

DETERMINAZIONE IN LABORATORIO DEI PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO DI ROCCE CARBONATICHE: ANALISI COMPARATA TRA DIVERSE METODOLOGIE

Scaglione G., Frasca A., Biondi G., Amato B., Cascone G., Buonmestieri S.

“Settore Geologia e Geognostica Provincia Regionale di Ragusa”

Riassunto

La valutazione dei parametri di un ammasso roccioso può essere effettuata direttamente in situ attraverso varie classificazioni geomeccaniche (Bieniawski, Burton, Wickham, etc.).

Determinazioni dirette possono essere effettuate attraverso prove di laboratorio che, essendo eseguite su provini, hanno il vantaggio di determinare con maggior precisione il parametro geomeccanico ricercato. Di contro, vi è la difficoltà, non sempre superata, di reperire provini sufficientemente rappresentativi dell'intero ammasso.

La determinazione dei parametri di resistenza al taglio su roccia può risultare utile nelle verifiche geomeccaniche degli aggrottati del territorio ragusano.

Il presente lavoro in itinere, dopo una succinta descrizione dei principali metodi di classificazione degli ammassi rocciosi, si propone di sensibilizzare maggiormente i tecnici nell'utilizzo di prove di laboratorio su rocce e suggerire una metodologia per mettere a confronto i parametri ottenuti con prove di taglio diretto con quelli ricavati "indirettamente" da prove di compressione semplice e prove brasiliane. Il materiale analizzato è costituito da litotipi calcarei provenienti dalle latomie di Cava Gonfalone. In particolare, la prova a trazione indiretta (brasiliana) viene interpretata come una prova di compressione inversa rappresentabile sul settore negativo di un diagramma di Mohr.

Summary - Laboratory determination of the parameters of shear strength on limestones: comparative analysis of different methodologies.

The evaluation of the parameters of a limestone can be done directly in situ through different geomechanical classifications (Bieniawski, Burton, Wickham, etc).

Scientific observations can be done through laboratory tests which, being carried out on samples, have the advantage of determining with better precision the researched geomechanical parameter. Nevertheless there is generally the difficulty of finding samples representative enough of the whole limestone.

The determination of the parameters of shear strength of limestone can be useful in the geomechanical check-up of the stone quarries of the ragusan land.

This work in progress, after a brief description of the chief methods of limestone classification, aims at awakening more technicians to the use of laboratory tests on the limestones and at suggesting a method for making a comparison between the parameters gained with direct shear tests and those gained "indirectly" from simple compression tests and brazilian tests. The limestone samples analyzed come from the stone quarries of Gonfalone.

In particular, the indirect traction test (brazilian) is interpreted as an inverted compression test which can be represented on the negative area of the Mohr's diagram.

Caratterizzazione geologica e geotecnica

Per meglio comprendere il comportamento geomeccanico di un ammasso roccioso, la caratterizzazione geologica e geotecnica assume una rilevanza del tutto particolare, in quanto dalla corretta esecuzione delle indagini che riguardano tale attività e dalla elaborazione/interpretazione dei risultati consegue, in modo determinante, la “conoscenza geomeccanica” dell’ammasso.

La caratterizzazione geologica e geotecnica comprende la progettazione e l’esecuzione delle indagini geologico-tecniche e la valutazione dei risultati ottenuti per l’individuazione del “modello geotecnico del sottosuolo” che sarà interessato dall’opera.

La caratterizzazione geotecnica ha come obiettivo la individuazione del modello geotecnico del sottosuolo e la conseguente quantificazione dei parametri da utilizzare in analisi progettuali. Come illustrato nel seguente schema, si tratta di ricorrere alla classica distinzione tra i modelli che si basano sull’ipotesi di continuo, continuo equivalente e di quelli nei quali si tiene esplicitamente conto della presenza delle discontinuità e ricorrono alla rappresentazione dell’ammasso roccioso come discontinuo.

TIPO DI TERRENO	TIPO DI MODELLO	CARATTERISTICHE DI COMPORTAMENTO
Terreni sciolti	Continuo	Comportamento omogeneo
Ammassi rocciosi fratturati	Continuo equivalente	Si tiene conto dell’effetto delle discontinuità in senso globale
Ammassi rocciosi fratturati	Discontinuo	Le discontinuità sono parte determinante del modello e si dovrà, anche per esse, scegliere una legge di comportamento soddisfacente

Tipicamente il modello continuo viene utilizzato per i terreni sciolti.

Il modello continuo equivalente ed il modello discontinuo vengono adottati alternativamente per la descrizione del comportamento degli ammassi rocciosi. Nel modello continuo equivalente il comportamento adottato deve consentire di tenere conto dell’effetto delle discontinuità in senso globale; cioè il comportamento meccanico dell’ammasso viene ritenuto “omogeneo”. Ciò non significa, ovviamente, che le caratteristiche meccaniche dell’ammasso siano le stesse per tutta la sua estensione, ma è lecito presumere che tali caratteristiche rientrino in un range di valori abbastanza ristretto rispetto ad un ammasso roccioso fratturato caratterizzato da un modello di tipo discontinuo. Infatti, in quest’ultimo modello, le discontinuità sono parte determinante del modello e si dovrà, anche per esse, scegliere una legge di comportamento soddisfacente.

L’uso di un modello o dell’altro (continuo o discontinuo) dipende sostanzialmente dalla spaziatura delle discontinuità, dal tipo di discontinuità e dalle dimensioni dello scavo; esiste un ampio campo di sovrapposizione in cui può essere utile applicare entrambi i modelli e confrontarne i risultati.

Classificazioni dell’ammasso roccioso

Al fine di caratterizzare un ammasso roccioso, negli ultimi anni si sono sviluppate delle tecniche che consentono di classificarlo in base alle sue caratteristiche: litologia, tipo di discontinuità, frequenza, etc.

Le classificazioni consentono di assegnare una classe di qualità all’ammasso roccioso in esame. Essendo ogni classe associata ad un indice numerico, l’ammasso roccioso viene concordemente suddiviso in regioni omogenee; quindi, sulla base delle risultanze dei rilievi geostrutturali e delle perforazioni di sondaggio si procede alla determinazione degli indici di classificazione.

Ad oggi, i metodi più diffusamente usati per classificare gli ammassi rocciosi sono:

- ✓ RSR (Rock Structure Rating System) (Wickham et al. 1972)
- ✓ Q (Barton et al., 1974, Grimstad & Barton, 1993)
- ✓ RMR (Rock Mass Rating System) (Bieniawski, 1973, Bieniawski, 1989)
- ✓ GSI (Geological Strength Index) (Hoek, 1994, Hoek et al., 1995, Hoek et al., 1997)
- ✓ Önorm B 2203 (Lauffer, 1997).

Classificazione mediante RSR

Il metodo RSR, introdotto da Wickham et al. (1972), rappresenta il primo tentativo di esprimere quantitativamente la qualità di un ammasso roccioso mediante la somma degli indici numerici abbinati ad ogni parametro ritenuto caratteristico. I fattori che influenzano la risposta allo scavo sono raggruppati in tre parametri di base, indicati con A, B e C:

- Parametro A, rappresentativo della struttura della roccia e comprendente: l’origine del litotipo; la durezza della roccia; la struttura geologica (massiva, leggermente fratturata, moderatamente fratturata e intensamente fratturata).
- Parametro B, che tiene conto dell’influenza della giacitura delle discontinuità e comprende: la spaziatura dei giunti; l’orientazione dei giunti; la direzione di avanzamento dello scavo
- Parametro C, relativo agli effetti del flusso idraulico sotterraneo

Ad ognuno dei tre parametri è associato un indice numerico; la somma di tutti gli indici fornisce il valore di RSR per l’ammasso analizzato.

Classificazione mediante Q

Il metodo Q, introdotto da Barton et al. (1974), prevede la definizione, per l’ammasso roccioso in esame, di sei parametri:

- recupero percentuale modificato RQD (Rock Quality Designation)
- J_n , funzione del numero di sistemi principali di discontinuità presenti
- J_r , funzione del grado di scabrezza a piccola e grande scala delle superfici di discontinuità
- J_a , funzione delle condizioni delle superfici di discontinuità (alterazione, riempimento)
- J_w , coefficiente di riduzione che tiene conto delle venute di acqua
- SRF, fattore di riduzione funzione dello stato tensionale in sito.

Noto il valore di RQD e l’indice numerico associato ad ognuno degli altri parametri, si calcola un valore di Q caratteristico dell’ammasso roccioso ed una relativa classe di qualità. Sono previste nove classi, per valori di Q variabili

da meno di 0.01 a 1000.

L'indice Q, per ammassi rocciosi di buona qualità può anche essere posto in relazione con V_p , la velocità dell'onda elastica longitudinale in sito (Barton, 1996):

$$V_p = \log Q + 3.5 \quad (\text{dove } V_p \text{ è espresso in km/s})$$

Classificazione mediante RMR

Il metodo RMR, introdotto da Bieniawski (1973), prevede la definizione di sei parametri (Bieniawski, 1989):

- resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta
- recupero percentuale modificato RQD (Rock Quality Designation)
- spaziatura delle discontinuità
- condizioni delle discontinuità
- venute d'acqua
- orientazione delle discontinuità in rapporto alla direzione di scavo.

Dalla somma degli indici numerici relativi ai primi cinque parametri si ottiene l'RMR di base, tanto più elevato quanto migliore è la qualità dell'ammasso roccioso. Il sesto parametro è legato alla valutazione dell'influenza della giacitura dei sistemi di discontinuità principali sull'opera per la quale si esegue la classificazione. Dal valore di RMR è possibile risalire ai valori di coesione e angolo di attrito dell'intero ammasso roccioso:

$$C = 5 \text{ RMR (kpa)} \quad \varphi = (\text{RMR}/2) + 5$$

Classificazione mediante GSI

Il metodo GSI (Geological Strength Index), dovuto ad Hoek (1994) si fonda sulla semplice identificazione, mediante apposita tabella, di una categoria di appartenenza dell'ammasso roccioso in esame, in funzione di una sua descrizione qualitativa, nella quale si fa riferimento alle osservazioni in sito, tendenti ad individuare le famiglie di discontinuità e le condizioni delle loro superfici di contatto. Il calcolo di GSI consente di stimare i parametri di resistenza al taglio previsti dal criterio Mohr-Coulomb ($t = c' + \sigma \text{ tg } \varphi$):

- angolo di attrito interno

$$\varphi' = \arcsen \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}}$$

- coesione

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}'] (s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + [6am_b(s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}] / [(1+a)(2+a)]}}$$

in cui a , m_b ed s sono costanti tipiche di ciascun materiale, calcolabili come funzioni di GSI.

Classificazione basata sulla risposta della roccia allo scavo, Önorm B 2203/1994 (Laufer, 1997)

La necessità di costruire gallerie anche in siti ove le condizioni geologico-geotecniche si presentano estremamente irregolari e disuniformi, ha spinto diversi autori a definire dei metodi di classificazione degli ammassi rocciosi basati sulla risposta della roccia allo scavo.

Un'efficace risposta a queste esigenze è il sistema di classificazione previsto dal Codice Austriaco Önorm B 2203/1994 (Laufer, 1997), basato su tre fasi fondamentali:

- Suddivisione della massa rocciosa incontrata durante lo scavo della galleria in sezioni strutturalmente omogenee, raccolta e interpretazione dei dati geologico-geotecniche utili a descrivere in modo completo la roccia, in ogni sezione
- Definizione, per ogni sezione omogenea, del tipo di ammasso roccioso. In questa fase ci si avvale di un'apposita tabella che fornisce, per ogni tipo di ammasso roccioso, la classe di qualità, il comportamento meccanico dell'ammasso ed il tipo di sostegno da utilizzare durante lo scavo della galleria
- Definizione di una classe di scavo, basata essenzialmente sul tipo di supporto necessario e sulla lunghezza di avanzamento. La classe di scavo è caratterizzata da due indici numerici: il primo, relativo alla massima lunghezza di avanzamento; il secondo, dato da un fattore adimensionale di sostegno (SF).

Poiché il comportamento dell'ammasso roccioso allo scavo è influenzato dal tipo di TBM utilizzato e dalla sua velocità di avanzamento, è possibile definire una classe di scavo solo per uno specifico progetto e quindi per una particolare macchina di scavo.

Correlazioni tra gli indici di classificazione

Vari autori, nel corso degli ultimi anni, hanno cercato di correlare i vari indici di classificazione dell'ammasso roccioso. Sulla base di analisi eseguite su 117 casi relativi a progetti di gallerie eseguite in tutto il mondo, Bieniawski e Orr (1976) hanno fornito una relazione empirica che lega i due indici di classificazione RMR e Q:

$$\text{RMR} = 9 \ln Q + 44 \quad (5)$$

Successivamente Rutledge e Preston (1978) hanno definito altre relazioni che legano i tre metodi di classificazione RSR, RMR e Q:

- $\text{RMR} = 13.5 \log Q + 43$
- $\text{RSR} = 0.77 \text{ RMR} + 12.4$
- $\text{RSR} = 13.3 \log Q + 46.5$

Nel 1995 Barton, sulla base di lavori in galleria effettuati in Europa e India, propose un'ulteriore relazione tra gli RMR e Q:

$$\text{RMR} = 50 + 15 \log Q$$

Prove di laboratorio

Descrizione del sito di prelievo

Al fine di poter caratterizzare un ammasso roccioso sotto il profilo geomeccanico, nel presente lavoro, sicuramente non esaustivo e da integrare con ulteriori verifiche, sono stati prelevati dei campioni di calcarenite tenera e di calcarenite ben cementata in corrispondenza di una grande discontinuità presente all'interno della latomia di cava Gonfalone.

Le latomie non sono altro che antiche cave risalenti ai secoli scorsi ed utilizzate per lo sfruttamento di materiale da costruzione, tramite coltivazione a camere e pilastri. Cave di

questo tipo risultano sparse un pò ovunque, intorno all'abitato di Ragusa.

La cava si estende con un fronte di circa 400 metri, una profondità di 150 metri ed un'altezza dai 10 ai 15 metri. La cavità ha subito in passato una serie di interventi di consolidamento delle volte, attraverso la costruzione di pilastri in cemento armato.

Questa cavità, oltre a essere interessata da una fitta serie di leptoclasti, risulta attraversata per tutta la sua lunghezza da una grossa discontinuità strutturale avente direzione N10°E ed inclinazione superiore ai 70°. Secondo alcuni autori, la discontinuità presenta tra i suoi due lembi un leggero spostamento e quindi può essere considerata una faglia; altri autori non ritengono che tale discontinuità presenti uno spostamento e considerano la stessa una grossa diaclasi. Ciò che è certa è la notevole infiltrazione d'acqua che sta producendo un progressivo allargamento dovuto alla corrosione chimica tipica dei processi carsici. Sul pavimento della latomia, in corrispondenza dell'intersezione con il piano di discontinuità, un abbondante accumulo di argille rossastre evidenzia un trasporto solido operato dall'acqua, dalla superficie esterna verso l'interno della cavità.

Il prelievo di campioni di calcarenite dura e tenera è stato effettuato in corrispondenza della suddetta discontinuità.

Prove effettuate

Sono stati prelevati otto campioni, quattro di calcarenite tenera e quattro di calcarenite ben cementata per essere sottoposti alle seguenti prove meccaniche:

- prova di compressione
- prova di resistenza a trazione indiretta
- prova di taglio su campioni integri
- prova di taglio su campioni fessurati

Per quanto concerne la prova di resistenza a compressione, i campioni sono stati risagomati, utilizzando una sega per rocce, in cubi di 71 mm di diametro e sottoposti a compressione con pressa da 2.000 KN, secondo la normativa UNI 9724 parte III. Le prove di resistenza a trazione indiretta, note anche come prove di compressione brasiliana, e le prove di taglio sono state effettuate ricarotando i campioni con una carotatrice elettrica, fino a portarli a cilindri con diametro di 54 mm ed altezze di 27 mm, per la prova brasiliana, e di 100 mm per la prova di taglio. Le normative seguite sono state la ISRM 1978, per le prove brasiliane, e la ISRM 1974 per le prove di taglio.

Rappresentazione risultati

resistenza a compressione - resistenza a trazione

(Raccomandazioni ISRM - Metodologie per la descrizione quantitativa delle discontinuità delle masse rocciose - da Rivista Italiana di Geotecnica n°2/93)

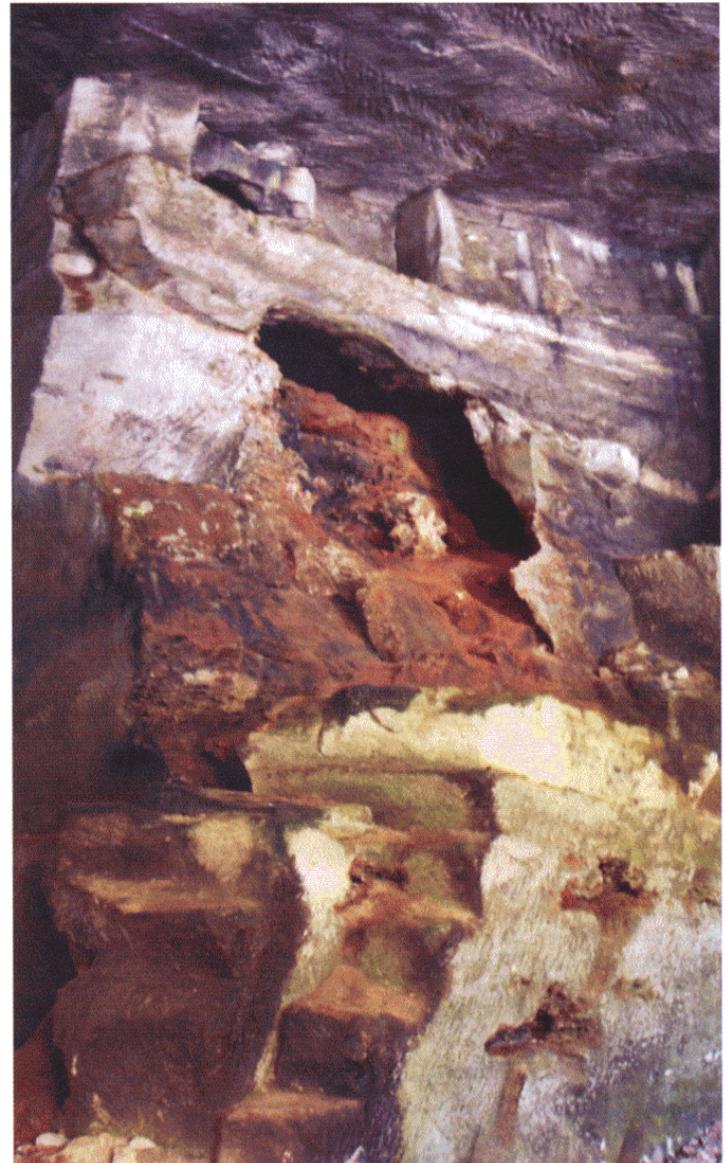
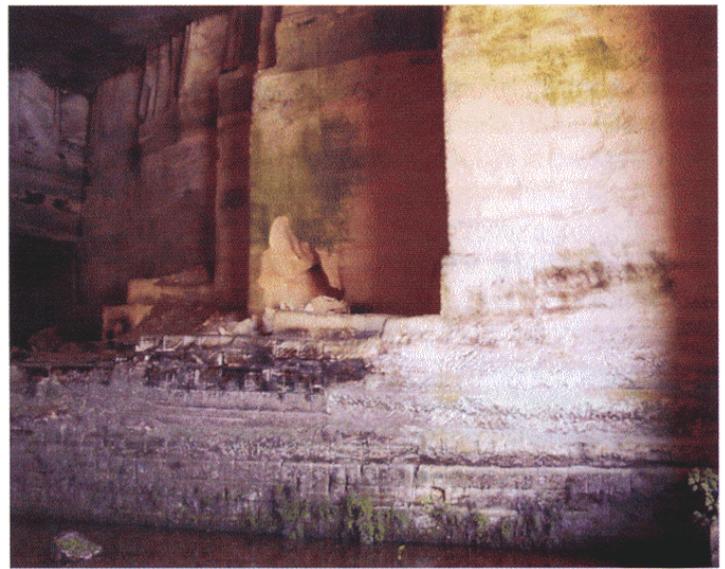
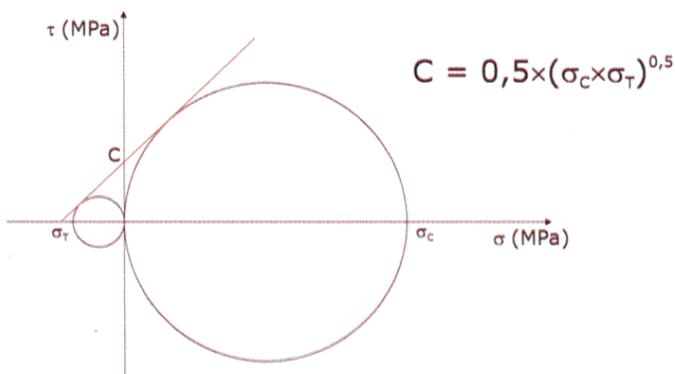
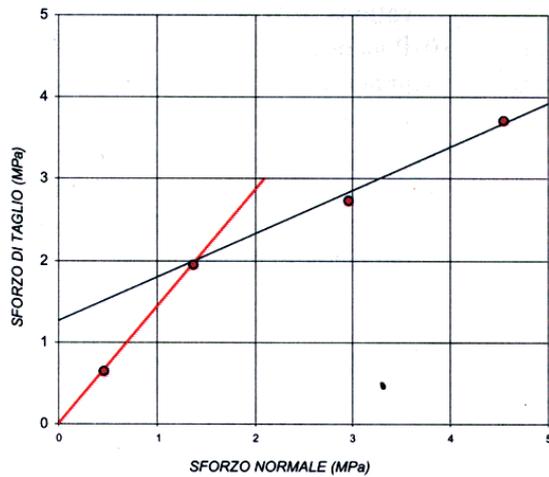


Foto cava Gonfalone: particolare discontinuità beante e veduta interna

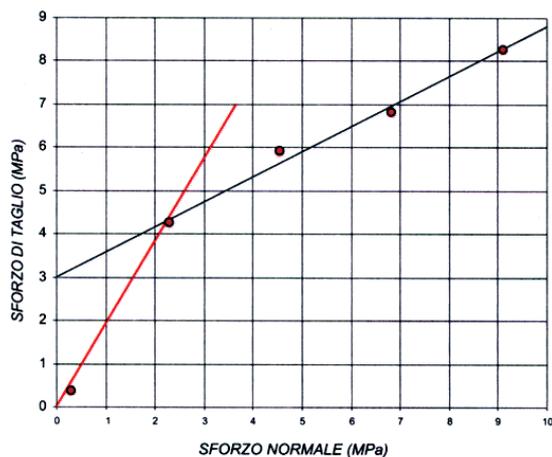
I risultati relativi alle prove di compressione e di trazione indiretta sono stati successivamente inseriti in diagramma di Mohr, considerando la prova brasiliana come una prova di compressione inversa, rappresentandola nel settore di ascissa negativa del diagramma stesso (vedi figura). Tutto ciò al fine di determinare la coesione relativa al superamento della resistenza in corrispondenza di ponti di roccia.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli di una



	VALORI A ROTTURA	
	Pressione MPa	Sforzo MPa
Provino 1	0,5	0,6
Provino 2	1,4	1,9
Provino 3	3,0	2,7
Provino 4	4,5	3,7

Taglio diretto su giunto - campione di calcarenite tenera



	VALORI A ROTTURA	
	Pressione MPa	Sforzo MPa
Provino 1	0,3	0,4
Provino 2	2,3	4,3
Provino 3	4,5	5,9
Provino 4	6,8	6,8
Provino 5	9,1	8,3

Taglio diretto su giunto - campione di calcarenite ben cementata

prova di taglio su campioni integri. Di seguito sono riassunti tutti i dati relativi alle prove effettuate.

Analisi dei risultati

I valori di resistenza ottenuti dalle prove di compressione: 12,51 Mpa per le calcareniti tenere e 36,06 per le calcareniti cementate sono leggermente più bassi (soprattutto il secondo dato) rispetto ai normali valori di resistenza di un campione superficiale avente le stesse caratteristiche. Ciò può essere dovuto, considerato il sito di prelievo, a processi di corrosione chimica che hanno indebolito l'intrinseca strut-

tura dei campioni.

La prova di taglio su provini fratturati ha evidenziato le due diverse litologie esaminate. Infatti, i valori di coesione, angolo di attrito ϕ_a e ϕ_b calcolati al di sotto e al di sopra della σ_a (tensione normale corrispondente all'istante di tranciamento delle irregolarità maggiori sulla superficie di taglio) sono nettamente più elevati nelle calcareniti cementate rispetto alle calcareniti tenere.

Il rapporto tra la resistenza a compressione e la resistenza a trazione è più basso nelle calcareniti tenere (5,5) rispetto a quelle cementate (7,5). La resistenza al taglio dovuta al superamento dei ponti di roccia, calcolata col metodo ISRM, risulta essere ampiamente compatibile col valore calcolato direttamente attraverso la prova di taglio su campioni integri, a conferma della validità delle ipotesi prima sunteggiate.

QUADRO RIEPILOGATIVO

		CALCARENITI TENERE	CALCARENITI BEN CEMENTATE
Taglio diretto Camp. fratturati	ϕ_a	55°	62°
	ϕ_b	28°	30°
	C	1,2 MPa	3,0 MPa
Resistenza a compressione σ_c		12,51 MPa	36,06 MPa
Resistenza a trazione σ_T		2,27 MPa	4,83 MPa
Rapporto σ_c/σ_T		5,5	7,5
Resistenza al taglio camp. Integri C		2,90 MPa	6,80 MPa
I.S.R.M. C		2,66 MPa	6,60 MPa

Considerazioni conclusive

Il presente lavoro, ben lungi dall'essere esaustivo, mira a sensibilizzare maggiormente i tecnici sull'utilità delle prove di laboratorio su rocce.

Le classificazioni dell'ammasso roccioso assumono una diversa valenza in funzione dell'ammasso roccioso considerato. Nel caso di un ammasso roccioso avente un modello geotecnico associabile al tipo "continuo equivalente", le classificazioni risultano essere importanti per uno studio di mas-

sima per meglio inquadrare la situazione in esame fornendo parametri per lo più qualitativi. Chiaramente, le classificazioni danno una valutazione di insieme e non possono in alcun modo sostituire le prove di laboratorio che forniscono parametri esclusivamente quantitativi.

Completamente diverso è il caso di un ammasso roccioso avente un modello geotecnico associabile al tipo "discontinuo". In tale situazione le classificazioni possono dar luogo a risultati aleatori e non rispondenti alla realtà considerata. In questo caso le prove di laboratorio, associate eventualmente a prove in sito, si dimostrano le uniche soluzioni per poter affrontare il problema in esame.

Per ciò che concerne le analisi effettuate all'interno di cava Gonfalone, risulta evidente che l'ammasso roccioso preso in esame sia associabile ad un modello di tipo discontinuo e pertanto non si ritiene utile caratterizzare tale ammasso con le classificazioni prima citate. Chiaramente, le analisi sono state effettuate solo sulla parete che presentava una discontinuità strutturale, quindi in futuro non si esclude la possibilità di utilizzare le classificazioni per tutte le altre pareti che presentino maggiori caratteristiche di omogeneità.

Dall'esecuzione delle prove di laboratorio, particolarmente evidente è apparsa l'analogia tra i valori di resistenza ottenuti da prove di taglio su campioni integri e quelli ricavati con il metodo ISRM suggerito, con uno scarto percentuale che non eccede il 10%.

Bibliografia

- 1) Barla G., Arduino G. & Parisi D. (1999), Le gallerie di San Pellegrino Terme. Indagini geologiche, idrogeologiche e geotecniche. XX Convegno Nazionale di Geotecnica. Associazione Geotecnica Italiana. Parma, 22-25 settembre 1999. Pàtron Editore, Bologna.
- 2) Barton N., Lien R. & Lunde J. (1974), Engineering classification of rock masses for the design of the tunnel support. *Rock Mech.* 6; 183-236
- 3) Barton N. (1995), The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Keynote Lecture, 8th ISRM Congress, Tokyo, Japan. Vol. 3, pp. 1023-1032.
- 4) Barton N. (1996), Rock mass characterization and seismic measurements to assist in the design and execution of TBM projects. Taiwan Rock Engineering Symposium; 1-16.
- 5) Barton N. (1998), Quantitative description of rock masses for the design of NMT reinforcement. International Conference on Hydropower Development in Hymalayas. Ed. V.D. Choubey. April 20-22, 1998, Shimla.
- 6) Barton N. (1999), TBM performance estimation in rock using QTBM. *Tunnels and Tunneling International* - September 1999; 30-34.
- 7) Bieniawski Z.T. (1973), Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.* 15; 335-344.
- 8) Bieniawski Z.T. & Orr C.M. (1976), Rapid site appraisal for dam foundations by the geomechanics classification. Proc. 12th Congr. Large Dams, ICOLD, Mexico City; 483-501.

- 9) Bieniawski Z.T. (1989), Engineering rock mass classifications. J. Wiley and Sons. New York. 251.
- 10) Raccomandazioni ISRM: metodologie per la descrizione quantitativa delle discontinuità nelle masse rocciose - da Rivista Italiana di Geotecnica n. 2 /'93.
- 11) Ruggieri R. (1994) Fenomeni di carsogenesi nel substrato roccioso di Ragusa: aspetti quali-quantitativi e tendenza evolutiva - da atti del I congresso regionale dell'Ordine dei Geologi di Sicilia.