

TEXTURA DAS ROCHAS, SUAS DEFORMABILIDADES E RESISTÊNCIAS, PARA DIFERENTES SOLICITAÇÕES

ROCK TEXTURE, DEFORMABILITY AND STRENGTH, UNDER DIFFERENT TYPES OF LOADINGS

Dinis da Gama, Carlos, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal (dgama@ist.utl.pt)*
Reis e Sousa, Manuel, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal (reis.sousa@mail.ist.utl.pt)*
Barroso, Fernando *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal (pcm4028@mail.ist.utl.pt)*

RESUMO

O trabalho apresentado neste artigo teve por finalidade verificar a interdependência das características de deformabilidade e de resistência das rochas com a sua textura, ou seja, com o tamanho, forma e disposição espacial dos minerais que as constituem.

Para tal, provetes de oito tipos distintos de rochas (ígneas, sedimentares e metamórficas) com texturas granulares muito diversas, foram sujeitos a diversos tipos de ensaios mecânicos, tendo-se determinado as características de deformabilidade e de resistência para diferentes solicitações. Descrevem-se os tipos de rochas ensaiados, os diversos tipos de ensaio realizados, apresentam-se os resultados obtidos sob diversas solicitações e são tiradas conclusões, com especial destaque para as características de deformabilidade e resistência à tracção.

ABSTRACT

The work presented in this article intended to verify if the characteristics of deformability and resistance of rocks are dependent in some way on its texture, and size, shape and spatial distribution of the minerals that constitute most rocks.

For that purpose, specimens of eight distinct types of rocks (igneous, sedimentary and metamorphic) with distinct granular textures, were submitted to various test types, for determining their characteristics of deformability and strength.

Obtained results from the various types of rocks under different tests are presented, in order to develop relevant conclusions, regarding their deformability and tensile strength.

1 – INTRODUÇÃO

Perante um conjunto de rochas de diferentes litologias, é comum admitir-se que àquela a que corresponde o valor de módulo de deformabilidade mais elevado deve corresponder, também, o maior valor de resistência à rotura. Porém, a grande dispersão encontrada nos valores de módulo de deformabilidade e nos valores de resistência à rotura para o mesmo tipo de solicitação (compressão uniaxial, por exemplo), leva a supor que os valores daquelas características, para além de dependerem grandemente do grau de alteração da rocha, dependem, também, de outros factores, como por exemplo da textura da rocha, isto é, da disposição e dimensão média dos minerais que a constituem.

Para se tentar avaliar até que ponto as diferentes texturas das rochas têm influência nos valores das características de deformabilidade e de resistência e, também, para se analisar as diferenças entre os valores de deformabilidades do mesmo tipo de rocha para diferentes solicitações, foram sujeitos a diversos tipos de ensaios um apreciável número de provetes com texturas bem diferentes [1, 2].

Este trabalho, para além de procurar averiguar se os valores das características de deformabilidade e de resistência das rochas estão de algum modo ligados à sua textura, teve ainda por objectivo determinar os valores de módulo de deformabilidade e de resistência das rochas quando sujeitas a diferentes estados de solitação.

2 - ENSAIOS

De oito tipos distintos de rochas (ígneas, sedimentares e metamórficas) com texturas granulares muito diversas e sem qualquer alteração visível, foram preparados vários provetes e submetidos a diversos tipos de ensaio, por forma a determinar, para cada tipo de rocha, os valores de deformabilidade e de resistência, em função do tipo de solitação do ensaio.

Relativamente aos provetes do mesmo tipo de rocha, procurou-se que os mesmos fossem obtidos do mesmo bloco de rocha, ou de blocos contíguos no local de jazida, e segundo a mesma direcção. Os provetes destinados aos ensaios de compressão diametral e de compressão pontual e uns poucos mais, tinham forma cilíndrica com o diâmetro de 55 mm, os restantes tinham forma prismática com a secção quadrada de 25 cm². No Quadro 1 indicam-se os tipos de rochas ensaiadas e o número de ensaios efectuados sobre cada tipo; no total foram efectuados 314 ensaios.

Para determinação das deformabilidades, as rochas foram submetidas à propagação de ultra-sons e a ensaios de compressão uniaxial, de compressão diametral e de flexão. Os valores de resistência à rotura das rochas ensaiadas foram determinados para as condições impostas pelos ensaios anteriormente referidos e, também, por meio do ensaio de compressão pontual. Porque a determinação da velocidade de propagação de ultra-sons através do material é um método não destrutivo, os provetes sujeitos a este tipo de determinação foram, posteriormente, sujeitos a ensaios de compressão uniaxial.

Quadro 1 – Rochas ensaiadas e número de ensaios efectuados

TIPO DE ROCHA	Estrutura	Textura	Nº de ensaios
Granito de grão fino	Compacta e homogénea	Microgranulosa (aplítica)	34
Granito de grão grosseiro	Compacta e homogénea	Granulosa	34
Granito porfiróide	Compacta e heterogénea	Porfiróide	32
Calcário levemente margoso	Compacta e homogénea	Fina	31
Calcário oolítico	Compacta e homogénea	Fina – sacaróide	59
Mármore de Borba	Compacta e homogénea	Muito fina – sacaróide e cristalina	48
Mármore de Estremoz	Compacta e homogénea	Muito fina – sacaróide e cristalina	40
Xisto levemente argiloso	Compacta e homogénea	Muito fina e cristalina	36

Quer no que respeita às preparações dos provetes, às metodologias dos diversos ensaios, bem como ao número de provetes para cada tipo de ensaio e por rocha ensaiada, foram seguidas as sugestões da ISRM [1].

As deformações motivadas pelas forças aplicadas nos ensaios destinados à determinação dos diversos módulos de deformabilidade foram determinadas por meio de extensómetros eléctricos de resistência, com base de medição de 10 ou 16 mm, consoante a maior ou menor dimensão média dos cristais constituintes das rochas. No caso dos provetes de granito porfiróide, dada a

dimensão média dos cristais, as extensões foram determinadas por meio de conjuntos de dois extensómetros eléctricos contíguos sobre a mesma geratriz e ligados em série, constituindo, assim, uma base de medição de 32 mm. Ainda relativamente a este tipo de granito, nos ensaios de compressão diametral não foram determinadas extensões, visto não ser possível tal tipo de ligação e as determinações com um único extensómetro não serem, certamente, representativas do material em ensaio.

Cada um dos diversos tipos de ensaio que tiveram por objectivo determinar os correspondentes módulos de deformabilidade estáticos, foi constituído por um ciclo de carga e descarga até níveis de tensão que não atingiram 50% do valor da tensão de rotura da rocha para o tipo de solicitação do ensaio, seguido de uma carga continuamente crescente até ser atingida a rotura do material em ensaio.

3 – RESULTADOS E SUA ANÁLISE

No Quadro 2 apresentam-se, para os diferentes tipos de rochas ensaiadas e para as diferentes solicitações de ensaio, os valores médios dos módulos de deformabilidade, bem como os coeficientes de variação do conjunto de valores a que correspondem aqueles valores médios.

Para alguns tipos de ensaio, no referido Quadro não constam os valores de módulo de deformabilidade respeitantes ao calcário oolítico e ao mármore de Estremoz, porque durante a realização dos mesmos não foram registadas as extensões. Isto, porque aqueles ensaios, quando executados, não tinham por objectivo o presente artigo e, posteriormente, já não se dispôs de materiais rochosos daqueles tipos.

No Quadro 3 apresentam-se, para os diferentes tipos de rochas ensaiadas e para as diferentes solicitações de ensaio, os valores médios de resistências à rotura, bem como os coeficientes de variação do conjunto de valores a que correspondem aqueles valores médios.

No Quadro 4 indicam-se, para os diferentes tipos de rocha, os valores das extensões registadas até à altura da rotura dos provetes, ou até imediatamente antes. Aquelles valores respeitam às diversas solicitações de ensaio (compressão uniaxial, compressão diametral e flexão) em que foram medidas as deformações resultantes dessas mesmas solicitações.

Nas Figuras 1 a 12 apresentam-se diagramas de tensões aplicadas versus extensões, referentes a alguns dos tipos de rocha ensaiada e respeitantes às três solicitações de ensaio em que foram medidas as extensões.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados mostraram que:

- Não existe uma relação directa entre o valor de módulo de deformabilidade e o valor de resistência à rotura da rocha, pois que, para o mesmo tipo de ensaio (compressão uniaxial), rochas de textura muito fina, como os dois tipos de mármore e o xisto, apresentam os mais elevados valores de módulo de deformabilidade determinados (79,3, 61,3 e 66,4 GPa) e apresentam para resistência à rotura, pela mesma ordem, os valores de 67,9, 67,3 e 63,7 MPa; rochas de texturas microgranular a porfiróide (os três tipos de granito ensaiados), apresentam os valores de 44,7, 34,6, e 35,6 GPa para módulos de deformabilidade e para resistência à rotura apresentam os valores mais elevados determinados (101,3, 94,7 e 140,8MPa);
- Em termos médios, a relação entre módulo de deformabilidade e tensão de rotura das rochas de textura fina é cerca de 2,5 vezes superior a idêntica relação para rochas de textura grosseira;

- Para todas as rochas ensaiadas e para as diferentes solicitações de ensaio, os módulos de deformabilidade dinâmicos, determinados a partir da velocidade de propagação de ultras-sons, apresenta sempre o valor mais elevado; o valor mais baixo de módulo de deformabilidade respeita sempre ao ensaio de tracção por flexão (Tabela 2);
- Os valores de módulo de deformabilidade decrescem segundo o tipo de solicitação que se indica: propagação de ultra-sons, compressão uniaxial, compressão diametral e tracção por flexão (Tabela 2);
- Em termos médios, os valores de módulo de deformabilidade determinados para o estado de tracção por flexão, correspondem a cerca de 70% dos valores determinados nos ensaios de compressão uniaxial;
- Para as diferentes rochas e diferentes tipos de solicitação de ensaio, os valores das extensões até à rotura, dependem muito do tipo de solicitação do ensaio e, também, da textura das rochas. No ensaio de compressão uniaxial o valor da extensão é algumas vezes superior ao obtido no de flexão, situando-se o valor da extensão registada no ensaio de compressão diametral entre aqueles dois. Nas rochas de textura granular (granitos), o valor da extensão na rotura em tracção por flexão é da ordem de 25 a 35 % do valor que se regista no ensaio de compressão uniaxial; nas rochas de textura muito fina (calcário, mármore e xisto) relativamente aos mesmos tipos de extensão, aquele valor situa-se entre 10% e 15 % (Quadro 4 e Fig. 1 a 12);
- Para todas as rochas ensaiadas e para os três tipos de ensaios em que as mesmas foram sujeitas à tracção (compressão diametral, flexão e compressão pontual), os valores de tensão de rotura mais elevados corresponderam sempre ao ensaio de flexão e os mais baixos ao de compressão pontual (Tabela 3).

Quadro 2 – Módulos de deformabilidade das variedades rochosas ensaiadas

Tipo de Rocha	MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE (GPa)							
	TIPO DE ENSAIO							
	DINÂMICO		COMPRESSÃO UNIAXIAL		COMPRESSÃO DIAMETRAL		FLEXÃO	
	E_d	Coefficiente de variação (%)	E_e	Coefficiente de variação (%)	E_t	Coefficiente de variação (%)	E_t	Coefficiente de variação (%)
Granito de grão fino	56,5	7,1	44,7	3,0	33,7	2,6	30,8	4,4
Granito de grão grosseiro	45,7	2,3	34,6	7,2	31,1	11,1	22,7	11,0
Granito porfiróide	39,4	5,5	35,6	6,8	----	----	21,0	6,9
Calcário levemente margoso	72,1	1,6	60,8	2,3	48,4	2,7	37,8	7,2
Calcário oolítico	54,8	5,0	39,6	5,8	----	----	----	----
Mármore de Borba	112,7	2,2	79,3	8,3	74,7	6,2	67,4	11,2
Mármore de Estremoz	----	----	61,3	7,0	----	----	----	----
Xisto levemente argiloso (medições segundo a xistosidade)	80,6	1,0	66,4	3,8	62,2	7,4	52,5	8,7

Quadro 3 – Resistências à rotura das variedades rochosas ensaiadas

Tipo de Rocha	RESISTÊNCIAS À ROTURA (MPa)							
	TIPO DE ENSAIO							
	COMPRESSÃO UNIAXIAL		COMPRESSÃO DIAMETRAL		FLEXÃO		COMPRESSÃO PONTUAL	
	σ_u	Coefficiente de variação (%)	σ_t	Coefficiente de variação (%)	σ_t	Coefficiente de variação (%)	$I_{s(50)}$	Coefficiente de variação (%)
Granito de grão fino	101,3	7,7	11,0	7,5	14,9	3,9	7,7	5,9
Granito de grão grosseiro	94,7	6,2	7,9	6,4	10,8	6,0	7,0	10,5
Granito porfiróide	140,8	11,0	7,9	8,9	10,9	9,1	6,5	8,0
Calcário levemente margoso	91,3	5,3	7,3	9,2	11,6	19,0	5,1	11,0
Calcário oolítico	60,5	8,9	5,6	7,0	10,6	14,1	4,7	7,8
Mármore de Borba	67,9	9,0	6,1	9,3	13,8	5,0	5,6	9,3
Mármore de Estremoz	67,3	7,2	5,9	5,3	13,1	6,6	4,8	5,5
Xisto levemente argiloso	63,7*	8,6	12,3**	7,4	13,3**	17,7	7,6**	13,7

* - Resistência paralelamente à xistosidade

** - Resistência perpendicularmente à xistosidade

Quadro 4 – Extensões registadas nas roturas das diferentes rochas, nos diversos tipos de ensaio

Tipo de rocha	Extensões máximas na rotura, ϵ (10^{-6})		
	Tipo de ensaio		
	Compressão uniaxial	Compressão diametral	Flexão
Granito de grão fino	2420	836*	666
Granito de grão grosseiro	3080	908*	1049
Granito porfiróide	2565	----	601
Calcário levemente margoso	2470	482*	382
Mármore de Borba	1900	287*	244
Xisto levemente argiloso	2540	693*	226

* Extensões verticais (segundo a força aplicada)

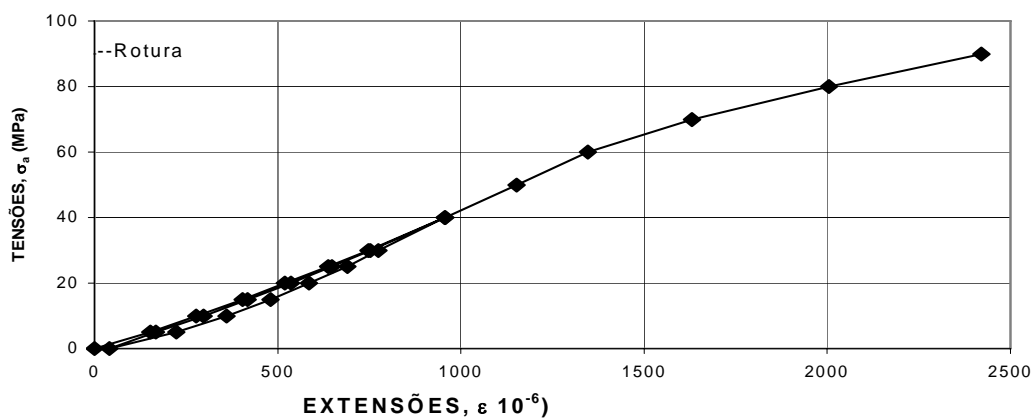


Fig.1 - Ensaio de compressão uniaxial GRANITO DE GRÃO FINO

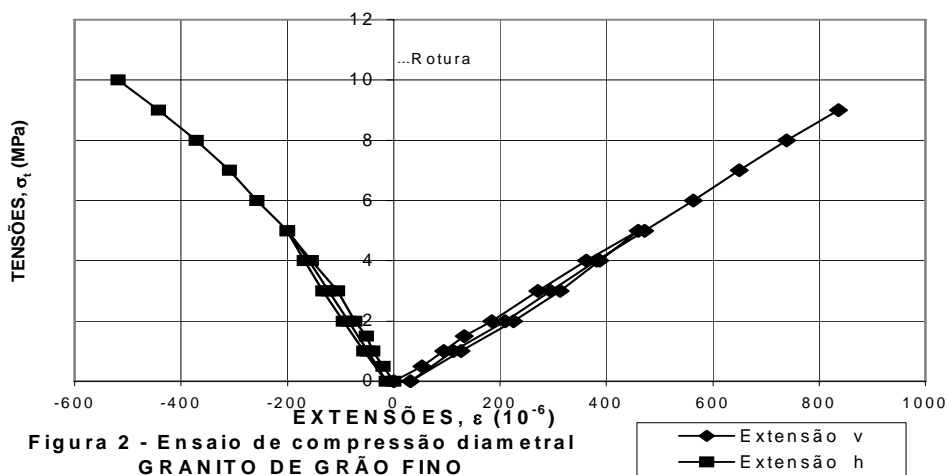


Figura 2 - Ensaio de compressão diametral GRANITO DE GRÃO FINO

Extensão v
 Extensão h

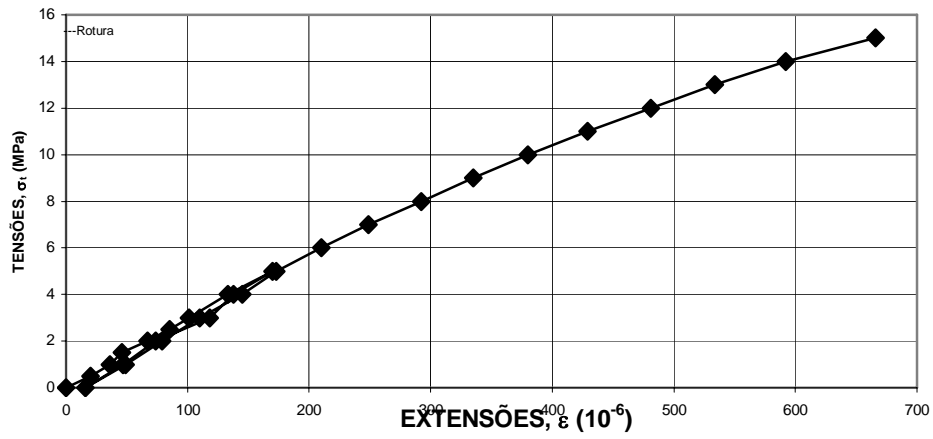


Figura 3 - Ensaio de flexão
GRANITO DE GRÃO FINO

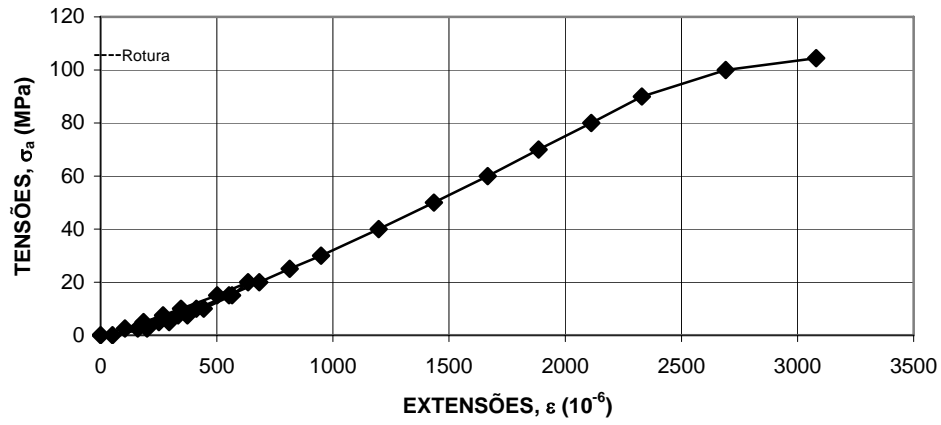


Figura 4 - Ensaio de compressão uniaxial
GRANITO DE GRÃO GROSSEIRO

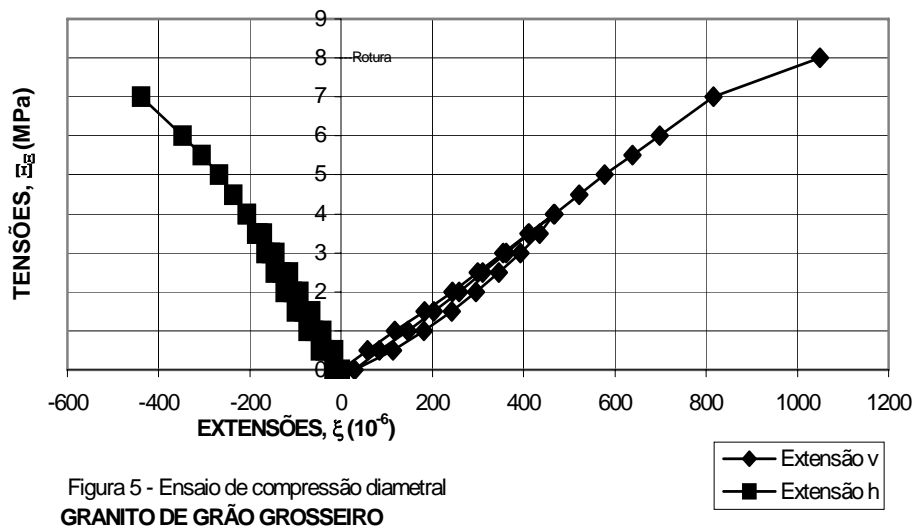


Figura 5 - Ensaio de compressão diametral
GRANITO DE GRÃO GROSSEIRO

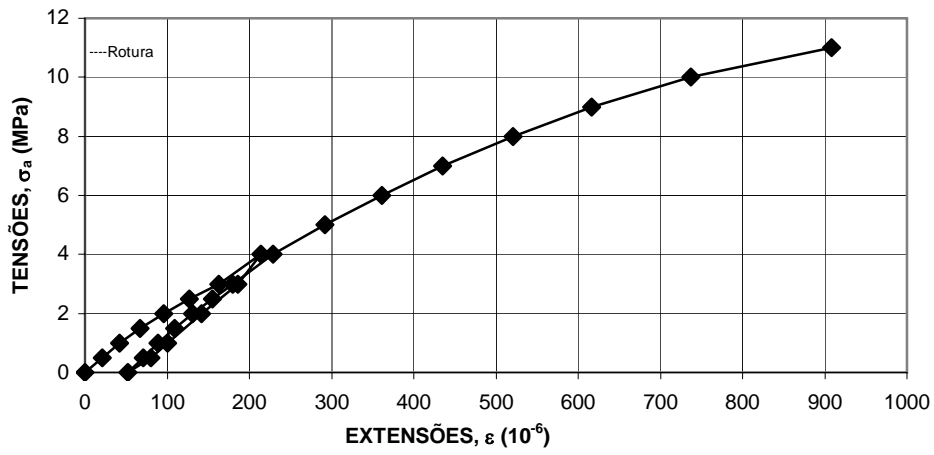


Figura 6 - Ensaio de flexão
GRANITO DE GRÃO GROSSEIRO

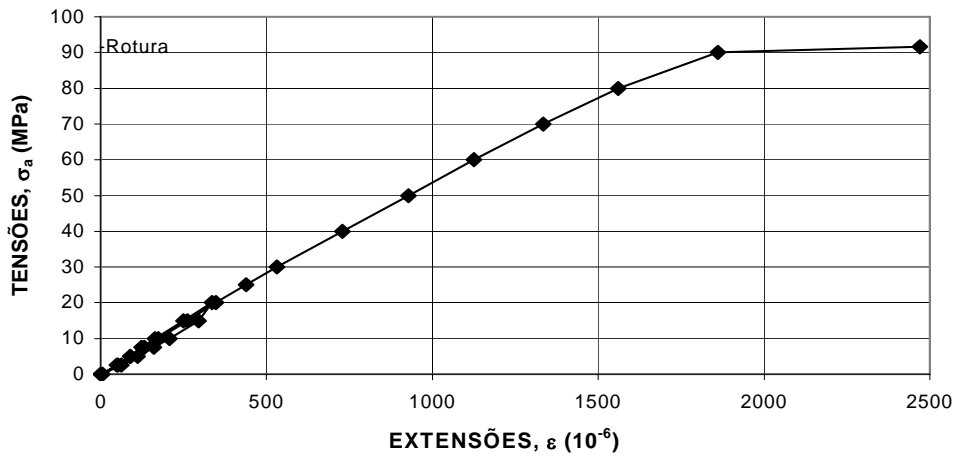


Figura 7 - Ensaio de compressão uniaxial
CALCÁRIO MARGOSO

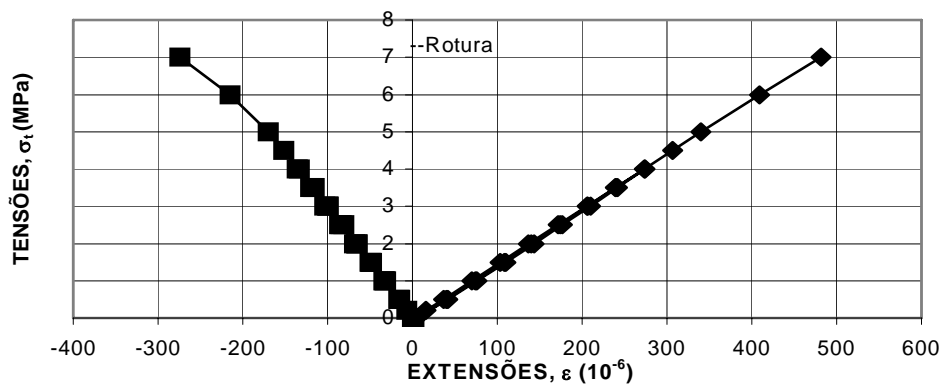
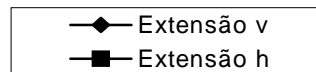


Figura 8 - Ensaio de compressão diametral
CALCÁRIO MARGOSO



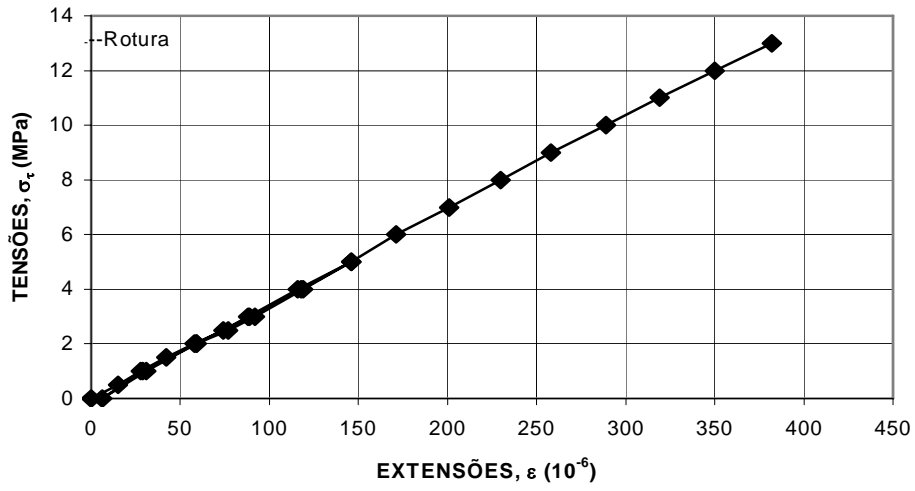


Figura 9 - Ensaio de flexão
CALCÁRIO MARGOSO

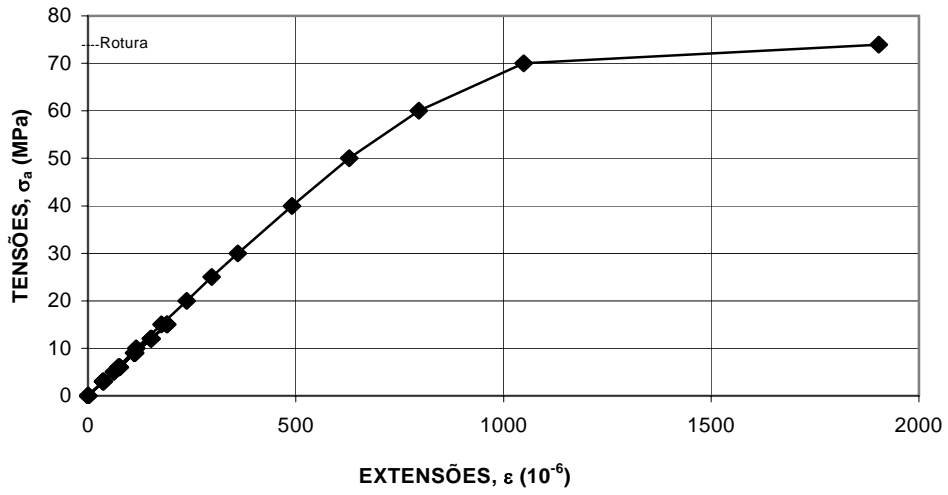


Figura 10 - Ensaio de compressão uniaxial
MÁRMORE DE BORBA

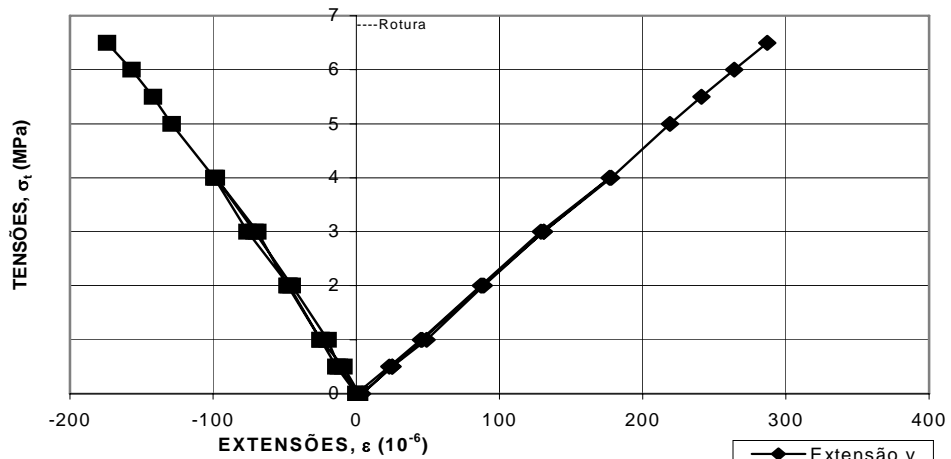


Figura 11 - Ensaio de compressão diametral
MÁRMORE DE BORBA

Extensão v
 Extensão h

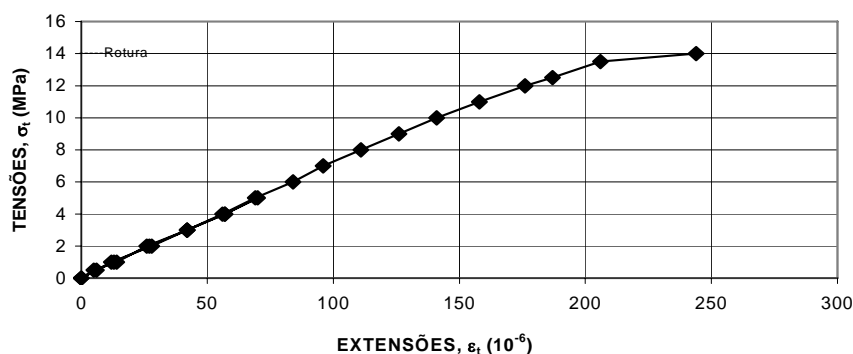


Figura 12 - Ensaio de flexão
MÁRMORE DE BORBA

4 - CONCLUSÕES

Não se observou uma relação directa entre os valores do módulo de deformabilidade das rochas e os valores das suas resistências à rotura.

A composição mineralógica das rochas e as suas texturas não influenciam do mesmo modo as suas características de deformabilidade e de resistência [3, 4].

Para os diversos tipos de rochas estudadas, independentemente das suas texturas, os valores dos módulos de deformabilidade dependem apreciavelmente do tipo de solicitação a que são submetidas para aquelas determinações. Ao ensaio dinâmico (propagação de ultra-sons) corresponde o valor mais elevado e ao ensaio de tracção por flexão corresponde o valor mais baixo. Em termos médios, a relação entre aqueles valores é da ordem de 1,8.

Independentemente das texturas das rochas, os seus valores de resistência à rotura por tracção, dependem do método de ensaio utilizado para a determinação. O valor mais elevado corresponde ao ensaio de tracção por flexão, o valor intermédio corresponde ao ensaio de compressão diametral e o valor mais baixo corresponde ao ensaio de compressão pontual. Em termos médios, a relação entre valores máximos e mínimos é da ordem de 2,0.

Dos diversos tipos de rochas ensaiadas, as de textura mais fina apresentam valor de módulo de deformabilidade mais elevado, ao passo que as de textura mais grosseira apresentam maiores valores de resistência à rotura.

Dada a considerável diferença entre os valores de módulo de deformabilidade determinados pelos diversos métodos de ensaio e, também, entre os valores de resistência à rotura por tracção, determinados segundo diversos métodos de ensaio, sugere-se que, no cálculo da estabilidade de estruturas subterrâneas, sejam utilizados os valores correspondentes às solicitações a que as mesmas são sujeitas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Brown, E.T., 1986- ISRM Suggested Methods for Rock Characterization. Pergamon Press.
- [2] Deere, D. U., 1968. Geological Considerations. Rock Mechanics in Engineering Practice. Stagg, R.G. and Zienkiewicz, D.C. (eds.), 1-20. New York, New York: John Wiley Publishing.
- [3] Hudson, John A.; Harrison, John P., 1997. Engineering Rock Mechanics- An Introduction to the Principles. Pergamon Press.
- [4] Sharma, V.M. and Saxena, K.R., 2002. In-Situ. Chacterization of Rocks. A. A. Balkema Publishers, Lisse.