

# CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS VÁRIOS GRAUS DE ALTERAÇÃO DO GRANITO DA GUARDA

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF THE WEATHERING GRADES OF GUARDA GRANITE

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LOS VARIOS GRADOS DE METEORIZACIÓN PRESENTADO POR EL GRANITO DE GUARDA (PORTUGAL)

Ana Antão ([anantao@ipg.pt](mailto:anantao@ipg.pt))\*

## RESUMO

A alteração provoca nas rochas profundas modificações das suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e texturais que se vão refletir no seu comportamento mecânico. Procurou-se neste trabalho estabelecer uma relação entre o comportamento mecânico do granito da Guarda ao longo do seu perfil de alteração e as suas propriedades físicas. O fator escala foi tido em consideração tendo-se feito toda a caracterização diretamente em provetes de grandes dimensões e com relação altura/diâmetro de 2. As propriedades foram determinadas com base em ensaios-índice (porosidade, pesos volúmicos, teor de água e velocidade de propagação dos ultrassons), em ensaios de capilaridade e de permeabilidade, que foram assim relacionados com as características de resistência da rocha determinadas através dos ensaios de compressão uniaxial e de carga pontual. Verificou-se que a textura, principalmente ao nível dos poros e fissuras, condicionava significativamente os parâmetros de resistência destas rochas, tendo-se determinado um valor patamar de 2% para o início dessa influência. Estabeleceram-se correlações entre os vários ensaios e entre o grau de alteração que a rocha apresentava, tendo-se proposto algumas equações para determinação da resistência à compressão através de ensaios expeditos. Propuseram-se também fatores de conversão ( $K(\sigma_c / I_{5(50)})$ ), entre o ensaio de compressão uniaxial e o ensaio de carga pontual, específicos para cada grau de alteração da rocha.

Palavras-chave: Granito, alteração, comportamento mecânico, propriedades-índice.

## ABSTRACT

Rock weathering brings deep changes in their physical, chemical, mineralogical and textural properties which will be reproduced in their mechanical behavior. In order to assess this influence on the Guarda granite that appears in central Portugal with different weathering grades, several index tests, and capillarity and permeability tests were done. The samples were obtained in the field by coring, and prepared in the laboratory, the cylindrical samples having a height to diameter ratio around 2. Big samples were used in all tests in all grades of weathering, due to the coarse fabric of the rock. Correlations were established for this granite, between uniaxial compression and point load resistance and some physical properties (porosity, dry density and ultrasonic velocity), and related with the alteration presented by the rock samples. Those tests have confirmed that the grain size, the texture, namely the pores and fissures, and the weathering are responsible for the variation of the strength and deformation properties of the granite. We have found that the increase of porosity above 2% is marked by a significant reduction of the mechanical properties of the granite. Good correlations were established between porosity, dry density, ultrasonic velocity, capillarity, weathering grades and the uniaxial and point load tests, and some equations were proposed between those properties. It is also proposed a correlation coefficient ( $K$  ( $\sigma_c / I_{s(50)}$ )) between point load strength and uniaxial compressive strength specific for each weathering grade presented by the rock.

Key-words: Granite, weathering, mechanical behavior, index tests.

## RESUMEN

La meteorización provoca profundas modificaciones de sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y texturas que se reflejan en el comportamiento mecánico de las rocas. En consecuencia, se trató de establecer una relación entre el comportamiento mecánico del granito de Guarda (Portugal) según el perfil de meteorización presentada "*in situ*". Estas propiedades fueron determinadas con base en las propiedades índice (porosidad, peso volumétrico, contenido de humedad y velocidad de propagación de las ondas sónicas), y en ensayos de permeabilidad y capilaridad, habiendo sido relacionadas con las características de la resistencia de la roca determinada por ensayo de compresión uniaxial y ensayo de carga puntual. Las muestras fueron obtenidas en campo por sondeos a rotación, y se prepararon en el laboratorio probetas cilíndricas con una proporción altura/diámetro alrededor 2. Se utilizaron probetas de grandes dimensiones debido al tamaño de grano de la roca. Se encontró que la textura, especialmente a nivel de los poros y grietas, condicionaba de manera

significativa los parámetros de resistencia de estas rocas, se determinó un valor de 2% para el comienzo de esta influencia. Fueran establecidos correlaciones entre los diversos ensayos y entre el grado de meteorización de la roca, y se proponen algunas ecuaciones para la determinación de su resistencia a la compresión a través de ensayos expeditos. También se proponen factores de conversión ( $K (\sigma_c/Is_{50})$ ) específicos para cada grado de alteración de la roca.

Palabras clave: granito, meteorización, comportamiento mecánico, propiedades índice.

\* Professora Adjunta da Unidade Técnico-Científica de Engenharia e Tecnologia do Instituto Politécnico da Guarda.

Submission: 18<sup>th</sup> February 2011  
Acceptation: 16<sup>th</sup> June2011

## 1. INTRODUÇÃO

Muitas obras de engenharia civil localizam-se à superfície do terreno ou a pequenas profundidades, em locais onde os maciços rochosos se encontram mais alterados. Esta alteração irá traduzir-se em modificações das propriedades iniciais dos materiais rochosos (Fookes *et al.*, 1988). Torna-se, assim, importante caracterizar a influência que a alteração tem nas características físicas e mecânicas dos materiais rochosos que constituem o maciço, para melhor se entender o seu comportamento em termos de deformabilidade e de resistência. Com efeito, as propriedades mecânicas de uma rocha, especialmente os parâmetros de resistência e de deformabilidade, são a base dos métodos de dimensionamento para muitas obras, tais como fundações de edifícios, barragens e túneis, sendo também a base das principais classificações geotécnicas de maciços rochosos (RMR, RMQ, SMR). Pretende-se com esta abordagem contribuir para o conhecimento do comportamento geotécnico do granito da região da Guarda (Portugal), que aparece na região com vários graus de alteração, desde o material são (W1) até ao material completamente decomposto, saprólito (W5) segundo a classificação da IAEG (1981).

## 2. METODOLOGIA UTILIZADA

A profundidade de alteração do maciço granítico da região da Guarda é muito variável de local para local, podendo-se observar dentro da zona citadina praticamente todos os graus de alteração, desde a rocha sã (W1) até ao saprólito propriamente dito (Rodrigues, 2003). Relativamente à caracterização geológica, trata-se de um granito monzonítico, de duas micas, com largo predomínio da biotite (Teixeira, Martins *et al.*, 1963), como consta da Carta Geológica de Portugal (1:50 000), folha 18-C. São rochas leucomesocráticas, com grandes cristais de feldspato e grão geralmente grosseiro. Como elementos essenciais referem-se o quartzo, a oligoclase, a microclina, a albite, a biotite e a moscovite; os minerais acessórios compreendem a apatite, o zircão e a magnetite, sendo a caulinite, a sericite e a clorite os minerais secundários mais abundantes. De referir que as percentagens destes minerais variam consideravelmente consoante os graus de alteração apresentados pela rocha (Antão, 2004).

O granito apresenta textura porfiróide de grão muito grosseiro a grosseiro (dimensão média dos cristais da matriz de 7 mm), tendo os megacristais feldspáticos comprimentos médios entre os 45 e os 70 mm.

Para a finalidade do nosso trabalho interessa conhecer as características físicas do granito nos vários graus de alteração e correlacioná-las com o seu comportamento mecânico. Atendeu-se por isso às recomendações da IAEG e da ISRM sobre a relação entre o diâmetro ou largura dos provetes e a dimensão dos grãos minerais da rocha. Assim, optou-se por efetuar os ensaios de caracterização física nos provetes onde posteriormente foram executados os ensaios de caracterização mecânica. Nesse sentido foram efetuadas várias campanhas de sondagens no terreno com o intuito de obter amostras representativas dos vários graus de alteração. Devido às características mineralógico-texturais do granito (granito porfiróide de grão grosseiro), optou-se por se executar sondagens com diâmetros de 80 e 100 mm donde se obtiveram provetes cilíndricos com uma relação altura/diâmetro igual ou superior a 2, de acordo com o recomendado pela ISRM (1999). Relativamente aos ensaios de caracterização mecânica da rocha mais alterada, optou-se também por provetes prismáticos obtidos por corte com serra diamantada em laboratório, mantendo-se também nestes a mesma relação altura/largura de 2. Com esta metodologia, os parâmetros mecânicos são mais facilmente relacionáveis com as características físicas, visto o material onde ambos foram determinados ser o mesmo.

A classificação dos graus de alteração foi feita com base quer nas características físico-químicas, mineralógicas (microscópicas), quer de observação visual, apresentadas pela rocha (Antão, 2004; Antão e Quinta Ferreira, 2004; Quinta Ferreira e Antão, 2003a e 2003b; Rodrigues e Sousa, 2002).

### 3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Na determinação dos pesos volúmicos, da porosidade, do teor de água de saturação e da densidade, seguiu-se o procedimento nº 3 da ISRM (1981). Determinou-se também a porosidade livre ou às 48 horas ( $n_{48}$ ) pelo processo descrito por Begonha (1997), sendo esta dada por:

$$n_{48} = \frac{W_{48} - W_s}{W_2 - W_1} \times 100 \quad (1)$$

Sendo

$w_s$  - peso dos provetes secos em estufa;

$w_{48}$  - peso dos provetes após imersão em água durante 48 horas;

$w_1$  - peso imerso em água do provete saturado;

$w_2$  - peso no ar do provete saturado.

A porosidade determinada pela equação (1) é aquela que está livremente acessível à água, sendo um parâmetro muito utilizado no caso de alvenarias em construção de monumentos e edifícios de um modo geral. Está diretamente relacionada com a livre circulação de fluidos à pressão atmosférica no interior da pedra, sendo importante na alteração destes materiais rochosos, visto poder transportar facilmente para o seu interior fluidos com características agressivas. Com base na porosidade livre determinou-se o coeficiente de Hirschwald ( $S_{48}$ ), dado pela razão percentual entre  $n_{48}$  e  $n$  (porosidade), e que permite quantificar a percentagem do volume de vazios que efetivamente é preenchida livremente pela água. Na tabela 1 estão apresentados os valores obtidos para o granito da Guarda para os diferentes graus de alteração ensaiados.

**Tabela 1 - Propriedades físicas do granito da Guarda**

Grau de alteração	n (%)	$n_{48}$ (%)	$W_{m\acute{a}x.}$ (%)	$S_{48}$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	G
W1 (Média) (Variação) N	0.8 0.52-1.03 10	0.37 0.12-0.72 4	0.30 0.20-0.40 10	51.09	25.71 25.2-25.9 10	25.79 25.25-26.0 10	25.92 25.38-26.1 10	2.64 2.59-2.66 10
W2 (Média) (Variação) N	1.91 0.96-4.26 10	1.03 0.41-3.36 10	0.74 0.36-1.67 10	43.33	25.68 24.9-25.9 10	25.86 25.3-26.04 10	26.18 26.02-26.3 10	2.67 2.65-2.68 10
W3 (Média) (Variação) N	5.67 4.14-6.99 22	4.90 3.37-6.85 15	20.27 1.63-2.83 22	85.69	24.5 23.6-24.9 22	25.07 24.25-25.4 22	25.97 25.24-26.2 22	2.65 2.57-2.67 22
W4 (Média) (Variação) N	10.03 7.34-14.02 13	8.59 5.70-9.9 7	4.29 2.99-6.17 13	88.24	23.01 22.28-24.2 13	23.99 23.48-24.9 13	25.58 25.1-26.15 13	2.61 2.56-2.67 13

N: número de provetes ensaiados; n: porosidade;  $n_{48}$ : porosidade livre;  $w$ : máx. teor de água máximo de absorção;  $\gamma_d$ : peso volúmico aparente seco;  $\gamma_{sat}$ : peso volúmico aparente saturado;  $\gamma$ : peso volúmico real; G: densidade

Sendo a velocidade de propagação dos ultrassons um parâmetro importante na caracterização física dos materiais rochosos (Iliev, 1966; Delgado Rodrigues, 1983; Irfan e Dearman, 1978a; Chistaras, 1991; Gupta e Rao, 1998; Kahraman, 2001), também foi feita a sua determinação ao longo da sequência de alteração, quer em provetes secos, quer após saturação no vácuo. Em alguns casos foi também determinada a velocidade de propagação das ondas transversais. Pretendia-se estimar a fissuração da rocha através do seu índice de fissuração (IF) e determinar o índice de qualidade (IQ) que, conjuntamente com a porosidade ( $n$ ), nos permite quantificar o tipo de porosidade (de poro ou de fissura) de uma rocha (Tourenq *et al.*, 1971; Tourenq, 1974; Tourenq e Denis, 1982). De referir que a determinação destas velocidades nos provetes de rocha mais alterada ofereceu alguma dificuldade devido à existência de superfícies rugosas com muitos vazios, que dificultou o contacto entre o provete e os recetores e emissores da onda. Esta problemática mereceu alguma atenção de Li e Nordlund (1993), que referem a importância de haver uma boa ligação para uma correta transmissão das ondas. Houve assim especial cuidado, nestes materiais mais alterados, de preencher cuidadosamente todos os espaços vazios existentes na superfície de contacto da rocha com os emissores e recetores. Os resultados obtidos da medição da velocidade de propagação dos ultrassons para as condições acima referidas apresentam-se na tabela 2.

**Tabela 2 - Velocidade de propagação dos ultrassons no granito da Guarda em função do grau de alteração**

Grau de alteração	$V_L$ (m/s)		$V_T$ (m/s)
	Seca	Saturada	Seca
W1	3193 (7)	4062 (7)	2642 (1)
W2	2632 (10)	3564 (10)	1288 (1)
W3	1408 (16)	1736 (15)	479 (1)
W4	980 (11)	1107 (7)	---

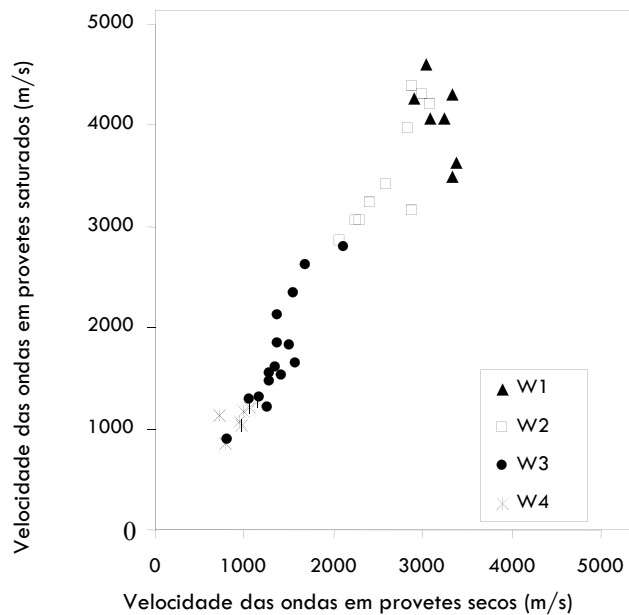
$V_L$  – Velocidade de propagação das ondas longitudinais;

$V_T$  – Velocidade de propagação das ondas transversais;

(7) – Número de provetes ensaiados.

--- – Sem dados.

Como se pode verificar, à medida que aumenta o grau de alteração da rocha, existe uma diminuição da velocidade de propagação dos ultrassons, quer nos provetes secos quer nos provetes saturados. A razão entre a velocidade de propagação das ondas longitudinais nos provetes secos e saturados é muito constante (figura 1), variando entre 0,79 e 0,86. Esta razão, considerada como um índice da intensidade de fissuração (Dobereiner *et al.*, 1993), é sempre superior a 0,6, indicando assim uma baixa a média contribuição das microfissuras para a porosidade total da rocha.



**Figura 1 - Relação da velocidade dos ultrassons em provetes secos e saturados nos vários graus de alteração (W1, W2, W3 e W4).**

A fissuração foi determinada de um modo indireto através dos índices de qualidade (IQ) e de fissuração (IF) atrás referidos. Procurou-se, com a sua determinação, saber a contribuição da porosidade de poro e da porosidade de fissura na porosidade total ao longo da sequência de alteração que estas rochas apresentam. A determinação dos dois índices acima referidos foi feita com base nas seguintes equações:



$$IQ = \frac{V_{Lsec}}{V_{Lc}} \times 100 \quad (2)$$

$$IF = \sqrt{\frac{(V_{Lc} - V_{Lsat})^2 + (V_{Lc} - V_{Lsec})^2}{(V_{Lc} - 1500)^2 + (V_{Lc} - 340)^2}} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$V_{Lc}$  - Velocidade teórica de propagação das ondas longitudinais (m/s);

$V_{Lsec}$  - Velocidade de propagação das ondas longitudinais em provetes secos (m/s);

$V_{Lsat}$  - Velocidade de propagação das ondas longitudinais em provetes saturados (m/s);

1500 e 340 - Velocidade de propagação dos ultrassons na água e no ar respetivamente (m/s).

Para o cálculo da velocidade teórica de propagação das ondas longitudinais recorreu-se ao trabalho de Aleksandrov *et al.* (1968), que fornece valores das velocidades de propagação dos ultrassons em rochas isentas de vazios. Para o granito, aqueles autores determinaram um valor de 6000 m/s para a propagação das ondas longitudinais e de 3600 m/s para a propagação das ondas transversais.

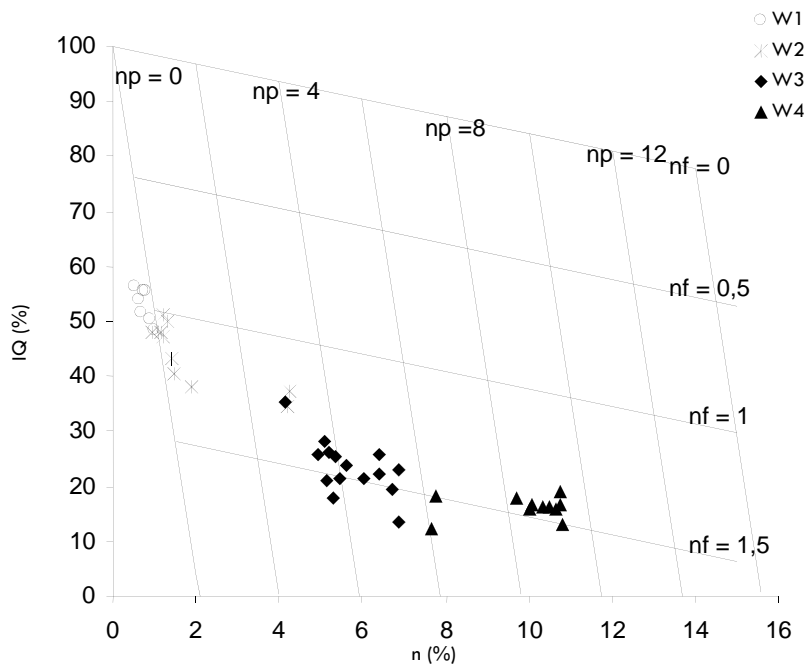
Com base nestes valores, determinaram-se os índices de qualidade (IQ) e de fissuração (IF), segundo as equações (2) e (3) atrás referidas, apresentando-se na tabela 3 o resumo dos resultados obtidos. Calculou-se também o IQ<sub>w</sub> (índice de qualidade em provetes saturados), substituindo na equação (2)  $V_{Lsec}$  por  $V_{Lsat}$ .

**Tabela 3 - Valores do IQ, IF e IQ<sub>w</sub> ao longo da sequência de alteração do granito da Guarda**

Grau de alteração	Nº de provetes ensaiados	n (%)	IQ (%)	IQ <sub>w</sub> (%)	IF (%)
W1	10	0.8	53.2	67.7	47.5
W2	10	1.91	43.9	59.4	57.7
W3	22	5.67	23.3	28.9	86.8
W4	13	10.03	16.2	18.4	97.2

n – porosidade; IQ – Índice de qualidade;  
IQ<sub>w</sub> – Índice de qualidade em provetes saturados;  
IF – Índice de fissuração.

Estes valores foram depois introduzidos no ábaco desenvolvido por Tourenq *et al.* (1971), para a determinação e quantificação da porosidade de poro (np) e da porosidade de fissura (nf). A figura 2 mostra a fração poro e fissura para os vários graus de alteração analisados, através da decomposição gráfica baseada na porosidade (n) e no índice de qualidade (IQ).

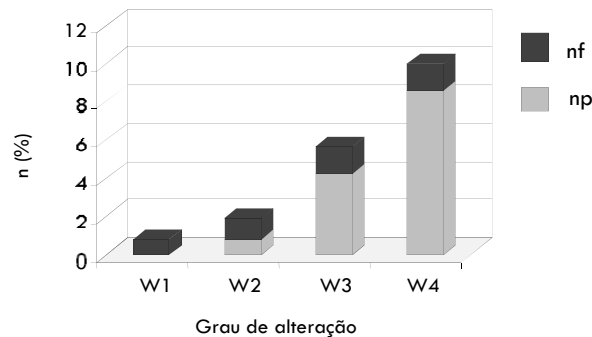


**Figura 2 - Ábaco para a determinação da porosidade poro (np) e fissura (nf) do granito da Guarda**

W1, W2, W3 e W4 representam os vários graus de alteração da rocha

Como se pode observar da análise da figura 2 e 3, à medida que a porosidade aumenta há um acréscimo da contribuição dos poros (np) para a porosidade total, mantendo-se a porosidade de fissura (nf) praticamente constante (entre 1 e 1.5 %). Por outro lado, verifica-se que, na rocha sã (W1), a porosidade existente corresponde essencialmente a uma porosidade de fissura, como seria de esperar neste tipo de rochas. Se analisarmos os valores dos índices de qualidade IQ e IQw, apresentados na tabela 3, verificamos que a diferença entre eles é maior nos provetes correspondentes à rocha menos alterada (W1 e W2). Com efeito, como se verifica da análise das figuras 2 e 3, a percentagem da porosidade de fissura relativamente à

porosidade de poro é muito maior nestes graus de alteração, o que leva a uma maior diferença entre os valores dos dois índices de qualidade acima referidos (da ordem dos 15 %), como se pode observar na tabela 3. Nos provetes mais alterados (W3 e W4), a percentagem da porosidade de fissura relativamente à porosidade de poro diminui drasticamente, fazendo com que a diferença entre o IQw e o IQ nestes graus de alteração seja já muito pequena (da ordem dos 2 a 5 %). Ao analisar uma série de granitos nacionais, Quinta Ferreira (1990) verificou também que, nestas rochas de baixa porosidade, a contribuição inicial das fissuras é importante, mas que à medida que se processa a alteração da rocha aumenta muito a contribuição dos poros para a porosidade total.



**Figura 3 - Relação entre a porosidade poro (np) e fissura (nf) em função do grau de alteração apresentado pelo granito da Guarda**  
n – porosidade, W- grau de alteração

A determinação da permeabilidade nas rochas permite inferir sobre a existência de uma rede de vazios interligados entre si que permitam a circulação de um fluido, geralmente a água. Ora, sendo a água o principal agente de alteração química, física e mecânica das rochas, quanto maior for a permeabilidade das rochas mais fácil será o acesso da água ao seu interior e, portanto, maior será a possibilidade de alteração. Com este objectivo, foram determinadas a permeabilidade segundo o procedimento descrito em Castro Gomes *et al.* (2002), tendo-se utilizado como fluido percolante o oxigénio. Os provetes utilizados no ensaio foram caroteados com uma broca diamantada de modo a permitir a obtenção de amostras com as dimensões das células de ensaio. Foi também determinada a absorção de água por

capilaridade, seguindo-se o procedimento de ensaio da NP EN 1925:2000 (Métodos de ensaio para pedra natural: determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade), tendo-se determinado o parâmetro  $C_1$  (em gramas por metro quadrado pela raiz quadrada do tempo em segundos). Para esse efeito, serraram-se de cada amostra a ensaiar 4 cubos com 5 cm de aresta cada. Os valores obtidos dos dois ensaios estão apresentados na tabela 4.

**Tabela 4 - Valores da permeabilidade ao oxigénio e da absorção de água por capilaridade**

Grau de alteração	Nº de provetes ensaiados	n (%)	K $\times 10^{-15}$ (m <sup>2</sup> )	$C_1$ (g/m <sup>2</sup> .s <sup>0.5</sup> )
W1	3	0.77	0.026	1.672
W2	3	1.33	0.085	2.798
W3	3	5.64	12.31	24.155
W4	2	9.24	-	26.876

n – porosidade média dos provetes ensaiados;  
 K – permeabilidade ao oxigénio;  
 $C_1$  – absorção de água por capilaridade;  
 - sem dados.

Da análise da tabela 4, verifica-se existir uma relação positiva entre a porosidade, a absorção de água por capilaridade e a permeabilidade ao oxigénio. Com efeito, são as amostras com maiores porosidades que apresentam maiores valores de  $C_1$  e de K.

#### 4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

As propriedades mecânicas deste granito foram determinadas experimentalmente ao longo de toda a sequência de alteração, através de ensaios de compressão uniaxial e de carga pontual. Após a obtenção dos provetes de acordo com a metodologia atrás referida, estes foram instrumentados de modo a poder-se obter as deformações, os respetivos módulos e coeficientes. A máquina de compressão utilizada foi uma prensa rígida servocontrolada da Form+Test Prüfssysteme Schneider (modelo STM 2000S), que possui como sistema de medição das deformações axiais três LVDT, sendo através deles que a deformação do provete é controlada. Além disso, todos os provetes foram instrumentados com mais 2 pares de transdutores de deformação linear (LDT), colocados em ângulos de 90°

a meia altura dos provetes, para determinação das deformações transversais.

#### 4.1 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS

Com o objetivo de determinar o módulo de deformabilidade permanente, foram realizados ensaios de compressão uniaxial cíclicos, sempre com deformação controlada e constante. Como se pretendia analisar o tipo de rutura dos provetes, todos os ensaios foram levados até à descarga total. Foi assim possível analisar o comportamento deformador, quer axial, quer transversal de todos os provetes. Determinaram-se, de acordo com a proposta da ISRM (1999), a tensão à compressão uniaxial ( $\sigma$ ), o módulo de elasticidade tangente e secante a 50% da tensão máxima ( $E_{t50}$  e  $E_{s50}$ , respetivamente), a deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ), e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), sendo este determinado para valores de deformação correspondentes a 50% da tensão máxima, e nos casos de ensaios cíclicos na curva de carga do ensaio. Além da tensão de rutura máxima, calculou-se também a deformação correspondente à rutura ( $\epsilon_{rot}$ ). Determinou-se também o módulo de deformação permanente (M), segundo o procedimento proposto por Goodman (1989) a partir dos ensaios cíclicos, bem como o módulo de elasticidade inicial ( $E_i$ ) proposto por Gupta e Rao (2000).

Relativamente aos ensaios de carga pontual, seguimos o procedimento proposto pela ISRM (1985). Com o intuito de avaliar a influência que o teor de água da amostra poderia trazer à resistência à carga pontual, foram também executados ensaios em que as amostras se encontravam com um teor de água correspondente à saturação no vácuo ( $I_{s(50)}$  saturado). Foram assim determinadas as resistências à carga pontual em todos os graus de alteração.

#### 4.2. RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Na tabela 5 encontram-se os resultados obtidos dos ensaios de compressão uniaxial efetuados para os vários graus de alteração. Todas as amostras foram ensaiadas com um teor de água resultante da secagem ao ar e com controlo da deformação, ou seja, a velocidade era previamente fixada, mantendo-se constante ao longo do ensaio. Optou-se sempre por velocidades baixas, de acordo com o preconizado pela ISRM (1999), quer nos ensaios simples, quer nos ensaios cíclicos.

**Tabela 5 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial realizados**

Grau de alteração	Velocidade (mm.s-1)	$\sigma_c$ (MPa)	M (GPa)	$E_i$ (GPa)	$E_{150}$ (GPa)	$E_{50}$ (GPa)	$\varepsilon_{a\ rot.}$ (%)	$\nu$
W1 (Média) (Variação) N	0.004 0.001-0.01 7	74.3 59.9- 7.3 7	131.9 131.4-132.3 3	10.5 6.4-13.3 6	23.3 16.2-27.7 7	14.6 12.8-8.1 6	0.481 0.45-0.55 7	0.35 0.29-0.38 6
W2 (Média) (Variação) N	0.002 0.001-0.005 6	67.6 41- 90.8 6	137.1 70-266.4 3	10.6 5.5-15.9 6	20.9 6.9-33.6 6	12.99 5.9-20.7 6	0.506 0.40-0.74 6	0.35 0.24-0.43 6
W3 (Média) (Variação) N	0.003 0.001-0.005 5	24.9 23.3- 9.9 5	6.9 5.1-8.7 2	3.7 2.1-4.6 5	3.9 2.9-6.5 5	2.8 2.1-3.4 5	0.945 0.84-1.08 5	0.32 0.20-0.42 4
W4 (Média) (Variação) N	0.005 0.005-0.005 4	6.7 3.1- 13.6 4	0.65 0.6-0.7 2	1.8 1.7-1.9 4	1.4 0.7-2.5 4	0.7 0.3-1.2 4	0.958 0.75-1.35 4	0.91 0.28-1.17 4

$\sigma_c$  – tensão de rotura máxima no ensaio de compressão uniaxial; M – Módulo de deformação permanente obtido nos ensaios cíclicos;  $E_i$  – Módulo de elasticidade inicial;  $E_{150}$  – Módulo de elasticidade tangente a 50 % da tensão máxima;  $E_{50}$  – Módulo de elasticidade secante a 50 % da tensão máxima;  $\varepsilon_{a\ rot.}$  – Deformação axial máxima na rotura;  $\nu$ -Coeficiente de Poisson.

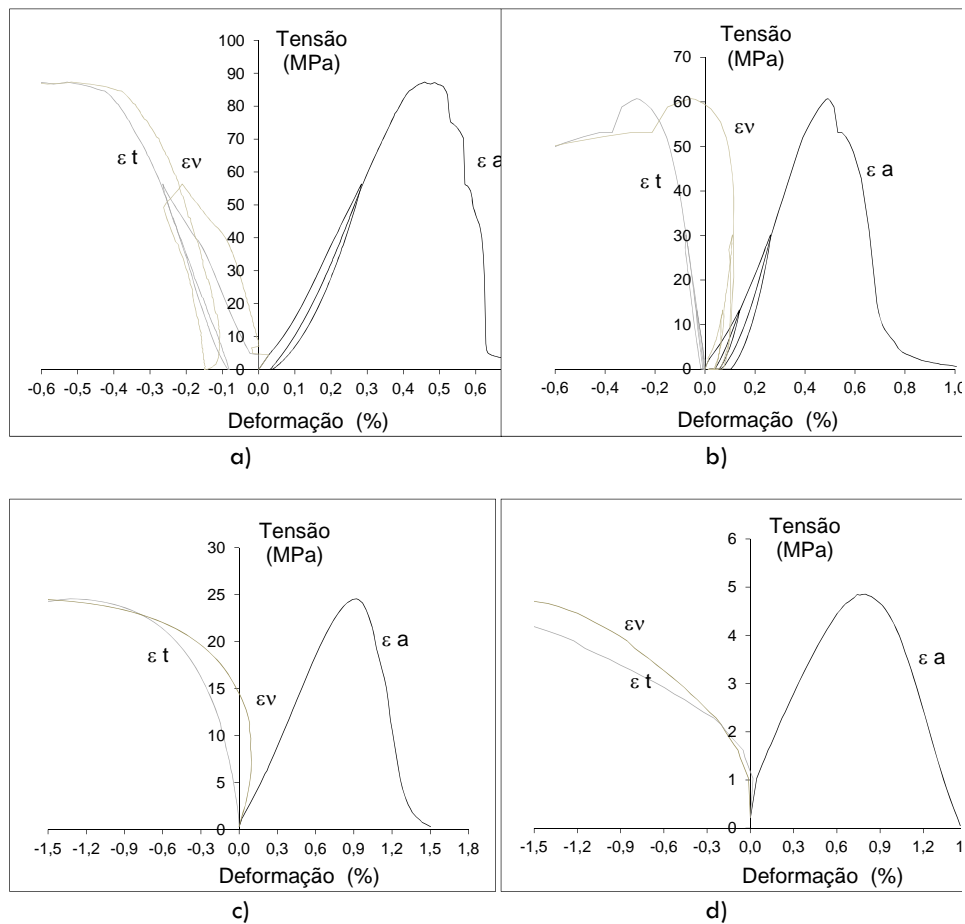
Analisando os valores obtidos em termos estatísticos, os granitos mais alterados (W4) apresentam uma maior dispersão dos valores do que os menos alterados, indiciando uma maior variabilidade. Com efeito, neste grau de alteração, encontra-se material que do ponto de vista geotécnico é mais heterogéneo, e em que pequenas variações mineralógicas e estruturais podem conduzir a uma diminuição drástica da resistência e a uma maior deformação na rotura. O aumento da fissuração e da porosidade é talvez o elemento mais significativo, pois leva a um aumento da intercomunicação entre os vazios (poros e fissuras), fazendo com que as microfaturas que se iniciam na fase elástica se possam propagar mais facilmente por todo o provete.

Na figura 4 apresentam-se algumas curvas de tensão-deformação obtidas, agrupadas segundo o seu grau de alteração. Nas amostras de grau W1, W2 e W3 de alteração, foi possível identificar as diferentes fases da curva de tensão-deformação referidas na bibliografia (Andreev, 1995; Lama e Vutukury, 1978). Relativamente às amostras com grau W4, representadas na figura 4.d), não se observa a fase correspondente ao fecho das microfissuras da rocha. Isso deve-se, em nosso entender, a que quando se dá o encosto do prato superior no início do ensaio, ocorrer de imediato o colapso da estrutura do provete, que se já encontra com muitas fraturas abertas e poros interligados devido à desagregação dos grãos. Após o colapso inicial, a rocha

passa para a fase elástica, enrijecendo a sua estrutura, devido, em parte, ao imbricamento dos seus grãos minerais.

#### 4.3. RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS DE CARGA PONTUAL

Na tabela 6 encontram-se os resultados obtidos dos ensaios de carga pontual efetuados para os vários graus de alteração, com as amostras secas ao ar e com um teor de água correspondente à saturação.



**Figura 4 - Curvas tensão-deformação obtidas para os vários graus de alteração**

a) W1; b) W2; c) W3; d) W4.  $\epsilon_a$  - deformação axial;

$\epsilon_t$  - deformação transversal;  $\epsilon_v$  - deformação volumétrica;

As curvas a) e b) representam ensaios cíclicos e as curvas c) e d) representam ensaios simples

Da análise dos resultados verifica-se que a resistência à carga pontual é menor, para o mesmo grau de alteração, nos ensaios realizados em provetes previamente saturados, relativamente aos ensaios realizados nos provetes secos ao ar.

Esta constatação observa-se em todos os estádios de alteração, podendo dizer-se que a saturação das amostras, com o conseqüente aumento do seu teor de água, leva a uma redução de mais de 50 % da sua resistência à carga pontual obtida, de acordo com o preconizado no procedimento da ISRM (1985).

**Tabela 6 - Quadro resumo dos valores obtidos no ensaio de carga pontual ( $I_{s(50)}$ ).**

Grau de alteração	n (%)	$I_{s(50)}$ (MPa)							
		Seco ao ar				Saturado			
		N	$I_{s(50)}$	C.V.	w (%)	N	$I_{s(50)}$	C.V.	w (%)
W1	0.80	7	3.89	9.8	0.09	4	2.15	38.2	0.30
W2	1.91	5	2.01	33.8	0.17	3	1.32	43.9	0.74
W3	5.67	13	0.97	61.1	0.35	6	0.42	66.9	2.27
W4	10.03	9	0.29	77.8	0.49	5	0.14	82.2	4.29

C.V. – coeficiente de variação =  $(\text{Desvio padrão}/I_{s(50)}) \times 100$ ; w (%) – teor em água médio das amostras ensaiadas; n (%) – porosidade; N – número de amostras ensaiadas.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Relativamente às propriedades físicas do granito da Guarda, procurou-se saber se existia alguma relação entre elas, de modo a que, a partir da determinação de um dado parâmetro, se pudesse inferir com razoável segurança outro sem necessidade de efetuar ensaios morosos e caros.

A tabela 7 mostra os coeficientes de correlação obtidos para os parâmetros e índices físicos analisados, estando realçados aqueles considerados estatisticamente significantes ( $r \geq 0.80$ ), cujas correlações estão apresentadas na tabela 8.

De um modo geral obtiveram-se boas correlações, confirmando-se os resultados observados por vários autores nestes materiais rochosos. Como se pode verificar da análise dos dados da tabela 7, as correlações entre a densidade e todos os outros



parâmetros e índices físicos são fracas, com coeficientes de correlação inferiores a 0.80. Isto deve-se, em nosso entender, ao facto de, nestes granitos, a alteração ser essencialmente de origem física, não promovendo por isso uma decomposição dos seus minerais que proporcione uma diminuição da densidade da rocha, mantendo-se esta sem grandes variações ao longo da sequência de alteração (ver tabela 1).

**Tabela 7- Coeficientes de correlação entre os parâmetros e índices físicos analisados**

	V <sub>Lseco</sub> (m/s)	V <sub>Lsat</sub> (m/s)	n <sub>48</sub> (%)	n (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
G	+ 0.62	+ 0.59	- 0.67	-0.57	+ 0.75
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	+ 0.90	+ 0.89	- 0.98	- 0.97	
n (%)	- 0.97	- 0.92	+ 0.98		- 0.97
C <sub>1</sub> (g/m <sup>2</sup> x s <sup>0.5</sup> )	- 0.83	- 0.86	+ 0.89	+ 0.96	- 0.86
K (m <sup>2</sup> )	- 0.94	- 0.90	+ 0.88	+ 0.88	- 0.82

n – porosidade; n<sub>48</sub> – porosidade livre às 48 horas; V<sub>Lsat</sub> – Velocidade de propagação das ondas longitudinais em provetes saturados; V<sub>Lseco</sub> – Velocidade de propagação das ondas longitudinais em provetes secos; G – densidade; γ<sub>d</sub> – peso volúmico aparente seco; K – permeabilidade ao oxigénio; C<sub>1</sub> – absorção de água por capilaridade.

**Tabela 8 - Relações obtidas entre os índices físicos do granito da Guarda**

Relações obtidas	r	N	Observações
$\gamma_d = 2.166 \ln(V_{Lseco}) + 8.526$	+ 0.90	43	Todos os graus de alteração
$\gamma_d = 1.740 \ln(V_{Lsat}) + 11.389$	+ 0.89	39	Todos os graus de alteração
$\gamma_d = -0.345 n_{48} + 26.073$	- 0.98	35	Todos os graus de alteração
$\gamma_d = -0.301 n + 26.127$	- 0.97	55	Todos os graus de alteração
$n = 26.527 e^{-0.0011 V_{Lseco}}$	- 0.97	43	Todos os graus de alteração
$n = 19.151 e^{-0.0007 V_{Lsat}}$	- 0.92	39	Todos os graus de alteração
$n = 1.023 n_{48} + 0.751$	+ 0.99	35	Todos os graus de alteração
$C_1 = 84.91 e^{-0.0012 V_{Lseco}}$	- 0.96	7	Amostras pouco representativas
$C_1 = 90.768 e^{-0.001 V_{Lsat}}$	- 0.95	6	Amostras pouco representativas
$C_1 = 2.18 n^{1.21}$	+ 0.98	8	Amostras pouco representativas
$\log K = 6E + 22(V_{Lseco})^{-6.98}$	- 0.93	8	Amostras pouco representativas
$\log K = 3E + 48e^{-4.43 \gamma_d}$	- 0.94	8	Amostras pouco representativas
$K = 0.042 n^{2.86}$	+0.88	8	Só provetes de grau W1, W2 E W3

N – número de provetes ensaiados; r – coeficiente de correlação.

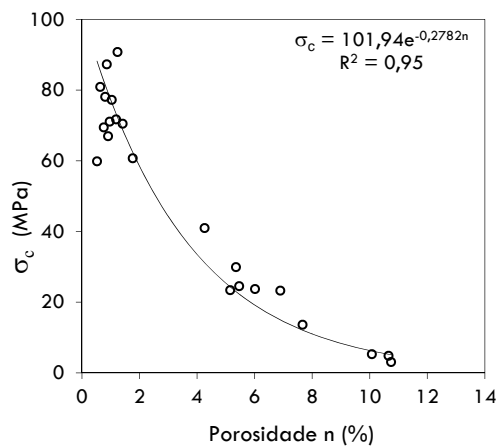
As correlações obtidas entre o  $C_1$  e o  $K$  com  $V_L$  e  $n_{48}$  poderão eventualmente ser melhoradas com o aumento do número de amostras ensaiadas, que para aqueles dois parâmetros foi muito inferior ao dos restantes índices (tabela 8). É de mencionar, no entanto, a correlação positiva com coeficiente de correlação superior a 0.85, apresentada quer por  $C_1$ , quer por  $K$  relativamente à porosidade. Parece-nos que uma vez mais, neste caso em que a alteração de origem física é predominante em relação a outros tipos de alteração, a porosidade desempenha um papel importante no controlo de outras propriedades e índices da rocha. As correlações obtidas entre  $C_1$  e a porosidade e entre a permeabilidade ao oxigénio e a porosidade são do tipo potencial, sendo ambas positivas, enquanto a correlação entre a velocidade de propagação dos ultrassons em provetes secos e saturados e  $C_1$  é do tipo logarítmica negativa. O baixo número de amostras ensaiadas nestes ensaios não permite validar as correlações obtidas de modo inequívoco. Com efeito, em alguns casos não foi possível efetuar os ensaios em toda a gama de alteração da rocha. No entanto, vários autores observaram também correlações do mesmo tipo entre estes parâmetros com valores de coeficientes de correlação mais elevados, para um maior número de dados. Begonha (1997) refere boas correlações obtidas para o granito do Porto, do mesmo tipo das da tabela 7, entre  $C_1$  e a porosidade, e entre a velocidade dos ultrassons e  $C_1$ .

Os valores da razão  $V_L\text{sec}/V_L\text{sat}$  e as diferenças entre o  $I_{Qw}$  e o  $I_Q$  nos vários graus de alteração levam-nos a concluir que a porosidade de fissura é muito grande inicialmente (representando mais de 65 % dos vazios da rocha), diminuindo depois a sua proporção nos graus mais elevados de alteração onde representa menos de 27 % dos vazios nos provetes mais alterados (graus W3 e W4). Verifica-se, assim, que a alteração a que estes granitos foram sujeitos conduziu a um aumento da sua porosidade, pelo que, apesar de existir também uma alteração química presente, é a porosidade que condiciona as suas propriedades físicas. Com efeito, a velocidade de propagação dos ultrassons na rocha sã (W1) sofre uma diminuição de cerca de 60 % na rocha muito alterada (W4). Parece-nos que este parâmetro, por ser de fácil determinação, não destruir a amostra e não necessitar de grande preparação dos provetes para a sua obtenção, poderá ser um bom aferidor do grau de alteração das rochas graníticas alteradas, quando a alteração se evidenciar por um aumento de porosidade. As boas

correlações obtidas entre este parâmetro e as propriedades físicas destes materiais evidenciados na tabela 8 apontam nesse sentido.

Relativamente ao ensaio de compressão uniaxial, parece haver um certo controlo estrutural e mineralógico da resistência nestes materiais, verificando-se muitas vezes que as fronteiras dos megacristais de feldspato funcionavam como superfícies estruturais de maior fraqueza, fazendo com que fossem aí iniciadas as primeiras fraturas que levariam à rotura do provete.

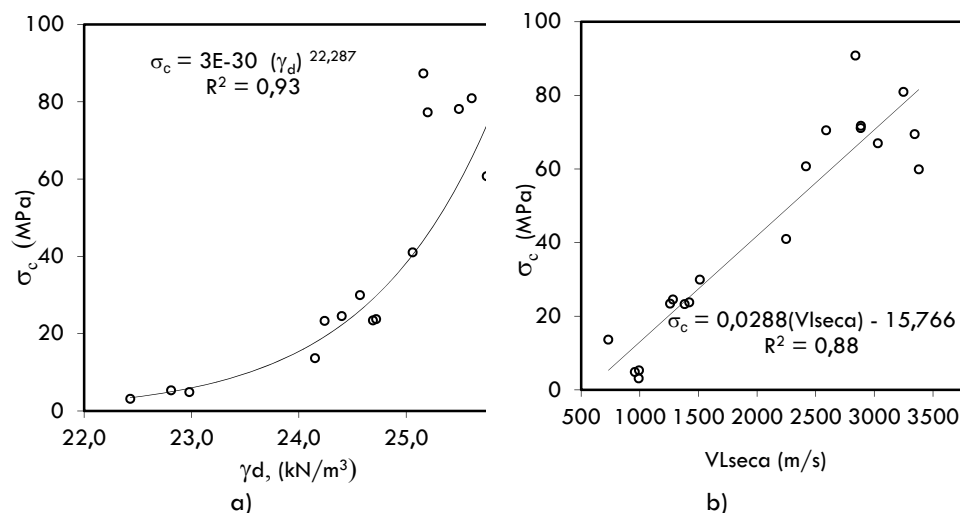
Projetando os resultados da resistência à compressão uniaxial em função da porosidade (Figura 5), observa-se uma relação exponencial negativa com um bom coeficiente de correlação. Da análise da figura verifica-se que, para valores baixos da porosidade, a resistência à compressão uniaxial da rocha diminui drasticamente para incrementos muito pequenos da porosidade. O gráfico mostra também que a taxa de diminuição se torna mais suave para as amostras com porosidades mais elevadas, o que pode indicar que, pequenas variações da porosidade no início do processo de alteração (W1 e W2) podem conduzir a uma grande diminuição da sua resistência em consequência de importantes modificações internas da rocha. Consideramos que estas modificações estarão essencialmente associadas aos mecanismos de fissuração interna das amostras e que podem condicionar o comportamento mecânico destas. Da análise da figura 5 observa-se que, a partir de uma porosidade de 2 %, a alteração parece ter uma influência importante na resistência da rocha.



**Figura 5 - Variação da resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) com a porosidade ( $n$ )**

Este comportamento tinha já sido observado anteriormente no granito do Jarmelo (Quinta Ferreira e Antão, 2007) e noutros granitos portugueses (Quinta Ferreira, 1990).

Com o intuito de analisar a variação desse comportamento com outras propriedades do material granítico, projetaram-se na figura 6 as relações entre a resistência à compressão uniaxial e o peso volúmico seco ( $\gamma_d$ ) e a velocidade de propagação das ondas longitudinais nas amostras secas ( $V_{Lseca}$ ) anteriormente determinadas. Como se pode verificar, existe uma boa relação linear positiva no caso de  $V_{Lseca}$  e exponencial também positiva no caso de  $\gamma_d$ , pelo que consideramos que estas correlações poderão ser bons indicadores para estimar a resistência destes granitos.



**Figura 6 - Relação entre a resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e  $V_{Lseca}$  (a) e  $\gamma_d$  (b)**

Vários autores (Santos, 1995; Begonha, 1997; Irfan e Dearman, 1978a e b; Arel e Tugrul, 2001), ao analisarem granitos com diferentes graus de alteração, encontraram também relações muito semelhantes a estas.

A relação encontrada entre o ensaio de compressão uniaxial e o ensaio de carga pontual é bastante boa. No entanto, se analisarmos esta relação à luz dos diferentes graus de alteração, observamos algumas diferenças que se impõe analisar. Com efeito, têm sido obtidos valores distintos desta relação para vários tipos rochosos, o que nos leva a considerar a hipótese da existência de fatores de

correlação diferenciados, entre estes dois ensaios, consoante o tipo de rocha analisado e também função do grau de alteração que estas apresentam. Relativamente a esta questão, Gupta e Rao (1998) apresentam vários fatores de conversão da razão  $\sigma_c / I_{s(50)}$  para várias rochas com diferentes estados de alteração. Estes autores reconhecem que se pode obter um fator de conversão (a que chamaram fator K) para a rocha sã a ligeiramente alterada, mas que em materiais rochosos mais alterados este fator pode variar consideravelmente com o grau de alteração. A tabela 9 mostra relativamente ao granito da Guarda os valores dos fatores de conversão em função do seu grau de alteração.

**Tabela 9 - Fatores de conversão K ( $\sigma_c / I_{s(50)}$ ) para o granito da Guarda.**

Granito de grão grosseiro porfiróide	Grau de alteração			
	W1	W2	W3	W4
Fator K	19.1	33.6	25.9	23.2

Como se pode observar da análise desta tabela, a correlação existente varia consideravelmente para os quatro graus de alteração da rocha, o que pode indicar alguma cautela na utilização deste fator para amostras alteradas. Verifica-se, de um modo geral, um aumento do fator de conversão com o incremento da alteração da rocha. Este comportamento tem sido referido por vários autores (Lee, 1987; Irfan e Dearman, 1978a; Dearman e Irfan, 1978; Irfan e Powell, 1985; Gupta e Rao, 1998), nomeadamente quando correlacionam estes dois ensaios em rochas graníticas, o que representa uma modificação ao mencionado nos procedimentos deste ensaio (ISRM, 1985).

## 6. CONCLUSÕES

A caracterização efetuada nos granitos ensaiados permitiu evidenciar algumas características que ajudam a compreender a variação das suas propriedades ao longo da evolução da sua alteração. Verificou-se que a porosidade e o teor de água de absorção (com que está intimamente relacionado) tendem a crescer com o aumento da alteração, tendo-se verificado que a este aumento corresponde uma diminuição da velocidade de propagação dos ultrassons. Estas propriedades, conjugadas com a observação macro e microscópica, permitiram identificar os vários graus de alteração apresentados pelas

rochas. Verificou-se, por outro lado, que a densidade da rocha não apresentava grandes variações ao longo da sequência de alteração, não permitindo, assim, diferenciar os graus de alteração. Isso deve-se ao tipo de alteração imposto a estes granitos, que, sendo de índole essencialmente física, não permite grandes variações na densidade dos minerais constituintes da rocha.

A análise do tipo de porosidade revelou-se muito importante na compreensão das características geométricas do espaço poroso. Devido ao facto de os granitos serem materiais rochosos de baixa porosidade, pequenas variações desta propriedade conduzem a grandes desvios do comportamento do material quer na sua resistência, quer na sua deformabilidade.

Verificou-se haver boas correlações entre a velocidade de propagação dos ultrassons com o peso volúmico aparente seco, com a porosidade, com a absorção de água por capilaridade e com a permeabilidade ao oxigénio, tendo-se verificado que a textura e a dimensão média dos minerais são um fator importante a considerar na absorção de água por capilaridade destes materiais.

Sugere-se, assim, que sejam usadas as relações atrás apresentadas (tabela 8), para uma caracterização expedita das propriedades físicas destes granitos ao longo do seu perfil de alteração.

O estudo experimental efetuado sobre o comportamento mecânico destas rochas veio mostrar que não se comportavam nem como um meio contínuo nem como um meio isotrópico. A sua resposta não linear nos ensaios de compressão uniaxial está profundamente relacionada com a presença de fissuras. Estas são intrínsecas ao próprio material, aparecendo já na rocha sã principalmente ao longo dos limites entre minerais, mas também se desenvolvem quando da aplicação de cargas nos provetes e ao longo do processo de alteração da rocha.

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e de carga pontual confirmaram a existência de relações positivas entre a resistência à compressão uniaxial, a velocidade de propagação dos ultrassons e o peso volúmico aparente seco, sugerindo uma interdependência destes parâmetros. Isso poderá permitir que, quer a velocidade de propagação dos ultrassons, quer o peso volúmico aparente seco sejam bons indicadores para estimar a resistência de uma rocha, estando definida a equação de correlação entre estes parâmetros. Observaram também relações bastante boas (com valores de  $R^2 > 0.95$ ), do tipo exponencial negativa, entre a resistência à

compressão uniaxial e a porosidade. Com efeito, sendo o aumento da porosidade nos granitos um indicador de uma maior alteração, esta relação pode servir como um primeiro aferidor da resistência da rocha. Os resultados obtidos permitem-nos definir para estes granitos um valor de 2 % de porosidade a partir do qual a alteração vai influenciar a resistência destas rochas. Para o granito estudado as relações obtidas entre esses dois parâmetros foram:

$$\text{Granito da Guarda} \quad \sigma_c = 101.94 e^{-0.2782 n}$$

( $R^2 = 0.95$ )

Relativamente às correlações entre o ensaio de compressão uniaxial e o ensaio de carga pontual, estas devem ser usadas tendo em atenção o grau de alteração da rocha, pelo que se sugere a utilização dos fatores de conversão (k) apresentados na tabela 9.

## BIBLIOGRAFIA

- Aleksandrov, K.S., Belikov, B.P. e Ryzova, T.V. (1968) – “Calcul des constantes élastiques des roches d’après leur composition minéralogique. Tradução LCPC 67.T.90, *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Paris.
- Andreev, G. E. (1995) – “Brittle Failure of Rock Materials. Test Results and Constitutive Models”. A.A. Balkema, Roterdão.
- Antão, A.M. (2004) – Comportamento geotécnico do granito da Guarda relacionado com a sua alteração. *Tese de Doutoramento*, Coimbra, p.318.
- Antão, A.M. e Quinta Ferreira, M. (2004) -“Efeito da alteração na resistência e no comportamento da deformação do granito da Guarda.” *Actas do 9º Congresso Nacional de Geotecnia*. Aveiro, Vol. I, p189-198.
- Arel, E. e Tugrul, A. (2001) – “Weathering and its relation to geomechanical properties of Cavusbasi granitic rocks in northwestern Turkey”. *Bulletin of the IAEG*, Vol. 60, nº 2 pp. 123-133.
- Begonha, A. (1997) – “Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto”. *Tese de Doutoramento*, Universidade do Minho, Braga, 393 pp.
- Castro-Gomes, J.P., Pereira-Oliveira, L.A., Gonilho-Pereira, C.N. e Pacheco-Torgal, F. (2002) – “Ensaio de absorção e permeabilidade em agregados”. *Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, Vol.1, pp.439-447.
- Chararas, B. (1991) – “Méthode d’évaluation de l’altération et modification des propriétés mécaniques des granites en Grèce du nord”. *Bulletin of the IAEG*, Vol. 43, pp.21-26.
- Dearman, W.R. e Irfan, T.Y. (1978) – “Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests”. *Proceedings Colloque*

*International UNESCO – RILEM Altération et Protection des Monuments en Pierre*, Paris, 35p.

Delgado Rodrigues, J. (1983) – “Laboratory study of thermally-fissured rocks”. *Memória N° 583, LNEC*, 13 pp.

Dobereiner, L., Durville, J-L. e Restituito, J. (1993) – “Weathering of the Massiac gneiss (Massif Central, France)”. *Bulletin of the IAEG*, Vol. 47, pp.79-96.

Fookes, P. G., Gourley, G.S. e Ohikere, C. (1988) – “Rock weathering in engineering time”. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21, pp.33-57.

Goodman, R. E. (1989) – “Rock Mechanics”. 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons.

Gupta, A.S. e Rao, K. S. (1998) – “Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability”. *Bulletin of the IAEG*, n° 57, pp.161-172.

Gupta, A.S. e Rao, K. S. (2000) – “Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state”. *Engineering Geology*, 56, pp.257-274.

IAEG (1981) – “Rock and soil description and classification for engineering geological mapping”. Report by the IAEG Commission on Eng. Geol. Mapping, *Bulletin of the IAEG*, N° . 24, pp.235-274.

Iliev, I. G. (1966) – “An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physic-mechanical properties”. *Proceedings 1<sup>st</sup> Int. Cong. ISRM*, Lisboa 2 (3), pp. 109-114.

Irfan, T.Y. e Dearman, W.R. (1978a) – “Engineering classification and index properties of a weathered granite”. *Bulletin of the IAEG*, N° . 17, pp.79-90.

Irfan, T.Y. e Dearman, W.R. (1978b) – “The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England”. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 11, pp.233-244.

Irfan, T.Y. e Powell, G.E. (1985) – “Engineering geological investigations for foundations on a deeply weathered granitic rock in Hong Kong.” *Bulletin of the IAEG*, N° . 32, pp.67-80.

ISRM (1981) – “Rock characterization testing & monitoring – ISRM suggested methods”. Editado por E. T. Brown, Pergamon Press.

ISRM (1985) – “Suggested method for determining point load strength”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, N° .2, pp.51-60.

ISRM (1999) - “Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.36, p.279-289.

Kahraman, S. (2001) – “A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, pp.729-733.

Lama, R.D. e Vutukuri, V.S., (1978) – “*Handbook on mechanical properties of rocks – Testing Techniques and results*”. Vol.II, III e IV Trans Tech. Publications. Clausthal.

Lee, S.G. (1987) – “Weathering and geomechanical characterization of Korean granites”. *Tese de Doutorado*, University of London, 415 pp.

Li, C. e Nordlund, E. (1993) – “Effects of Couplants on Acoustic Transmission”. *Rock Mech. Rock Engng.*, 26(1), pp. 63-69.



- Quinta Ferreira, M. (1990) - "Aplicação da geologia de engenharia ao estudo de barragens de enrocamento". *Tese de Doutoramento*, Universidade de Coimbra, Coimbra, 322 p.
- Quinta Ferreira, M. e Antão, A.M. (2003a) - "Alteração do granito da Guarda (Portugal) - algumas correlações entre índices geoquímicos". *IV Congresso Ibérico de Geoquímica*. Coimbra, p.165-167.
- Quinta Ferreira, M. e Antão, A.M. (2003b) - Caracterização química e mineralógica do estado de alteração do granito da Guarda. *Revista Ciências da Terra*. Lisboa. Vol. Especial Nº V (2003) p.24-25.
- Quinta Ferreira, M. e Antão, A.M. (2007) - "Uniaxial compression behaviour of the Jarmelo granite (Guarda, Portugal). *11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisboa, Vol 1,p.513-516.
- Rodrigues, C.M.G e Sousa, L.M.O. (2002) - "Influência da composição química e mineralógica no comportamento do saprólito granítico da Guarda". *Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, Vol.1, p.321-330.
- Rodrigues, C.M.G. (2003) - "Caracterização Geotécnica e Estudo Geomecânico de um Saprólito Granítico da Guarda". *Tese de doutoramento*, Universidade de Coimbra, Coimbra, 644 p
- Santos, L.R. (1995) - "Estudo de um perfil de alteração do granito do Porto". *Tese de Mestrado*, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 167 p.
- Teixeira, C., Martins, J.A., Medeiros, A.C., Pilar, L., Mesquita, L.P. e Ferro, M.N. (1963) - "Notícia explicativa da folha 18-C, Guarda". Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000, *Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa*.
- Tourenq, C. (1974) - "Propriétés et classification des matériaux naturels de construction". *Proceedings 2<sup>nd</sup> Int. Cong. IAEG*, São Paulo (Brasil), thème IV, Vol.1,GR1-Gr35.
- Tourenq, C. e Denis, A. (1982) - "Les essais de granulats". Lab. Central des Ponts et Chaussées. *Rapport de Recherche n° 114*, Paris, 92 p.
- Tourenq, Cl., Fourmaintraux, D. e Denis, A. (1971) - " Propagation des ondes et discontinuités des roches ". *Symp. ISRM*, tema I, Nancy, França.