

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE GRANITOS NUMA PRENSA RÍGIDA*

Uniaxial compressive strength and failure process of granites
tested on a stiff machine

por

M. QUINTA FERREIRA**

A. VEIGA PINTO***

RESUMO — Para se entenderem os mecanismos envolvidos no processo de rotura das rochas graníticas efectuaram-se ensaios de compressão simples numa prensa rígida servocontrolada, utilizando como variável independente a velocidade de deformação. Verificou-se que a textura, a fissuração e o grau de alteração condicionam o modo como as amostras se comportam quando sujeitas ao aumento de cargas uniaxiais. O processo de rotura foi analisado a partir da morfologia da curva tensão-deformação e do modo particular de fractura durante o ensaio. As amostras resistentes acumulam energia que tendem a libertar de um modo violento quando é atingida a tensão de rotura. As amostras mais alteradas acumulam menos energia, pois a partir de níveis de tensão baixos geram-se fracturas axiais que dissipam essa energia.

SYNOPSIS — A stiff testing machine was used to study the failure process of granitic rocks, using the strain rate as the independent variable. The behaviour of the samples during uniaxial testing is dependent on texture, fissure index, and weathering degree of samples. The morphology of load displacement curves and the fracture pattern was used to study the failure process. The strongest samples accumulate energy that they release abruptly when peak strength is reached. More weathered samples do not store too much energy as they start to develop axial fractures in early stages of compression.

1 — INTRODUÇÃO

Nos ensaios de compressão simples convencionais não se considera o comportamento da rocha após a tensão de rotura, pois, quando esta é atingida, observa-se a fragmentação das amostras com a perda total de resistência devido à libertação brusca da energia elástica armazenada pela máquina. O desenvolvimento das prensas rígidas, ou seja aquelas em que a taxa de deformação se mantém constante mesmo com a diminuição da reacção da amostra, tornou possível registar e analisar a curva tensão-deformação, associada à rotura progressiva da amostra, e estudar o *verdadeiro* comportamento reológico do material.

Numa prensa rígida, o tipo de rotura, violenta ou progressiva, vai depender da rigidez relativa da máquina e do provete (Hudson *et al.*, 1972; Brady e Brown, 1985) e das características particulares do material que constitui o provete. O processo de rotura é estável quando é necessário fornecer energia ao provete para que a rotura prossiga, e instável quando é necessário subtrair energia do provete para evitar o seu colapso violento (Ferrer, 1986). Geralmente numa máquina servocontrolada faz-se actuar o fluido hidráulico sobre ambas as faces do pistão que em consequência se move, aplicando ou removendo carga ao provete de modo a obter-se uma velocidade de deslocamento constante e antecipadamente programada. O sistema deverá ter um tempo de resposta muito curto para evitar a rotura explosiva da amostra, mantendo a velocidade de deformação constante.

*A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

**Geólogo, Assistente da Univ. Coimbra, Bolseiro do INIC.

***Engenheiro Civil, Investigador auxiliar do LNEC.

1.1 — Comportamento em compressão simples

Segundo Hawkes e Mellor (1970), o ensaio de compressão simples afasta-se claramente do comportamento ideal dos materiais devido à não-linearidade das características tensão-deformação. Na Fig. 1 apresenta-se o diagrama esquemático da curva tensão-deformação para uma rocha cristalina de elevada resistência, ensaiada numa prensa rígida, podendo-se considerar três fases distintas: na primeira fase (I), o declive da curva cresce com o aumento da tensão; a segunda fase (II) corresponde ao troço médio da curva, e caracteriza-se pela existência de uma relação aproximadamente linear entre a tensão e a deformação; a terceira fase (III) inicia-se com a diminuição do declive da curva à medida que a tensão se aproxima da resistência à rotura da rocha. O ponto máximo da curva (ponto A) corresponde ao limite de resistência à rotura do material. Após ultrapassar o pico, a amostra continua a deteriorar-se devido à fissuração interna, originando o ramo final da curva representado a tracejado na Fig. 1.

Com base na curva tensão-deformação podem-se considerar três grupos de comportamento à rotura (Houpert, 1974 e 1979): 1 - no primeiro grupo englobam-se as rochas cuja rotura nunca é violenta, podendo ser controlada até cargas praticamente nulas (comportamento dúctil); 2 - no segundo grupo englobam-se as rochas com um comportamento progressivo ou mesmo violento (frágil-dúctil). Na maioria dos casos, a rotura, mesmo quando progressiva, não pode ser controlada até cargas nulas pois a amostra sofre primeiro ruína; 3 - no terceiro grupo englobam-se as rochas cuja rotura não pode ser controlada, qualquer que seja a velocidade de deformação (comportamento frágil).

As curvas tensão-deformação permitem determinar além da tensão de rotura (σ_r), a tensão de cedência (σ_y) e as deformações correspondentes à rotura (ϵ_r) e à cedência (ϵ_y). O ponto de cedência coincide com o ponto da curva em que deixa de haver proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pela amostra (ponto D da Fig. 1).

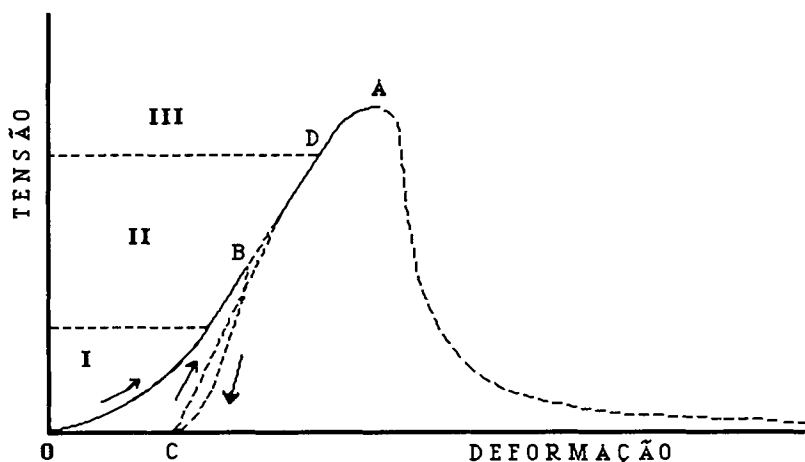


Fig. 1 — Diagrama esquemático da relação tensão-deformação para rochas ensaiadas à compressão simples numa prensa rígida (segundo Hawkes e Mellor, 1970)

2 — MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 — Materiais ensaiados

Os granitos utilizados nos ensaios, foram recolhidos na pedreira que forneceu os materiais para o enrocamento da Barragem de Paradelá bem como no próprio enrocamento da barragem. Estes granitos pertencem a uma mancha de granitos hercínicos, pós-tectónicos, vulgarmente conhecidos por granitos do Gerês (Noronha e Ribeiro, 1983). Trata-se de granitos de grão grosseiro, porfiróides e com textura hipidiomórfica-granular. O tamanho médio dos grãos varia entre 5 mm e 10 mm, mas os feldspatos podem atingir 30 mm. Estes granitos apresentam uma tonalidade por vezes rosada, possuindo localmente afloramentos de granito vermelho, em especial próximo das descontinuidades do maciço. São constituídos principalmente por quartzo, plagioclase (oligoclase), feldspato potássico (microclina) e biotite. Também possuem pequenas quantidades de zircão, apatite, clorite e epidoto. Os granitos com uma cor vermelha mais intensa têm características semelhantes às referidas anteriormente, mas tendem a ter menos biotite e quartzo, mais epidoto, e maior quantidade de inclusões ferruginosas. Estas inclusões tendem a concentrar-se nos feldspatos potássicos e são principalmente constituídas por óxidos de ferro com pequenas quantidades de titânio (Quinta Ferreira, 1987).

Com o avanço da alteração as biotites sofrem cloritização, aparecendo simultaneamente uma mancha de oxidação à sua volta. As plagioclases sofrem sericitização, enquanto que os feldspatos potássicos sofrem caulínização.

2.2 — Preparação das amostras

Para a realização do ensaio de compressão simples utilizaram-se provetes prismáticos com cerca de 12 cm de altura e com uma base quadrada de 5 cm de lado. Os provetes foram cortados a partir de blocos de granito. Os topos foram preparados de modo a apresentarem superfícies planas e paralelas. Para a determinação do módulo de elasticidade, com extensómetros mecânicos, efectuou-se a colagem de pequenas placas metálicas nos pontos de apoio da estrutura que transmite as deformações do provete, permitindo a sua leitura no deflectómetro. O sistema referido passará a designar-se simplesmente por gaiola. Para medir a deformação lateral, de modo a calcular o coeficiente de Poisson, procedeu-se à colagem de extensómetros eléctricos.

2.3 — Execução do ensaio

Começou-se por determinar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade utilizando a prensa rígida, fazendo-se o registo contínuo das tensões e das deformações. Com este procedimento, as deformações registadas correspondem às variações entre os pratos da prensa. Para algumas das amostras ensaiadas na prensa rígida, efectuou-se primeiro a determinação do módulo de elasticidade com o auxílio da gaiola (extensómetro mecânico) usando uma prensa normal. Após comparação dos módulos de elasticidade obtidos pelos dois processos para a mesma amostra, verificou-se que os módulos obtidos com a gaiola eram significativamente maiores que os obtidos pelos resultados do registo na prensa rígida. Por

esta razão considerou-se conveniente executar os restantes ensaios determinando o módulo de elasticidade apenas na prensa rígida, mas efectuando duas determinações simultâneas: uma utilizando as deformações obtidas a partir do registo entre pratos, e a outra com os valores das leituras na gaiola que previamente havia sido colocada na amostra a ensaiar. Deste modo, esperava-se poder aferir os resultados obtidos para os módulos calculados segundo os dois processos descritos.

As amostras foram ensaiadas com um teor em água resultante da secagem ao ar. Previamente foram determinadas algumas propriedades utilizando técnicas de caracterização não-destrutivas (Quinta Ferreira *et al.*, 1987).

QUADRO 1

AMOST		γ_d (kN/m ³)	n (%)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	σ_r (Mn/m ²)	ϵ_r (x10 ⁻⁶)	σ_y (Mn/m ²)	ϵ_y (x10 ⁻⁶)	ν		I.F. (%)	E (Mn/m ²)		
										est	din		din	gaiola	pratos
1	A	25.65	0.99	3030	1580	123.0	9180	117.0	8700	0.05	0.31	•	16.88	•	12.0
	C		0.99	2960	1880	110.0	9560	105.7	9100	•	•	•	•	17.0	•
3	A	25.64	1.17	3800	2470	102.8	7430	92.8	6680	0.06	0.14	32.9	35.50	•	14.3
	B		1.17	3690	2200	111.0	•	•	•	•	•	•	•	24.0	•
4	A	24.96	3.72	2380	1310	39.5	7960	34.6	6660	•	0.28	55.4	10.97	•	4.3
	B		3.72	2130	1090	31.5	8380	26.7	6830	•	•	•	•	•	4.7
5	A	24.88	3.53	1830	1220	36.5	6630	33.3	5980	•	0.1	61.9	8.14	5.3	•
	B		3.53	1860	1050	25.5	7620	23.2	6740	•	•	•	•	•	4.3
6	A	24.31	5.01	3280	2630	46.5	7770	40.3	6810	•	-0.4	46.2	20.22	•	5.8
	B		5.01	3290	2370	41.5	7140	34.6	5680	•	•	•	•	•	5.8
8	A	25.46	1.69	2050	1220	58.5	8310	51.4	7160	•	0.23	58.7	9.24	9.2	8.0
	B		1.69	2090	1320	80.9	8200	77.5	7700	•	•	•	•	11.5	7.9
9	A	25.47	1.59	3120	1610	64.0	9490	59.7	8790	•	0.32	43.3	17.38	18.0	9.6
	B		1.59	3280	1980	53.9	6090	49.0	5350	•	•	•	•	17.0	7.8
10	A		4.92	2200	1390	37.0	5420	•	•	•	0.17	56.4	11.09	17.4	8.5
	B	24.67	4.92	2120	1300	37.4	7330	36.0	6450	•	•	•	•	•	5.2
	C		4.92	2220	1270	41.6	6990	37.4	6170	•	•	•	•	•	5.2
13	A	25.34	1.69	4370	2530	92.9	7560	88.3	7100	•	0.25	24.3	40.44	36.8	13.4
	B		1.69	4140	2820	77.6	6480	74.4	5830	0.05	•	•	•	•	13.4
19	A	25.66	0.96	4380	3010	122.6	7660	113.9	7080	•	0.05	26.2	48.83	33.0	13.1
	B		0.96	4380	2830	113.4	6970	106.2	6480	•	•	•	•	44.0	16.2
61	A	25.7	1.00	3200	2160	95.4	8280	93.1	8010	•	0.08	42.1	25.97	34.0	11.6
66		•	•	4070	2690	76.6	4730	72.8	4450	•	•	•	•	•	12.0
74	A	25.44	1.46	5090	3270	108.5	5930	97.2	5290	0.14	0.15	16.7	62.63	40.4	16.4
	B		1.46	4900	3380	108.4	8360	102.6	7670	•	•	•	•	•	15.0
500		25.63	0.95	3990	3000	129.7	6410	125.3	6260	0.07	-0.15	28.9	39.16	43.1	20.9
502		25.57	1.08	4130	3010	125.8	7330	120.8	6880	0.12	-0.06	28.2	43.35	50.0	17.0

γ_d - Peso volúmico aparente seco; n - porosidade; I.F. - Índice de fissuração;
 V_L e V_T - Velocidade de propagação das ondas longitudinais (L) e transversais (T) nas amostras secas;
 σ_r e σ_y - Tensão de rotura (r) e de cedência (y) no ensaio de compressão uniaxial;
 ϵ_r e ϵ_y - Deformação de rotura (r) e de cedência (y) no ensaio de compressão uniaxial;
 ν - Coeficiente de Poisson (din- dinámico, est- estático);
E - Módulo de elasticidade (din - dinámico, gaiola - estático com a gaiola, pratos- estático entre pratos).

3 — RESULTADOS

Para todas as amostras ensaiadas determinou-se a resistência à compressão simples, a tensão de cedência, as deformações de rotura e de cedência e o módulo de elasticidade. O coeficiente de Poisson foi obtido apenas para algumas das amostras. No quadro 1 apresenta-se uma sùmula dos resultados obtidos.

Na Fig. 2 apresenta-se o comportamento tensão-deformação de duas amostras em que foi efectuada a descarga das tensões depois de se atingir a fase elástica da curva. Verifica-se que nas duas amostras há uma recuperação quase total das deformações devido à diminuição das cargas. Aumentando novamente as tensões observa-se que uma das amostras sofreu maiores deformações que no ciclo inicial, enquanto a outra sofreu menores deformações.

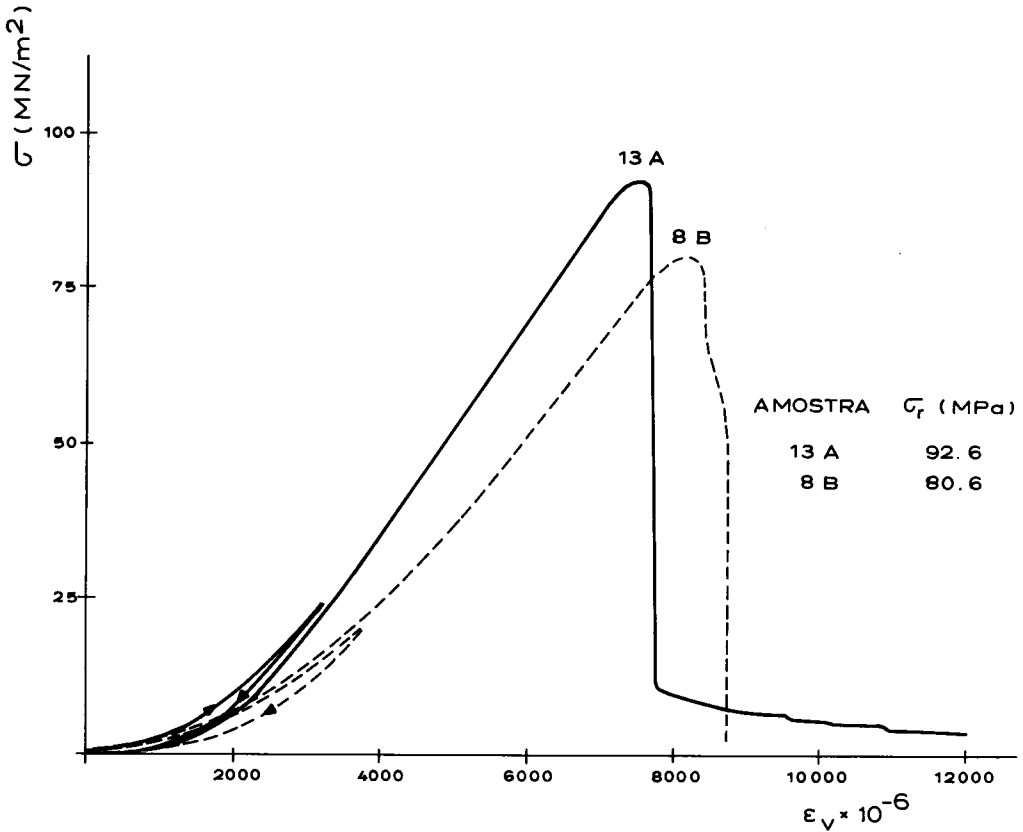


Fig. 2 — Comportamento tensão-deformação e ciclo de descarga e carga de duas amostras

Depois de se atingir a tensão de rotura, observaram-se diferentes tipos de comportamento. Na Fig. 3 apresentam-se três exemplos em que após a rotura há diminuição da resistência até valores praticamente nulos. As amostras mais resistentes tendem a apresentar um comportamento predominante frágil (e.g. amostra 19A), passando a frágil-dúctil para as amostras pouco resistentes (e.g. amostra 10C).

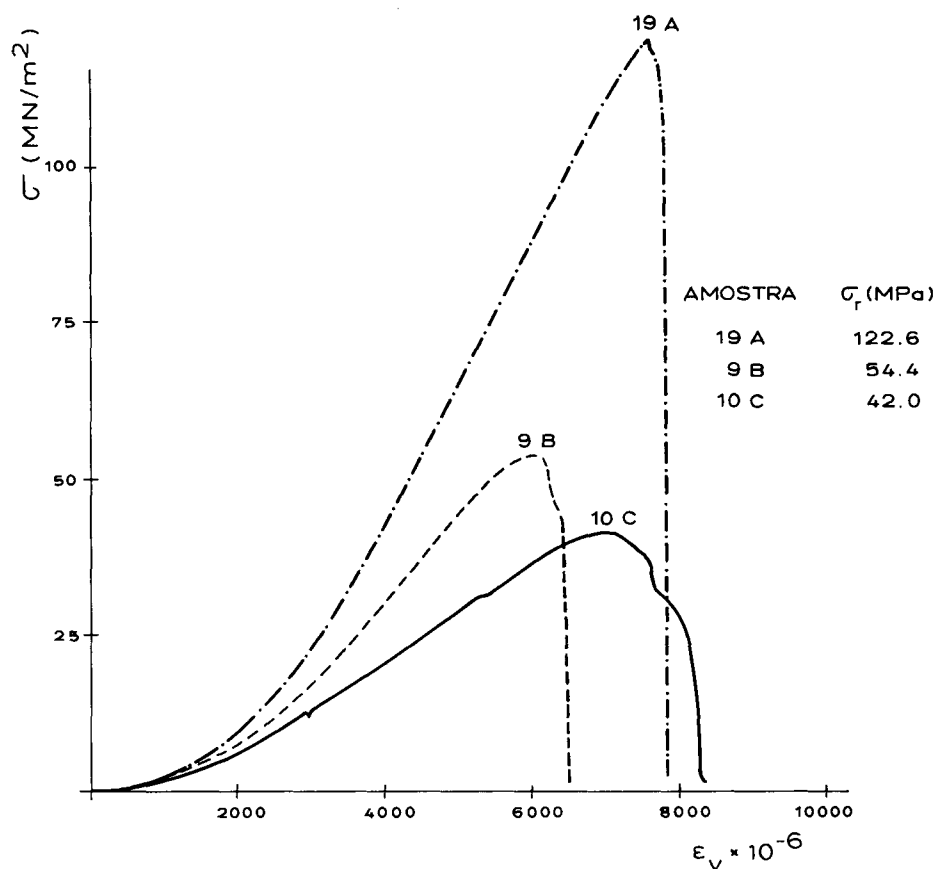


Fig. 3 — Curvas tensão-deformação de três amostras exibindo diminuição total de resistência após atingirem a tensão de rotura

Na Fig. 4 apresentam-se outros três exemplos em que não há diminuição total da resistência após a rotura. Também nestas amostras se verifica que a variação da resistência antes e após rotura é mais suave nas amostras menos resistentes. Também se observa uma transição do comportamento frágil-dúctil (e.g. amostras 13B e 8A) para o comportamento dúctil (e.g. amostra 4A).

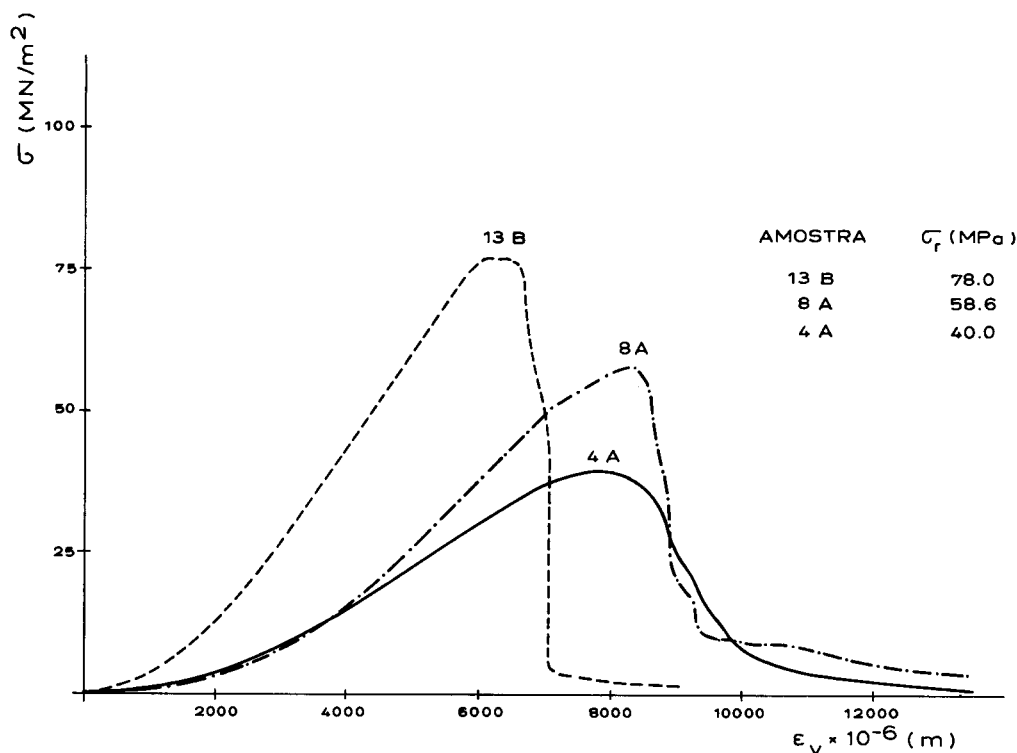


Fig. 4 — Comportamento de alguns granitos exibindo resistência residual após rotura

Tomando como referência o valor da tensão de rotura em cada amostra, quanto menor for a sua resistência à rotura mais cedo sofre cedência. Nas amostras mais alteradas ($\sigma_r < 60$ MPa) e com comportamento predominantemente dúctil, a cedência tende a ocorrer para valores inferiores a 92% de σ_r ; nas amostras sãs a cedência tende a ocorrer para percentagens praticamente idênticas e rondando os 95% da tensão de rotura (Fig. 5).

Na Fig. 6-A apresenta-se a relação obtida entre as tensões de rotura e de cedência e na Fig. 6-B a relação entre os quocientes das deformações sobre as tensões de cedência e de rotura para as amostras ensaiadas. Verifica-se que em ambos os gráficos há uma boa correlação linear.

Nos granitos mais resistentes, a rotura tende a processar-se pelo aparecimento de um único plano de corte oblíquo, enquanto que nos granitos mais alterados há tendência para a formação de fracturas axiais múltiplas, com a consequente destruição da estrutura interna da amostra.

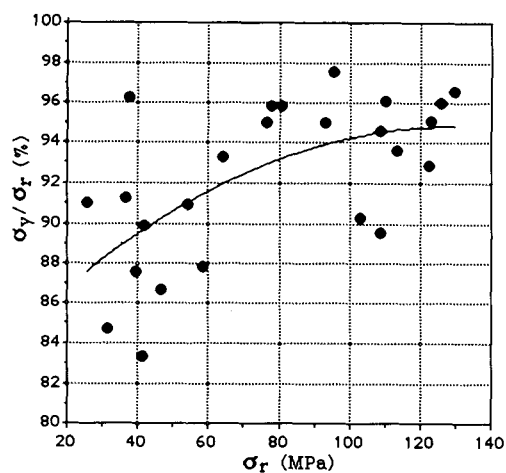


Fig. 5 — Tensão de rotura versus percentagem da tensão de cedência em relação à tensão de rotura

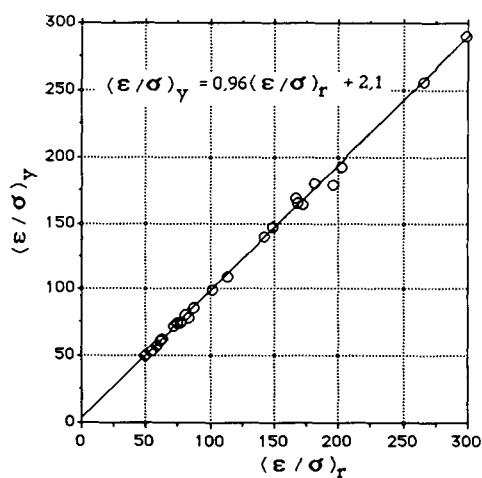
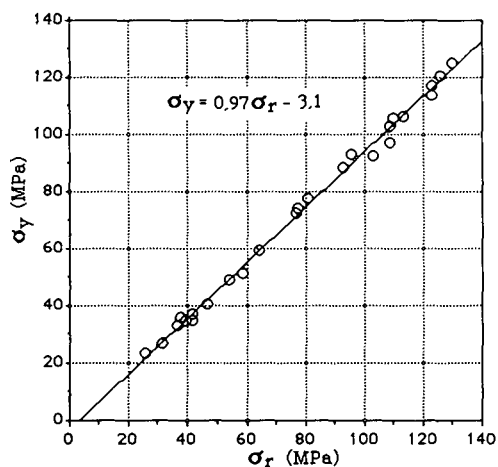


Fig. 6 — Relações entre: A) as tensões de rotura e de cedência; B) os quocientes das deformações (ϵ) sobre as tensões (σ) de rotura (r) e de cedência (y), (sendo $\epsilon = \epsilon_p \times 10^{-6}$ e σ a tensão de rotura ou de cedência em MPa)

Na Fig. 7 encontram-se projectados os valores da resistência à rotura em função da porosidade das amostras ensaiadas. Nos granitos sãos, com menos de 1,5% de porosidade, a resistência à rotura varia entre 100 e 130 MPa. Nos granitos alterados, com porosidades entre 3 e 5%, a resistência à rotura varia entre 25 e 50 MPa.

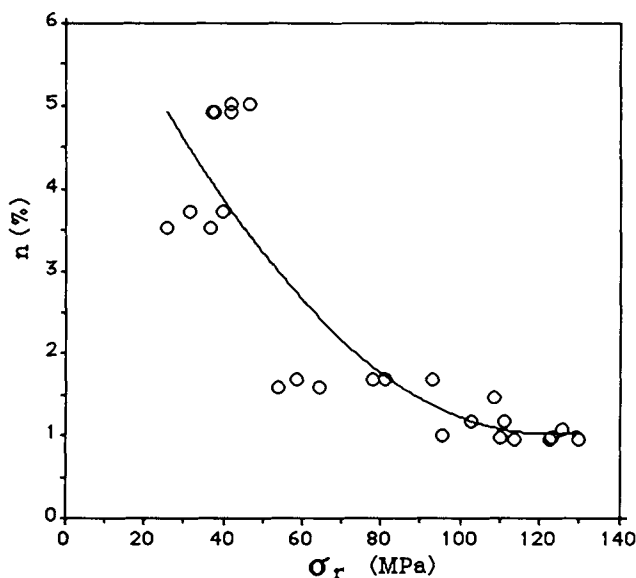


Fig. 7 — Variação da resistência à rotura em função da porosidade (n) no ensaio de compressão simples (Veiga Pinto *et al.*, 1988)

Quanto ao módulo de elasticidade, verifica-se que tende a ser menor nas amostras com maior porosidade, sem que no entanto se observe uma relação evidente entre estes dois parâmetros. A Fig. 8 mostra que existe correlação negativa entre o módulo de elasticidade e o índice de fissuração, parâmetro este proposto e descrito por Delgado Rodrigues (1983); as amostras com maiores módulos de elasticidade apresentam os índices de fissuração mais baixos.

Verificou-se que os módulos de elasticidade determinados simultaneamente são menores utilizando os valores do registo das deformações entre pratos ($E_{est.}$ - pratos) do que utilizando as deformações obtidas com a gaiola ($E_{est.}$ - gaiola). Na Fig. 9 apresenta-se a relação entre os módulos de elasticidade calculados por estes dois processos. Na Fig. 8 apresentam-se duas correlações obtidas entre o índice de fissuração e os módulos de elasticidade determinados com a gaiola ou com as deformações obtidas entre os pratos da prensa. As diferenças crescem com a diminuição do índice de fissuração. Baixos índices de fissuração traduzem amostras pouco perturbadas e com elevada resistência.

Na Fig. 10 apresenta-se a relação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico. Os módulos de elasticidade dinâmicos foram obtidos a partir da velocidade de propagação de ultra-sons. Quanto ao coeficiente de Poisson estático, verifica-se que varia entre 0,05 e 0,14 nos granitos sãos.

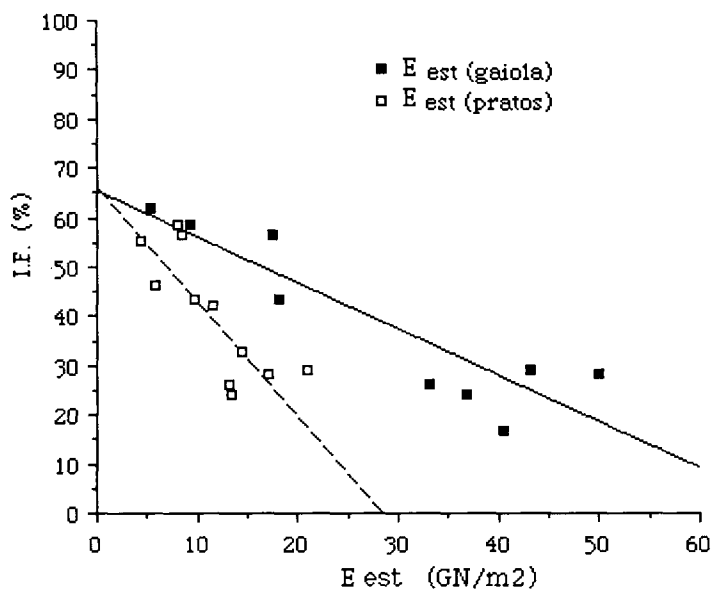


Fig. 8 — Correlações entre o índice de fissuração e os módulos de elasticidade determinados com a gaiola e a partir do registo da curva tensão-deformação (pratos)

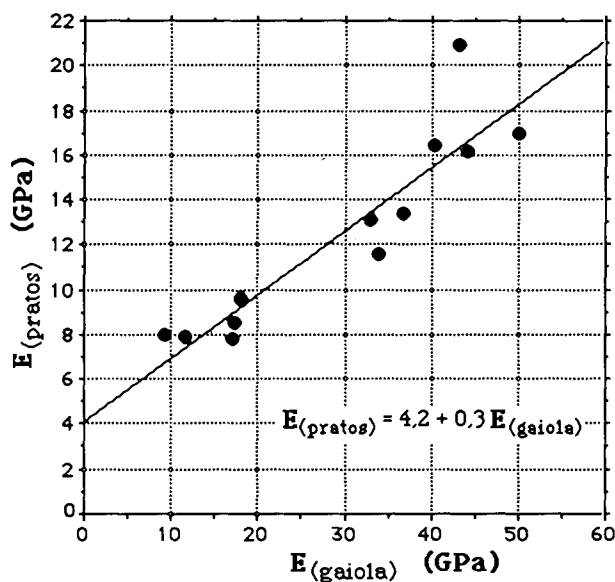


Fig. 9 — Relação entre os módulos de elasticidade calculados com as deformações entre os pratos (curvas tensão-deformação) e com as leituras da gaiola

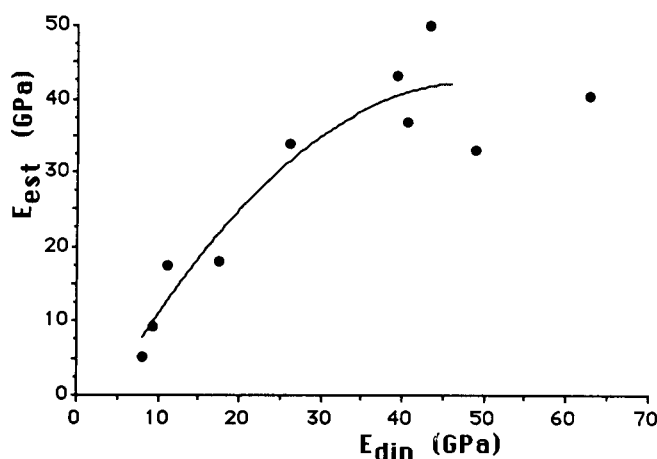


Fig. 10 — Relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico

4 — DISCUSSÃO

Em todas as amostras ensaiadas foi possível identificar as três fases da curva tensão-deformação já referidas anteriormente (Hawkes e Mellor, 1970). O aumento do declive na primeira fase (I) atribui-se ao fecho das fissuras e poros provocado pelo aumento das tensões, envolvendo ainda uma parte correspondente ao ajustamento dos topos do provete em contacto com as placas. O comportamento elástico verificado na segunda fase (II) da curva deve-se às propriedades elásticas dos minerais constituintes da rocha. As maiores diferenças de comportamento verificaram-se após o ponto de cedência (ponto D da Fig. 1), que materializa a transição entre as fases II e III. Desde o ponto de cedência e até se atingir a tensão de rotura observa-se uma diminuição gradual do declive da curva, que é mais evidente nas amostras com menor resistência à rotura (fase III). Para além do pico da curva tensão-deformação, verificou-se que algumas amostras sofreram rotura brusca enquanto outras romperam mais ou menos progressivamente.

Admite-se que para as curvas apresentadas na Fig. 2 o aumento da deformação após o relaxamento das cargas se deve à aparição de novas fissuras durante a carga e descarga, enquanto que a diminuição das deformações se deverá ao fecho das fissuras preexistentes.

Os materiais com comportamento perfeitamente elástico não apresentam cedência ($\sigma_r = \sigma_y$). No entanto, tal não acontece nos materiais rochosos pois a rotura geralmente só ocorre após ser ultrapassado o ponto de cedência.

Nas amostras alteradas, a energia acumulada durante a carga é dissipada gradualmente a partir de níveis de tensão relativamente baixos. O comportamento dúctil, exibido, mostra a capacidade de dissipar essa energia, pois a degradação física e química sofrida pela rocha

possibilita o desenvolvimento de numerosas fracturas, geralmente axiais, ao aproximar-se a rotura. Não havendo acumulação de tensão na amostra não há a possibilidade de ocorrer rotura violenta. Pelo contrário, nas amostras sãs acumula-se maior tensão sem se gerarem fracturas. Por outro lado os coeficientes de compressibilidade do quartzo e em particular dos feldspatos são bastante diferentes, provocando o aumento da microfissuração à medida que cresce a tensão aplicada. A textura porfiróide de grão grosseiro destes granitos facilita ainda mais a microfissuração, pois sendo os feldspatos os minerais com maiores dimensões eles têm baixos coeficientes de compressibilidade (Perami, 1971). Nos feldspatos, o limite de elasticidade e a rotura são atingidos primeiro que no quartzo, que é muito compressível e dificilmente clivável. O contraste de tamanho entre os enormes cristais de feldspato, que chegam a atingir alguns centímetros, e os cristais de quartzo provoca em valor absoluto grandes diferenças de tensão nos limites intercristalinos, o que tende a gerar microfissuras. Estas diferenças de tensão são superiores às que se verificariam numa rocha com pequenos cristais do mesmo tamanho. A partir das microfissuras desenvolvem-se progressivamente fracturas que podem originar a destruição brusca da amostra com a perda parcial ou mesmo total da resistência. Este comportamento é o que Houpert (1974) designa por frágil-dúctil.

As microfracturas e fracturas axiais, que originam a cedência, aparecem, segundo Houpert (1974), para um valor da carga que pode variar entre 50% e 95% da tensão de rotura, respectivamente para as rochas homogéneas e heterogéneas. As amostras ensaiadas são claramente heterogéneas, pelo que os resultados apresentados na Fig. 5 concordam com o referido por aquele autor, pois que a cedência se verificou entre os valores extremos de 83% e 97% da tensão de rotura.

É interessante reparar que nas rochas mais resistentes a entropia (grandeza que define a incapacidade de utilização de energia) tem uma variação mais rápida para o seu valor máximo (rotura total), a qual ocorre repentinamente.

Nas rochas de baixa resistência a entropia cresce mais moderadamente com uma taxa de variação ligeiramente decrescente com a deformação até à resistência mecânica máxima, após o que aumenta suavemente com uma taxa decrescente.

Em termos globais as rochas de baixa resistência têm uma elevada capacidade de adaptação com uma taxa de variação da entropia moderada com a deformação. Desse modo, será possível considerar um maior nível de incerteza associado à previsão do colapso de estruturas constituídas por rochas de elevada resistência, as quais exibem uma rotura (entropia máxima, ou seja, grau de desordem máxima do sistema) repentina e imprevista.

Quanto aos módulos de elasticidade (Fig. 9), os menores valores obtidos nos módulos entre pratos poderão dever-se às deformações que se verificam nos topos da amostra em contacto com os pratos da prensa, e que na gaiola não são tidos em consideração por os pontos de apoio para as leituras das deformações se encontrarem afastados dos topos. Verifica-se que os módulos obtidos com a gaiola são semelhantes aos referidos por outros autores para este tipo de rochas, enquanto os obtidos a partir das deformações entre os pratos são bastante menores. Assim, parece que a determinação do módulo de elasticidade a partir do registo da curva tensão-deformação é incorrecto. Isto é, pode considerar-se que a aplicação de cargas conduz a uma elevada perturbação com deformações excessivas junto dos pratos e não representativa do comportamento real do material. Para a determinação do módulo de elasticidade deverão usar-se extensómetros mecânicos (gaiola) ou eléctricos. No entanto poderá ter interesse efectuar um estudo aprofundado das causas que estão na origem das diferenças observadas.

O comportamento tensão-deformação das rochas graníticas varia com o estado de tensão instalado, a resistência à rotura e as características específicas de cada amostra.

A rotura dos materiais é um processo contínuo que se inicia pelo aparecimento de microfissuras. Com o aumento das tensões crescem as deformações que provocam o desenvolvimento das microfissuras, gerando o aparecimento de superfícies de rotura. As microfracturas e fracturas axiais que originam a cedência aparecem para um valor da carga que, proporcionalmente à tensão de rotura, é menor nas amostras mais alteradas. Nestas, a diminuição da resistência após rotura tende a ser mais lenta que nos granitos sãos, evidenciando um comportamento mais dúctil.

A porosidade cresce com o avanço da alteração nos granitos, diminuindo-lhes a resistência à rotura e à cedência e o módulo de elasticidade. A fissuração apresenta boa correlação negativa com a elasticidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRADY, B. G. e BROWN, E. T. (1985) — *Rock mechanics for underground mining*, Capítulo 4, George Allen & Unwin.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1983) — *Laboratory study of thermally-fissured rocks*, Memória do LNEC N.º 583.
- FERRER, M. (1986) — *Report of an investigation of rock strength and failure using servo-controlled testing equipment and specimens from Penarroya*, Eng. Geology Section, Imperial College of Science and Technology, London.
- HAWKES, I. e MELLOR, M. (1970) — *Uniaxial testing in rock mechanics*, Eng. Geol. 4, N.º 3, pp. 177-285.
- HOUPERT, R. (1974) — *Comportement fragile en compression simple et structure des roches*, 2nd Int. Cong. IAEG, Vol. 1, pp. IV-25.1 a 10, São Paulo, Brasil.
- HOUPERT, R. (1979) — *The fracture behaviour of rocks*, 4th Int. Cong. ISRM, Vol. 3, pp. 107-114, Montreux.
- HUDSON, J. A.; CROUCH, S. L. e FAIRHURST, C. (1972) — *Soft, stiff and servocontrolled testing machines: a review with reference to rock failure*, Eng. Geol. 6, N.º 3, pp. 155-189.
- NORONHA, F. e RIBEIRO, M. L. (1983) — *Notícia explicativa da folha 6-A — Montalegre*, Carta geológica de Portugal, Escala 1/50 000. Serv. Geol. Portugal.
- PÉRAMI, R. (1971) — *Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques*. Thèse présente à l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- QUINTA FERREIRA, M. (1987) — *Chemical and mineralogical characters of granites used in portuguese rockfill dams and their possible relationship with mechanical properties*. Relatório de estágio Eng. Geology Section, Imperial College of Science and Technology, London.
- QUINTA FERREIRA, M.; ANA QUINTELA e VEIGA PINTO, A. (1987) — *Barragem de Paradela. Estudo dos Enrocamentos e análise do comportamento estrutural*. Relatório interno do LNEC, Outubro de 1987, Lisboa.
- VEIGA PINTO, A.; QUINTA FERREIRA, M. e ANA QUINTELA (1988) — *Estudo do enrocamento e análise do comportamento estrutural da barragem de Paradela*, Geotecnia N.º 53, pp. 1-20.