

Un metodo semiempirico per la previsione del comportamento geotecnico degli ammassi rocciosi nei lavori in galleria.

BIENIAWSKI Z. T. - *Classification system is used to predict rock mass behaviour*. World Construction, May 1976.

1. Premesse

Nonostante i progressi compiuti nella meccanica dei terreni e delle rocce i metodi teorici di calcolo delle opere di sostegno delle gallerie sono validi solo in casi del tutto particolari e sotto il vincolo di ipotesi molto restrittive per il comportamento meccanico dell'ammasso. L'esperienza e l'osservazione sistematica dei complessi fenomeni che si verificano nel corso della costruzione delle gallerie hanno ormai fornito, invece, un valido supporto scientifico per superare le difficoltà che si incontrano nella classifica degli ammassi rocciosi e per lo sviluppo di metodi semiempirici che consentono di valutare globalmente il comportamento del complesso roccia-manufatto e di ottenere le necessarie indicazioni per i provvedimenti di sicurezza.

Con questi metodi, sulla base di valutazioni quantitative e qualitative, ciascuna delle caratteristiche salienti di un ammasso roccioso, come la resistenza della roccia intatta, l'orientazione dei piani di discontinuità, la pressione dell'acqua, viene espressa con indici numerici; attraverso somme o prodotti di tali indici si perviene quindi alla determinazione di un indice generale caratterizzante l'ammasso stesso.

Quest'ultimo indice viene quindi utilizzato per una classifica meccanica globale dell'ammasso, dalla quale si traggono informazioni sui problemi specifici relativi al progetto, ed alla realizzazione dei manufatti. I lavori, ormai classici in questo campo, sono quello di TERZAGHI [1946], che getta le basi per un approccio di questo tipo, e quello di LAUFFER [1958].

Il criterio di Terzaghi, largamente applicato per molti anni negli USA, risulta a tutt'oggi valido, ma limitatamente al caso delle gallerie con centine d'acciaio, per le quali venne messo a punto. Non è quindi applicabile alle moderne tecnologie esecutive, che comprendono l'uso di calcestruzzo proiettato, ancoraggi, eventualmente precom-

pressi, reti metalliche, ed inoltre non fornisce informazioni quantitative sulle proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso.

Con la classifica di Lauffer si compie un notevole passo in avanti, per l'introduzione di concetti ormai universalmente adottati nello studio dei problemi di questo tipo, quali il « tempo » e la « lunghezza » caratteristici (*).

Successivamente, la classifica di DEERE *et al.* [1970] pone in relazione l'indice di qualità RQD dell'ammasso con le dimensioni del priverestimento della galleria.

Questa classifica, semplice e pratica, trascura però completamente l'influenza della orientazione dei piani di discontinuità, della presenza di materiale di riempimento nei giunti, e della presenza dell'acqua, risultando perciò non molto aderente alla realtà.

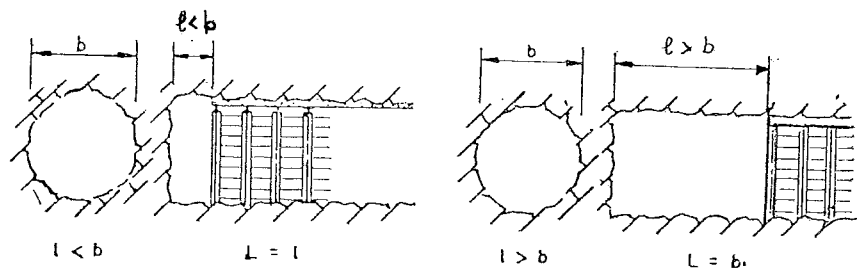
Due nuovi lavori degni di nota sono apparsi recentemente su questi argomenti.

Il primo è opera di un gruppo norvegese [BARTON *et al.*, 1975]; il secondo, oggetto della presente recensione, è stato presentato dal prof. Bieniawski, Direttore della Sezione Geotecnica del Consiglio per la Ricerca Scientifica ed Industriale del Sud Africa. Entrambi si basano sul medesimo schema operativo (le caratteristiche geotecniche dell'ammasso roccioso sono espresse mediante

(*) Si propone qui l'uso delle espressioni « tempo caratteristico » e « lunghezza caratteristica » della galleria, rispettivamente, per tradurre i termini anglosassoni « stand up time » e « unsupported rock span ».

Il tempo caratteristico T è il tempo che intercorre fra il momento dello scavo e quello dell'inizio dei franamenti in un profilo non rivestito e scavato secondo il metodo tradizionale di avanzamento, cioè mediante perforazione e brillamento.

La lunghezza caratteristica L di un tronco di galleria è la distanza che intercorre fra il fronte di attacco ed il cantiere del priverestimento, con l'avvertenza che se tale distanza è superiore al diametro b della galleria si assume sempre $L = b$ (v. figura).



indici numerici) e prendono in esame i medesimi parametri, quali l'RQD, l'orientazione, l'apertura e la rugosità dei giunti, la presenza di acqua, la resistenza del materiale intatto.

Diverso è però il grado di dettaglio a cui essi sono spinti, e diversi vorrebbero essere gli obiettivi che gli Autori si propongono.

Infatti, a differenza della classifica norvegese, rivolta specificamente al dimensionamento dei sostegni nelle costruzioni in sotterraneo, il criterio di Bieniawski viene presentato come un metodo di progetto molto generale, applicabile non solo alle gallerie, ma anche alle fondazioni ed ai pendii.

In pratica, però, anche la classifica sudafricana riesce effettivamente utile soltanto nel campo delle costruzioni in sotterraneo ove, come prima accennato, una parte considerevole è affidata alla esperienza ed all'osservazione diretta, piuttosto che nei problemi di stabilità di pendii, o di carico limite di fondazioni superficiali, già affrontati e risolti per via teorica con criteri ormai confermati dall'esperienza.

Mediante la classifica norvegese sembra inoltre possibile condurre una analisi più dettagliata dei parametri geotecnici presi in considerazione; ci si può chiedere, però, se questo approfondimento costituisca un effettivo vantaggio, o se non si risolve invece in un perfezionamento eccessivo, e quindi poco indicativo, di uno strumento fondato sostanzialmente su basi empiriche.

2. La classifica geomeccanica sudafricana

L'A. prende in considerazione sei fattori, alcuni dei quali rilevabili solo in sito:

- la resistenza del materiale intatto;
- l'indice di qualità dell'ammasso RQD;

- la frequenza dei giunti;
- l'apertura e la scabrezza dei giunti;
- l'orientazione dei giunti;
- la pressione neutra e la portata idrica nei giunti.

Se le discontinuità sono molto distanziate e la roccia è tenera, il comportamento meccanico globale è caratterizzato dalla resistenza della roccia integra; è noto, fra l'altro, che per tensioni molto elevate la resistenza dell'ammasso giuntato coincide in ogni

di applicazione del carico, indice che ha le dimensioni di una tensione e che può essere posto in relazione con la resistenza a rottura per compressione a dilatazione libera σ_r .

Studi sperimentali compiuti da BROECH e FRANKLIN, D'ANDREA e dallo stesso BIENIAWSKI, hanno infatti dimostrato che il rapporto σ_r/I_s assume mediamente il valore di 24.

In ogni altro caso il comportamento meccanico dell'ammasso è regolato dai

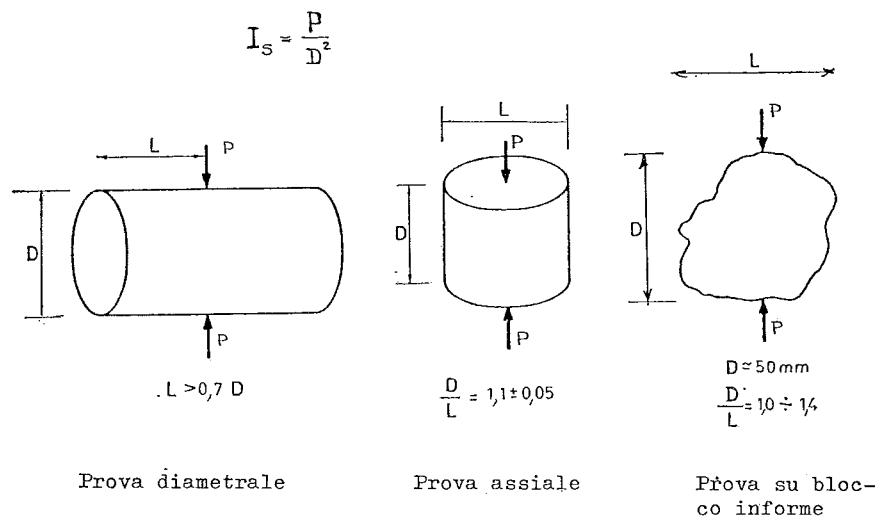


Fig. 1. - Schema della prova di rottura per applicazione di carichi concentrati.

caso con quella della roccia integra, mentre i piani di discontinuità cessano di essere piani di minore resistenza.

La resistenza del materiale intatto può essere determinata mediante prove di compressione a dilatazione trasversale libera, o con applicazione di carichi concentrati.

Quest'ultima prova, di semplice esecuzione anche in cantiere, può essere effettuata su carote del materiale o addirittura su blocchi informi, secondo lo schema di fig. 1, e fornisce un indice I_s , rapporto fra il carico di rottura ed il quadrato della distanza tra i punti

fattori che caratterizzano i sistemi dei giunti, fra i quali i più importanti sono l'orientazione, la frequenza, l'apertura, il tipo di materiale di riempimento e lo stato della superficie.

Di alcuni di questi parametri l'A. tiene globalmente conto, anche se in modo incompleto e discutibile, introducendo nella classifica l'indice RQD.

Di altri, come l'orientazione nello spazio dei sistemi di giunti, è necessaria una valutazione particolare. Esistono al riguardo diverse convenzioni: quella adottata da Bieniawski, che è la più diffusa, è riportata nella fig. 2.

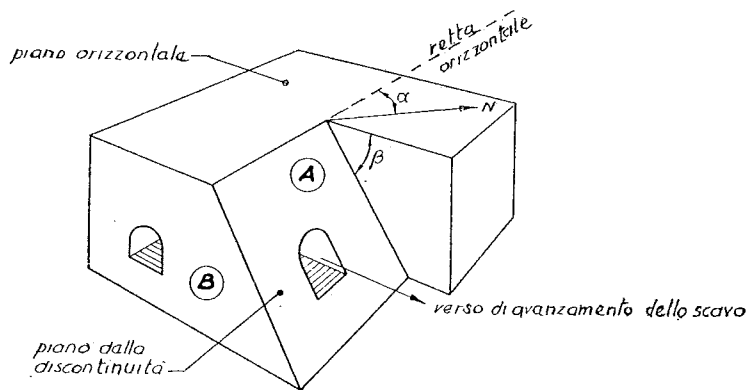


Fig. 2. - Definizione del sistema di riferimento del piano di discontinuità; sono anche riportate due possibili posizioni della galleria rispetto al piano di discontinuità, per facilitare l'uso della tab. I. Nella posizione « A » la pendenza dei piani di discontinuità è concorde con il verso di avanzamento dello scavo.

È noto, infine, come la presenza dell'acqua abbia un effetto importante sul comportamento degli ammassi rocciosi. Per tenere conto di questo l'A. introduce nella classifica il valore della portata idrica, in l/sec, che affluisce in un determinato tratto di galleria, ed un parametro adimensionale, che si è indicato con R_w , rapporto fra la pressione dell'acqua nei giunti e la tensione principale agente nella zona considerata.

2.1. Uso della classifica geomeccanica sudafricana

La classifica, riportata nelle tabelle e nei grafici che seguono, si può considerare suddivisa in due parti: la prima ha lo scopo di valutare, in generale, le proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso in esame; la seconda propone degli orientamenti per il progetto e l'esecuzione dei manufatti che debbono avere sede nell'ammasso stesso.

Si ritiene opportuno precisare che, nell'intento di fornire all'operatore del settore uno strumento completo e di facile uso, l'impostazione originaria dell'Autore è stata leggermente modificata, nella presente recensione, senza tuttavia alterare la sostanza. Alcune tabelle sono state quindi sostituite con grafici che pongono in evidenza più chiaramente il peso dei vari elementi nella sommatoria finale. Altre tabelle sono state modificate nella forma espositiva. Infine, per evitare ripetizioni, le grandezze fondamentali sono state indicate con i simboli elencati in appendice.

Per l'uso della classifica è necessario:

- valutare in sito i parametri innanzi definiti;
- ricavare, attraverso gli assi orientati di fig. 3, il punteggio parziale n_i relativo a ciascun parametro;
- calcolare l'indice N dell'ammasso come $N = \sum n_i$.

Gli ammassi rocciosi vengono raggruppati, in funzione di N , in cinque classi. Questa suddivisione è considerata dall'A. sufficiente per fornire una differenziazione significativa nei confronti di tutti i parametri. Un numero maggiore di classi creerebbe difficoltà di lavoro, mentre un numero minore non offrirebbe una distinzione sufficientemente chiara.

Inserito l'ammasso in una delle cinque classi di qualità è possibile, mediante la Tab. II, ottenere informazioni sul significato della classe stessa in termini di proprietà meccaniche (coesione ed angolo di attrito equivalenti) e di comportamento (difficoltà di scavo e tempo caratteristico dell'ammasso).

Si può quindi particolarizzare il problema, riferendolo ai lavori in galleria, mediante la seconda parte del lavoro di Bieniawski.

L'A. propone anzitutto un grafico in scala logaritmica che lega il tempo

TABELLA I

Valutazione degli effetti della orientazione dei giunti per il calcolo dell'indice parziale n_6 in gallerie sub-orizzontali

galleria in posizione A				galleria in posizione B		pendenza $\beta = 0^\circ \div 20^\circ$ qualunque sia la direzione
pendenza β						
concorde con il verso di avanzamento		discorde dal verso di avanzamento				
$45^\circ \div 90^\circ$	$20^\circ \div 45^\circ$	$20^\circ \div 45^\circ$	$45^\circ \div 90^\circ$	$20^\circ \div 45^\circ$	$45^\circ \div 90^\circ$	
molto favorevole	favorevole	sfavorevole	discreto	molto sfavorevole	sfavorevole	

TABELLA II

Proprietà meccaniche e comportamento degli ammassi rocciosi

$N = \Sigma n_i$	$0 \div 25$	$25 \div 50$	$50 \div 70$	$70 \div 90$	$90 \div 100$
classe	V	IV	III	II	I
qualità dell'ammasso	molto scadente	scadente	discreta	buona	ottima
c kg/cm ²	> 1	1 ÷ 1,5	1,5 ÷ 2,0	2,0 ÷ 3,0	> 3,0
φ	< 30°	30° ÷ 35°	35° ÷ 40°	40° ÷ 45°	> 45°
giudizio sulle difficoltà di scavo	nessuna difficoltà	può essere cavato facilmente Frammentazione notevole	discrete difficoltà	si cava con difficoltà Frammenti di notevoli dimensioni	notevoli difficoltà di scavo
T L m	10 min 0,5	5 ore 1,5	1 settimana 2	6 mesi 4	10 anni 5

caratteristico alla lunghezza caratteristica (fig. 4).

Si tratta del tipo di impostazione introdotto da LAUFFER [1958] nei suoi lavori e qui modificato e perfezionato.

La tabella III fornisce, invece, per ogni classe di roccia, informazioni sul tipo di avanzamento da adottare nello scavo (a sezione piena o parziale) nonché sulla scelta dei provvedimenti di sicurezza che devono essere adottati durante e dopo i lavori, per permettere di ricavare la sezione di scavo secondo i piani di progetto e per impedire franamenti e deformazioni inammissibili prima del rivestimento definitivo.

Provvedimenti di sicurezza sono principalmente gli ancoraggi, le centine metalliche, i rivestimenti in calcestruzzo proiettato, le reti metalliche ed eventualmente la protezione mobile del fronte di attacco.

I provvedimenti di sicurezza proposti da BIENIAWSKI sono largamente cautelativi; probabilmente, egli avverte, il rivestimento provvisorio così dimensionato potrebbe assolvere alle funzioni di rivestimento definitivo. A suo parere, però, finché le conoscenze in

materia saranno, come sono attualmente, ben lungi dall'essere complete, non è giustificata una riduzione degli attuali margini di sicurezza.

Come prima accennato, l'A. affronta anche i problemi della stabilità dei pendii rocciosi e delle fondazioni sugli ammassi, attraverso l'indice n_6 .

L'approccio appare tuttavia piuttosto empirico perché i valori dell'indice sarebbero scelti soltanto sulla base di giudizi qualitativi (favorevole, molto favorevole, sfavorevole ecc.).

Per quanto già accennato nella premessa si sono quindi esclusi, nel grafico di fig. 3, i valori di n_6 relativi ai pendii ed alle fondazioni.

3. Applicazione ad un caso reale

Sembra utile riportare a titolo di esempio, una applicazione della classifica sudafricana ad un caso reale.

Si è verificato recentemente in Sud Africa un crollo nel cantiere di una galleria stradale.

La galleria veniva scavata, con avanzamento in calotta, in quarzite legger-

mente alterata; le dimensioni del cunicolo di avanzamento erano all'incirca di 5 m di larghezza per 5 m di altezza.

Cinque mesi dopo lo scavo si ebbe il franamento di un tratto del cunicolo non ancora rivestito.

Essendo quindi noti il tempo caratteristico (cinque mesi) e la lunghezza del tronco crollato, nonché le caratteristiche dell'ammasso roccioso, è stato possibile svolgere una « back analysis » del dissesto facendo uso della classifica geomeccanica sudafricana.

Le caratteristiche dell'ammasso erano le seguenti:

Con $N = 72$ l'ammasso ricade nella seconda classe (roccia buona).

Il grafico di fig. 4 fornisce, in corrispondenza della seconda classe, e per una lunghezza caratteristica di 5 metri (*), un tempo caratteristico teorico di circa 1600 ore (67 giorni), alquanto inferiore al tempo realmente intercorso fra l'epoca dello scavo e quella del dissesto.

Dalla tabella III si desume che la gal-

(*) Essendo la lunghezza del tronco crollato minore della larghezza dello scavo stesso.

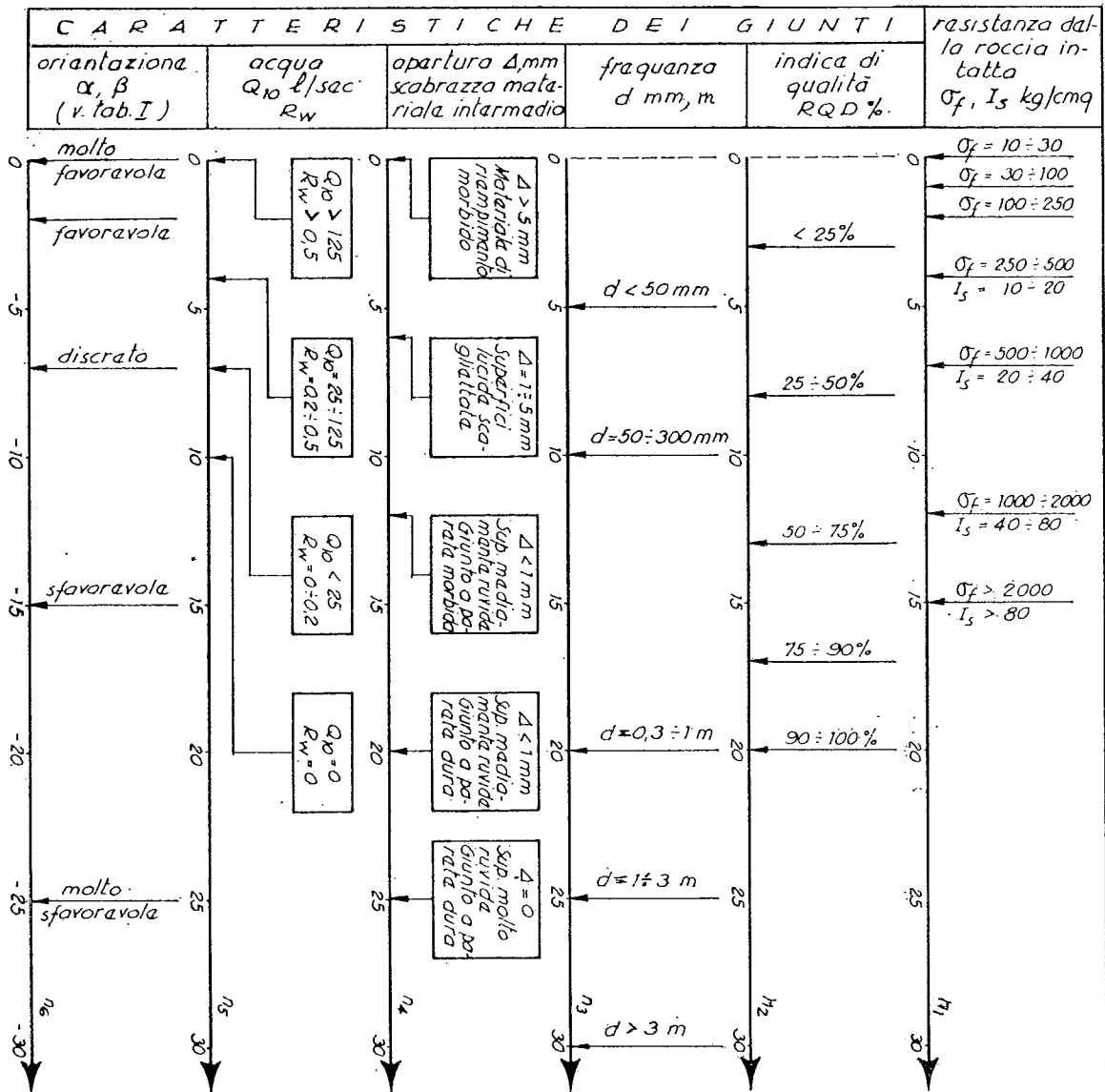


Fig. 3. - Grafici per la classifica degli ammassi rocciosi. Per l'indice n_6 (orientazione dei giunti) è necessario fare uso preliminarmente della tab. I per valutare l'influenza della pendenza (dip) e della direzione (strike) dei sistemi di giunti.

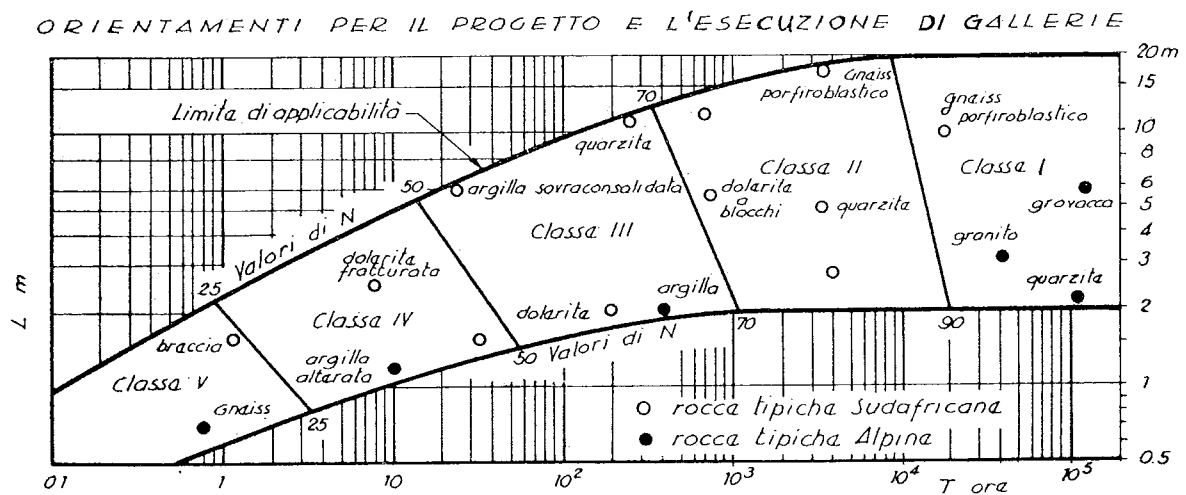


Fig. 4. - Relazione sperimentale fra il tempo caratteristico T e la lunghezza caratteristica L.

TABELLA III

Scelta delle modalità di avanzamento e dei provvedimenti di sicurezza in funzione dell'indice N

classe ammasso		V	IV	III	II	I
N	0	25	50	70	90	100
Avanzamento	a sezione parziale			a piena sezione		
	avanzamento con cunicoli e allarghi	avanzamento in calotta				
	a 0,5 ÷ 1 m dal prriverstimento	ad 1 ÷ 1,5 m dal prriverstimento	ad 1,5 ÷ 3 m dal prriverstimento	ad 1 ÷ 1,5 m dal prriverstimento	a 3 m dal prriverstimento	
SOSTEGNI PROVVISORI	* bulloni	(Bulloni di) lunghezza 5 ÷ 6 m disposti regolarmente con spaziatura 1 ÷ 1,5 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica. Bulloni in arco rovescio	(Bulloni di) lunghezza 4 ÷ 5 m, disposti regolarmente con spaziatura 1 ÷ 1,5 m in calotta e sulle pareti con rete metallica	(Bulloni di) lunghezza 3 ÷ 4 m, disposti regolarmente con spaziatura 1,5 ÷ 2 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica in calotta	Localmente (bulloni) in calotta, lunghezza 2 ÷ 3 m, spaziatura 2 ÷ 2,5 m, collegati eventualmente da rete metallica	Non è richiesto rivestimento ad eccezione di qualche bullone isolato
	calcestruzzo proiettato	150 ÷ 200 mm in calotta, 150 mm sulle pareti e 50 mm sul fronte di scavo. Applicare il più presto possibile dopo avere usato gli esplosivi	100 ÷ 150 mm in calotta e 100 mm sulle pareti. Può essere applicato anche mentre si effettua lo scavo	50 ÷ 100 mm in calotta e 30 mm sulle pareti	50 ÷ 100 mm in calotta come base per impermeabilizzante	
	centine	profilati pesanti in acciaio inossidabile a distanza di 1,5 m; traverse in arco rovescio	profilati leggeri a distanza di 1,5 m se necessari	non necessarie	non necessarie	

* diametro 20 mm, lunghezza pari a metà larghezza della galleria

Parametro considerato		Valore rilevato		Indice parziale n_i
σ_t kg/cm ²		15		12
RQD %		90 ÷ 94		20
Frequenza dei giunti	Sistema n.	d m	n_3	22 (*)
	1	0,3 ÷ 1,0	20	
	2	0,3 ÷ 0,6	20	
	3	2	25	
Apertura e scabrezza dei giunti		Giunti continui, $\Delta > 1$ mm superfici ruvide		15
Acqua		$Q_{10} = 0$; $R_w = 0$		10
Orientazione dei giunti	Sistema n.	orientazione	n_6	-7 (*)
	1	orizzontale	-10	
	2	verticale posizione « B »	-12	
	3	verticale posizione « A »	0	
N		$\Sigma n_i =$		72

(*) Media dei valori degli indici n_3 ed n_6 rilevati nei diversi sistemi di giunti.

leria avrebbe dovuto essere sostenuta, entro due mesi, mediante uso di bulloni di 2,5 metri distanziati di 2 ÷ 3 m, con eventuale rete metallica in calotta per prevenire rotture locali.

L'esempio mostra, fra l'altro, come il criterio in esame sia a vantaggio della sicurezza.

5. Conclusioni

In conclusione, i casi esaminati mostrano chiaramente le possibilità di applicazione della classifica geomeccanica sudafricana nell'ingegneria civile e nelle applicazioni minerarie.

È sempre opportuno, comunque, tenere presente che un approccio di questo tipo può servire soltanto in via di prima approssimazione e che i risultati del calcolo vanno in ogni caso verificati in sito con opportuni rilevamenti in corso d'opera.

L'A. consiglia infatti di effettuare, durante lo svolgimento dei lavori, livellazioni molto accurate per accertare eventuali cedimenti o rigonfiamenti, misure di deformazione lungo sezioni trasversali della galleria, misure di pressione totali sul rivestimento lungo

la superficie di separazione roccia-calcestruzzo, e misure estensimetriche entro fori.

Con queste premesse, e tenuto conto delle inevitabili limitazioni, la classifica sudafricana è in ogni caso un mezzo molto efficace per valutare le condizioni dell'ammasso roccioso in cui l'opera deve inserirsi, e per ricavare informazioni utili alla stesura del progetto esecutivo.

(Armando D'Amico)

6. Appendice

Elenco dei simboli

σ_t (kg/cmq) resistenza alla compressione a dilatazione trasversale libera;
 I_s (kg/cmq) indice di resistenza da prove di rottura con carichi concentrati;

RQD % (Rock quality designation), indice di qualità dell'ammasso;
 d (mm, m) distanza fra due giunti contigui;
 Δ (mm) apertura del giunto;
 Q_{10} (l/sec) contributo di portata idrica che defluisce da un tronco di galleria lungo 10 m;
 R_w indice di pressione neutra nei giunti: rapporto fra la pressione neutra nei giunti e la tensione principale massima ($R_w = P_w/\sigma_1$);
 c (kg/cmq) coesione equivalente dell'ammasso;
 φ angolo di attrito equivalente dell'ammasso;
 α, β direzione (strike) e pendenza (dip) dei piani dei giunti (v. fig. 2);
 T (ore) tempo caratteristico;
 L (m) lunghezza caratteristica.

BIBLIOGRAFIA

- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1975) - *Estimation of supports requirement for underground excavations*. 16th Symposium on Rock Mechanics. University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- DEERE U. D., PECK R. B., PARKER H. W. (1970) - *Design of tunnel supports systems*. Highway Research Record n. 339.
- LAUFFER H. (1958) - *Gebirgsklassifizierung für den Stollen*. Geologie und Bauwesen, Vol. 24.
- TERZAGHI K. (1946) - *Rock defects and loads on tunnel supports*. Rock tunnelling with steel supports, Proctor and White, Commercial Shearing and Stamping Company. Youngstown, Ohio.