

INFLUÊNCIA DOS INTERVALOS DE TENSÃO DE COMPRESSÃO SIMPLES NA ANISOTROPIA DE DEFORMABILIDADE DAS ROCHAS*

The influence of the uniaxial compression stress intervals on the rock deformability anisotropy

por

F. PERES-RODRIGUES**

RESUMO — Estuda-se neste trabalho a influência dos intervalos de tensão nas características das superfícies de anisotropia obtidas sobre seis tipos de rocha, durante o primeiro ensaio rápido de carga e descarga, apontando-se algumas tendências observadas e que se consideram relevantes.

SYNOPSIS — This paper discusses the influence of stress intervals on the characteristics of the anisotropy surfaces of six types of rock, as obtained in a first loading-unloading quick test. Some tendencies observed, thought relevant, are briefly described.

1 — INTRODUÇÃO

Sabe-se que a maior parte das rochas, sobretudo as fracturadas e alteradas, apresenta um comportamento mecânico que as afasta do comportamento linear e elástico, aproximando-as mais, em termos simplistas, de um comportamento visco-elástico, mesmo em ensaios considerados rápidos, em que a influência do factor tempo se considera desprezável; este comportamento será ainda diferente nos ramos da carga e da descarga, sobretudo no 1.º ciclo do ensaio, e apresentando, regra geral, uma deformação permanente significativa.

Na Fig. 1 apresenta-se o comportamento genérico de uma rocha fracturada e ou alterada num primeiro ensaio rápido de carga e descarga; assim, o ramo da carga pode ser dividido em três fases: a primeira correspondente ao refechamento das fissuras e diminuição da porosidade e na qual os módulos de deformabilidade tangente e por pontos ou por intervalos aumentam, seguindo-se uma 2.ª fase em que o comportamento é praticamente linear e, finalmente, uma 3.ª fase, em que o efeito da viscosidade se começa a fazer sentir acentuadamente, e que nem sempre aparece nos ensaios em que a tensão máxima aplicada se encontra longe da tensão de rotura, abaixo de um terço deste valor. Na curva da descarga, também dividida em três fases, começa-se por uma fase em que os módulos de deformabilidade já indicados se apresentam relativamente algo elevados, devido, sobretudo, a uma espécie de inércia mecânica, seguida duma fase praticamente linear de curta amplitude ou mesmo nula, e terminando numa fase com deformabilidade maior, mesmo sem recuperação de toda a deformação, traduzida na existência de uma deformação permanente, mais ou menos acentuada.

*Apresentado ao 6.º Congresso da ISRM, Montreal, 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

**Engenheiro Civil, Investigador-Coordenador e chefe do Núcleo de Fundações Rochosas do LNEC, professor catedrático convidado do IST.

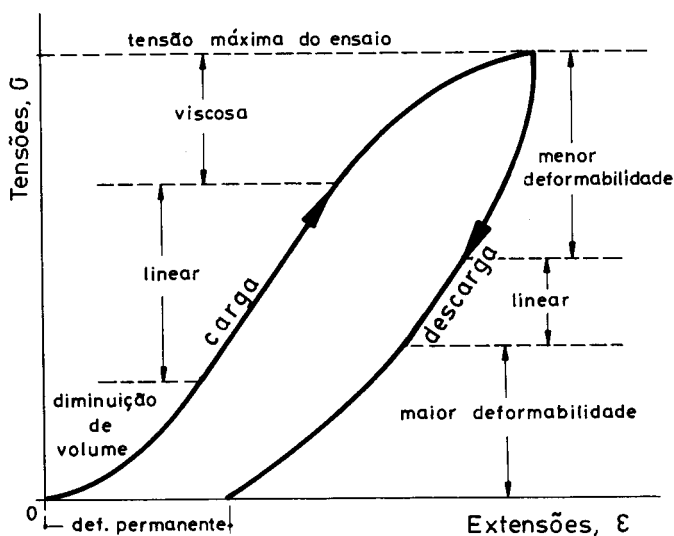


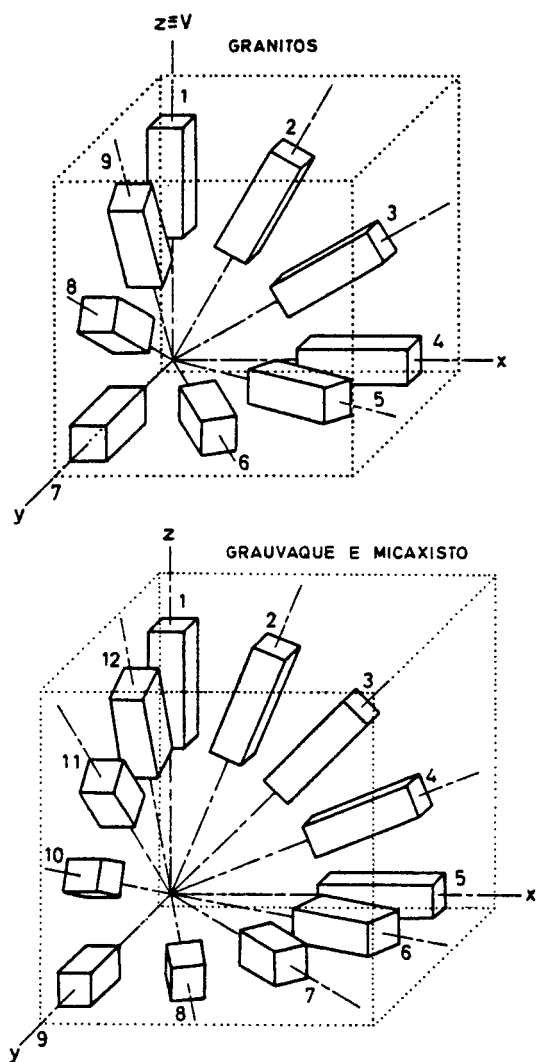
Fig. 1 — Comportamento de uma rocha fracturada e ou alterada

2 — ROCHAS ENSAIADAS

Neste estudo foram aproveitados os ensaios sobre anisotropia realizados sobre rochas extraídas de diversos locais onde o LNEC procedeu à caracterização do maciço rochoso de fundação de barragens de betão. Assim, do local de Albarelos, Espanha, foram considerados os ensaios de anisotropia realizados em laboratório sobre provetes de um granito gnaissóide, um granito de grão grosso e um micaxisto, LNEC (1971a); do local do Torrão, os ensaios realizados sobre provetes de um granito são e um granito alterado, LNEC (1971b); e, finalmente, do local do Funcho, os ensaios realizados sobre um grauvaque, LNEC (1977).

3 — ENSAIOS REALIZADOS

De cada um dos seis tipos de rocha indicados em 2, foram extraídos, no local, um cubo com cerca de 40 cm de aresta, que possibilitou a preparação, em laboratório, de 9 ou 12 provetes prismáticos com $5 \times 5 \times 12 \text{ cm}^3$ e cujas orientações e natureza se encontram descritas na Fig. 2. Cada um dos provetes foi sujeito a um ensaio de compressão simples contendo vários ciclos de carga e descarga até uma tensão normal máxima de cerca de um quarto da tensão de rotura por compressão. Neste estudo, foi apenas considerado o primeiro ciclo de carga e descarga, por ser aquele que corresponde ao material ainda intacto sem perturbações provenientes de acções mecânicas. A aplicação das tensões é suficientemente rápida para se não fazer sentir influência significativa do factor tempo. Todos os cubos extraídos se encontram localizados, em relação ao terreno, pela atitude do plano Oxy e direcção do semieixo Ox , Fig. 2. Os dois ramos de carga e descarga foram divididos no mesmo número de



LOCAL	TIPO DE ROCHA	ATITUDE DO PLANO Oxy	DIRECÇÃO DO SEMI-EIXO Ox
ALBARELHOS	GRANITO GNAISSÓIDE	HORIZONTAL	NM 30° E
	GRANITO DE GRÃO GROSSO		
TORRÃO	GRANITO SÃO	HORIZONTAL	NM 55° E
	GRANITO ALTERADO		NM 50° E
FUNCHO	GRAUVAQUE	NM 2° W - 54° NE SEDIMENTAÇÃO	NM 2° W
ALBARELHOS	MICAXISTO	NM 11° E - 29° NW XISTOSIDADE	NM 20° E

Fig. 2 — Esquemas de extracção dos provetes

intervalos, com uma variação de tensão constante, determinando-se, para cada intervalo, o módulo de deformabilidade entre pontos extremos desse intervalo. Obtém-se, assim, a evolução do módulo de deformabilidade com o intervalo de tensão, quer na carga quer na descarga, e isto para cada provete referente a uma dada direcção, Fig. 1. Foi assim possível determinar as superfícies de anisotropia mais prováveis dos módulos de deformabilidade obtidos, para cada intervalo de tempo, utilizando o método dos mínimos quadrados, Peres-Rodrigues (1966), (1970) e (1977).

4 — RESULTADOS OBTIDOS

Das rochas estudadas, apenas se apresentam os resultados referentes ao granito gnaissóide de Albarellos.

No quadro I indica-se, sucessivamente para cada um dos oito intervalos de tensão de 25 kg/cm² em que foram divididos os ramos do primeiro ciclo de carga e descarga, os semieixos mais prováveis, a , b e c , da equação normal do elipsóide definidor da anisotropia, obtidos a partir do método dos mínimos quadrados, o valor \bar{E} média geométrica dos três semieixos e equivalente ao raio da esfera de volume igual ao do elipsóide obtido, os ângulos directores que cada um dos três eixos principais do elipsóide X , Y e Z fazem com os eixos de referência x , y e z , os coeficientes de anisotropia de massa, a_m , e máxima, a_M , Peres-Rodrigues (1977), definidos por:

$$a_m = \frac{R}{E} \quad a_M = \frac{R}{r} \quad (1)$$

em que R é o maior dos semieixos e r o menor, e finalmente o coeficiente de variação, Peres-Rodrigues (1977), dado por:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i - e_i}{t_i} \right)^2}{n-1}} \quad (2)$$

em que t_i é o módulo de deformabilidade teórico obtido a partir do elipsóide e e_i é o valor experimental correspondente, para cada uma das n direcções ensaiadas. Este coeficiente mede, assim, o ajuste entre o elipsóide mais provável e os valores experimentais e considera-se aceitável desde que não ultrapasse 15%.

Nas Figs. 3 a 8 inclusive, encontram-se representados para três intervalos de tensão, na carga e na descarga, a equação normal, o elipsóide mais provável, os pontos experimentais, o operador rotação que liga entre si o referencial principal $OXYZ$ e o de referência $Oxyz$, os coeficientes de anisotropia e de variação, e finalmente, um quadro contendo, para cada direcção, os valores medidos e calculados e seus desvios absolutos e relativos.

Na Fig. 9 encontram-se representados, numa rede estereográfica, os eixos e os planos principais dos seis elipsóides apresentados nas Figs. 3 a 8, que definem o referencial principal $OXYZ$; encontra-se, também, o diagrama representativo da evolução dos módulos de deformabilidade máximo e mínimo dos elipsóides e do valor médio \bar{E} , já definido, em função dos intervalos de tensão e dos ramos de carga e descarga (ver quadro I).

QUADRO I

Estudo da anisotropia

MÓDULO DE DEFORMABILIDADE (10^3kg/cm^2) EM COMPRESSÃO UNIAxIAL

PARÂMETROS PARA DIFERENTES INTERVALOS DE TENSÃO

TIPO DE ROCHA: Granito gnaissóide

LOCAL: Albarellos

RAMO	G_a (kg/cm ²)		EQUAÇÃO NORMAL $\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} + \frac{Z^2}{c^2} = 1$			FW	ÂNGULOS DIRECTORES (°)									COEFICIENTES DE		
	De	Até	a	b	c		X			Y			Z			ANISOTROPIA		VARIAÇÃO (%)
							x	y	z	x	y	z	x	y	z	q _m	q _M	
CARGA	0	25	185	244	125	178	47	53	64	135	46	81	102	114	27	1,37	1,95	2,7
	25	50	197	229	142	186	35	66	66	122	39	72	101	119	31	1,23	1,61	1,4
	50	75	199	212	171	193	173	86	84	84	22	69	86	112	22	1,10	1,24	2,0
	75	100	196	234	173	199	158	69	83	71	33	66	93	114	25	1,17	1,35	2,6
	100	125	228	233	183	213	131	135	75	119	49	55	55	105	39	1,09	1,27	2,2
	125	150	206	268	183	216	157	78	71	69	36	62	80	123	35	1,24	1,46	3,6
	150	175	207	259	237	233	47	110	50	126	142	79	116	59	42	1,11	1,25	3,7
	175	200	235	271	211	237	150	84	61	72	28	69	67	117	37	1,14	1,28	3,4
DESCARGA	200	175	402	478	431	436	135	133	81	130	44	74	73	96	18	1,10	1,19	5,5
	175	150	429	396	329	382	141	98	52	92	9	81	51	95	39	1,12	1,30	4,0
	150	125	337	402	314	349	33	58	80	122	49	57	80	123	34	1,15	1,26	2,3
	125	100	316	320	266	300	148	59	84	59	40	66	97	113	25	1,07	1,20	3,6
	100	75	265	302	230	264	10	89	80	95	22	68	99	113	24	1,14	1,31	1,4
	75	50	223	261	184	220	21	75	76	110	30	68	97	116	27	1,18	1,42	2,3
	50	25	187	212	144	179	38	52	85	126	45	67	80	111	23	1,19	1,47	1,0
	25	0	190	139	103	140	136	76	49	79	147	59	48	61	56	1,36	1,84	9,1

TIPO DE ROCHA: Granito gnaissóide

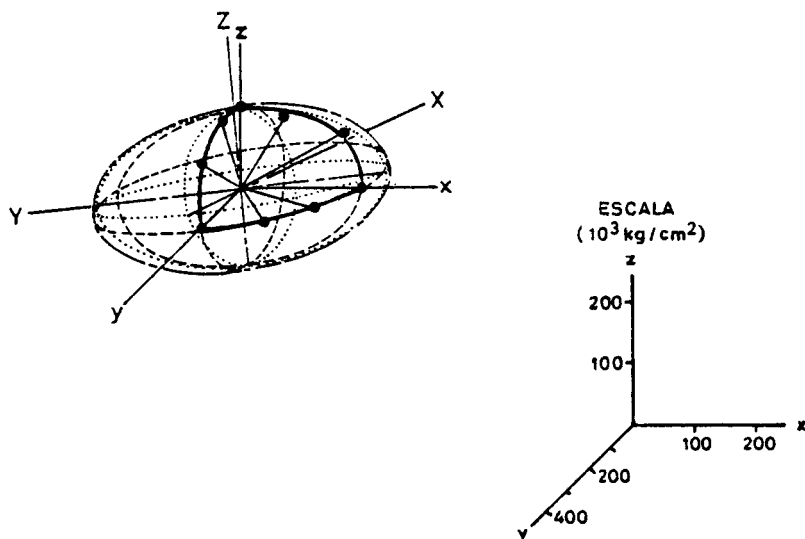
LOCAL: Albarellos

EQUAÇÃO NORMAL

$$\frac{X^2}{185^2} + \frac{Y^2}{244^2} + \frac{Z^2}{125^2} = 1$$

OPERADOR ROTAÇÃO

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0,678 & +0,596 & +0,430 \\ -0,707 & +0,690 & +0,157 \\ -0,203 & -0,410 & +0,889 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



COEFICIENTES DE ANISOTROPIA

$$\alpha_m = 1,37$$

$$\alpha_M = 1,96$$

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

$$\delta_v = 2,7\%$$

DIRECÇÃO	VALORES (10^3 kg/cm^2)		DESVIOS	
	MEDIDOS	CALCULADOS	ABSOLUTOS (10^3 kg/cm^2)	RELATIVOS (%)
1 (z)	137	133	+ 4	+3,0
2	141	150	- 9	-6,0
3	194	188	+ 6	+3,2
4 (x)	200	202	- 2	-1,0
5	171	173	- 2	-1,2
6	169	167	+ 2	+1,2
7 (y)	184	185	- 1	-0,5
8	205	205	0	0
9	163	163	0	0

Fig. 3 — Elipsóide de anisotropia dos módulos de deformabilidade para o intervalo de tensões 0 a 25 kg/cm^2

TIPO DE ROCHA: Granito gnaissóide

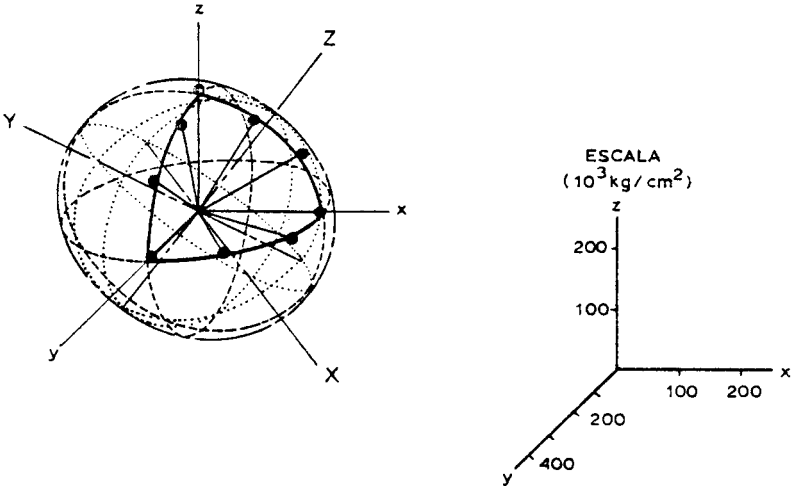
LOCAL: Albarellos

EQUAÇÃO NORMAL

$$\frac{X^2}{228^2} + \frac{Y^2}{233^2} + \frac{Z^2}{183^2} = 1$$

OPERADOR ROTAÇÃO

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,660 & -0,770 & +0,254 \\ -0,489 & +0,660 & +0,570 \\ +0,571 & -0,252 & +0,781 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



COEFICIENTES DE ANISOTROPIA

$$a_m = 1,09$$

$$a_M = 1,27$$

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

$$\delta_V = 2,2\%$$

DIRECÇÃO	VALORES (10 ³ kg/cm ²)		DESVIOS	
	MEDIDOS	CALCULADOS	ABSOLUTOS (10 ³ kg/cm ²)	RELATIVOS (%)
1 (z)	203	198	+ 5	+ 2,5
2	181	186	- 5	- 2,7
3	195	191	+ 4	+ 2,1
4 (x)	207	211	- 4	- 1,9
5	223	220	+ 3	+ 1,4
6	225	228	- 3	- 1,3
7 (y)	225	226	- 1	- 0,4
8	234	229	+ 5	+ 2,2
9	208	214	- 6	- 2,8

Fig. 4 — Elipsóide de anisotropia dos módulos de deformabilidade para o intervalo de tensões 100 a 125 kg/cm²

TIPO DE ROCHA : Granito gnaissóide

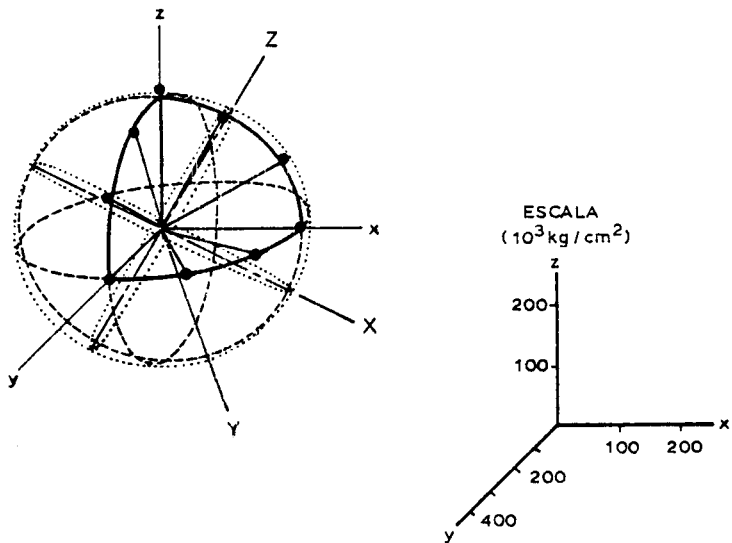
LOCAL: Albarellos

EQUAÇÃO NORMAL

$$\frac{X^2}{235^2} + \frac{Y^2}{271^2} + \frac{Z^2}{211^2} = 1$$

OPERADOR ROTAÇÃO

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,869 & +0,108 & +0,483 \\ +0,308 & +0,882 & +0,357 \\ +0,388 & -0,459 & +0,799 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



COEFICIENTES DE ANISOTROPIA

$$a_m = 1,14$$

$$a_M = 1,28$$

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

$$\delta_v = 3,4\%$$

DIRECÇÃO	VALORES (10 ³ kg / cm ²)		DES VIOS	
	MEDIDOS	CALCULADOS	ABSOLUTOS (10 ³ kg / cm ²)	RELATIVOS (%)
1 (z)	231	222	+ 9	+ 4,1
2	210	220	-10	-4,5
3	234	226	+ 8	+3,5
4 (x)	229	233	- 4	-1,7
5	250	251	- 1	-0,4
6	263	263	0	0
7 (y)	248	254	- 6	-2,4
8	275	266	+ 9	+ 3,4
9	234	246	-12	-4,9

Fig. 5 — Elipsóide de anisotropia dos módulos de deformabilidade para o intervalo de tensões 175 a 200 kg/cm²

TIPO DE ROCHA : Granito gnaissóide

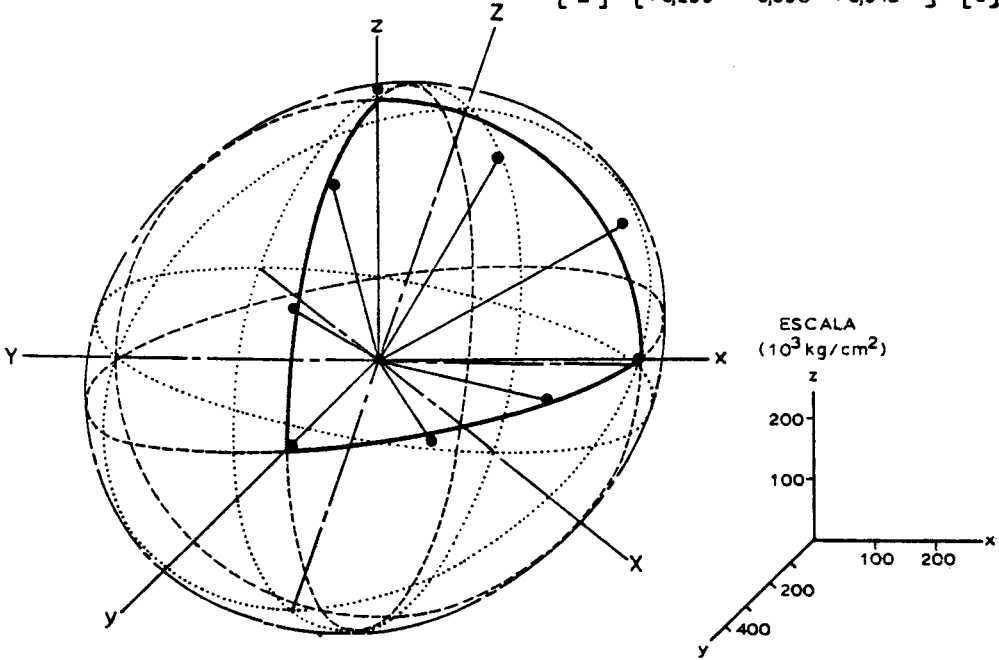
LOCAL: Albarethos

EQUAÇÃO NORMAL

$$\frac{X^2}{402^2} + \frac{Y^2}{478^2} + \frac{Z^2}{431^2} = 1$$

OPERADOR ROTAÇÃO

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,710 & -0,687 & +0,153 \\ -0,637 & +0,720 & +0,275 \\ +0,299 & -0,098 & +0,949 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



COEFICIENTES DE ANISOTROPIA

$\alpha_m = 1,10$

$\alpha_M = 1,19$

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

$\delta_v = 5,5\%$

DIRECÇÃO	VALORES (10 ³ kg/cm ²)		DESVIOS	
	MEDIDOS	CALCULADOS	ABSOLUTOS (10 ³ kg/cm ²)	RELATIVOS (%)
1 (z)	455	433	+ 22	+ 5,1
2	391	430	- 39	- 9,1
3	455	429	+ 26	+ 6,1
4 (x)	424	431	- 7	- 1,6
5	385	405	- 20	- 4,9
6	424	408	+ 16	+ 3,9
7 (y)	417	437	- 20	- 4,6
8	463	446	+ 17	+ 3,8
9	424	445	- 21	- 4,7

Fig. 6 — Elipsóide de anisotropia dos módulos de deformabilidade para o intervalo de tensões 200 a 175 kg/cm²

TIPO DE ROCHA: Granito gnaissóide

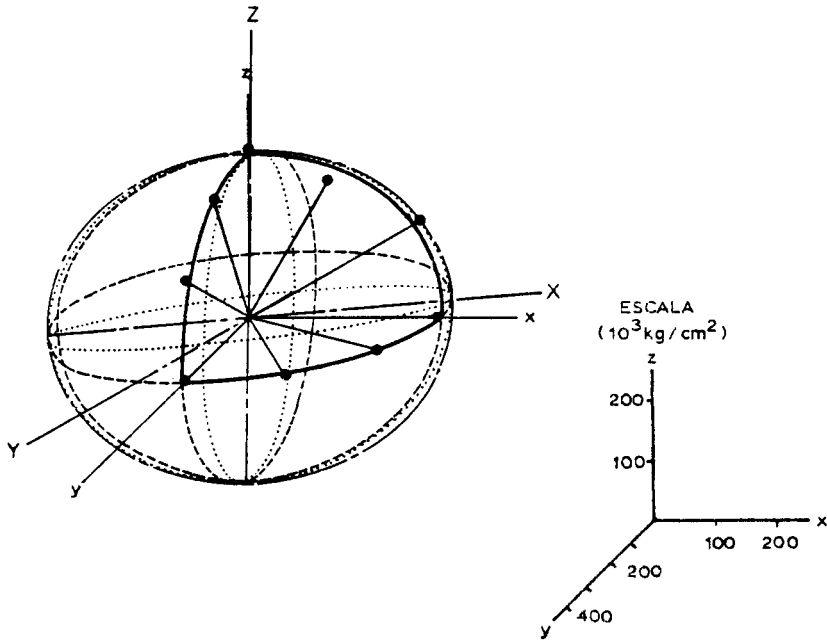
LOCAL: Albarelos

EQUAÇÃO NORMAL

$$\frac{X^2}{316^2} + \frac{Y^2}{320^2} + \frac{Z^2}{266^2} = 1$$

OPERADOR ROTAÇÃO

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,852 & +0,514 & +0,103 \\ +0,508 & +0,761 & +0,403 \\ -0,128 & -0,396 & +0,909 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



COEFICIENTES DE ANISOTROPIA

$$\alpha_m = 1,07$$

$$\alpha_M = 1,20$$

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

$$\delta_v = 3,6\%$$

DIRECÇÃO	VALORES (10^3 kg/cm^2)		DESVIOS	
	MEDIDOS	CALCULADOS	ABSOLUTOS (10^3 kg/cm^2)	RELATIVOS (%)
1 (z)	284	274	+10	+3,6
2	266	288	-22	-7,6
3	325	310	+15	+4,8
4 (x)	309	316	-7	-2,2
5	309	312	-3	-1,0
6	312	309	+3	+1,0
7 (y)	305	308	-3	-1,0
8	321	318	+3	+0,9
9	294	297	-3	-1,0

Fig. 7 — Elipsóide de anisotropia dos módulos de deformabilidade para o intervalo de tensões 125 a 100 kg/cm^2

TIPO DE ROCHA : Granito gnaissóide

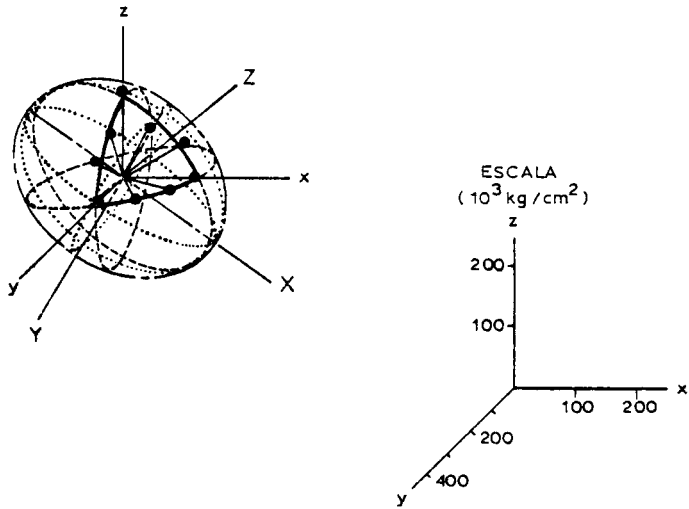
LOCAL: Albarellos

EQUAÇÃO NORMAL

$$\frac{X^2}{190^2} + \frac{Y^2}{139^2} + \frac{Z^2}{103^2} = 1$$

OPERADOR ROTAÇÃO

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,720 & +0,238 & +0,653 \\ +0,185 & -0,840 & +0,510 \\ +0,669 & +0,488 & +0,560 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



COEFICIENTES DE ANISOTROPIA

$$a_m = 1,36$$

$$a_M = 1,84$$

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

$$\delta_v = 9,1\%$$

DIRECÇÃO	VALORES (10 ³ kg/cm ²)		DESVIOS	
	MEDIDOS	CALCULADOS	ABSOLUTOS (10 ³ kg/cm ²)	RELATIVOS (%)
1 (z)	144	135	+ 9	+6,7
2	97	112	- 15	-13,3
3	120	111	+ 9	+8,1
4 (x)	126	131	- 5	-3,8
5	116	116	0	0
6	115	115	0	0
7 (y)	121	128	- 7	- 5,5
8	134	123	+11	+8,9
9	106	126	-20	-15,9

Fig. 8 — Elipsóide de anisotropia dos módulos de deformabilidade para o intervalo de tensões 25 a 0 kg/cm²

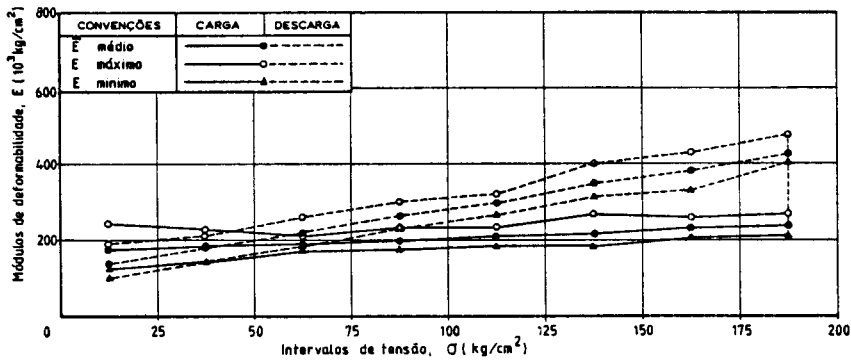
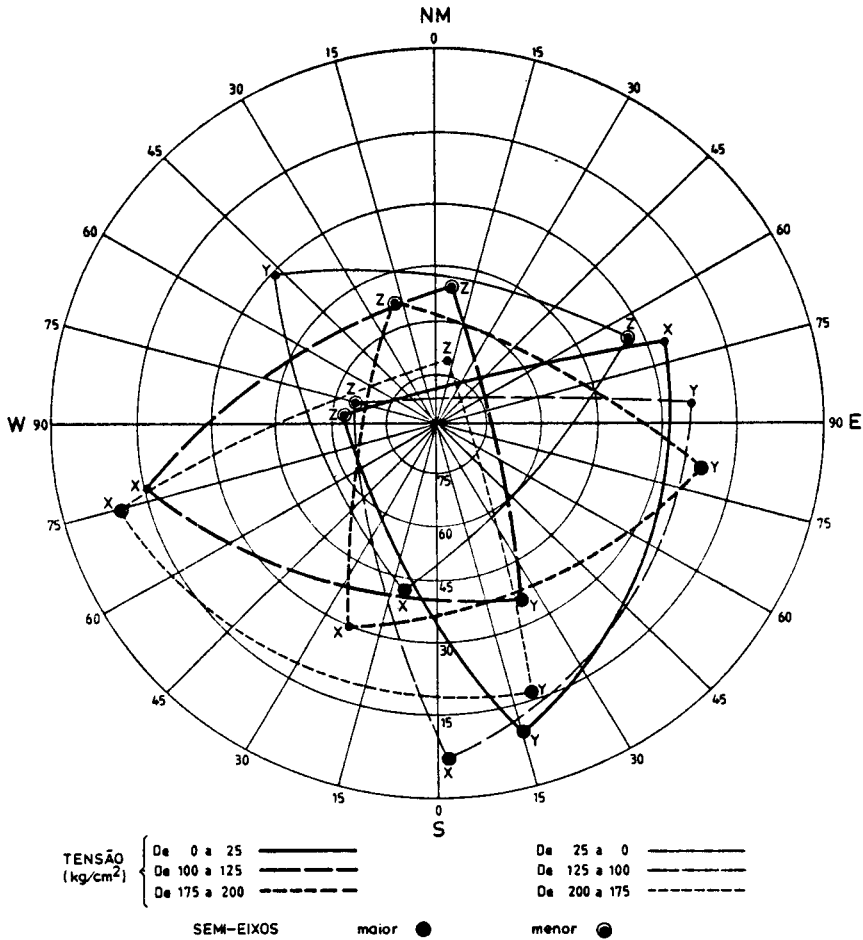


Fig. 9 — Evolução dos módulos de deformabilidade a diferentes intervalos de tensões

5 — CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos sobre as seis rochas ensaiadas, foi possível inferir algumas tendências que ensaios futuros deverão permitir confirmar ou alterar. Assim, as tendências mais relevantes são:

- a) a anisotropia é influenciada pelos intervalos de tensão;
- b) a anisotropia é influenciada pelos ramos da carga e da descarga, sendo maior a influência do ramo da descarga;
- c) os maiores e os menores valores do módulo de deformabilidade obtêm-se no ramo da descarga;
- d) os coeficientes de anisotropia têm tendência para baixar com a carga e para aumentar com a descarga;
- e) os valores de \bar{E} apresentam um aumento sistemático com a carga e uma diminuição, também sistemática, com a descarga;
- f) não parece existir uma lei de variação dos eixos principais das superfícies de anisotropia com os intervalos de tensão.

As tendências apontadas são de molde a encorajar a continuação do estudo não só em relação ao módulo de deformabilidade como também a outras propriedades.

6 — AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Técnico Principal do LNEC Manuel Reis e Sousa a valiosa colaboração prestada não só na condução dos ensaios como na elaboração dos desenhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LNEC (1971a) — *Estudo das fundações da barragem de Albarellos (Espanha)*. Lisboa.
- LNEC (1971b) — *Estudo das fundações da barragem do Torrão*. Lisboa.
- LNEC (1977) — *Estudo das fundações da barragem do Funcho*. Lisboa.
- PERES-RODRIGUES, F. (1966) — *Anisotropy of granites — Modulus of elasticity and ultimate strength ellipsoids, joint systems, slope attitudes, and their correlations*. Proc. 1st Cong. ISRM, Vol. I, pp. 721-732, Lisboa.
- PERES-RODRIGUES, F. (1970) — *Anisotropy of rocks — Most probable surface of the ultimate stresses and of the moduli of elasticity*. Proc. 2nd Cong. ISRM, Vol. I, pp. 1-20, Beograd.
- PERES-RODRIGUES, F. (1977) — *Anisotropia das rochas e dos maciços rochosos — Aplicação de quárticas fechadas ao estudo da deformabilidade e da rotura*. Memória 483 — Vol. I, LNEC, Lisboa.