture beanti, discordanze, ecc).

1.1.3 Instabilità

Vanno indicati i tipi di fenomeni di instabilità in roccia eventualmente presenti sul versante in affioramento. Nel caso siano presenti fenomeni di una certa importanza, vanno indicate le giaciture dei piani di discontinuità sui quali si è sviluppato il fenomeno ed il volume della massa mobilizzata.

1.1.4 Tipo di ammasso

Va indicato il tipo di ammasso sia per quanto riguarda la dimensione relativa dei blocchi (campo ammasso, Fig.2) che (campo struttura) rispetto alla presenza di anisotropie strutturali (presenza di una famiglia di discontinuità particolarmente persistente) o litologiche (presenza di alternanza di litotipi a diverse caratteristiche fisico-meccaniche).

1.1.5 Alterazione

Il grado di alterazione dell'ammasso viene descritto facendo riferimento alla terminologia proposta dall'ISRM (Fig.3). Tramite un'analisi più dettagliata dei processi di degradazione dell'ammasso vanno inoltre individuati le principali evidenze di alterazione chimica e disgregazione fisica delle rocce affioranti.

1.1.6 Resistenza

Per una prima valutazione, del tutto indicativa, della resistenza a compressione uniassiale della roccia si fa riferimento alla *classe litotecnica* determinabile dal "Manual Index Test" proposto dall'ISRM (Fig.4). Valori più precisi si possono ottenere, sempre in campagna, tramite prove sclerometriche su roccia intatta effettuate col Martello di Schmidt.

1.1.7 Volume del blocco unitario (VRU)

Va espresso tramite i due indici J_v e I_b .

L'indice J_v (Volumetric Joint Count) è definito come la somma del numero di giunti per metro per ogni set di joint presente. Il numero di joint per ogni set deve essere contato in direzione perpendicolare a quella apparente del set e su una lunghezza idonea rispetto alla spaziatura media dei giunti (generalmente è sufficiente una lunghezza di 5-10 m). Sulla base dell'indice J_v , L'ISRM ha proposto una serie di termini descrittivi della dimensione media dei blocchi che caratterizzano l'ammasso (Fig.5).

L'indice I_b vuole rappresentare la dimensione medie del blocco roccioso "tipico" e viene stimato scegliendo soggettivamente alcuni blocchi di taglia "tipica" e misurandone le dimensioni. Tale indice non può essere determinato come media delle spaziature medie dei set: specie quando sono presenti più di tre set, infatti, il valore elevato di spaziatura media di un set influenza sensibilmente il valore di I_b senza determinare una significativa variazione nella dimensione media dei blocchi.

1.1.8 Forma dei blocchi

Va indicata la forma prevalente dei blocchi costituenti l'ammasso secondo la terminologia proposta dall'ISRM (vedi Scheda 1).

1.1.9 Numero famiglie

Va indicato il numero di famiglie di discontinuità riconoscibili "a vista" in affioramento. Particolare attenzione deve essere rivolta alle famiglie con giacitura simile a quella del piano di affioramento, meno visibili di quelle ad esso perpendicolari.

1.1.10 Giacitura piano affioramento

Va riportata l'orientazione del versante, la sua altezza sul p.c. e la sua larghezza. La giacitura del versante deve essere espressa mediante il valore dell'azimut della linea di massima pendenza (*dip direction*) e dell'inclinazione di questa rispetto all'orizzontale (*dip*). Questa convenzione è quella comunemente utilizzata in geomeccanica per la misura della giacitura dei piani (Fig.6).

Per molti scopi può essere sufficiente derivare l'orientazione del versante dalla carta topografica. Tuttavia l'acclività così ottenuta è funzione della scala di quest'ultima: nei casi in cui è necessaria una maggior precisione è indispensabile rilevare direttamente in campagna la pendenza e l'orientazione del versante.

1.1.11 Giacitura linea di scansione

Va riportata la direzione e l'inclinazione della linea di scansione. Tale linea viene tracciata sulla parete e serve da riferimento per una caratterizzazione oggettiva dell'ammasso: vengono infatti considerate e misurate solo le discontinuità che intersecano la linea. Per comodità la linea di scansione viene generalmente tracciata orizzontale anche se dovrebbe essere orientata perpendicolarmente alla giacitura apparente della principale famiglia di discontinuità.

Oltre alla giacitura vanno indicate l'eventuale deviazione della linea dall'ipotetico tracciato rettilineo e la sua lunghezza.

1.1.12 Censoring

Il *censoring* è definito da due parametri, chiamati *trimming* e *curtailment*, e viene utilizzato nella misura della lunghezza delle discontinuità che intersecano la linea di scansione.

Alcuni operatori scelgono di non misurare la lunghezza di quelle discontinuità che sono più corte di un certo valore: questo valore di soglia è detto *trimming* (*t*). Se non viene registrato il numero delle discontinuità che vengono scartate, si ha l'effetto di "troncare" il campione delle lunghezze per i valori minori di *t*; se, invece, viene registrato il numero di discontinuità scartate, il campione delle lunghezze è detto "limitato" per valori minori di *t*.

Il *curtailment* (*c*) rappresenta il massimo valore di lunghezza delle discontinuità che è possibile misurare con una ragionevole precisione. Analogamente al *trimming*, anche il *curtailment* è deciso "a priori" ed ha l'effetto di "limitare" il campione delle lunghezze a seconda che vengano o non vengano conteggiate le discontinuità di lunghezza superiore a *c*.

Il significato e l'uso statistico di questi due parametri sarà descritto nelle sezioni relative all'elaborazione delle lunghezze.

1.2 Caratteristiche delle discontinuità

Per ciascuno dei piani intersecanti la linea di scansione vengono descritte le seguenti caratteristiche:

1.2.1 Intersezione

Indica la distanza (in metri) tra il punto d'inizio della linea di scansione e il punto nel quale il piano di discontinuità interseca la linea.

1.2.2 Giacitura

Va riportata la direzione di immersione (*dip direction*) e l'inclinazione (*dip*) del piano di discontinuità.

1.2.3 Semitraccia

La semitraccia di una discontinuità rappresenta la lunghezza della discontinuità misurata a partire dal punto di intersezione con la linea di scansione fino alla terminazione superiore (semitraccia sopra) od inferiore (semitraccia sotto) della discontinuità. La misura della semitraccia e l'uso dei parametri di *censoring* permettono, tramite l'analisi statistica dei dati, la stima del valor medio della lunghezza delle discontinuità; tale parametro non è infatti determinabile dalla semplice media aritmetica dei valori delle lunghezze intere delle discontinuità che intersecano la linea di scansione.

Generalmente, la misura della lunghezza delle discontinuità viene eseguita tracciando "a priori" una linea immaginaria parallela alla linea di scansione e posta sopra questa ad una distanza H_c pari solitamente a 3-4 m (Fig.7). La componente di H_c parallela ad un certo piano di discontinuità rappresenta il *curtailment* (c) di quella discontinuità. Alla voce *curtailment* del campo *censoring* della scheda di rilevamento (sezione 1.1.12) risulta pertanto più comodo indicare il valore di H_c , che rimane costante, piuttosto che quello di c , che varia in funzione della giacitura della discontinuità e che può essere calcolato successivamente nota H_c e la giacitura del piano.

Definita la posizione della linea di *curtailment*, la misura della semitraccia viene effettuata a partire dal punto di intersezione con la linea di scansione procedendo verso l'alto: se la discontinuità termina prima della linea di *curtailment*, il valore misurato va indicato nel campo "semitraccia sopra"; se la discontinuità si estende oltre la linea di *curtailment*, la semitraccia non viene misurata e viene conteggiata semplicemente come "semilunghezza > c ".

Il valore del *trimming* (t) viene generalmente posto a qualche centimetro; le semitracce di lunghezza inferiore a questa soglia vengono quindi conteggiate ma non misurate. Secondo Priest (1993), il *trimming* dovrebbe essere, per quanto possibile, evitato; le discontinuità molto corte, infatti, hanno una probabilità molto bassa di intersecare la linea di scansione, per cui la misura di tutte le discontinuità visibili non rappresenta di norma un grande *surplus* di lavoro.

1.2.4 Terminazione

Va indicato il tipo di terminazione della semitraccia superiore della discontinuità secondo la simbologia proposta dall'ISRM:

I = in roccia intatta

A = contro un'altra frattura

O = fuori affioramento

Il campione delle terminazioni risente logicamente dello stesso tipo di "limitazione" precedentemente discussa per le lunghezze delle semitracce.

1.2.5 Rugosità (JRC)

Il *Joint Roughness Coefficient* (JRC) è una stima della rugosità della superficie della discontinuità. Tale parametro viene determinato confrontando il profilo di rugosità del giunto, ricavato appoggiando un profilometro (pettine di Barton; Fig.8; Scheda 2 a fine testo) sulla superficie della discontinuità, con alcuni profili standard proposti da Barton &

Choubey (1977; Fig.8a). Visto che la lunghezza dei profili standard è pari a 10 cm, l'indice JRC fornisce indicazione sulle asperità a scala millimetrica.

Teoricamente, la direzione lungo la quale va determinata la rugosità deve essere quella coincidente con la direzione di scivolamento del blocco. Se questa non è nota a priori si può utilizzare come direzione di misura quella di immersione del piano di discontinuità o quella parallela alla linea di intersezione tra il piano di discontinuità di interesse e un altro piano di discontinuità adiacente.

1.2.6 Curvatura e ondulazione

Va indicata l'eventuale curvatura della discontinuità, definita come irregolarità della superficie del giunto con "lunghezza d'onda" maggiore di 10 cm. L'ondulazione è definita come il susseguirsi lungo la superficie del giunto di irregolarità di questa scala.

Nel caso di discontinuità curve, il valore da inserire nel campo rappresenta la distanza (in mm) dal punto di massima curvatura della discontinuità alla retta passante per le estremità della discontinuità. Nel caso di discontinuità piana la curvatura è uguale a zero.

Nel caso di discontinuità ondulate si può utilizzare la classificazione descrittiva proposta dall'ISRM, che prende in considerazione sia la rugosità che l'ondulazione (Fig.9).

Una misura più accurata dell'ondulazione (Fig.10) può essere effettuata poggiando sulla superficie della discontinuità una serie di dischi metallici di diverso diametro (5, 10, 20 e 40 cm) e misurando la direzione d'immersione e l'inclinazione delle piastre per un certo numero di posizioni (100, 75, 50 e 25 posizioni per le piastre da 5, 10, 20 e 40 cm rispettivamente). Logicamente, misure di questo tipo non possono essere effettuate su tutti i piani di discontinuità che intersecano la linea di scansione e sono generalmente realizzate per un numero ridotto di superfici estese e ben esposte appartenenti ai diversi set individuati o al sistema ritenuto più sfavorevolmente orientato nei confronti della stabilità.

1.2.7 Tipo

Si deve indicare il tipo genetico di discontinuità (Fig.11). Su questo punto non vengono fornite particolari indicazioni dalle norme ISRM tuttavia, come sostenuto da Hoek & Bray (1981), è di fondamentale importanza distinguere la natura geologica delle discontinuità in quanto essa ne condiziona in larga misura le caratteristiche meccaniche.

1.2.8 Apertura

L'apertura è la distanza ortogonale tra le pareti della discontinuità (Fig.12). Può essere misurata tramite uno spessimetro o, nel caso di discontinuità ben aperte, con un metro. Nel caso in cui si abbia una certa variabilità dell'apertura, va indicato il valore modale.

1.2.9 Riempimento

Nel caso di discontinuità con una certa apertura, è necessario indicare la presenza di riempimento. Di questo va indicato lo spessore modale ed il tipo, seguendo le indicazioni riportate in fondo alla scheda allegata. L'importanza del riempimento deriva dal fatto che le caratteristiche meccaniche della discontinuità risultano fortemente influenzate dalla presenza di materiale tra le superfici del giunto (Fig.13). Se l'apertura è maggiore dell'ampiezza delle asperità delle pareti la resistenza al taglio della discontinuità coincide

con quella del materiale di riempimento; se l'apertura non supera l'ampiezza della rugosità la resistenza al taglio è intermedia fra quella del riempimento e quella delle pareti. Il riempimento controlla anche la permeabilità e la possibilità di filtrazione dell'acqua all'interno dell'ammasso: a questo proposito è importante indicarne il grado di umidità seguendo i termini descrittivi proposti dall'ISRM (Fig.14).

Nel caso di riempimento coesivo è possibile fornire una prima indicazione della resistenza non drenata del materiale tramite "Manual Test Index" o usando un penetrometro tascabile.

1.2.10 Resistenza a compressione delle pareti della discontinuità

La resistenza a compressione uniassiale delle pareti della discontinuità (Joint Compressive Strength, JCS) è un parametro di fondamentale importanza per la stima della resistenza al taglio della discontinuità. Il valore di JCS viene determinato tramite prove sclerometriche (martello di Schmidt; Fig.15) sulle pareti delle discontinuità facendo ogni volta 20 serie di letture: 10 sulla superficie naturale della discontinuità e 10 sulla stessa superficie dopo levigatura a mano, allo scopo di rimuovere la pellicola alterata più superficiale.

Generalmente, le prove col martello di Schmidt non si eseguono su tutte le discontinuità che intersecano la linea di scansione ma su un numero più ridotto di piani rappresentativi delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso. Per ogni serie di letture è importante annotare l'inclinazione del martello rispetto all'orizzontale ed accertarsi di non poggiare la punta metallica su microfratture, asperità o muschi che producono una parziale dissipazione dell'energia dell'impatto e falsano il valore del rimbalzo.

1.2.11 Filtrazione

Pur non comparando nella scheda allegata in appendice, è descrivere, per ogni piano di discontinuità intersecante la linea di scansione, le condizioni di filtrazione lungo la superficie. I termini descrittivi della filtrazione lungo discontinuità con e senza riempimento sono stati proposti dall'ISRM (Fig.15a).

2 Elaborazione dati

2.1 Cenni di statistica

Al fine dell'analisi statistica, una popolazione è definita come un gruppo di valori dal quale può essere estratto un campione. I valori di una popolazione possono essere di natura continua, come la spaziatura tra coppie di discontinuità che viene descritte da numeri reali, o di natura discreta, come il numero di discontinuità che intersecano una linea di scansione di una data lunghezza che viene espresso da numeri interi.

Nella gran parte dei casi, lo scopo delle indagini in sito è la stima delle proprietà di una data popolazione di valori sulla base delle proprietà di un campione preso dalla popolazione stessa. Un campione può essere estratto da una popolazione sia in modo casuale sia utilizzando criteri predefiniti che introducono un "errore controllato"; è questo il caso, ad esempio, della misura col *censoring* delle semilunghezze delle discontinuità.

Un campionamento che si basa su una scelta personale delle discontinuità da misurare introduce un errore "random" difficilmente quantificabile e produce un campione di valori da cui non è possibile ricavare le caratteristiche della popolazione. La tecnica di raccolta dati descritta nelle sezioni precedenti permette teoricamente di ottenere una campione rappresentativo della popolazione, privo di errore o affetto da "errore controllato".

La stima dei parametri della popolazione a partire da un campione di dati viene eseguita calcolando le cosiddette "migliori stime" dei parametri.

Considerando ad esempio un campione di n valori presi da una popolazione, la miglior stima X_m del valor medio della popolazione μ_x è data da:

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

mentre la miglior stima S^2 della varianza della popolazione σ_x^2 è data da:

$$S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2$$

Ulteriori informazioni sulle caratteristiche di una popolazione possono essere ottenute dall'analisi della distribuzione dei valori del campione. Una prima idea di tale distribuzione può essere ottenuta scegliendo un appropriato intervallo di classe, ad esempio $\Delta = X_m/10$, e diagrammando in un istogramma il numero dei valori che ricadono in ogni classe. E' possibile inoltre tracciare una curva continua $N(x)$ che approssimi l'andamento ottenuto con l'istogramma e che individui più chiaramente la distribuzione del campione di dati: $N(x)$ dipenderà comunque, a parità di Δ , dal numero n dei valori del campione.

Allo scopo di eliminare questa dipendenza si può definire una nuova funzione $R(x)$:

$$R(x) = N(x)/n$$

in grado di fornire la frequenza relativa in un intervallo di classe centrata in x . La frequenza relativa, comunque, è proporzionale all'intervallo della classe Δ , visto che intervalli più grandi tendono a contenere più valori.

E' possibile pertanto definire una nuova funzione $f(x)$:

$$f(x) = N(x)/n\Delta$$

in grado di fornire la frequenza relativa per unità di intervallo di classe centrata in x . La funzione $f(x)$ è detta distribuzione di densità di probabilità ed è indipendente da Δ e da n .

La forma della funzione $f(x)$ determinata da una campione di valori può essere confrontata con diverse distribuzioni teoriche di densità di probabilità (Fig.16) allo scopo di stimare la distribuzione dei valori della popolazione. Numerosi test statistici possono essere utilizzati per valutare quale distribuzione teorica di densità di probabilità meglio approssima quella sperimentale e quale è la significatività di tale approssimazione (es. Davies, 1986).

2.2 Caratteristiche delle discontinuità

Nelle sezioni seguenti saranno brevemente illustrate le principali tecniche di analisi ed elaborazione dei dati ottenuti con la linea di scansione. Si rimanda ai testi specifici per i necessari approfondimenti sull'argomento e per quanto riguarda l'utilizzo dei vari parametri nella stima delle caratteristiche fisico-meccaniche e la loro influenza sul comportamento generale dell'ammasso roccioso.

2.2.1 Orientazione

Le giaciture delle discontinuità misurate lungo la linea di scansione vengono generalmente rappresentate come poli dei piani in proiezione stereografica equiareale (emisfero inferiore).

Scopo principali dell'analisi delle giaciture è l'individuazione di famiglie di discontinuità, ovvero di concentrazioni statisticamente significative di poli caratterizzate da giaciture simili tra loro (Fig17).

La significatività statistica delle concentrazioni polari deve essere attentamente valutata. Il fatto che un certo numero di poli si addensino in una porzione più o meno ristretta del reticolo equiareale non significa infatti che tale concentrazione individua una famiglia di discontinuità: l'addensamento potrebbe essere del tutto casuale e dipendere esclusivamente dal numero dei dati raccolti. Per verificare se una certa concentrazione polare ha un significato statistico è necessario eseguire un'analisi "cluster" dei dati raccolti (es. Shanley & Mahtab, 1976 in Priest, 1993); questo tipo di analisi fornisce la probabilità che una certa concentrazione polare sia frutto di un evento casuale e deve essere utilizzata per un'identificazione meno soggettiva delle famiglie di discontinuità.

Un'indicazione qualitativa delle famiglie di discontinuità presenti può essere ottenuta diagrammando sul reticolo equiareale le linee di uguale densità polare.

Il campione delle giaciture delle discontinuità risente però di un "errore controllato". A parità di spaziatura media, infatti, le discontinuità parallele al piano di affioramento hanno una minore probabilità di intersecare la linea di scansione rispetto alle discontinuità ad esso perpendicolari: il campione delle giaciture è cioè numericamente "sbilanciato" verso i piani

perpendicolari alla linea e questo può rendere poco significativa l'analisi *cluster* per l'individuazione delle famiglie di discontinuità.

Un modo per correggere questo errore è quello di assegnare ad ogni valore di giacitura un peso funzione dell'angolo acuto compreso tra la linea di scansione e la normale al piano di discontinuità: più questo angolo tende a 90° maggiore è il peso attribuito alla discontinuità.

Il peso W può essere calcolato come:

$$W=1/\cos(d)$$

dove d , angolo acuto tra la linea di scansione e la normale al giunto, si ricava dalla seguente espressione:

$$\cos(d) = \text{ASS}[\cos(\mathbf{a}_n - \mathbf{a}_s)\cos(\mathbf{b}_n)\cos(\mathbf{b}_s) + \sin(\mathbf{b}_n)\sin(\mathbf{b}_s)]$$

con:

α_n, β_n = direzione, inclinazione della normale al piano di discontinuità

α_s, β_s = direzione, inclinazione della linea di scansione

Per evitare di attribuire un peso eccessivo ai piani subparalleli alla linea di scansione, W è posto pari a 10 per tutti gli angoli $\delta > 84.3$.

L'analisi *cluster* va quindi effettuata sui campioni pesati secondo la procedura sopra descritta ed anche il diagramma delle isolinee di densità polare andrebbe realizzato considerando i pesi delle singole misure.

Una volta pesati i valori ed identificate le concentrazioni polari statisticamente significative si determinano, per ogni famiglia, il polo rappresentativo (o polo centrale del set) e la deviazione standard attorno al polo centrale (definita dal semiangolo apicale del cono contenente il 63% dei poli del set). A seconda delle necessità e del dettaglio richiesto possono essere calcolati numerosi altri parametri statistici dei set volti a definirne, ad esempio, la forma (varianza sferica), la dispersione (modulo di accentrimento) e l'errore standard (indice di errore standard a diversi livelli di confidenza).

2.2.2 Spaziatura

La spaziatura tra due discontinuità è definita come la distanza tra una coppia di discontinuità misurata lungo una linea di una certa orientazione. Si distinguono tre tipi di spaziatura (Fig.18):

- 1) spaziatura totale (X_t): è la spaziatura tra due discontinuità immediatamente adiacenti lungo la linea di scansione;
- 2) spaziatura del set (X_d): è la spaziatura tra due discontinuità dello stesso set immediatamente adiacenti lungo la linea di scansione;
- 3) spaziatura normale del set (X_n): è la spaziatura tra due discontinuità dello stesso set immediatamente adiacenti misurata lungo la normale media del set.

I valori di spaziatura totale X_t si calcolano semplicemente come differenza tra i punti di intersezione delle discontinuità con la linea di scansione. Le spaziature del set X_d sono stimate scegliendo solo quelle discontinuità che appartengono allo stesso set e facendo la differenza tra le relative progressive dei punti di intersezione con la linea di scansione. Le

spaziature normali del set X_n sono calcolate correggendo i valori di spaziatura del set X_d in funzione dell'angolo acuto δ tra la linea di scansione e la normale media del set:

$$X_n = X_d \cos(\delta)$$

Il campione delle spaziature totali X_t è utilizzato per la stima del grado di fratturazione dell'ammasso tramite il calcolo dell'indice RQD:

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \frac{X_{ti}}{L}$$

dove n è il numero dei valori, L è la lunghezza della linea di scansione e X_{ti} sono le lunghezze totali maggiori di 10 cm. L'indice RQD varia dallo 0% (ammasso roccioso estremamente fratturato) al 100% (ammasso roccioso poco fratturato) e su questa base è stata proposta una prima classificazione della qualità dell'ammasso (Deere 1963; Fig.18a).

I valori di X_t vengono inoltre presentati sotto forma di istogramma di frequenza e sono calcolati i parametri statistici di base: media, moda, deviazione standard, errore standard, valore minimo e massimo. La forma della funzione di densità di probabilità di X_t è generalmente di tipo esponenziale negativo, come risultato di un processo genetico di tipo *random* (Fig.19). Il reciproco del valor medio delle spaziature totali rappresenta la "miglior stima" della frequenza lineare delle discontinuità (numero medio di discontinuità per metro lineare).

Il campione delle spaziature normali del set viene trattato in modo analogo a quello della spaziatura totale: per ognuno dei set individuati vengono calcolati i parametri statistici di base e viene realizzato l'istogramma di frequenza. La funzione di densità di probabilità teorica che meglio approssima la distribuzione sperimentale delle spaziature normali del set è generalmente di tipo lognormale e, meno frequentemente, esponenziale negativa.

La significatività statistica delle differenze eventualmente presenti tra le spaziature dei set può essere adeguatamente valutata tramite test statistici non parametrici quali il test di chi-quadro e quello di Kolmogorov-Smirnov (es. Davies, 1986).

Sia nel caso delle spaziature totali che in quello delle spaziature normali del set è buona norma indicare sull'asse delle ascisse degli istogrammi di frequenza le classi descrittive della spaziatura proposte dall'ISRM (Fig. 20).

Le spaziature del set non vengono generalmente analizzate e sono utilizzate solamente per il calcolo delle spaziature normali del set.

In generale, la stima della spaziatura media delle discontinuità è una parte cruciale dell'indagine geomeccanica. Questo parametro fornisce infatti un'indicazione diretta del grado di fratturazione dell'ammasso ed ha un peso notevole nelle classificazioni geomeccaniche e nella stima dei parametri di permeabilità e deformabilità dell'ammasso.

Benchè il valor medio della spaziatura totale, del set e normale del set possa essere calcolato semplicemente come la media dei valori del campione, il risultato non dà indicazioni sull'affidabilità della stima.

Esistono due criteri distinti grazie ai quali può essere stimata questa affidabilità. Il primo criterio riguarda la tendenza del valor medio stimato ad essere influenzato da un errore sistematico (dato ad esempio dal fatto che con una linea di scansione di lunghezza L non è

possibile misurare spaziature delle discontinuità maggiori di L): questo effetto è chiamato inaccuratezza. Il secondo criterio riguarda la tendenza che hanno i campioni poco numerosi a fornire deviazioni *random* attorno al valor medio della popolazione, risultando quindi poco significativi del valore reale: questo effetto è chiamato imprecisione.

Tralasciando la trattazione statistica (Priest, 1993), si dimostra che l'effetto di inaccuratezza, che tende a far sottostimare il valor medio della popolazione, è significativo solo nel caso di linee di scansione molto corte. Teoricamente, si ricava che: se il prodotto di λL (λ =frequenza delle discontinuità; L =lunghezza della linea di scansione) è maggiore di 5, il valor medio del campione è maggiore del 96% del valor medio della popolazione; se il prodotto λL è invece maggiore di 10, la media stimata è maggiore del 99% della media reale. In altre parole, se la linea di scansione interseca più di 5 discontinuità, l'effetto di inaccuratezza sarà piccolo; se la linea interseca 10 o più discontinuità, l'accuratezza sarà accettabile per gran parte delle applicazioni pratiche.

Molto più importante è l'effetto di imprecisione. Questo deriva dalla scarsa rappresentatività del valor medio della spaziatura calcolato su un campione poco numeroso e sottende il problema di quante misure di spaziatura siano richieste per una stima affidabile della spaziatura media della popolazione.

La valutazione di questo errore è basata sul teorema del limite centrale, da cui si ricava che il valor medio sconosciuto μ_x della popolazione ha una probabilità $\phi(z)$ di trovarsi nel *range*:

$$X_m \pm \frac{zS}{\sqrt{n}}$$

dove X_m e S sono media e deviazione standard del campione, n è il numero dei dati e z è la variabile normale standard tabulata in funzione di $\phi(z)$ per una distribuzione normale. All'aumentare del numero dei dati, il *range* attorno al valor medio del campione entro il quale si trova il valor medio della popolazione si restringe e la stima effettuata risulta più vicina al valore reale.

Nel caso di una distribuzione esponenziale negativa delle spaziature, è possibile calcolare il numero n di misure necessarie per ottenere una certa precisione ad un certo livello di confidenza:

$$n = \left(\frac{z}{\epsilon} \right)^2$$

dove ϵ è l'errore ammissibile, cioè il livello di precisione che si vuole ottenere.

Per gran parte delle applicazioni pratiche, un errore ammissibile del 10% ed un livello di confidenza variabile tra il 90% ed il 95% richiede un campione di spaziature variabile da 300 a 400 dati.

2.2.3 Lunghezza

La lunghezza è probabilmente la proprietà di una discontinuità più difficile da misurare con precisione e la più problematica da trattare dal punto di vista statistico; questo perché le discontinuità hanno generalmente lunghezze maggiori di quelle visibili in affioramento

per cui risulta estremamente difficile raccogliere un campione di misure di lunghezze intere non limitato (o troncato) superiormente.

Una stima del valor medio delle lunghezze intere delle discontinuità di un set può comunque essere effettuata sulla base del campione delle semilunghezze superiori misurate in campagna secondo la metodologia descritta nella sezione 1.2.3 (Fig.21)

Considerando i seguenti termini:

- $f(l)$, μ_L = distribuzione di densità di probabilità e valor medio delle lunghezze intere
- $h(l)$, μ_{hL} = distribuzione di densità di probabilità e valor medio delle semilunghezze
- $i(l)$, μ_{iL} = distribuzione di densità di probabilità e valor medio delle semilunghezze misurate considerando un certo curtailment c

e tralasciando ancora la trattazione statistica (Priest, 1993), si dimostra che:

per una distribuzione $f(l)$ di tipo esponenziale negativa

$$\mathbf{m}_{iL} = \mathbf{m}_L - \frac{ce^{-\left(\frac{c}{\mathbf{m}_L}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{c}{\mathbf{m}_L}\right)}}$$

per una distribuzione $f(l)$ di tipo uniforme

$$\mathbf{m}_{iL} = \frac{2c\left(\mathbf{m}_L - \frac{c}{3}\right)}{4\mathbf{m}_L - c}$$

per una distribuzione $f(l)$ di tipo triangolare

$$\mathbf{m}_{iL} = \frac{9\mathbf{m}_L^2 c - 4\mathbf{m}_L c^2 + \frac{1}{2}c^3}{18\mathbf{m}_L^2 - 6\mathbf{m}_L c + \frac{2}{3}c^2}$$

Visto che la distribuzione $f(l)$ delle lunghezze intere non è nota a priori e non può essere dedotta dalla distribuzione delle semilunghezze (Fig.22), la stima di μ_{iL} può essere effettuata considerando tutte e tre le distribuzioni teoriche ed utilizzando i tre valori risultanti per definire il *range* dei possibili valori teorici di μ_L .

Altri metodi per la stima di μ_L sono riportati in Priest (1993). Di questi, alcuni necessitano, come il metodo sopra descritto, della conoscenza "a priori" di $f(l)$ mentre altri sono "distribuzione-indipendenti" e si basano, ad esempio, sul rapporto tra il numero di discontinuità complessivamente rilevate ed il numero di quelle di lunghezza inferiore al *curtailment c*.

Il metodo che generalmente viene usato in pratica per la stima di μ_L consiste nel trovare la funzione di densità di probabilità delle lunghezze intere $f(l)$ le cui semilunghezze (calcolate teoricamente per lo stesso *curtailment c* usato in campagna) meglio approssimano la distribuzione sperimentale delle semilunghezze misurate; il *fit* viene realizzato automaticamente da appositi programmi di calcolo ed i parametri statistici della

distribuzione teorica $f(l)$ che meglio approssima la distribuzione sperimentale vengono assunti come rappresentativi dei parametri della popolazione delle lunghezze reali (Fig.23).

Per quanto riguarda la restituzione dei risultati, per ognuno dei set di discontinuità va riportato il *range* dei valori medi delle lunghezze intere μ_L ottenuti coi diversi metodi (e nel caso di metodi distribuzione-dipendenti per diverse distribuzioni teoriche $f(l)$) e l'istogramma di frequenza delle semilunghezze misurate.

Per la classificazione descrittiva delle lunghezze medie dei set si fa riferimento a quanto proposto dall'ISRM (Fig.24).

2.2.4 Terminazione

Le terminazioni delle discontinuità sono utilizzate per il calcolo del cosiddetto "indice di terminazione" T_i :

$$T_i = \frac{100N_i}{N_i + N_a + N_o}$$

dove N_i , N_a e N_o sono il numero totale di discontinuità la cui semitraccia termina rispettivamente in roccia, contro un'altra discontinuità o non è visibile. L'indice T_i può essere calcolato sia cumulando tutti i dati che separatamente per i vari set.

Un valore elevato di T_i indica che buona parte delle discontinuità termina in roccia, cioè che l'ammasso contiene ponti di roccia intatta piuttosto che blocchi ben sviluppati e distinti. Ci si potrebbe quindi aspettare che un ammasso con basso T_i sia più deformabile e meno resistente di uno con alto T_i . In realtà, le terminazioni delle discontinuità non possono fornire indicazioni sufficienti sull'assetto strutturale delle discontinuità; il numero di discontinuità intersecata da una dato giunto, ad esempio, ha un'elevata influenza sulle proprietà meccaniche dell'ammasso e non viene considerato nel calcolo di T_i .

2.2.5 Rugosità(JRC)

Per quanto riguarda le asperità a scala millimetrica delle superfici delle discontinuità, i profili ottenuti col pettine di Barton vanno confrontati con i profili standard di Barton & Choubey (1977) e si ricavano i valori dell'indice JRC. I valori ottenuti sono quindi riportati in forma di istogramma di frequenza separatamente per i vari set e vengono calcolati i parametri statistici fondamentali.

Nel caso non si riscontrassero differenze statisticamente significative tra le distribuzioni di JRC dei vari set. è possibile analizzare i dati complessivamente misurati in forma cumulata.

2.2.6 Curvatura e ondulazione

Le misure di curvatura delle discontinuità vanno elaborate sotto forma di istogrammi di frequenza dei valori misurati per i vari set; per ogni serie di dati i vanno inoltre calcolati i parametri statistici di base.

Le stime dell'ondulazione delle superfici possono essere riportate, separatamente per i vari set, come tabelle di frequenza basate sulla classificazione descrittiva proposta dall'ISRM (Fig.9).

Nel caso che l'ondulazione sia stata rilevata utilizzando i dischi metallici, i dati di giacitura delle piastre sono rappresentati, separatamente per i diversi diametri utilizzati, come proiezione stereografica dei poli. Dalla distribuzioni polari è possibile individuare l'inclinazione media e la dispersione delle asperità che caratterizzano a diversa scala la superficie delle discontinuità (Fig.10). Cumulando su un unico reticolo stereografico tutte le misure effettuate col le varie piastre si possono inoltre tracciare le isolinee di uguale "scala delle asperità", che risultano molto utili per definire con un certo dettaglio l'eventuale direzione preferenziale di scivolamento lungo un set sfavorevolmente orientato.

2.2.7 Resistenza a compressione delle pareti dei giunti

Per ogni serie di 10 misure effettuate con lo sclerometro su un piano di discontinuità si scartano i 5 valori più bassi del rimbalzo. I restanti valori vengono cumulati e, per ogni set si realizzano due istogrammi di frequenza: uno degli indici di rimbalzo ottenuti su giunto naturale e l'altro degli indici di rimbalzo ottenuti su giunto levigato. Sono quindi riportati i parametri statistici di base delle distribuzioni. Se non sono presenti differenze statisticamente significative tra le distribuzioni dei rimbalzi dei vari set è consigliabile analizzare i dati in forma cumulata.

Il valore medio, modale, minimo, massimo e di deviazione standard della resistenza a compressione uniassiale delle pareti del giunto (JCS) si determina dai rispettivi indici di rimbalzo sulla base del diagramma di Fig.15. Nella stima dei valori minimi di JCS si deve tener presente tuttavia che la correlazione è valida solo per JCS maggiori di 15-20 MPa.

Per la classificazione descrittiva dei valori di JCS si può fare riferimento a quanto proposto dall'ISRM (Fig.4).

Il rapporto tra i valori medi degli indici di rimbalzo relativi alla superficie levigata e naturale dei giunti fornisce una prima indicazione sul grado di alterazione della superficie dei giunti; tale rapporto va calcolato separatamente per i vari set.

2.2.8 Altre caratteristiche

Per quanto riguarda il tipo di discontinuità, l'apertura, il riempimento e la filtrazione, i dati raccolti vengono rappresentati come tabelle di frequenza relative ai vari set basate sulle classificazioni descrittive proposte per questi parametri dall'ISRM (Fig.11-15a-25). Per i campioni numerici è consigliabile allegare alla tabella di frequenza i parametri statistici di base.

3 Bibliografia

- BARLA G. (1976) - *Meccanica delle rocce*. CLUT, Torino.
- BARLA G. & SCAVIA C. (1987) - *Analisi di stabilità di pendii in roccia in presenza di sisma ed in condizioni tridimensionali*. Riv. It. Geotec., **21**(1), 5-24.
- BARTON N.R. (1973) - *Review of a new shear strength criterion for rock joints*. Engineering Geology, Elsevier, **7**, 287-332.
- BARTON N.R. & BANDIS S. (1980) - *Some effects of scale on the shear strength of joints*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **17**, 69-73.
- BARTON N.R. & CHOUBEY V. (1977) - *The shear strength of rock joint in theory and practice*. Rock Mechanics, **10**, 1-54.
- BIENIAWSKI Z.T. (1974) - *Estimating the strength of rock materials*. J. South African Institute of Mining and Metallurgy, **74**, 312-320.
- BIENIAWSKI Z.T. (1976) - *The Geomechanics Classification in rock engineering applications*. Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., **2**, 51-58.
- BLES J.L. & FEUGA B. (1986) - *The Fracture of Rocks*. Bureau de Reserches Géologiques et Minières. English translation by North Oxford Academic Publishers Ltd.
- CANMET REPORT (1977) - *Pit Slope Manual*. Canmet. Canada.
- CHEENEY R.F. (1983) - *Statistical Methods in Geology*. George Allen & Unwin Ltd., London.
- CHOWDHURY R.N. (1984) - *Recent developments in landslides studies: probabilistic methods*. Proc 4th Symp. on Landslides, Toronto, Sect. VII(a), 1,209-228.
- CLERICI A., GRIFFINI L. & POZZI R. (1986) - *Note sull'impiego della Geomechanics Classification di Z.T. Bienawski*. Atti Cong.Int. Grandi Opere Sotterranee, **2**, 530-537.
- CLERICI A., GRIFFINI L. & POZZI R. (1986) - *L'acquisizione dei parametri geomeccanici fondamentali di un ammasso roccioso lapideo fratturato. L'esempio della Serpentina della Valmalenco*. Atti Conv. Valmalenco Natura, **1**, 243-258.
- CLERICI A., GRIFFINI L. & POZZI R. (1988) - *Procedura per l'esecuzione di rilievi strutturali geomeccanici di dettaglio su ammassi rocciosi a comportamento rigido*. Geologia Tecnica, **3/88**, 21-31.
- COLI M. (1983) - *Metodi di trattamento statistico dei dati strutturali*. Arri riunione "Meccanismi deformativi nelle catene perimediteranee: stato di avanzamento delle ricerche e problematiche emerse", Firenze, 19-25.
- CRUDEN D.M. (1977) - *Describing the size of discontinuities*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **14**, 133-137.
- CUNDALL P. (1971) - *A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems*. Proc Int. Symp. on Rock Fractures, Nancy, ISRM.
- CUNDALL P., VOEGELE M. & FAIRHURST C. (1977) - *Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data*. Proc. 16th US Symp. on Rock Mechanics, ASCE, New York, 5-14.
- DEERE D.U. (1963) - *Technical description of rock cores for engineering purposes*. Rock Mech. & Eng. Geol., **1**, p.18.
- DEERE D.U. & MILLER R.P. (1966) - *Engineering classification and index properties for intact rock*. Technical Report n. AFNL-TR-65-116 Air Force Weapons Laboratory. New Mexico.
- DAVIES J.C. (1986) - *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley & Sons, 646 pp.
- ERCOLI L. (1981) - *Metodo normalizzato per la descrizione delle discontinuità negli ammassi rocciosi*. Riv. It. Geotec., **15**(3), 209-214.

- FECKER E. & RENGERS N. (1971) - *Measurement of large scale roughnesses of rock planes by means of profilograph and geological compass*. Proc Int. Symp. on Rock Fractures, Nancy, ISRM, **I.18**.
- GARZONIO C.A. (1990) - *Block theory and stability analysis of a slope subject to lateral spread: the example of "Chiusi della Verna" mountain*. Proc. Int. Conf. on Mechanics of Jointed & Faulted Rock, Wien.
- GENEVOIS R. & PRESTININZI A. (1979) - *Analisi tridimensionale della stabilità di versanti rocciosi: la frana di Salincriti*. (RC). Geol. Appl. & Idrogeol., **14**(3), 367-387.
- GENEVOIS R., ROMEO R.W. & SCARASCIA MUGNOZZA G.M. (1987) - *Un approccio probabilistico all'analisi di stabilità di versanti in roccia*. Geologica Romana **26**, 262-286.
- GOODMAN R.E. (1964) - *The resolution of stresses in rock using the stereographic projection*. Int. Journ. Rock Mech. Mining Sci., **1**, 93-103.
- GOODMAN R.E. (1970) - The deformability of joints. In: "Determination of the in situ modulus of deformation of rock". ASTM Special Technical Publication, **477**, 174-196.
- GOODMAN R.E. (1976) - *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*. West Publishing Company, St. Paul (Minn.).
- GOODMAN R.E. & BRAY J.W. (1977) - *Toppling of rock slopes*. Proc. Speciality Conf. on Rock Engineering for Foundations & Slopes. ASCE, Boulder (Colorado), **2**, 201-234.
- GOODMAN R.E. (1980) - *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons Ltd., New York.
- GOODMAN R.E. & SHI G.H. (1985) - *Block theory and its application to rock mechanics*. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- HARR M.E. (1987) - *Reliability based design in civil engineering*. Mc Graw Hill Book Co., New York.
- HOEK E. & BRAY J.W. (1981) - *Rock Slope Engineering*. Revised Third Edition. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- HOKING G.A. (1976) - *A method to distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **13**, 225-226.
- HUDSON J.A. & PRIEST S.D. (1979) - *Discontinuities and rock mass geometry*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **16**, 339-362.
- HUDSON J.A. (1988) - *The role of rock characterization in slope stability analysis*. II Ciclo Conf. "Meccanica e Ingegneria delle Rocce", Torino.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics - Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1974) - *Suggested Methods for determining Shear Strength*. Committee on Field Tests, Doc. n.1.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics - Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1978) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **15**, n.6, 319-368.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics - Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1981) - *Rock Characterization Testing and Monitoring. Suggested Methods*. Brown E.T. (Editor). Pergamon Press.
- JAEGER J.C. (1971) - *Frictions of rocks and stability of rock slopes*. Rankine Lecture. Geotechnique, **21**(2), 97-134.
- JOHN K.W. (1968) - *Graphical stability analysis of slopes in jointed rock*. Jour: Soil Mech Found. Div. Proc. ASCE, **94**, SM2, 497-526.
- JOHN K.W. (1970) - Engineering analysis of three-dimensional stability problems utilising the reference hemisphere. Proc. 2nd Cong. ISRM, Belgrade, **2**, 314-321.
- KOVARI K. & FRITZ P. (1984) - *Recent developments in the analysis and monitoring of rock slopes*. Int. Symp. on Landslides, Toronto.
- LEUNG G. & KHEOK S.C. (1987) - *Computer aided analysis of rock slope stability*. Rock Mech. **20**, 111-122.

- LONDE P. (1965) - *Une méthode d'analyse à trois dimensions de la stabilité d'une rive rocheuse*. Annales des Ponts et Chaussées, Paris, 37-70.
- LONDE P., VIGIER G. & VORMERINGER R. (1970) - *Stability of slopes - graphical methods*. Jour. Soil Mech. & Found. Div. ASCE, **96**,SM4, 14911-1434.
- MAJOR G., ROSS-BROWN D. & KIM H.J. (1978) *A general probabilistic analysis for three-dimensional wedge failures*. Proc. 19th U.S. Rock Mech. Symp, Mackay School of Mines, Nevada, 45-56.
- MARKLAND J.T. (1972) - *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected*. Imperial College Rock Mechanics Research Report, **19**.
- PERUZZI R. (1985) - *Analisi sulla stabilità di versanti in rocce lapidee attraverso modelli geometrici definiti dalla giacitura dei sets di discontinuità: quattro esempi nella Provincia di Firenze*. Tesi di laurea inedita, Firenze.
- PERUZZI R. (1989) - *Verifiche di stabilità di versanti in terreni flyschoidi dell'Appennino settentrionale*. Atti Tic. Sc. Terra, **32**, 71-88.
- PHILLIPS F.C. (1971) - *The use of stereographic projection in structural geology*. Edward Arnold, London, 3rd ed.
- POULOS H.G. & DAVIS E.H. (1968) - *Elastic solutions for soils and rock mechanics*. John Wilwy & Sons Ltd., New York.
- PRIEST S.D. & BROWN E.T. (1983) - *Probabilistic analysis of rock slopes*. Trans. Inst. Min. Metall., **A92**(1), A1-A12.
- PRIEST S.D. & HUDSON J.A. (1976) - *Discontinuity spacings in rocks*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **13**, 135-148.
- PRIEST S.D. (1993) - *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall, 473 pp.
- PRIEST S.D. & HUDSON J.A. (1981) - *Estimating of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **18**, 183-197.
- ROSSI P.P. (1986) - *Le indagini sperimentali per la caratterizzazione per la caratterizzazione degli ammassi rocciosi*. Geologia Tecnica, nn.**2,3,4**.
- SGUAZZONI G.(1975) - *Descrizione di una bussola per la misura di piani striati*. Boll.Geodesia e Sc. Affini, IGMI, Firenze, XXXIV, 1.
- STAGG K.G. & ZIENKIEWICZ O.C.(eds.) (1975) - *Rock Mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons Ltd., New York.
- TZE R. & CRUDEN D.M. (1979) - *Estimating Joint Roughness Coefficients*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **16**, 303-307.
- WARBURTON P.M. (1987) - *Implications of keystone action for rock belt support and block theory*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **24**, 283-290.
- WITTKER W.W. (1967) - *Methods to analyse the stability of rock slopes with and without additional loading* (in German). Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Supp. II, **30**, 52-79. English translation in: "Imperial College Rock Mechanics Report, **6**, July 1971.
- ZIENKIEWICZ O.C. (1971) - *The Finite Element Method in Engineering Science*. Mc Graw-Hill Book Co., New York.

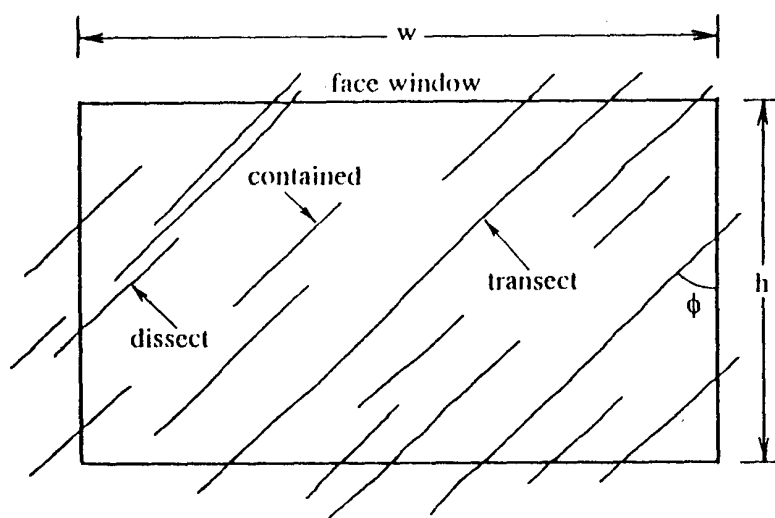
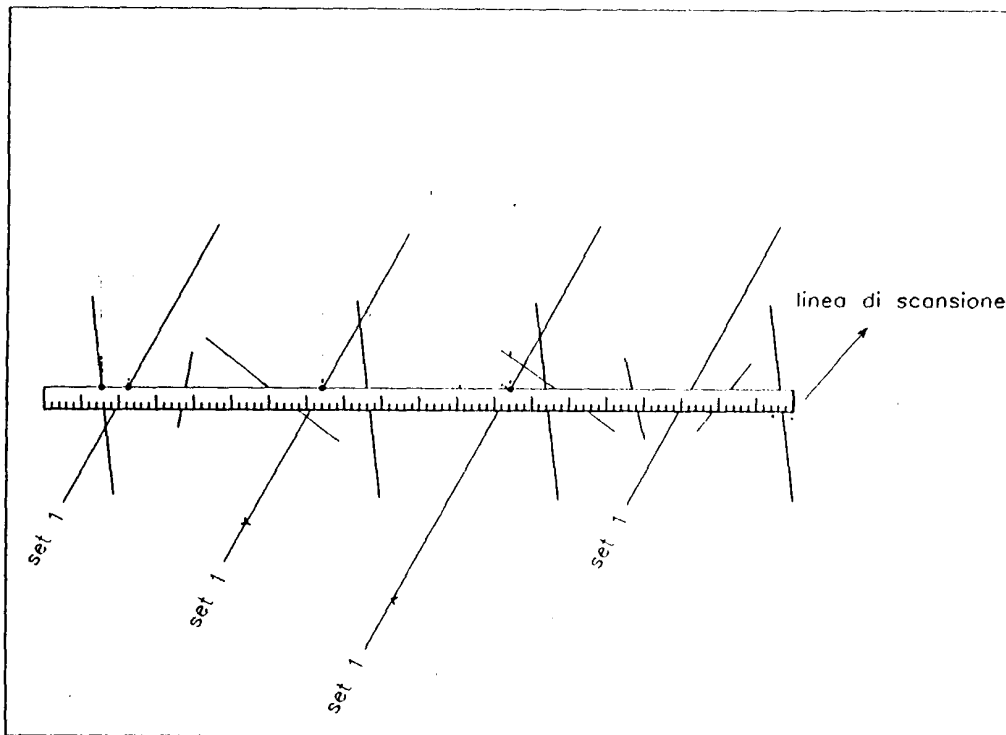


Fig. 1 (Priest, 1993)

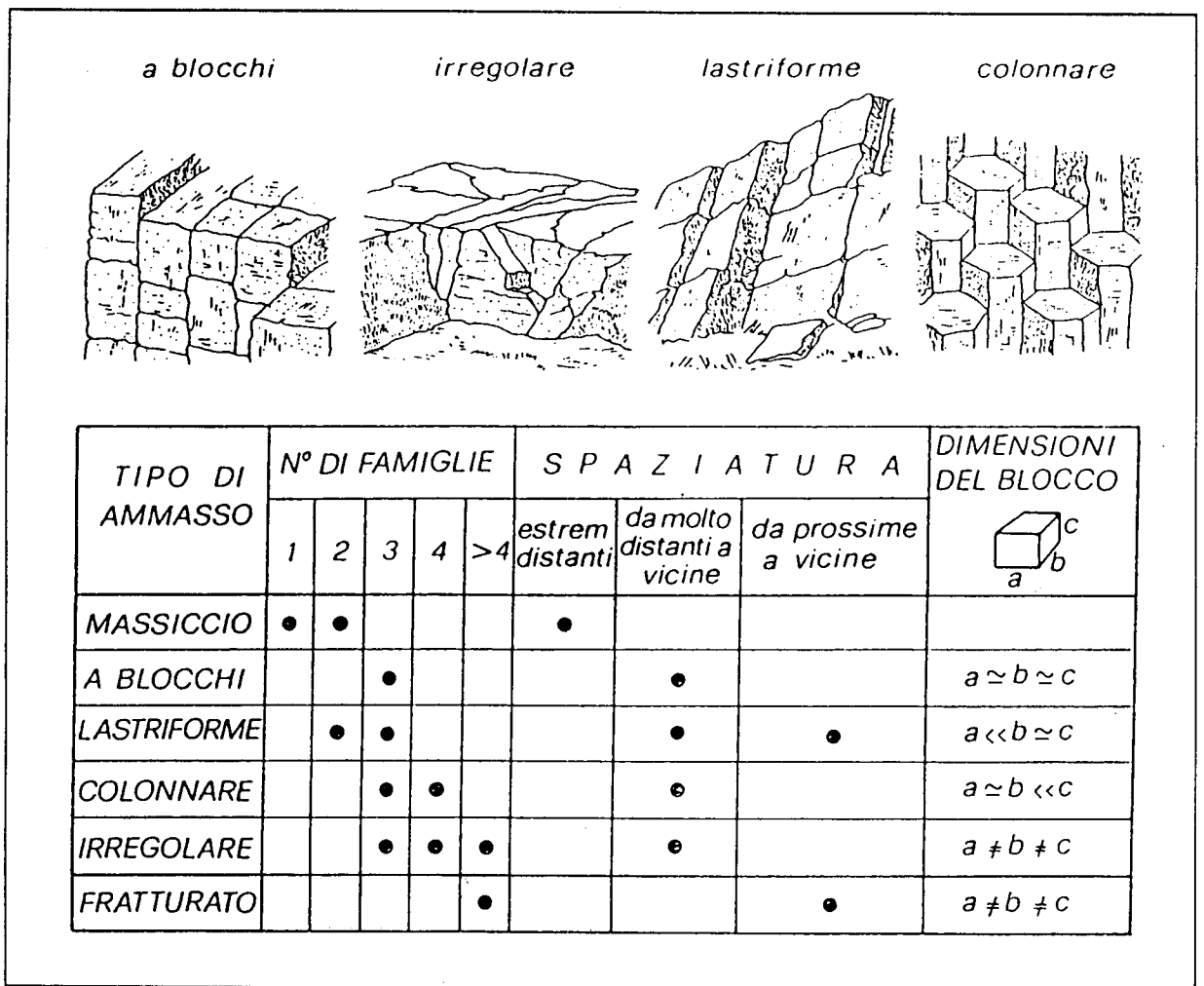


Fig. 2 (ISRM, 1978)

TERMINE	DESCRIZIONE	GRADO
Fresco	Non sono presenti segni di alterazione; lievi decolorazioni sulle superfici delle discontinuità principali	I
Leggermente alterato	La decolorazione indica alterazione del materiale roccioso e delle superfici di discontinuità. Tutto il materiale roccioso può essere decolorato per alterazione ed essere esternamente più debole rispetto alle condizioni non alterate	II
Moderatamente alterato	Meno della metà della roccia è decomposta e/o disintegrata. E' presente roccia decolorata o non alterata, sia arealmente che localmente.	III
Fortemente alterato	Più della metà della roccia è decomposta e/o disintegrata. E' presente roccia decolorata o non alterata, sia arealmente che localmente	IV
Completamente alterato	Tutto il materiale roccioso è decomposto e/o disintegrato. La originaria struttura è ancora in buona misura intatta	V
Suolo residuale	Tutto il materiale roccioso si è trasformato in suolo. La struttura generale e la tessitura del materiale è distrutta. Notevoli variazioni di volume, ma il terreno non ha praticamente subito trasporto.	VI

Fig.3 (ISRM, 1978)

MANUAL INDEX TEST (da ISRM, 1978)

CLASSE	DESCRIZIONE	IDENTIFICAZIONE	U.C.S. (MPa)
S1	ARGILLA MOLTO SOFFICE	Penetrabile facilmente alcuni centimetri con il pugno	<0.025
S2	ARGILLA SOFFICE	Penetrabile facilmente alcuni centimetri con il pollice	0.025-0.05
S3	ARGILLA SOLIDA	Penetrabile alcuni centimetri con il pollice con sforzo moderato	0.05-0.10
S4	ARGILLA COMPATTA	Facilmente scalfita dal pollice ma penetrata solo con grande sforzo	0.10-0.25
S5	ARGILLA MOLTO COMPATTA	Facilmente scalfita dall'unghia del pollice	0.25-0.50
S6	ARGILLA DURA	Scalfita con difficoltà dall'unghia del pollice	>0.50
R0	ROCCIA ESTREM. DEBOLE	Scalfita dall'unghia del pollice	0.25-1.0
R1	ROCCIA MOLTO DEBOLE	Si sbriciola sotto colpi decisi con la punta del martello. Si graffia con coltello	1.0-5.0
R2	ROCCIA DEBOLE	Graffiata con difficoltà dal coltello. Piccole scalfitture provocate da colpi decisi con la punta del martello	5.0-25
R3	ROCCIA MEDIAMENTE RESISTENTE	Non può essere scalfita né graffiata dal coltello. Un campione può fratturarsi con un singolo colpo di martello	25-50
R4	ROCCIA RESISTENTE	Un campione richiede più di un colpo di martello per fratturarsi	50-100
R5	ROCCIA MOLTO RESISTENTE	Un campione richiede molti colpi di martello per fratturarsi	100-250
R6	ROCCIA ESTREM. RESISTENTE	Un campione può solo essere scheggiato col martello	>250

- * U.C.S. = Resistenza a compressione uniassiale (MPa).
- * Le classi da S1 a S6 riguardano terre coesive, argille, argille limose e combinazioni di limo e argilla con sabbia a drenaggio lento.
- * Le classi R0 a R6 riguardano rocce.

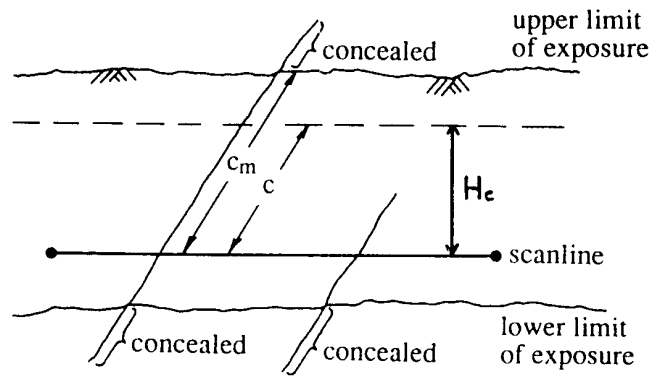
Fig.4 (ISRM, 1978)

The following descriptive terms give an impression of the corresponding block size:

Description	J_r (joints m ³)
Very large blocks	< 1.0
Large blocks	1-3
Medium-sized blocks	3-10
Small blocks	10-30
Very small blocks	> 30

Values of J_r > 60 would represent crushed rock, typical of a clay-free crushed zone.

Fig.5 (ISRM, 1978)



Curtailed semi-trace lengths (after Priest and Hudson, 1981).

Fig.7 (Priest, 1993)

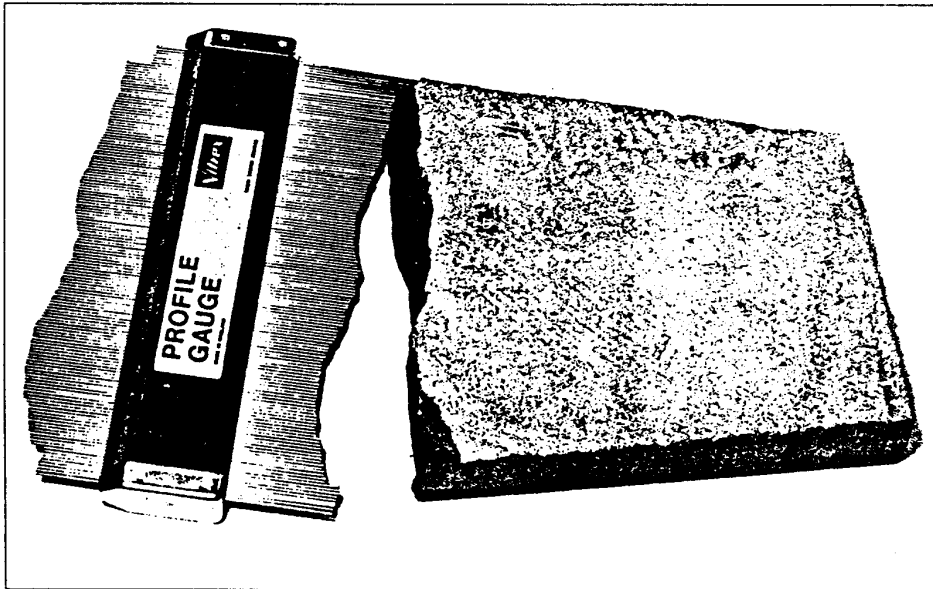


Fig.8

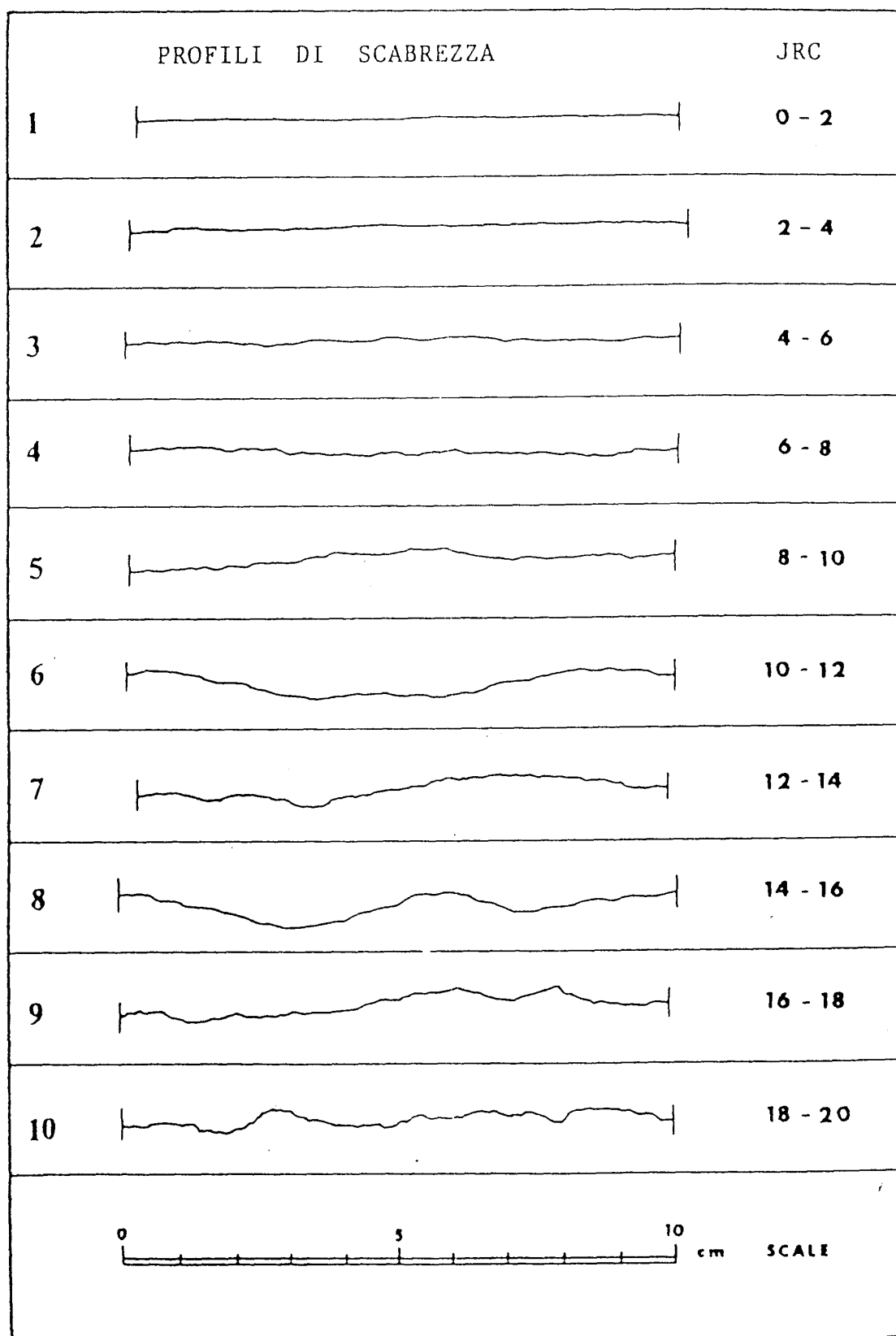


Fig.8a (Barton, 1974)

CLASSI DI RUGOSITA' (da ISRM, 1978)

CLASSE	DESCRIZIONE
I	Rugosa - A gradini
II	Liscia - A gradini
III	Striata - A gradini
IV	Rugosa - Ondulata
V	Liscia - Ondulata
VI	Striata - Ondulata
VII	Rugosa - Planare
VIII	Liscia - Planare
IX	Striata - Planare

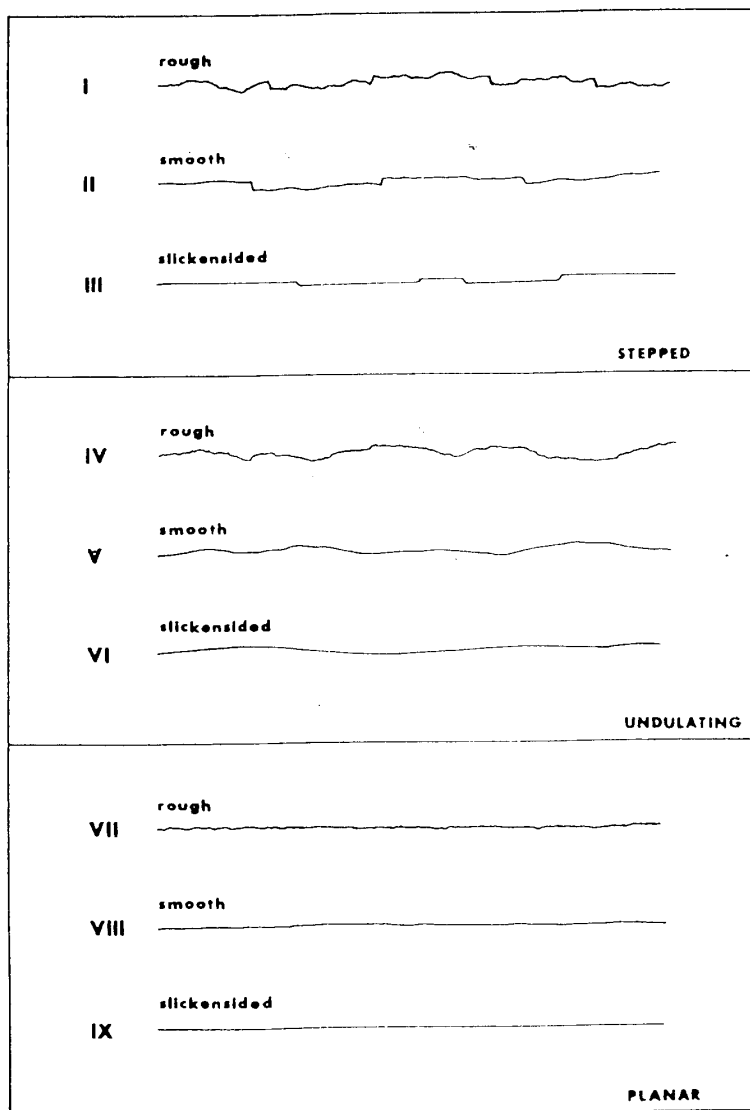


Fig.9 (ISRM, 1978)

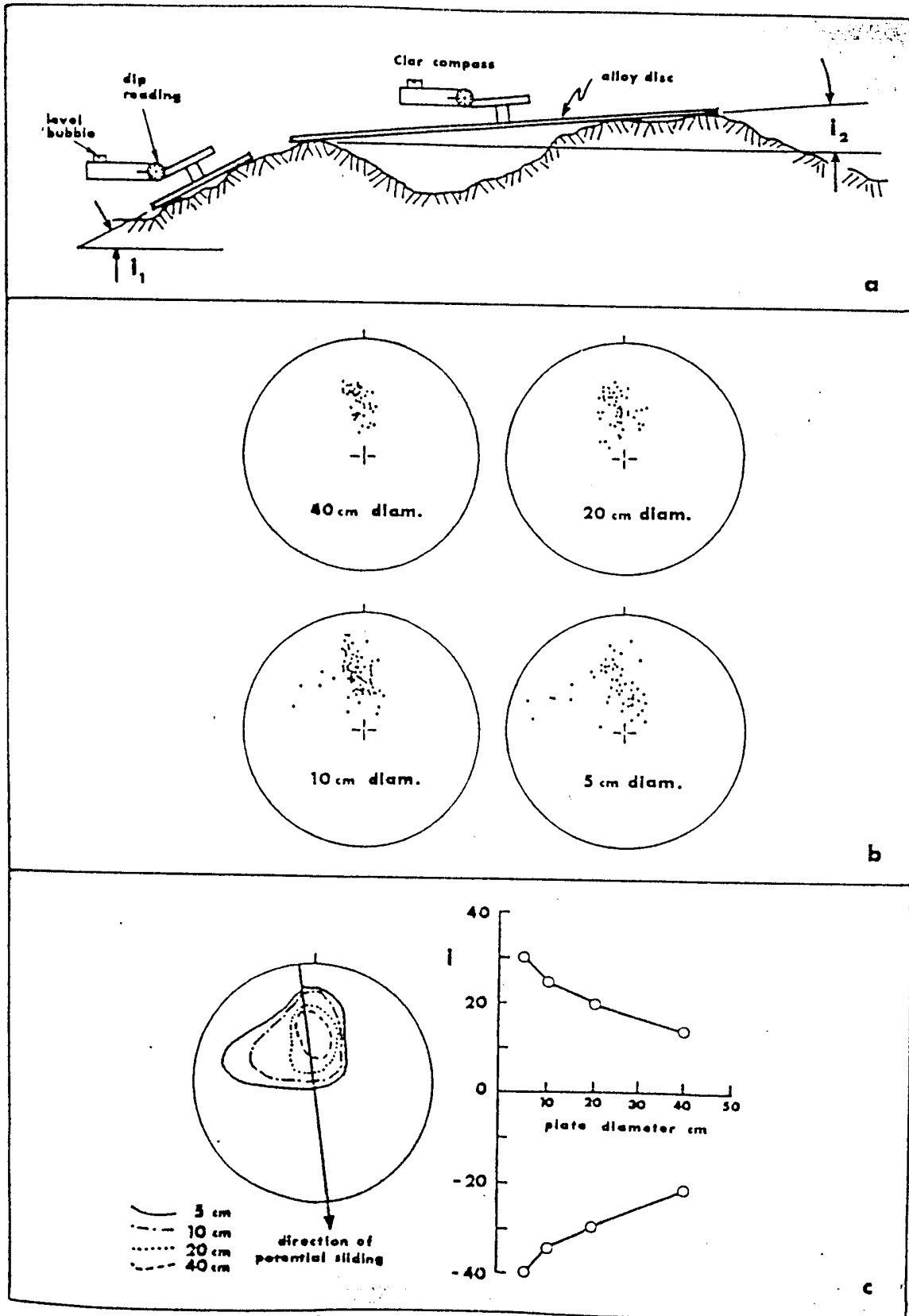


Fig.10 (ISRM, 1978)

TIPO DI DISCONTINUITA'

SIGLA	TIPO	DESCRIZIONE
BG	STRATIFICAZIONE	Superficie regolare in rocce sedimentarie che delimita i confini di strati o di diverse unità litologiche
CN	CONTATTO	Superficie che delimita due litotipi diversi, dei quali almeno uno non sedimentario
UC	UNCONFORMITY	Superficie di discontinuità in rocce sedimentarie testimoniante una fase di erosione
SC	SCISTOSITA'	Superficie di fissilità in rocce argillitiche dovuta alla isoorientazione preferenziale dei minerali
GN	GNEISSOSITA'	Superficie di fissilità subparallela agli originari letti sedimentari in rocce metamorfiche
CV	CLIVAGGIO	Superfici di fissilità poco spaziate e subparallele
JN	JOINT	Frattura lungo la quale non si ha dislocazione misurabile
FL	FAGLIA	Superficie di taglio con dislocazione misurabile
SR	SHEAR	Superficie di taglio lungo cui si ha dislocazione (evidenziata da slickensides), che tuttavia non è quantificabile
ST	GIUNTO STILOLITICO	Discontinuità irregolari costituite da alternanza di picchi e cavità, provocati da dissoluzione sotto sforzi compressivi
VN	VENA	Frattura con riempimento di spessore minore a 3 cm
LM	LIMITE	Superficie che delimita rocce di diversa composizione o resistenza come risultato di processi di formazione della roccia stessa, della tettonica o della alterazione

Fig.11 (ISRM, 1978)

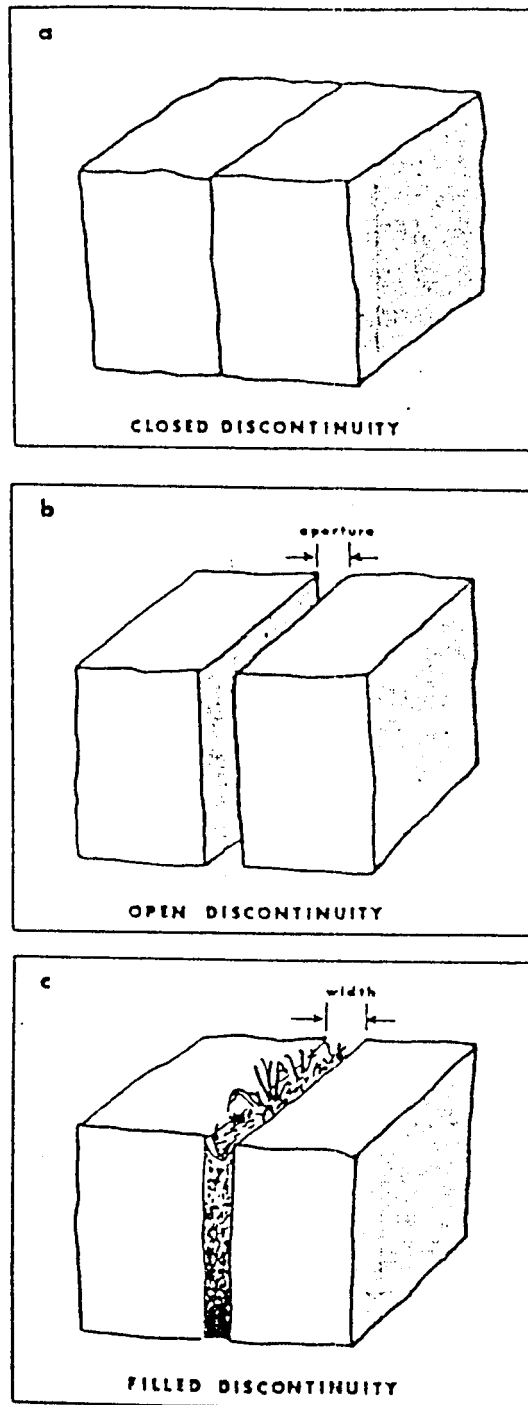


Fig.12 (ISRM, 1978)

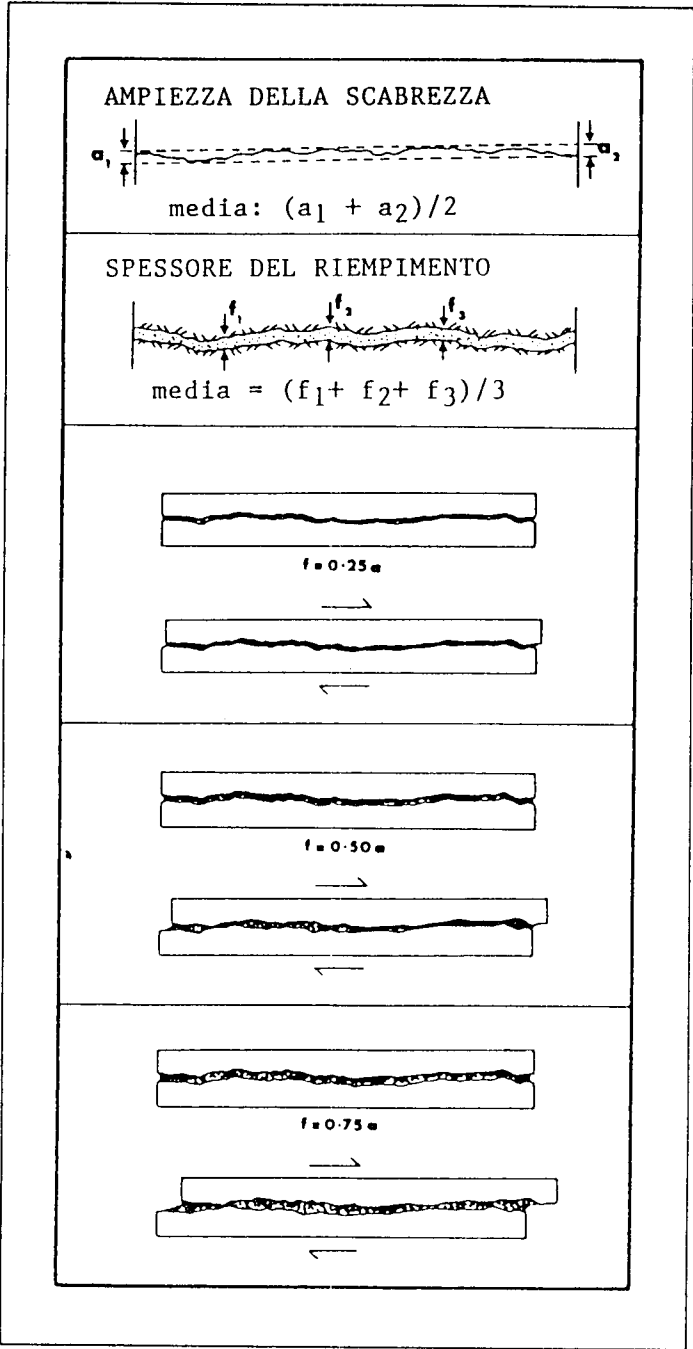


Fig.13 (ISRM, 1978)

- | | |
|------------|---|
| W 1 | Il materiali di riempimento sono molto consolidati ed asciutti;
bassa permeabilità |
| W 2 | I materiali di riempimento sono umidi, ma non è presente
acqua libera |
| W 3 | I materiali di riempimento sono bagnati, sono presenti
occasionalmente gocce d'acqua |
| W 4 | I materiali di riempimento mostrano segni di dilavamento,
continuo flusso di acqua (stimare l/min) |
| W 5 | I materiali di riempimento sono localmente dilavati,
considerevole flusso di acqua lungo canali di drenaggio
(stimare l/min e descrivere pressione: bassa, media, alta) |
| W 6 | I materiali di riempimento sono completamente dilavati,
con pressioni elevate, specialmente alla prima esposizione
(stimare l/min e descrivere pressione) |

Fig.14 (ISRM, 1978)

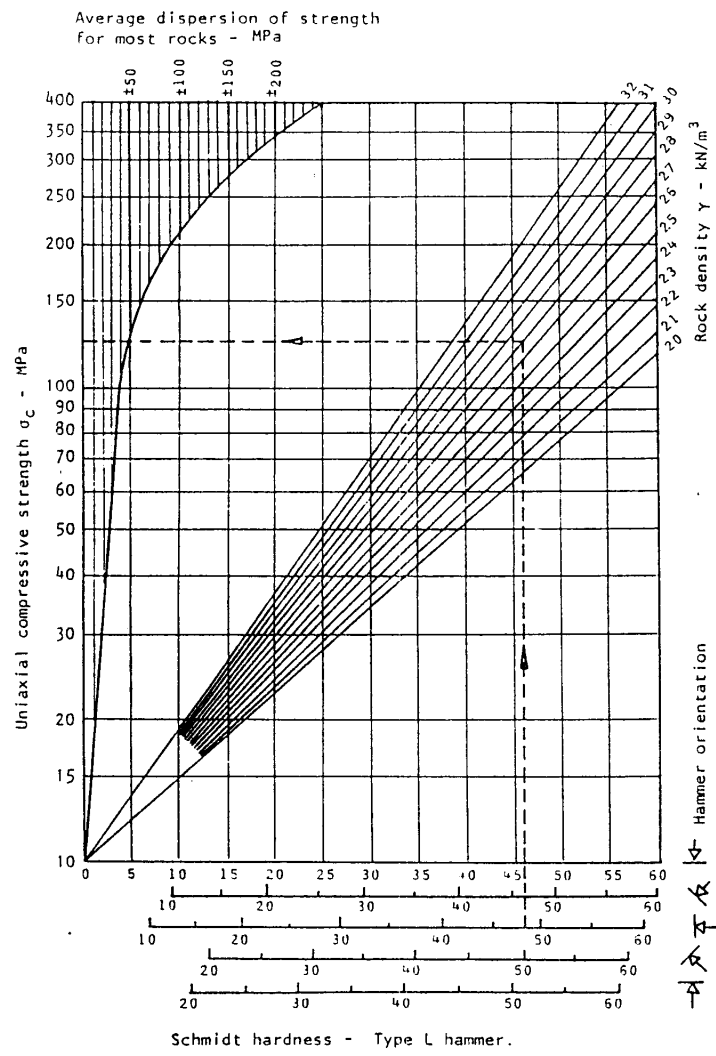
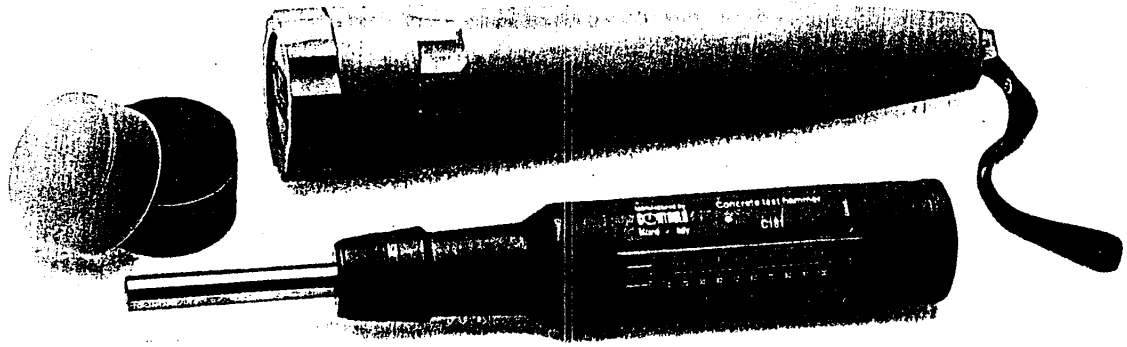


Fig.15 (Hoek & Bray, 1981)

Discontinuità senza riempimento

CLASSE	DESCRIZIONE
U I	La discontinuità è molto serrata e asciutta. Non sembra possibile un flusso d'acqua lungo di essa
U II	La discontinuità è asciutta senza alcuna evidenza di filtrazione
U III	La discontinuità è asciutta ma mostra evidenze di flusso d'acqua (colorazione, ruggine, ecc.)
U IV	La discontinuità è umida ma senza presenza di acqua libera
U V	La discontinuità mostra filtrazione, occasionali gocce d'acqua, ma non un flusso continuo
U VI	La discontinuità mostra un flusso continuo d'acqua (stimarne la portata e la pressione)

Discontinuità' con riempimento

CLASSE	DESCRIZIONE
F I	I materiali di riempimento sono molto consolidati e secchi, flussi significativi appaiono poco probabili per la loro scarsa permeabilità
F II	I materiali di riempimento sono umidi ma non è presente acqua libera
F III	I materiali di riempimento sono bagnati, con occasionali gocce d'acqua
F IV	I materiali di riempimento mostrano segni di dilavamento; presenza di un flusso d'acqua continuo (stimarne la portata)
F V	I materiali di riempimento sono asportati localmente, considerevoli flussi d'acqua si hanno lungo i canali di dilavamento (stimarne portata e pressione)
F VI	I materiali di riempimento sono completamente dilavati, si hanno rilevanti pressioni dell'acqua (stimare portata e pressione)

Fig.15a (ISRM, 1978)

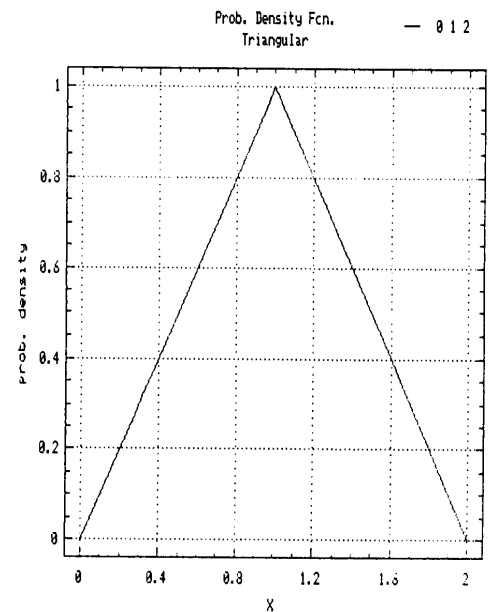
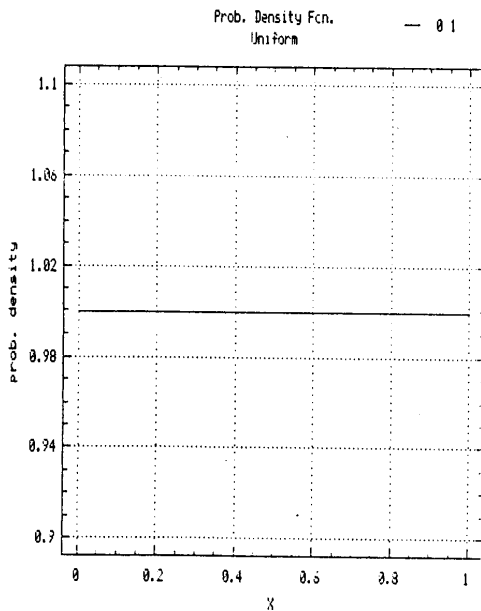
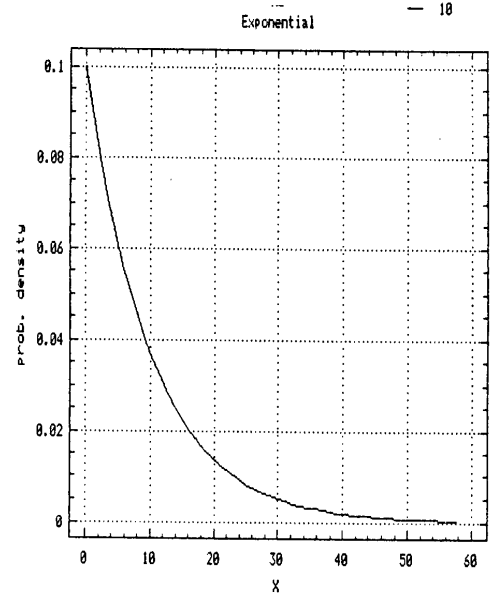
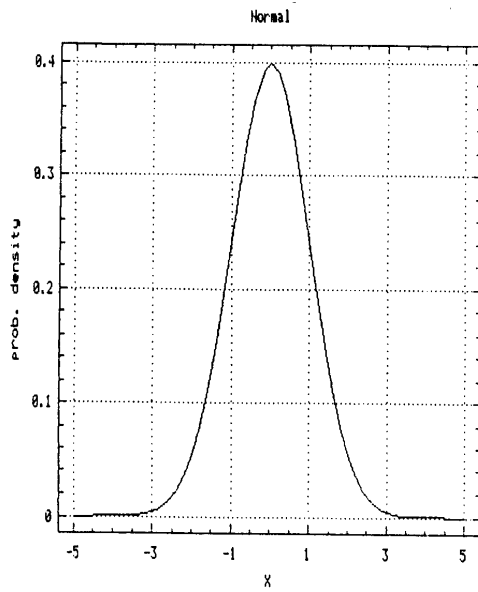


Table B.1 Probability density distributions

Name	Function	Range	Mean	Variance
Negative exponential	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$0 \leq x < \infty$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
Uniform	$f(x) = \frac{1}{a}$	$0 \leq x \leq a$	$\frac{a}{2}$	$\frac{a^2}{12}$
Triangular	$f(x) = \frac{2(a-x)}{a^2}$	$0 \leq x \leq a$	$\frac{a}{3}$	$\frac{a^2}{18}$
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$-\infty \leq x \leq \infty$	μ	σ^2
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$0 \leq x < \infty$	$\mu_1 = e^{(\mu+0.5\sigma^2)}$	$\mu_1^2(e^{\sigma^2} - 1)$

Fig.16 (Priest, 1993)

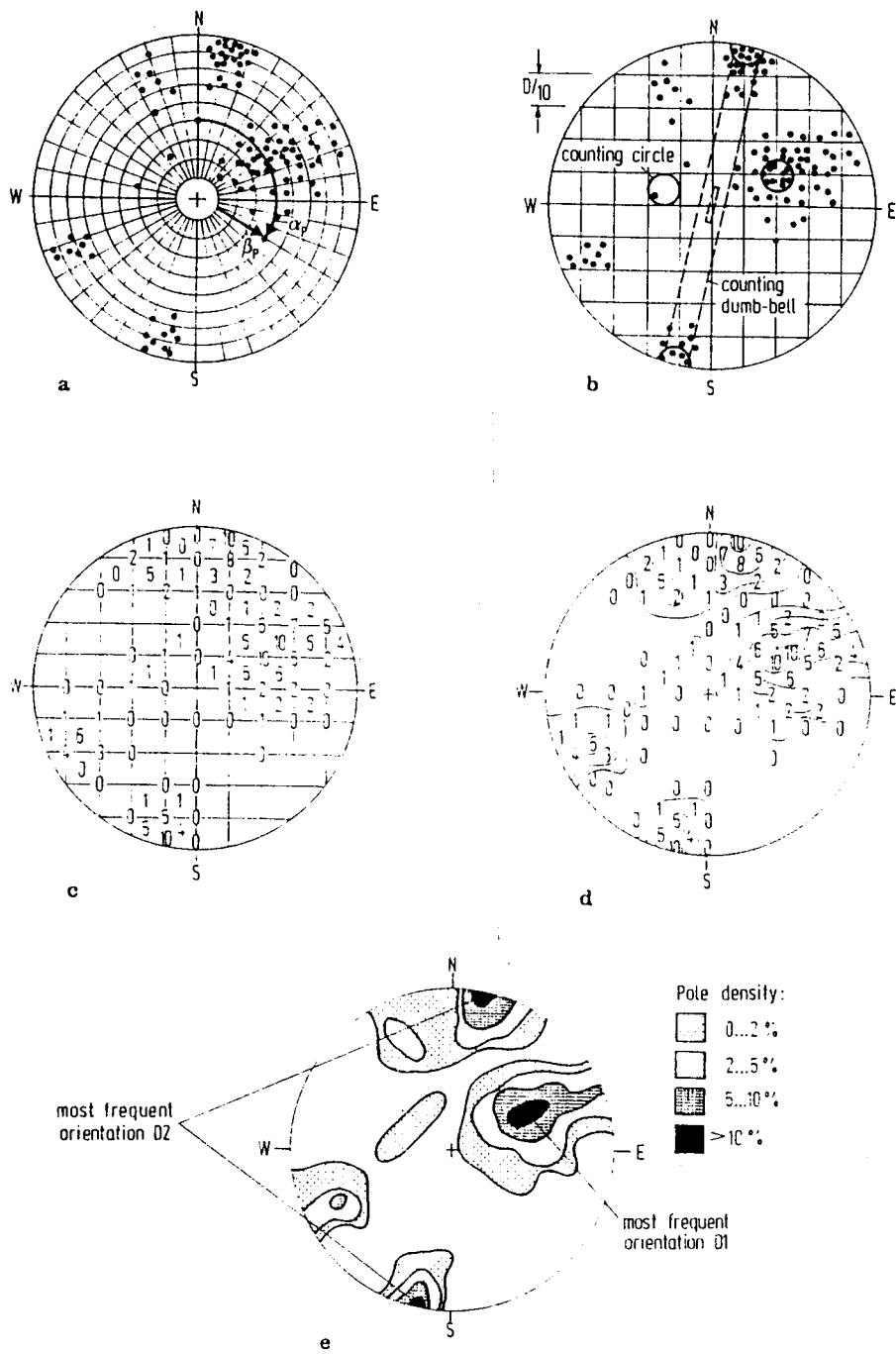


Fig.17 (Hoek & Bray, 1981)

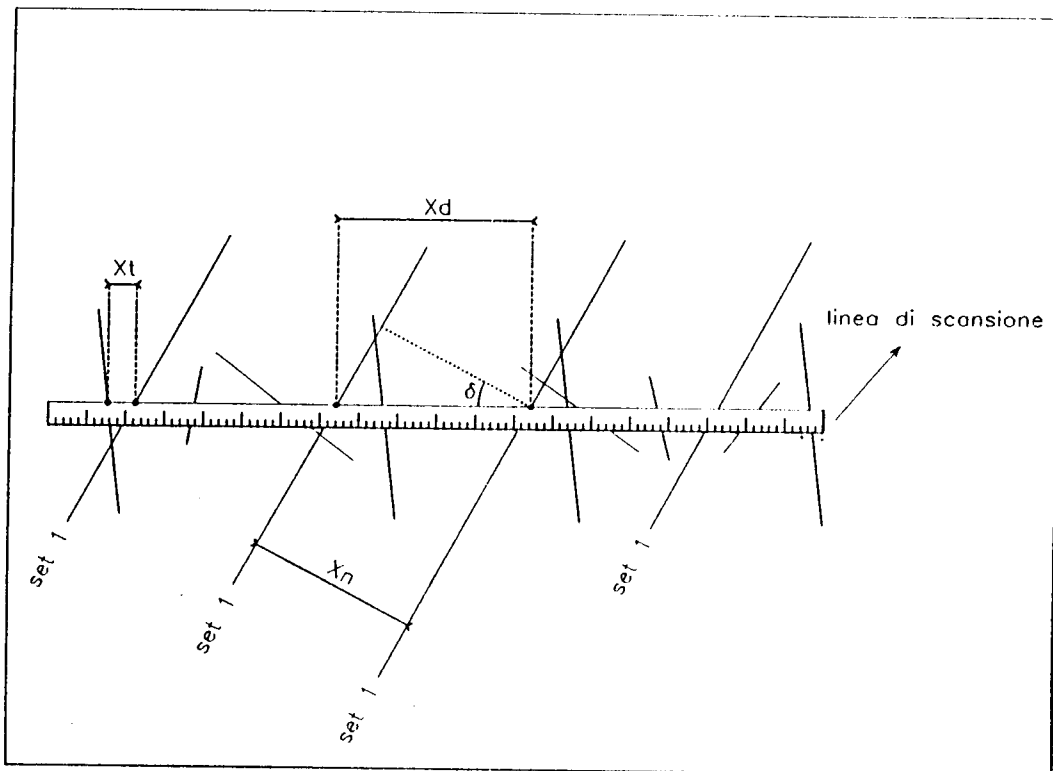
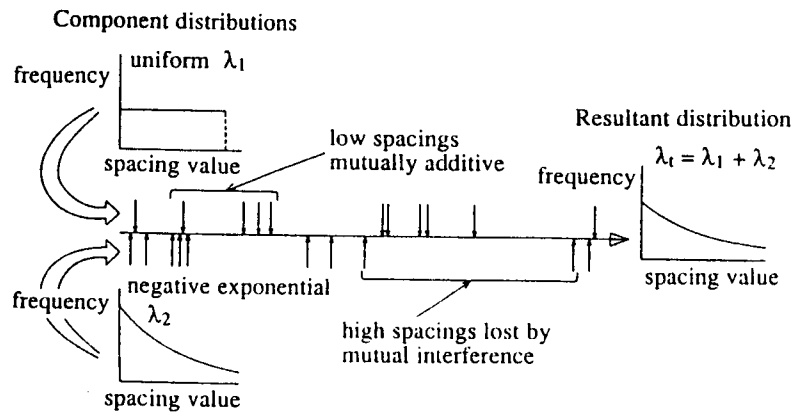


Fig.18 (Priest, 1993)

ROCK QUALITY DESIGNATION (da Deere, 1963)

Qualità	RQD %
Molto scadente	0 - 25
Scadente	25 - 50
Discreta	50 - 75
Buona	75 - 90
Ottima	90 -100

Fig.18a (Deere, 1963)



Combination of two discontinuity spacing distributions (after Hudson and Priest, 1979).

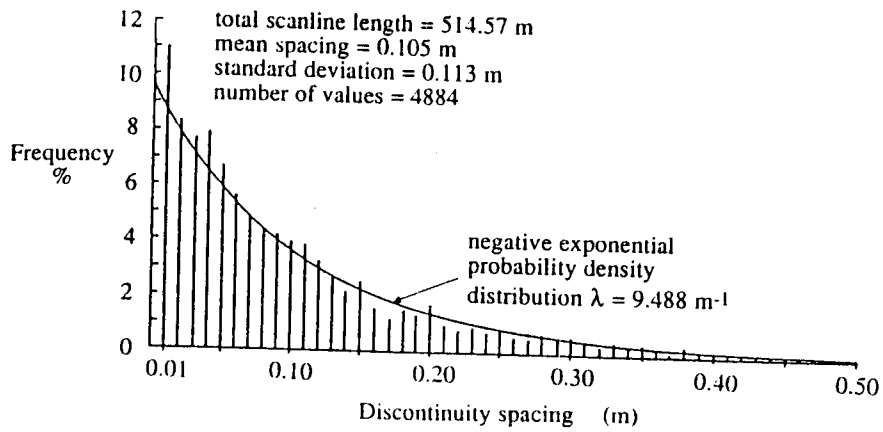
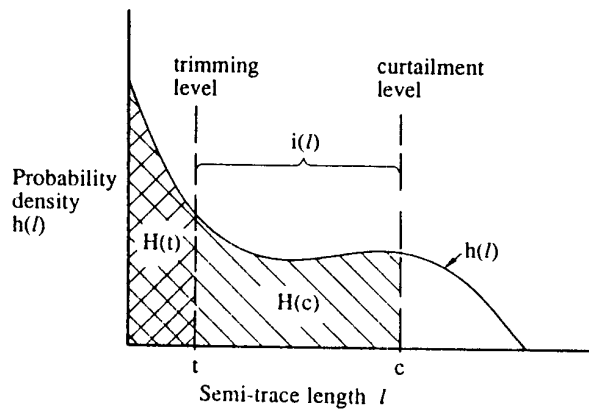


Fig.19 (Priest, 1993)

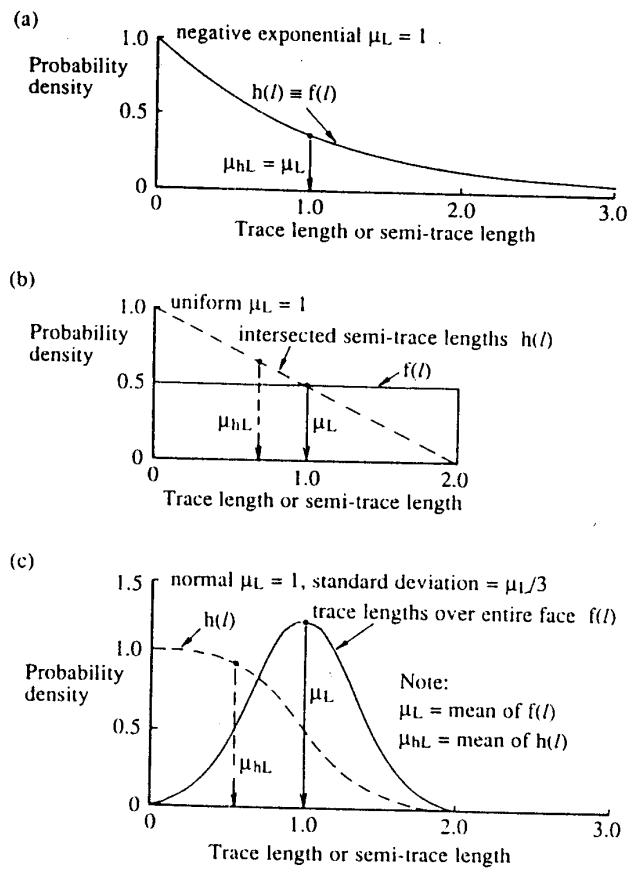
S	P	A	Z	I	A	T	U	R	A
<i>prossime</i>	<i>molto vicina</i>	<i>vicina</i>	<i>distanti</i>	<i>molto distanti</i>	<i>lontane</i>	<i>molto lontane</i>			
2	6	20	60	200	600	cm			

Fig.20 (ISRM, 1978)



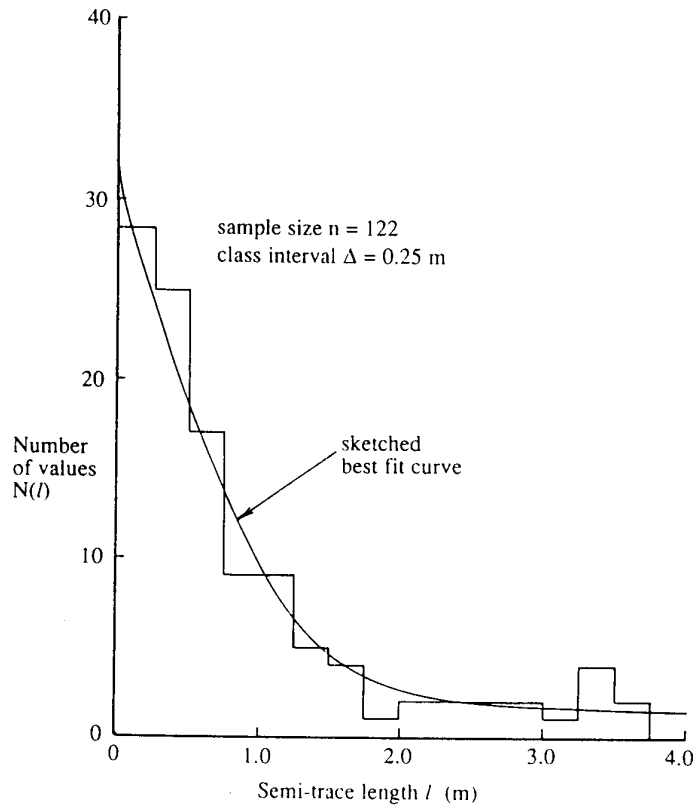
Trimming and curtailment of the semi-trace length distribution.

Fig.21 (Priest, 1993)



Probability density distributions of trace lengths over entire face $f(l)$ and semi-trace lengths $h(l)$ when $f(l)$ is (a) negative exponential, (b) uniform and (c) normal (after Priest and Hudson, 1981).

Fig.22 (Priest, 1993)



Histogram of semi-trace lengths, data from Priest and Hudson (1981).

Fig.23 (Priest, 1993)

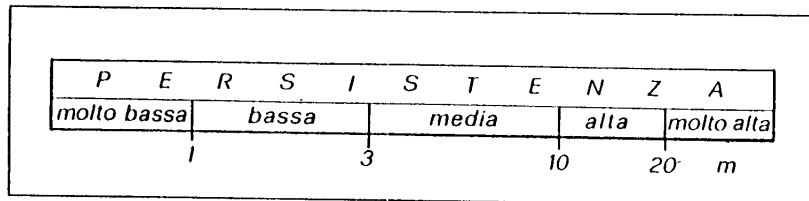


Fig.24 (ISRM, 1978)

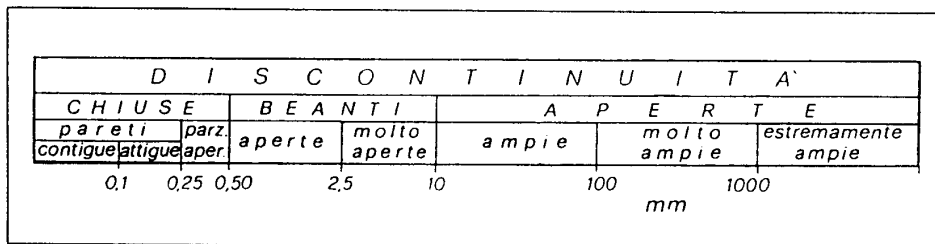


Fig.25 (ISRM, 1978)

STAZIONE R.S.:		Data:	Operatore		Rullino / Foto		
LOCALITA':		Tavola:		Campioni			
Affioramento:		Naturale	Scavo Sup.	Scavo Sotterr.	Trincea	Metodo di scavo	
LITOLOGIA _____							
Posiz. nella Seq. Stratigrafica o Formazione							
Fattori Geologici:		Cerniere/Fianchi Piega Faglie (dirette/inverse) Miloniti Pieghie	Giunti d'esfoliazione Discordanze Vene Filoni	Contatti geologici Laminazioni parall./incr./ond./conv. Terr. Residuale	Suolo spess. cm Carsismo		
INSTABILITA'	Scivolamenti; Planari a Cuneo		Rotazionali	Ribaltamenti; di blocchi	per flessione		
AMMASSO ISRM 78	MASSIVO		BLOCCOSO	TABULARE	COLONNARE	IRREGOLARE	FRANTUMATO
STRUTTURA	R1 Massiccia	R2 Stratificata	R3 Scistosa	WR1 Semicoerente	WR2 Altemanze		
ALTERAZIONE ISRM 78	F (W1) Inalterata	SW (W2) Deb. alterata Decolorata	MW (W3) Mod. alterata < 50% decomp.	HW (W4) Fort. Alterata > 50% decomp.	CW (W5) Compl.Alter.		
RESISTENZA ISRM 78	R0 Estrem. Deb. Sbriciola a mano 0-25 MPa	R1 Molto Deb. Sbriciola con martello 1-5 MPa	R2 Debole Difficile da sbriciolare con martello 5-25 MPa	R3 Mediam. Resist. Frattura con 1 colpo martello 25-50 MPa	R4 Resistente Frattura con pochi colpi martello 50-100 MPa	R5 Molto Resistente Fratture con molti colpi martello 100-250 MPa	R6 Estrem. Resist. Scheggiaia dal martello > 250 MPa
VRU	Ib = Jv =	/m3	Forma Cubo Romboedro	Tetraedro Prisma Equilat. / Barra / Piastra	N. Famiglie		
Giacitura Piano Affioramento			Altezza (m)		Larghezza (m)		
Giacitura Linea di Scansione			Deviazione (°)		Lunghezza (m)		

Censoring, c		Trimming (m)		n.		Curtailment (m)		n.						
Intersezione	Giacitura		Semitracciata		Terminazione		JRC	Curvat.	Tipo	Apertura	Riempim.			
N°	m	°	Inclin.	sotto / sin.	sopra / dx.	Frattura	Finestra	1-20	mm	***	mm	****		
1				m	m	I.A.O *	T.I.C**							
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
ANGOLO INTERSEZIONE SCANSIONE/FAMIGLIA														

by G.A.C. '90

*: Terminazione: I - in roccia intatta; A - contro un'altra frattura; O - fuori affioramento
 **: T - Frattura che trasetta la finestra; I - Interseca la finestra; C - Contenuta entro la finestra
 ***: 0 - Z. Faglia; 1 - Faglia; 2 - Giunto; 3 - Clivaggio; 4 - Scistosità; 5 - Taglio; 6 - Vena; 7 - Trazione; 8 - Foliazione;
 9 - Stratificazione; 10 - Stilolite
 ****: I - Incoerente; C - Coesivo inattivo; S - Coesivo rigonfiante; Cm - Cementato; Ca - Calcite; Q - Quarzo; T - Talco; G - Gesso

Stazione R.S.		Località						Pag.		di		
Giacitura Piano Affioramento				Altezza (m)			Larghezza (m)					
Giacitura Linea di Scansione				Deviazione (°)			Lunghezza (m)					
Spaziatura media, s (m)				Lungh. calcolata : > 50 * s								
Censoring, c		Trimming (m) n.			Truncation (m)							
		Curtailment (m) n.										
Intersezione	Giacitura		Semitraccia		Terminazione		JRC	Curvat.	Tipo	Apertura	Riempim.	
	Imm.	Inclin.	sotto / sin.	sopra / dx.	Frattura	Finestra						
N°	m	°	°	m	m	I,A,O *	T,I,C**	1-20	mm	***	mm	****
1.												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												
ANGOLO INTERSEZIONE SCANSIONE/FAMIGLIA												

by G.B.C. 90

*: Terminazione: I - in roccia intatta; A - contro un'altra frattura; O - fuori affioramento
 **: T - Frattura che transetta la finestra; I - Interseca la finestra; C - Contenuta entro la finestra
 ***: 0 - Z. Faglia; 1 - Faglia; 2 - Giunto; 3 - Clivaggio; 4 - Scistosità; 5 - Taglio; 6 - Vena; 7 - Trazione; 8 - Foliazione;
 9 - Stratificazione; 10 - Stilolite
 ****: I - Incoerente; C - Coesivo inattivo; S - Coesivo rigonfiante; Cm - Cementato; Ca - Calcite; Q - Quarzo; T - Talco; G - Gesso

Scheda 1 (segue)

Stazione R.S.	Località	Pag.	di
Giacitura Piano Affioramento		Altezza (m)	Larghezza (m)
PROFILI RUGOSITA'		Direz./Inclin.	JRC
1	_____		
2	_____		
3	_____		
4	_____		
5	_____		
6	_____		
7	_____		
8	_____		
9	_____		
10	_____		
11	_____		
12	_____		
13	_____		
14	_____		
15	_____		
16	_____		
17	_____		
18	_____		