# LA DEFORMABILITÀ DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

«ALCUNI CASE HISTORIES»

P. Froldi Rocksoil Spa, Milano

P. Lunardi Milano

#### Introduzione

La deformabilità è riconosciuta come uno dei parametri più importanti nel governare il comportamento geomeccanico degli ammassi rocciosi.

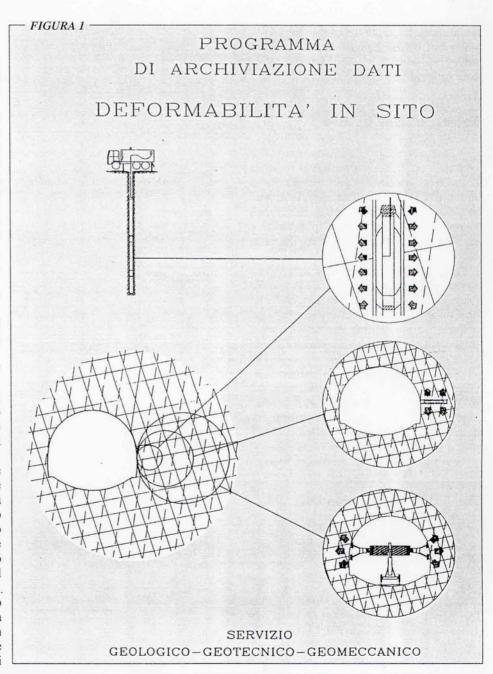
I parametri caratteristici che definiscono la deformabilità di un ammasso roccioso, il modulo elastico e il modulo di deformabilità, evidenziano sostanzialmente comportamento deformativo del mezzo sottoposto a differenti livelli di sollecitazione crescenti o ciclici. Essi dipendono sostanzialmente da tutte le caratteristiche fisico-meccaniche degli elementi che concorrono a costituire l'ammasso stesso, ovvero il litotipo e il reticolo di discontinuità, e perciò da:

- · caratteristiche di deformabilità del litotipo intatto:
- · caratteristiche geometriche giaciturali del reticolo di discontinuità (spaziatura, orientazione, ecc.);
- · caratteristiche di deformabilità delle

Le differenti e assai variabili combinazioni di tali caratteristiche con cui in natura appaiono gli ammassi rocciosi rende assai ardua e aleatoria la conoscenza e la previsione della loro deformabilità.

Per lo stesso motivo assai poco probabile è risultata e tutt'ora appare la determinazione dei parametri di deformabilità effettuata utilizzando metodi numerici che elaborano secondo differenti approcci (Elementi Finiti o Elementi Distinti), partendo dalle singole caratteristiche di deformabilità del litotipo intatto e delle discontinuità appartenenti al reticolo fessurativo.

L'esperienza internazionale del campo dell'ingegneria mineraria e dell'ingegneria civile ha evidenziato che le prove e i test in sito, ovvero procedure sperimentali condotte sulle masse rocciose nelle loro condizioni



naturali indisturbate, rappresentano l'unica metodologia affidabile per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità.

La raccolta, l'analisi, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati collezionati dalle prove in sito permette inoltre la creazione di una banca dati comune internazionale, diffusa a mezzo di bibliografia specialistica, che contribuisce alla conoscenza delle caratteristiche di deformabilità in funzione di parametri fisico-meccanici rilevati contestualmente ai test (velocità onde sismiche, classi di qualità della roccia, ecc.).

Lontani dal voler effettuare una disamina sul significato delle caratteristiche di deformabilità e sui metodi per ottenerle, il presente articolo vuole rappresentare semplicemente un modesto contributo alla divulgazione della conoscenza sui parametri di deformabilità delle masse rocciose, portando ad esempio alcuni casi di esperienze organizzati secondo le più diffuse correlazioni internazionalmente riconosciute.

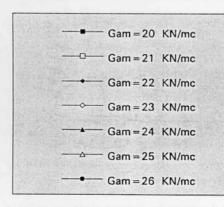
#### Prove e test in situ

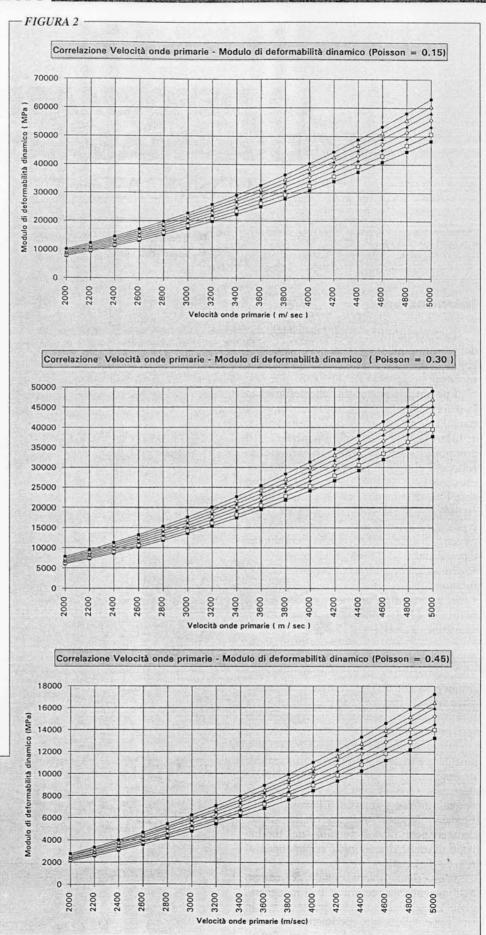
Come accennato un ammasso roccioso è caratterizzato dalla contemporanea presenza di una o più specie litologiche (litotipi) e un reticolo fratturativo che, se sviluppato maggiormente secondo una famiglia di piani rispetto alle altre (per spaziatura e caratteristiche delle discontinuità) conferisce alla massa una «anisotropia meccanica».

Inoltre l'intensità del reticolo fratturativo. ovvero l'inverso della spaziatura delle discontinuità, determina, in rapporto alla dimensione del problema un esame (diga, galleria, versante naturale, ecc.), un altro importantissimo fenomeno denominato «effetto scala».

Secondo tale fenomeno aumentando la dimensione del «provino ideale» sottoposto al test di deformabilità diminuiscono contestualmente le caratteristiche di deformabilità dello stesso, quindi il «modulo elastico» ed il «modulo di deformabilità».

Il significato fisico di tale diminuzione va





National transfer	AF	RCHIVIA	ZIONE	DATI CO	DEFFICIE	NTE DI	POISS	ON ( 15	993 )		
	VUTUKURI & LAMA			STACEY & PAGE		U. S. BUREAU OF RECL.			ROCKSOIL S.p.A.		
ROCCE	V. m.	D. S.	nº dati		V. m.	V. m.	D. S.	nº dati	V. m.	D. S.	nº dati
Ignee		THE TEN	100000		STATE OF THE PARTY OF	60% (BB)	29-10 Photos		096 583		ETTERN
Diorite	0.241	0.06	14		0.260	0.050	1	1		THE REAL PROPERTY.	
Gabbro	0.211	0.07	12		0.200	\$16.50 min.com					
Granito	0.192	0.09	111		0.220	0.040	1	1			
Granodiorite	0.207	0.04	4								
Andesite	0.200	0.04	5		0.200	0.180	1	1			
Basalto	0.214	0.06	37		0.200			The second		A	
Diabase	0.245	0.03	20		0.200					- T	
Dolerite	0.231	0.06	8		0.200		A STORY	AND THE REAL PROPERTY.			-
Ignimbrite	0.225	0.11	2				THE RESERVE	20 15 V5 18 LE	0.228	0.00	8
Pirossenite	0.206	0.03	3			Opin Santa	La Maria	Children St.			1
Tufo	0.181	0.06	18		- 17 075	The state of	SHOW DOWN				
Sedimentarie			Service Service	STATE OF STATE OF		Shirt San	NA ALEXANDE	See See	AGE IS TOWN		100=1000
Arenaria	0.185	0.10	113		0.150	(september			0.114	0.07	5
Argillite	0.220	1	1 1	(di Londra)	0.500			Contraction of the Contraction o			
Calcare	0.236	0.07	152		0.300	0.178	0.04	6	0.253	0.04	9
Carbone	0.420	0.04	8		0.420	-					
Conglomerato	0.118	0.03	8		0.150			DOLLAR DUST	0.177	0.06	3
Dolomite	0.287	0.11	12		- Sales All	S I PROPERTY OF		- Trees			
Grovacca	0.095	0.07	19			0.030	0.01	4			
Marna	0.,221	0.08	9		0.100			The same	0.250	0.13	8
Shale	0.168	0.09	32		Halling Co.	0.050	0.04	2			-
Siltite	0.159	0.07	11		all salies	0.050	1	1			
Slate	0.322	0.13	9		111111111111111111111111111111111111111		SAUCHIEL .	The Triple			
Metamorfiche	SALE BRIDGE	SID MINE DEL	distribution	Will Control	No the Labor.	SCHOOL SECTION	100	CALL STATE	out to Lamba	N-MAN HISM	GAM BESCHOOL
Calcescisto	- 1	1	1			la l		100 No. 1 1100 L	0.128	0.08	5
Eclogite	0.250	1	1			MUSICA	ON SHAPE				
Fillade	0.147	0.11	3		0.240	0.00	To the street of the street of		0.239	.12	7
Gneiss	0.200	0.07	35					Total Control			
Micascisto	0.146	0.08	25		0.170			TO SOL PHOESE			
Quarzite	0.194	0.08	22				MANAGE TELEVISION		0.53	C. 201 T. S.	The second

#### TABELLA 1

ricercato nel fatto che, aumentando la dimensione del «provino ideale» aumenta il numero delle discontinuità coinvolte nella prova e, di conseguenza, poiché le caratteristiche delle discontinuità sono sempre inferiori a quelle del lipotipo, diminuiscono le caratteristiche di deformabilità.

Ne consegue che le prove in sito coinvolgono, in funzione della metodologia

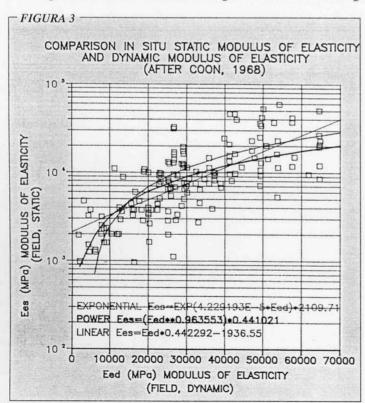
con cui si applicano, porzioni di ammasso roccioso differenti e, secondo quanto concettualmente espresso con l'ideogramma di *Figura 1*, «volumi significativi» («provino ideale») ben differenti in rapporto al problema in esame.

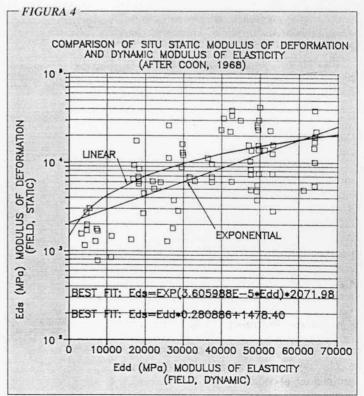
Tra le prove ed i test in sito necessari alla valutazione delle caratteristiche di deformabilità distinguiamo:

- · metodi geofisici o dinamici o indiretti;
- · metodi statici o diretti.

Tra i primi il più importante e riconosciuto é la sismica a rifrazione con la quale é possibile ricavare la velocità delle onde sismiche di compressione o primarie (Vp) e di taglio o secondarie (Vs).

La velocità delle onde sismiche é strettamente collegata alle caratteristiche di





deformabilità del mezzo attraversato

Secondo la teoria dell'elasticità e secondo le leggi di propagazione delle onde di compressione e taglio in un mezzo si ha:

E = Vp<sup>2</sup> • 
$$\frac{\gamma}{g} = \frac{(1+v)(1-2v)}{1-v}$$
 (1)

$$V = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{Vp}{Vs} \right)^2 - 1 \right] / \left[ \left( \frac{Vp}{Vs} \right)^2 - 1 \right]$$
 (2)

dove:

E = modulo dinamico

 $\gamma$  = peso di volume del mezzo

g = accelerazione di gravità

v = coefficiente di Poisson

Il modulo dinamico rappresenta la caratteristica di deformabilità del mezzo sottoposto ad una sollecitazione dinamica estremamente rapida e con livelli di deformazione decisamente più bassi di quelli di una sollecitazione statica. Esso é consistentemente più elevato del relativo modulo statico ottenuto con sollecitazioni statiche caratterizzate da deformazioni più elevate.

Per facilitare l'individuazione dei valori dei moduli dinamici, partendo dalla velocità delle onde sismiche, gli scriventi hanno espresso la relazione (1) in forma grafica per differenti valori del peso di volume e del coefficiente di Poisson (Figura 2); quest'ultimo risulta molto influente sui valori di deformabilità dinamica.

I valori del coefficiente di Poisson risultano generalmente da prove di laboratorio su campioni integri.

Si riporta in Tabella 1 alcuni tra i valori più significativi del parametro raccolti fra diverse fonti.

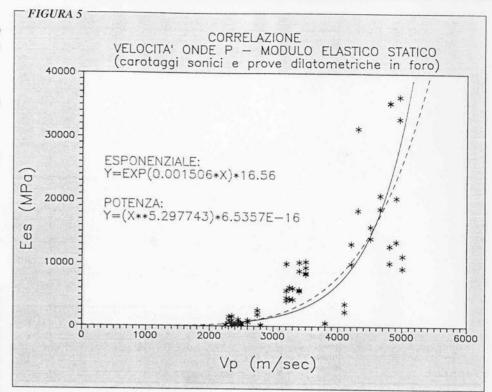
Allo scopo di ricavare indirettamente i valori del modulo elastico e di deformabilità statici, sono stati condotti numerosi studi comparando i risultati di test dinamici e statici.

Coon [1968] ha raccolto una notevole mole di dati arrivando a stabilire correlazioni empiriche come quelle che appaiono in Figure 3-4 rielaborate graficamente secondo differenti interpolazioni di fitting.

Trai metodi statici o diretti si distinguono, per metodologie e «volumi significativi» coinvolti (Figura 1):

- · prova dilatometrica in foro (dilatometer test):
- · prova con martinetto piatto (flat jacks);
- · prova con martinetto cilindrico (plate bearing) o di carico su piastra.

La prima viene eseguita in fori di sondaggi e coinvolge «volumi significativi» di ordine decimetrico al contorno della cavità.



La seconda e la terza vengono generalmente eseguite in cavità sotterranee (cunicoli esplorativi, caverne ecc.) e coinvolgono «volumi» significativi di roccia rispettivamente dell'ordine pluridecimetrico e metrico.

La descrizione dettagliata di tali metodologie non viene, per ovvi motivi di spazio, riportata in questa sede.

Relativamente alle prove dilatometriche e alle corrispondentivelocità Vp misurate in foro con prove soniche, alcune esperienze sviluppate dagli autori su terreni sedimentari prevalentemente flyschioidi, portano alla costruzione dei grafici di Figure 5, 6.

Con lo stesso criterio é stato costruito il

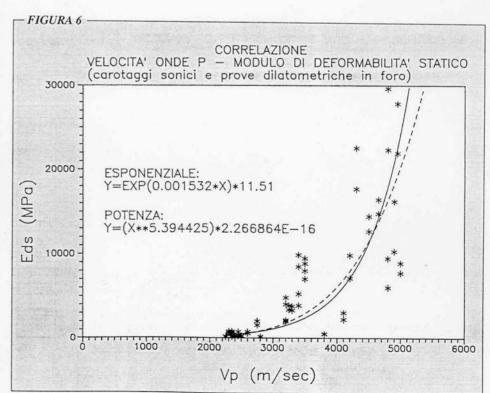


grafico di Figura 7 di correlazione tra il modulo di deformabilità, con prove di martinetto piatto e cilindrico all'interno di cunicoli esplorativi (in terreni sedimentari e metamorfici), e la velocità delle onde sismiche primarie misurate sul paramento del cunicolo stesso.

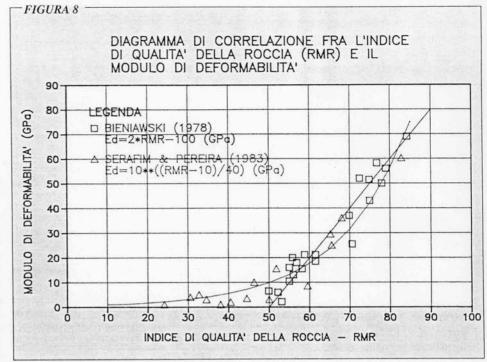
### La deformabilità degli ammassi rocciosi e la classificazione geomeccanica

(Geomechanics Classification)

Una delle metodologie più utilizzate per l'individuazione dei parametri di deformabilità d'ammasso é la Geomechanics Classification (Bieniawski, 1973). Secondo la G.C. é possibile definire un parametro denominato RMR (Rock Mass Rating) che individua una classe di qualità dell'ammasso roccioso. Tale classe di qualità é stata attribuita ad ammassi rocciosi sottoposti a prove di carico in sito così da ricavare coppie di valori RMR - parametri di deformabilità.

Si é ottenuto in tal modo la possibilità di correlare empiricamente le coppie di valori ottenendo formule numeriche di estrema applicabilità e generalmente affidabili nel contesto di studi e progetti a carattere preliminare.

Bieniawski [1978] raccogliendo una notevole mole di dati ottiene la correlazione riportata il *Figura 8* che per regressione lineare fornisce:



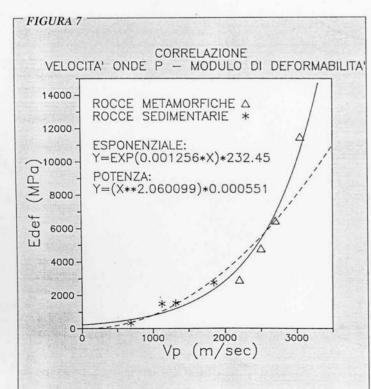
E = 2 \* RMR - 100 [GPa] (3) dove: E = modulo di deformabilitàRMR = indice di qualità della roccia.

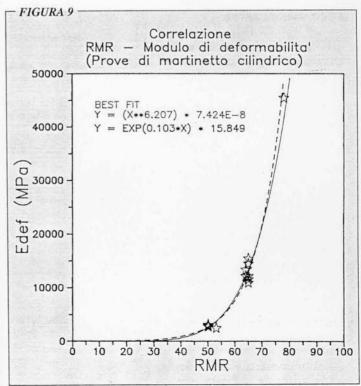
Serafim e Pereira [1983] su altri dati ricavano invece la (Figura 8):

$$E = 10**[(RMR-10)/40]$$
 [GPa] (4

Nel nostro caso, secondo quanto sviluppato in un'esperienza relativa a rocce metamorfiche sottoposte a test di martinetto cilindrico in cunicolo esplorativo, si é ottenuto una correlazione del tipo di quella mostrata in *Figura 9*.

L'analisi di un numero ben più elevato di casi differenti per modalità di prova, condizioni [GPa] (4) geomeccaniche e litotipi ha condotto a





proporre una serie di correlazioni empiriche tra l'indice di qualità RMR e le seguenti caratteristiche:

- modulo di elasticità in direzione sia normale sia parallela ai piani di anisotropia strutturale principale.
- modulo di deformabilità in direzione sia normale sia parallela ai piani di anisotropia strutturale principali.

Relativamente a queste correlazioni si riportano i seguenti grafici (il valore di RMR é stato siglato con Basic Mass Rating in accordo con Bieniawski):

Figura 10 - RMR - Modulo di elasticità (test dilatometrico);

Figura 11 - RMR - Modulo di deformabilità (test dilatometrico);

Figura 12 - RMR - Modulo di elasticità perpendicolare;

Figura 13 - RMR - Modulo di elasticità parallelo;

Figura 14 - RMR - Modulo di deformabilità perpendicolare;

Figura 15 - RMR - Modulo di deformabilità parallelo.

Infine, per evidenziare la variabilità dei parametri di deformabilità, secondo le differenti nature litologiche dei materiali e quindi diversamente deformabili già a livello di litotipo, secondo le differenti metodologie e secondo la direzione delle prove, sono stati costruiti i grafici di Figure 16-17.

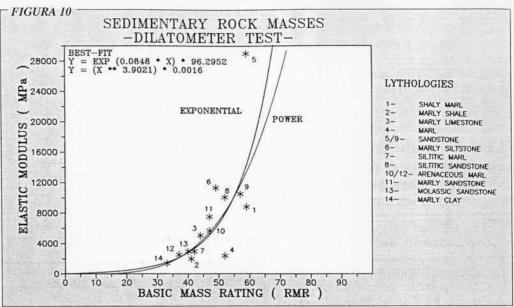
#### Nota conclusiva

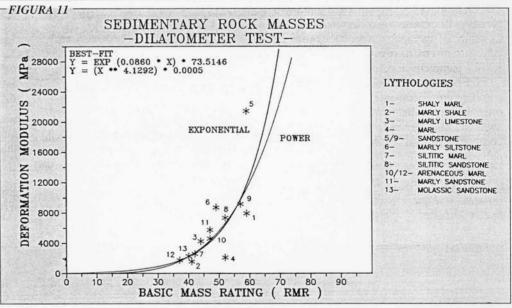
Il presente articolo vuole rappresentare un modesto contributo alla divulgazione delle conoscenze sulle caratteristiche di deformabilità degli ammassi rocciosi.

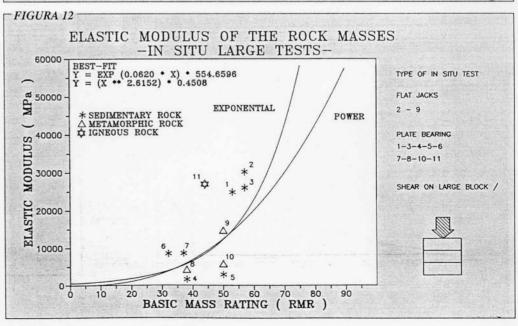
Dopo una breve introduzione sull'importanza dei pametri di deformabilità e sulle caratteristiche intrinseche degli ammassi rocciosi in grado di influenzarli, si citano alcune delle metodologie più comunemente usate per la loro individuazione.

Tra questi si distinguono metodi dinamici geofisici o indiretti e metodi statici o diretti; relativamente ai primi vengono riportate alcune delle correlazioni più importanti tra la velocità delle onde sismiche o i moduli dinamici e i corrispondenti moduli elastici e di deformabilità ottenuti contestualmente con prove statiche dirette

Relativamente alle metodologie statiche o dirette vengono invece







sviluppate, sulla base dei casi analizzati, numerose correlazioni fra l'indice di qualità della roccia (RMR) secondo la Geomechanics Classification e i corrispondenti moduli elastici e di deformabilità misurati, contestualmente al rilievo geomeccanico, sia perpendicolarmente sia parallelamente ai piani di anisotropia principali (stratificazione, scistosità, laminazioni ignee ecc ..).

Infine alcuni grafici riassuntivi hanno permesso di sintetizzare i campi di variabilità dei parametri in funzione del litotipo, della direzione di prova e della metodologia utilizzata.

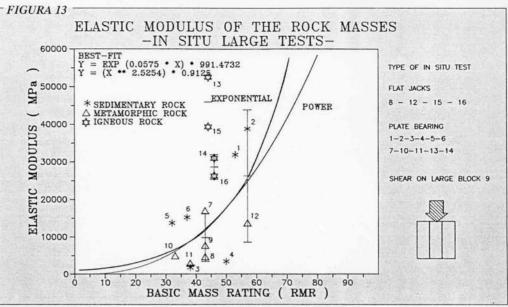
#### Ringraziamenti

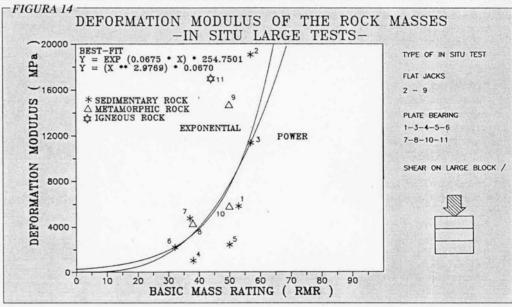
La particolare importanza della divulgazione tecnico-scientifico nel campo della geoingegneria ha portato gli autori alla redazione della presente memoria. La notevole quantità e variabilità dei dati contenuti nella trattazione nonché la loro disparata provenienza ha impedito la consueta richiesta di autorizzazione, ad enti ed organismi proprietari, eseguita di prassi; pertanto non sono state evidenziate fonti e riferimenti che possano indicare l'ubicazione del dato sul territorio e nell'ambito di una determinata opera.

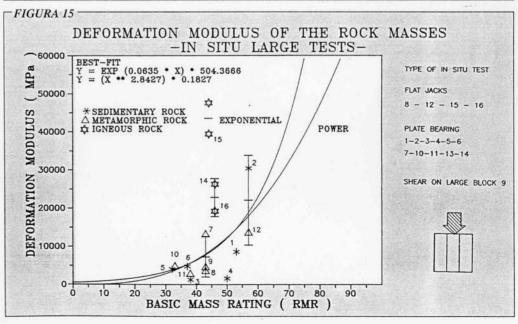
Si vuole comunque ringraziare enormemente tutti gli enti e le organizzazioni committenti che, alla lettura della presente memoria troveranno giustificabile tale deroga, apprezzando peraltro i contenuti divulgativi e di interesse per l'intera comunità tecnico-scientifica italiana ed internazionale. Un particolare ringraziamento va oltremodo riposto all'Ente FF.SS., alla Società Autostrade Spa e all'ANAS, sui cui lavori sono stati tratti molteplici dati.

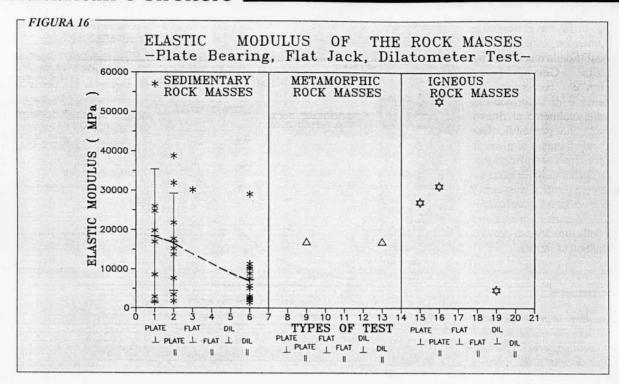
# Bibliografia

- · Autori vari, (1990): Scale Effects in Rock Masses. Pinto da Cunha, National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), Lisbon, Portugal. Balkema, Rotterdam.
- · Bieniawski, Z.T., (1972): Geomechanics Classification of Rock Masses and its Applications in Tunneling, Proc. 3rd Int. Congr. on Rock Mech. Denver 2. Part A, pp. 27÷32.
- · Bieniawski, Z.T., Van Heerden, W.L., (1975): The Significance of in Situ Tests on Large Rock Specimens. Int. J. Rock









Mech. Min. Sci. & G.A., Vol. 12, pp. 101-113. Pn D. Thesis, univ. Illinois. Pergamon Press, London.

- · Bieniawski, Z.T., (1978): Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & G.A., Vol. 15, pp. 237+247, Pergamon Press, London.
- · Bieniawski, Z.T., (1979): The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. Proc. 4th Int. Congr. on Rock Mech. ISRM.
- · Coon, R., (1968): Correlation of Engineering

- · Jaeger, C., (1972): Rock Mechanics and Engineering. Cambridge - University Press.
- · Lama, R.D., Vutukuri, V.S. (1978): Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 3, n. 1. Trans Tech Publications.
- · Muller, L., (1974): Rock Mass Behaviour -Determination and Application in Engineering Practice. Proc. 3rd Congr. Rock Mech., Vol. 1, pp. 205-215. ISRM, Denver.
- Behaviour with the Classification of In Situ Rock. Rocha, M. & Da Silva, J.N.A. (1970): A New

Method for the Determination of Deformability of Rock Masses. Proc. 2nd Congr. Rock Mech. pp. 2+21. ISRM, Belgrade.

- · Serafim, J.L., Pereira, J.P., (1983): Consideration of the Geomechanics Classification of Benjawski. Proc. int. Symp. Engng. Geol. and Underground Construction, Lisbon, Portugal, pp. 1133-44.
- · Stacey, T.R., Page, C.H. (1986): Practical Handbook for Underground Rock Mechanics. Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 12. Trans Tech Publications.

