

# MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM COMPRESSÃO DE ROCHAS GRANULARES BASEADA EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E QUASI NÃO DESTRUTIVOS

Ludovico Marques, M.<sup>1</sup>; Chastre, C.<sup>2</sup>; Vasconcelos, G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal

<sup>2</sup>UNIC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

<sup>3</sup>ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho



## RESUMO

*No património edificado português as rochas granulares assumem importância relevante nos elementos construtivos presentes no património histórico e cultural, nomeadamente as pedras graníticas e areníticas. Tendo por objectivo a avaliação do comportamento mecânico de rochas granulares presentes no património edificado histórico foi realizado um estudo de investigação experimental sobre amostras dos litótipos seleccionados e que são representativos de rochas presentes no próprio edificado, em termos de propriedades petrográficas, físicas e mecânicas. Neste artigo apresenta-se um modelo analítico definido com base em ensaios experimentais que permite efectuar a simulação do comportamento das rochas em compressão uniaxial (diagramas de tensão-deformação), função de propriedades físicas e mecânicas obtidas através de ensaios não destrutivos e quasi não destrutivos. Este modelo permite desta forma a avaliação do comportamento mecânico de rochas granulares sem afectar a integridade do património histórico.*

## 1- INTRODUÇÃO

A utilização da pedra nas construções tradicionais de paredes resistentes de alvenaria segue de muito perto a distribuição dos afloramentos rochosos no território.

Em Portugal Continental as rochas graníticas predominam na região norte e no interior centro (Beira Alta), apresentando ainda uma ocorrência importante no Alto Alentejo, entre Évora e Portalegre. Estes materiais pétreos foram as rochas de eleição para aplicação no património edificado monumental e histórico/cultural da região norte e centro.

Os arenitos apresentam uma distribuição menos vasta à escala nacional, mas à escala

regional a sua utilização é frequente nas construções tradicionais, particularmente na Região Oeste. Contudo, o património edificado monumental inventariado, em arenito, praticamente só existe nos concelhos de Peniche, Lourinhã e Silves. Apesar de em Portugal os arenitos não serem as rochas mais representativas, a importância dos monumentos medievais em que se encontram aplicadas justificam o seu estudo.

Dos princípios de salvaguarda do património monumental emanados das cartas internacionais de Atenas, Veneza e Cracóvia recomenda-se que os estudos a efectuar sobre os elementos construtivos deverão ter o menor grau de intrusão possível e respeitar a sua integridade física.

Assim, as metodologias tradicionais e mecânicas de caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos elementos pétreos das edificações do património dito não classificado, deparam-se com limitações respeitantes à extensão da sua aplicação no património monumental. Apenas se permite a realização de ensaios não destrutivos, mesmo assim em número reduzido. A realização de ensaios destrutivos, de um modo geral, terá que ser autorizada por uma comissão científica interdisciplinar, que obviamente invalida a maioria das pretensões nesse sentido.

O presente trabalho tem como principal objectivo a proposta de um modelo analítico que permita a caracterização do comportamento de diferentes tipos de rocha à compressão. Através do modelo global proposto torna-se possível simular o comportamento mecânico dos granitos e arenitos em termos de tensão-deformação, em função de parâmetros físicos (porosidade) e mecânicos (resistência à compressão, módulo de elasticidade) das variedades pétreas.

Para o efeito, o método preconizado consiste na identificação dos litótipos presentes nos elementos construtivos e na realização de um estudo petrográfico e de ensaios de caracterização física dos mesmos. Após a selecção dos litótipos representativos dos elementos pétreos do edificado monumental, estende-se o estudo do monumento a amostras extraídas de pedreiras coevas ou de afloramentos rochosos com materiais similares.

Para a implementação do método é necessária uma caracterização prévia dos materiais em estudo em termos dos parâmetros físicos, nomeadamente a porosidade e de parâmetros mecânicos como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático.

O método proposto tem grande interesse em termos de aplicação a monumentos porque permite obter a curva tensão-deformação da pedra aplicada em função de parâmetros que podem ser obtidos através de ensaios não-destrutivos, semi-destrutivos ou destrutivos.

## 2 -SELECCÃO DOS LITÓTIPOS ROCHOSOS

O modelo analítico foi desenvolvido para granitos e arenitos no seguimento do trabalho experimental de caracterização física e mecânica realizado para rochas graníticas (Vasconcelos 2005) e para arenitos (Ludovico Marques 2007, Ludovico Marques 2008).

Os materiais graníticos ensaiados foram provenientes de pedreiras situadas na região Norte. Os quatro litótipos estudados são granitos de duas micas, de grão fino a médio. Os primeiros três litótipos são provenientes da região do Minho e o último de Trás-os-Montes: GA de Guimarães, AF de Afife, PTa de Ponte de Lima e MDB de Mondim de Basto.

Os arenitos foram extraídos de Atouguia da Baleia, em Peniche (Ludovico Marques 2007, Ludovico Marques 2008). Identificaram-se quatro variedades que constituem dois litótipos representativos do património monumental. Refira-se que não foram encontradas pedreiras coevas nem sequer afloramentos de materiais similares aos do património monumental na região. Seleccionaram-se muros de alvenaria de pedra nas imediações do edificado patrimonial. Nestes procedeu-se à extracção de amostras com características petrográficas semelhantes, assim como propriedades físicas e mecânicas similares às das quatro variedades. Os dois litótipos possuem a mesma classificação segundo Folk (1974), *i. e.* arcoses líticas.

O litótipo designado de A+B que engloba as variedades A e B, apresenta cerca de 34 a 40% de carbonatos, enquanto o litótipo C+M possui cerca de 20 a 27% de carbonatos. Nos dois litótipos o teor em carbonatos é importante pelo que na sua designação consta também esta característica, ou seja são arcoses líticas com cimento carbonatado.

A média das dimensões dos grãos de quartzo e feldspato nas variedades de arenitos A e B oscilam de 0.1 a 0.13mm e nas variedades C e M variam de 0.15 a 0.24mm. Os arenitos A e B possuem, de um modo geral, grão fino e os arenitos C e M apresentam grão fino a médio.

### **3- CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL**

#### **3.1 - Preparação das amostras**

O litótipos graníticos seleccionados no presente estudo fazem parte de um grupo que foi objecto de uma ampla investigação experimental para a caracterização mecânica de diferentes tipos de granito que são característicos da maioria das construções históricas existentes no norte do país (Vasconcelos et al. 2008, Vasconcelos et al. 2009). Para a caracterização mecânica dos granitos optou-se por utilizar provetes cilíndricos com diâmetro de 75 mm e uma relação entre altura e o diâmetro de aproximadamente igual a dois de acordo com as recomendações da ISRM (1981), no sentido de obter amostras representativas dos granitos a estudar. Consideraram-se diferentes direcções de carregamento devido à identificação de anisotropia planar (foliação ou correr da pedra). Nos litótipos AF, PTA e MDB consideraram-se duas direcções de carregamento (paralela e perpendicular à foliação) e no granito GA só se considerou a direcção paralela ao correr da pedra. Para o estudo apresentado só se considerou os resultados experimentais na direcção paralela ao plano de anisotropia. Relativamente aos arenitos, as amostras das quatro variedades foram cortadas em provetes prismáticos com dimensões de  $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ , ficando as do litótipo A+B com as laminações e lineações dispostas segundo a dimensão maior dos provetes. Nas amostras do litótipo C+M não se detectaram laminações bem definidas macroscopicamente, pelo que os provetes prismáticos foram cortados aleatoriamente.

#### **3.2 - Estudo das propriedades físicas**

##### **3.2.1 *Determinação da porosidade acessível à água***

A avaliação das propriedades físicas das rochas pode constituir um modo simples de avaliar a qualidade das rochas e auxilia na interpretação dos resultados relativos à caracterização mecânica. Estudos anteriores revelaram que as propriedades mecânicas como a resistência à compressão e o

módulo de elasticidade são dependentes da porosidade e da densidade (Tuğrul and Zarif, 1999; Příkryl, 2001; Tuğrul, 2004). Os valores da porosidade e da densidade dos granitos foram obtidos com base no método sugerido pela ISRM (1981) (Vasconcelos, 2005), enquanto que a porosidade e densidade dos arenitos foram obtidos a partir das Recomendações I.1 e I.2 da RILEM (1980) e da EN 1936 (1999) (Ludovico Marques, 2008)

Os autores realizaram ensaios para determinação de outras propriedades físicas cujos resultados não são apresentados no âmbito do presente artigo, nomeadamente a massa volúmica aparente. Adicionalmente, foram efectuados ensaios para determinação da absorção de água a baixa pressão e por capilaridade, assim como para determinação da porometria por intrusão de mercúrio (Ludovico Marques, 2008).

#### **3.3 - Estudo do comportamento mecânico**

##### **3.3.1 *Procedimentos experimentais nos ensaios de compressão uniaxial monotónicos***

Os ensaios de compressão uniaxial nos provetes de arenito foram efectuados no Laboratório de Estruturas Pesadas da Universidade Nova de Lisboa numa prensa servocontrolada de marca Seidner, modelo 3000D, com capacidade de carga até 3000kN e um curso de êmbolo de 50 mm (Ludovico Marques, 2008). Os ensaios foram conduzidos com controlo de deslocamento axial, a uma velocidade de 10  $\mu\text{m/s}$ . Foram utilizados quatro LVDTs para medir a deformação vertical dos provetes instalados entre os pratos da prensa.

Os ensaios de compressão uniaxial nos provetes graníticos foram efectuados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho num pórtico de ensaio rígido de modo que fosse possível a obtenção da resposta completa dos granitos em termos de diagramas tensão-extensão. Dado que se verificou através de ensaios preliminares que alguns granitos apresentam um modo de rotura muito frágil, optou-se por realizar os ensaios através de controlo de deslocamento circunferencial através de um sistema constituído por um anel mecânico, ao qual estavam ligadas duas hastes entre as

quais se colocava o LVDT horizontal (Vasconcelos 2005, Vasconcelos et al. 2009; Vasconcelos e Lourenço, 2009). Este sistema permitia que a variável de controlo fosse sempre crescente, evitando roturas bruscas e a ocorrência de comportamento “snap back”. Além disso, o sistema permite a diminuição da velocidade real de ensaio, permitindo o registo do comportamento após o pico de resistência. Os ensaios de compressão uniaxial em granitos foram conduzidos com uma velocidade de  $2\mu\text{m/s}$ . Os diagramas tensão-extensão foram obtidos a partir dos deslocamentos médios medidos pelos três LVDTs colocados entre pratos e distanciados de  $120^\circ$ .

### 3.3.2 *Diagramas tensão-extensão*

Dado que se pretende com este trabalho a modelação da reposta de rochas granulares em compressão uniaxial no regime de pré-pico, apresentam-se nas Figuras 1 e 2 os diagramas tensão-extensão dos arenitos e granitos respectivamente até o valor máximo da resistência ser atingido. Na Fig. 1 estão indicados os resultados obtidos nos provetes de arenitos representativos das variedades A, B e M.

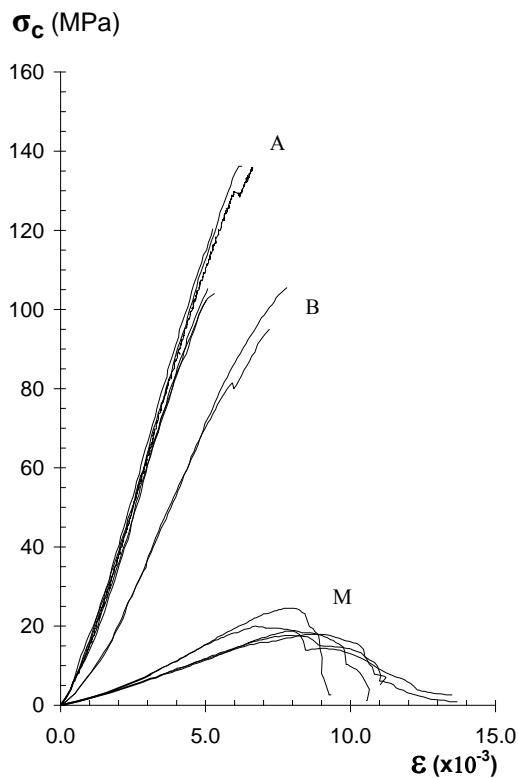


Fig. 1 – Diagramas de tensão-extensão representativos das variedades de arenitos

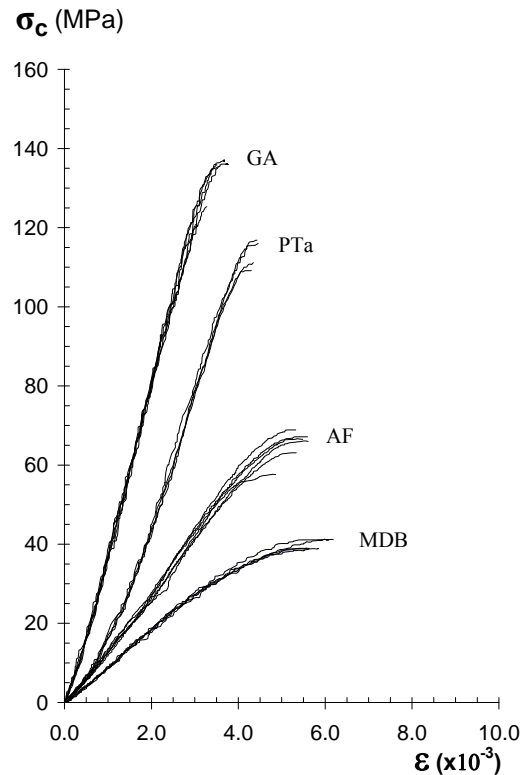


Fig. 2 – Diagramas de tensão-extensão representativos das variedades de granitos

Na Fig. 2 indicam-se os resultados obtidos em provetes de granito representativos dos litótipos GA, PTa, AF e MDB. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios da resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ), da extensão correspondente à resistência máxima ( $\epsilon_R$ ) e da porosidade ( $n$ ).

A análise dos resultados permite concluir que os dois tipos de rochas apresentam valores de porosidade consideravelmente distintos. Os granitos pouco alterados apresentam valores de porosidade baixa (inferior ou muito próximo de 1%) mas esta varia com o grau de alteração.

A maior porosidade dos granitos alterados pode atingir valores próximos da menor porosidade dos arenitos sãos. Os arenitos MP apresentam o valor mais elevado de porosidade das variedades pétreas estudadas.

Através da comparação dos valores da resistência à compressão com os valores da porosidade é evidente que a porosidade regula em parte o comportamento das rochas à compressão uniaxial. Rochas com alta porosidade apresentam valores mais baixos

**Tabela 1** – Valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos arenitos e granitos

Rocha	Provete	$\sigma_c$ (MPa)	$\epsilon_R$	$n$ (%)
Arenito	AP1	102.3	0.00500	4.60
	AP5	105.2	0.0051	4.30
	AP6	104.0	0.00530	4.20
	AP9	120.3	0.0052	4.20
	AP11	136.2	0.00625	3.80
	AP13	135.7	0.00663	3.60
	BP3	95.0	0.00720	7.00
	BP13	105.3	0.00780	6.70
	MP1	18.7	0.00793	18.40
	MP2	20.0	0.00673	18.50
	MP3	24.5	0.00798	17.20
	MP5	17.9	0.00883	18.60
	MP6	17.6	0.00798	18.60
Granito	GA3	125.3	0.00327	0.42
	GA5	120.8	0.00301	0.43
	GA1	136.2	0.00375	0.45
	GA4	137.1	0.00367	0.44
	GA2	135.9	0.00351	0.49
	GA9	135.4	0.00352	0.48
	PTa_15	109.2	0.00430	1.10
	PTa_14	111.2	0.00435	1.11
	PTa_16	116.0	0.00446	1.11
	PTa_13	116.9	0.00443	1.11
	AF_L13	68.9	0.00526	2.99
	AF_L12	57.7	0.00480	3.04
	AF_L8	67.1	0.00559	3.06
	AF_L1	66.7	0.00535	3.11
	AF_L2	66.1	0.00551	3.19
	AF_L11	63.1	0.00536	3.26
	MDB_L4	41.1	0.00596	4.77
	MDB_L51	39.1	0.00557	4.91
	MDB_L61	38.9	0.00582	4.95
	MDB_L5	39.1	0.00563	5.14
MDB_L2	41.2	0.00619	5.19	
MDB_L71	38.7	0.00562	5.23	

de resistência e como indicado por Vasconcelos et al. (2009), apresentam também valores de módulo de elasticidade mais baixos.

Os diagramas de tensão-deformação obtidos nos arenitos da Fig. 1 revelam a influência da porosidade no comportamento desta rocha, em especial na fase elástica. Comportamento semelhante é indicado pelos granitos cujo módulo de elasticidade diminui significativamente à medida que a porosidade aumenta. As variedades pétreas menos porosas apresentam em geral valores

superiores do módulo de elasticidade e um comportamento frágil na rotura. Apesar de na Fig. 2 não se mostrar a componente do diagrama após o pico de resistência ser atingido, verifica-se que o controlo circunferencial permitiu a obtenção do comportamento dos granitos após o pico. Além disso, é possível constatar que os granitos mais porosos apresentam respostas mais dúcteis, o que se traduz em diagramas mais caracterizados por uma diminuição de resistência progressivamente decrescente para valores do deslocamento sucessivamente crescentes. Em granitos menos porosos, a resposta é muito mais frágil, com diminuição brusca da resistência após o valor máximo ser atingido (Vasconcelos et al., 2009). Note-se que a extensão correspondente à resistência máxima também aumenta com a porosidade em ambas as variedades pétreas, o que confirma que a porosidade assume um papel muito importante no comportamento das rochas à compressão.

#### 4- MODELO GLOBAL

Ludovico Marques (2008) apresentou um modelo que intitulou de modelo global, desenvolvido inicialmente para arenitos, com base nos resultados experimentais que indicaram que as propriedades mecânicas em compressão dependem das propriedades físicas e nomeadamente da porosidade (Ludovico Marques, 2008). Pretende-se agora fazer a extensão do modelo para a modelação do comportamento de granitos dado que de acordo com Vasconcelos (2005), as propriedades mecânicas dos granitos homogéneos (sem anisotropia planar significativa) são também razoavelmente correlacionáveis com a porosidade. O modelo pretende ter ainda em consideração a influência do envelhecimento e da aplicação de consolidantes no comportamento das rochas. Assim, para uma determinada carga, o valor da tensão de compressão desenvolvida nos granitos e arenitos pode ser obtida através da eq. (1):

$$\sigma = \alpha \times (1 + \beta) \times \sigma_c \times f\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_R}\right) \quad (1)$$

O parâmetro  $\alpha$  corresponde a um índice de degradação em função do número de

ciclos de envelhecimento. O parâmetro  $(1+\beta)$  corresponde a um índice de degradação com consolidante em função do número de ciclos de envelhecimento. Neste estudo estes parâmetros consideram-se iguais à unidade dado que se pretende apenas estudar o comportamento no estado natural. A tensão máxima ( $\sigma_c$ ) corresponde ao valor da tensão de rotura das rochas à compressão e a função  $f(\varepsilon/\varepsilon_r)$  constitui a função de forma dependente da extensão normalizada pela extensão correspondente à tensão de rotura.

#### 4.1 - Definição da função de forma do modelo

Considerando que os valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $(1+\beta)$  são considerados iguais à unidade, a eq. 1 pode reescrever-se do seguinte modo:

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right) \quad (2)$$

Nesta equação a tensão ( $\sigma$ ) encontra-se normalizada pela tensão máxima ( $\sigma_c$ ) e a função de forma  $f(\varepsilon/\varepsilon_r)$  está dependente da extensão normalizada pela extensão na rotura.

Para a calibração da função de forma utilizam-se as curvas tensão-extensão obtidas com base nos ensaios de compressão uniaxial para ambos os tipos de rocha considerados neste trabalho. Deste modo, a partir das expressões analíticas de Ludovico Marques (2008) definidas para os arenitos e com base nas curvas experimentais apresentados para os granitos (Vasconcelos, 2005), adoptou-se a Eq. (3) como a função de forma  $f(\varepsilon/\varepsilon_r)$  de aplicação simultânea para os arenitos e para os granitos:

$$f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right) = -\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right)^3 + 1.47\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right) \quad (3)$$

O coeficiente 1.47 que multiplica a expressão  $\left(\varepsilon/\varepsilon_r\right)^2$  da Eq. (3) tende para 1.5 para que a expressão tenda para o valor 1.

Assim, por substituição directa da Eq. (3) na Eq. (2), a tensão normalizada pela tensão de rotura vem dada por:

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = -\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right)^3 + 1.47\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right) \quad (4)$$

Note-se que o modelo na forma apresentada é aplicável a arenitos e a granitos que apresentem baixo grau de anisotropia. No entanto, é de referir que o modelo deverá ser facilmente generalizável a outros tipos de rochas dado que o comportamento no regime de pré-pico é facilmente ajustado a uma função polinomial cúbica.

#### 4.2 - A tensão de rotura à compressão

O principal objectivo do modelo consiste em prever o comportamento das rochas em compressão uniaxial com base nas propriedades físicas, que se podem obter através de ensaios não destrutivos. Um método simples e relativamente económico para obtenção indirecta da porosidade in-situ consiste na utilização de tubos de Karsten a partir da absorção de água a baixa pressão (Nwaubani e Dumbelton, 2001; Ludovico Marques, 2008). Poder-se-á equacionar também a utilização da velocidade de propagação de ultrassons para a estimativa da porosidade das rochas (Vasconcelos et al., 2008). Deste modo, para a aplicação do modelo global tendo por base ensaios não destrutivos é necessário correlacionar os parâmetros mecânicos com as propriedades físicas dos materiais. A Fig. 3 ilustra a variação da resistência à compressão uniaxial com a porosidade nos provetes dos litótipos de arenitos e de granitos. As regressões que melhor se adaptam aos resultados experimentais que constam na Tabela 1 são as que se indicam como Eq. (5) para os arenitos e Eq. (6) para os granitos:

$$\sigma_c = 206.7e^{-0.129n} \quad (5)$$

$$\sigma_c = 148.8e^{-0.263n} \quad (6)$$

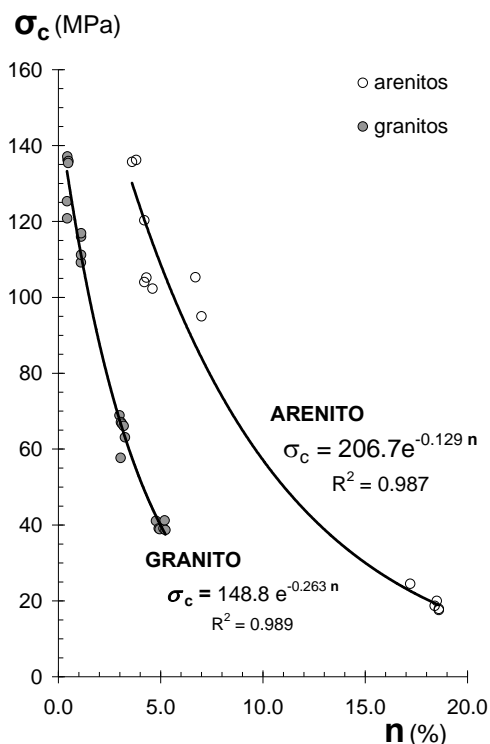


Fig. 3 – Relações entre a resistência à compressão ( $\sigma_c$ ) e a porosidade ( $n$ ) obtidas em provetes de arenitos e granitos

Verifica-se que existe uma correlação muito significativa entre a resistência à compressão dos arenitos e dos granitos com a porosidade, o que confirma que este parâmetro determina o comportamento das rochas à compressão. Este resultado está de acordo com as correlações obtidas entre a resistência à compressão e a porosidade referidas por outros autores (Prikril, 2001; Tuğrul, 2004). A respeito da relação entre resistência à compressão e a porosidade, deve-se referir que esta pode ser perturbada no caso de granitos com elevada anisotropia dado que se verifica que a resistência à compressão varia com a direcção de carregamento. Por outro lado, verifica-se que a porosidade não consiste numa propriedade direccionada.

#### 4.3 - A extensão na rotura

Um outro parâmetro importante para a completa definição do modelo baseado nos ensaios não destrutivos é a extensão na rotura, que de igual forma se pode correlacionar com as propriedades físicas dos materiais. Na Fig. 4 apresenta-se a variação da extensão na rotura ( $\epsilon_R$ ) com a porosidade dos arenitos e dos granitos.

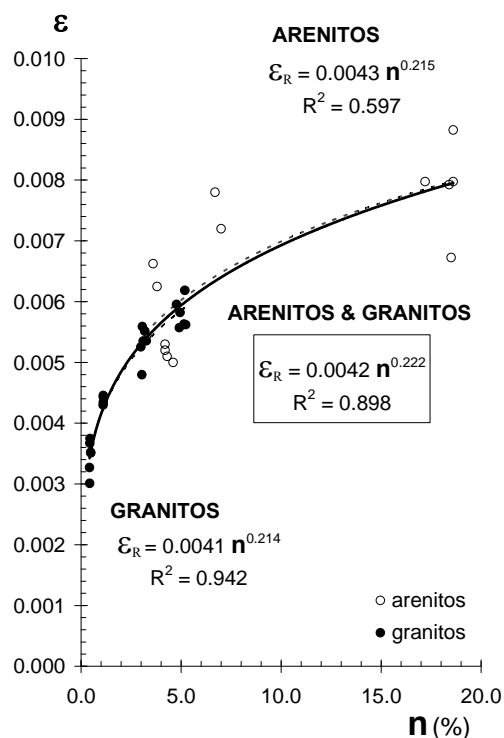


Fig. 4 – Relação entre a extensão na rotura ( $\epsilon_R$ ) e a porosidade ( $n$ ) obtidas em provetes de arenitos e granitos

As regressões que apresentam melhor ajuste aos resultados experimentais indicados na Tabela 1 são para os granitos a Eq. (7), para os arenitos a Eq. (8) e considerando os granitos e arenitos a Eq. (9):

$$\epsilon_R = 0.0041n^{0.214} \quad (7)$$

$$\epsilon_R = 0.0043n^{0.215} \quad (8)$$

$$\epsilon_R = 0.0042n^{0.222} \quad (9)$$

A Eq. (7) obtida nos provetes dos granitos é a que apresenta melhor valor de coeficiente de determinação  $R^2$  e a Eq. (8) dos arenitos a que obteve pior valor. Adoptou-se a Eq. (9) como representativa do conjunto dos dados obtidos no universo de litótipos de arenitos e granitos em estudo. A generalidade dos valores de extensão na rotura ( $\epsilon_R$ ) calculados através da Eq. (9) tem uma variação inferior a 10% dos valores experimentais obtidos nos arenitos e nos granitos. Nos granitos apenas o provete GA5 difere 16%. Nos arenitos os provetes AP13, BP13 e MP2 diferem respectivamente 16%, 18 e 19%. Verifica-

se que a extensão na rotura aumenta para valores de porosidade crescente, o que significa que rochas com valores elevados de porosidade são mais deformáveis. A porosidade e em particular a distribuição da porometria influencia o comportamento mecânico do material. Rochas mais porosas apresentam à partida maior número de poros e vazios, que por um lado se traduzem numa maior deformação na fase inicial correspondente ao fechamento das fissuras pré-existentes e por outro lado resultam numa menor rigidez. Assim, a menor rigidez associada à maior deformação inicial resulta no aumento da extensão correspondente à força de rotura. As rochas com uma microestrutura mais porosa apresentam além disso um comportamento não linear no regime de pré-pico mais extenso o que contribui também para o aumento da extensão correspondente à tensão máxima.

Através do modelo global proposto é possível simular o comportamento mecânico à compressão das rochas em termos de tensão-extensão e assim obter a resistência e módulo de elasticidade com base no conhecimento das propriedades físicas. O método proposto tem grande interesse em termos de aplicação prática ao estudo da pedra de edifícios de alvenaria com a estimativa das propriedades elásticas e assim das condições de estabilidade de edifícios antigos de alvenaria de pedra, onde a carotagem de provetes para posterior ensaio trutativo em laboratório é por vezes impossível dado o valor histórico do edifício.

#### 4.4 - O modelo global no universo de litótipos em estudo

A expressão geral que permite obter os diagramas tensão-extensão em compressão uniaxial define-se substituindo as expressões que relacionam a resistência à compressão e a extensão na rotura com a porosidade na Eq. (4), obtendo-se para os arenitos a equação

$$\sigma = 206.7e^{-0.129n} \left\{ -\left( \frac{\varepsilon}{0.0042n^{0.222}} \right)^3 + 1.47 \left( \frac{\varepsilon}{0.0042 \cdot n^{0.222}} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{\varepsilon}{0.0042 \cdot n^{0.222}} \right) \right\} \quad (10)$$

Seguindo o mesmo procedimento e substituindo as expressões obtidas para a resistência,  $\sigma_c$ , e extensão na rotura,  $\varepsilon_R$ , para os granitos resulta a Eq. (11):

$$\sigma = 148.8e^{-0.263n} \left\{ -\left( \frac{\varepsilon}{0.0042n^{0.222}} \right)^3 + 1.47 \left( \frac{\varepsilon}{0.0042 \cdot n^{0.222}} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{\varepsilon}{0.0042 \cdot n^{0.222}} \right) \right\} \quad (11)$$

#### 4.5 - Simulação das curvas de tensão-deformação

As Eq. (10) e (11) foram utilizadas para a efectuar a simulação das curvas de tensão-extensão em compressão uniaxial dos arenitos e granitos em estudo em função da porosidade, ver Figuras 5 e 6, onde se compara a simulação realizada através do modelo analítico proposto com os diagramas tensão-extensão obtidos para os arenitos e granitos respectivamente.

Refira-se que as curvas experimentais encontram-se indicadas a linha fina contínua e os resultados do modelo com a linha contínua pontuada. A análise dos resultados permite concluir que se consegue uma boa aproximação entre os resultados experimentais e os resultados do modelo.

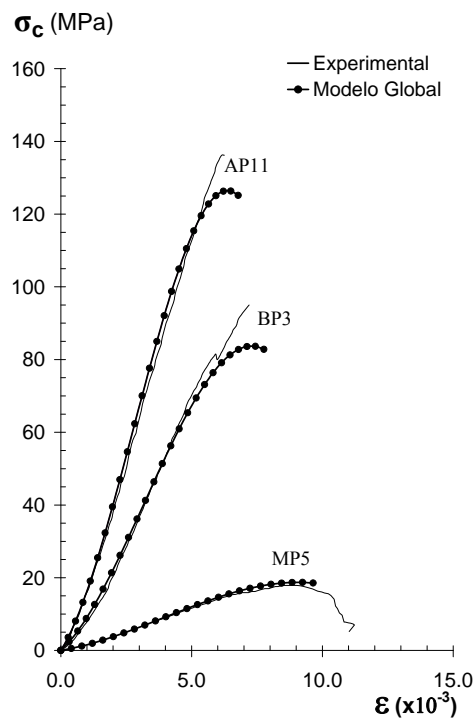


Fig. 5 – Modelação das curvas experimentais de alguns provetes de arenitos.



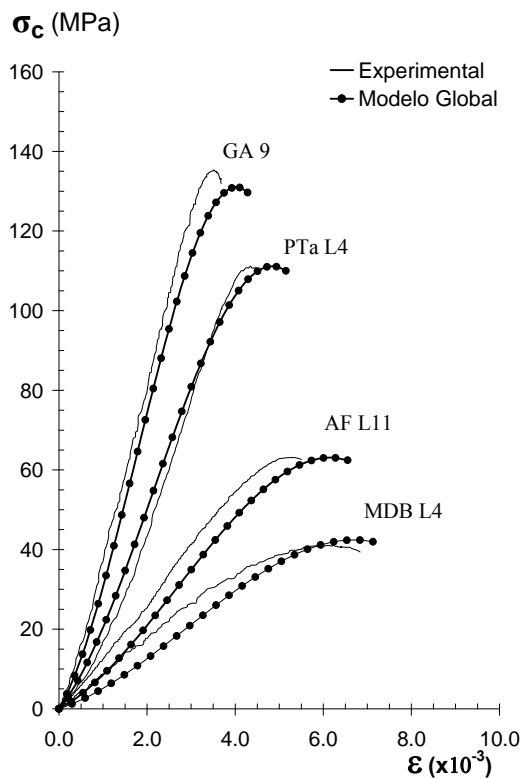


Fig. 6 –Modelação das curvas experimentais de alguns provetes de granitos

Verifica-se que a Eq. (10) conduziu a uma melhor aproximação às curvas experimentais nos arenitos do que a Eq. (11) nos granitos em termos de regime de pré-pico com maior aproximação dos valores do módulo de elasticidade. Este comportamento poderá estar relacionado com a função que se utilizou entre a extensão na rotura e a porosidade, que teve em conta também as extensões na rotura obtidos nos arenitos. Porém, a Eq. (11) permitiu obter valores de resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) nos granitos mais próximos dos valores experimentais do que nos arenitos.

## 5- CONCLUSÕES

O modelo global de Ludovico Marques (2008) permitiu modelar com razoável precisão as curvas de tensão-deformação experimentais dos provetes dos arenitos e granitos utilizados no presente estudo.

Procedeu-se à identificação das tipologias pétreas existentes nos elementos construtivos do edificado monumental, assim como à sua caracterização em termos de propriedades petrográficas e físicas.

Tornou-se assim possível obter uma assinatura que permitiu detectar material similar e estender o estudo dos monumentos a amostras de afloramentos ou de material não classificado, sem os constrangimentos que a extracção de materiais dos monumentos impõe.

O modelo global foi calibrado com base em resultados de caracterização física (porosidade) e caracterização mecânica (diagramas tensão-deformação) obtidos para um conjunto de provetes de diferentes tipos de arenitos e granitos. Ambas as rochas se consideram representativas do património edificado em Portugal.

Pretende-se que este modelo global possa ser aplicado a rochas existentes em edifícios antigos nos quais seja possível a obtenção da porosidade através de ensaios não destrutivos ou quasi não destrutivos e consequentemente a estimativa das propriedades mecânicas em compressão, nomeadamente a resistência à compressão e módulo de elasticidade.

## 6- REFERÊNCIAS

- EN 1936: EUROPEAN STANDARD. 1999. Natural stone test method-determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. European Committee for Standardization, 9 pp.
- Folk, R. 1974. Petrology of Sedimentary rocks. Hemphill Publishing. Austin, 184 pp.
- Goodman, R., Introduction to rock mechanics, 2nd edn, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989. ISBN 0 471 61718 0.
- Hatzor, Y.H., Palchick, V. 1997, The influence of the grain size and porosity on the crack initiation stress and critical flaw length in dolomites, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34( 5), 805-816.
- ISRM Suggested Methods. 1981. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. Brown E.T., ISRM. Pergamon, Oxford.
- Ludovico Marques, M. A. 2008. Contribuição para o conhecimento do efeito da cristalização de sais na alterabilidade de arenitos. Aplicação ao património edificado

- de Atougua da Baleia. Tese de Doutoramento em Geotecnia, na especialidade de Mecânica das Rochas, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 314p.
- Ludovico Marques, M.A. 2007. Contribuições para o estudo de investigação sobre a alterabilidade dos arenitos de Atougua da Baleia. Relatório interno. DEC/FCT. Lisboa.
- Nwaubani e Dumbelton, 2001. A practical approach to in-situ evaluation of surface-treated structures, *Construction and Building Materials*, 15, 199-212.
- Přikrál, R. Some microstructural aspects of strength variation in rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 671-682, 2001.
- RILEM. 1980. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Commission 25 PEM. *Matériaux et Constructions*, Bourdas -Dunoud, vol. 13, n° 75, pp. 175 – 253.
- Tuğrul, A., The effect on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey, *Engineering Geology*, 51, 303-317, 2004.
- Tuğrul, A., Zarif, I.H., Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, *Engineering Geology*, 51, 303-317, 1999.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A., Pamplona, J. 2008. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites”, *Ultrasonics*, 48(5), 453-466.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A., Pamplona, J. 2009. Compressive behaviour of granite: An experimental approach”, *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(9), 502-511.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B. 2009. Experimental characterization of the compressive behaviour of granites, *Revista Mecânica Experimental*, Vol 16, pp 61-71.
- Vasconcelos, G.. 2005. Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behaviour of ancient masonry shear walls. Ph.D. thesis. Universidade do Minho, 266p.