

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA EXPEDITA DO GRANITO DO PORTO PARA FINS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

SWIFT GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF OPORTO GRANITE FOR TUNNELING EXCAVATION

Dinis da Gama, Carlos, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*
Reis e Sousa, Manuel, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal*

RESUMO

Os critérios sugeridos por diversos autores para a caracterização geotécnica dos maciços rochosos não são de fácil e expedita aplicação, visto que nela intervêm várias propriedades geotécnicas que quantificam características geológicas, geomecânicas e geofísicas dos maciços e rochas constituintes e a determinação de tais parâmetros é difícil e morosa.

O presente artigo tem por objectivo apontar critérios para uma expedita caracterização geotécnica dos maciços rochosos que reproduza a realidade do maciço, quer no que respeita à maior ou menor resistência às acções de escavação, quer à sua capacidade portante.

Referem-se os tipos de ensaios efectuados sobre amostras de granito com diferentes graus de alteração, apresentam-se os valores obtidos e relacionam-se, entre si, tais valores. Por fim, com base em análises de correlação e respectivos coeficientes, apontam-se critérios para uma expedita caracterização geotécnica dos maciços rochosos graníticos.

ABSTRACT

Criteria suggested by many authors for the classification of rock masses are not easily applied due to the multiplicity of geotechnical properties that describe their geological, geomechanical and geophysical characteristics, whose determination is often complex and time consuming.

This article aims to propose a simplified classification scheme for granitic rock masses which may reproduce their real behaviour, not only under excavation actions, but also regarding their self supporting capacities.

Various testing types for granite samples with different weathering degrees are described, the obtained values are presented and their mutual relations are shown. Finally, on the basis of correlation analyses and corresponding coefficients, an expedite classification criterion is developed for granitic rock masses.

1 – INTRODUÇÃO

Como é referenciado por diversos autores, [1][2][3], a execução de grandes escavações, quer a céu aberto quer subterrâneas, em maciços rochosos para implantação de obras de engenharia de grandes dimensões, exige um aprofundado conhecimento das características geotécnicas dos maciços e rochas constituintes onde vão ser efectuadas as escavações. Uma cuidada caracterização geotécnica dos materiais permite definir processos de construção mais seguros e mais económicos e, também, os tipos de suporte provisório e definitivo mais adequados, ou seja, aferindo a escavabilidade do maciço e a sua capacidade portante, facilitando ainda a comunicação entre todos os intervenientes nos projectos.

Grande parte dos acidentes estruturais ocorridos inesperadamente nos maciços durante a fase de escavação são devidos a uma insuficiente caracterização geotécnica dos materiais a escavar. Tais acidentes, para além de serem em causa a integridade física das pessoas que ali trabalham,

originam atrasos na conclusão das obras e gastos não previstos, com o recurso a soluções não consideradas quando da elaboração do respectivo projecto.

A descrição geotécnica de um dado maciço visa classificá-lo de modo a poder prever a sua maior ou menor aptidão para a implantação de um dado tipo de obra e consoante este último e o local de implantação, uma mesma classe de maciço rochoso pode ser favorável ou desfavorável para a implantação. Dada a importância atribuída à classificação geotécnica dos maciços de implantação de grandes obras de engenharia, desde há várias décadas que conceituados especialistas em Mecânica das Rochas se vêm dedicando a este tema.

De uma maneira geral, nesses estudos são consideradas características geológicas, características geomecânicas e, mais raramente, características geofísicas. Quanto aos elementos geológicos usualmente aplicados nos critérios de classificação dos maciços, eles são o tipo de formação geológica, a percentagem de amostra recuperada nas sondagens efectuadas (RQD), a presença de eventuais falhas e os seus graus de fracturação e de alteração. As características mecânicas dos maciços e das rochas constituintes mais cumumente aplicadas na classificação geotécnica dos maciços respeitam à deformabilidade, à resistência ao corte, às resistências à compressão uniaxial e à tracção e, mais recentemente, à resistência à compressão pontual. Como características geofísicas utilizadas na caracterização geotécnica dos maciços rochosos referem-se as velocidades de propagação de ondas sísmicas e de ondas sísmicas através dos materiais.

Os critérios para a classificação geotécnica dos maciços rochosos, sugeridos pelos diferentes autores de trabalhos sobre Mecânica das Rochas, não são uniformes. Isto, porque não são comuns os parâmetros definidores das características geológicas, geomecânicas e geofísicas que contribuem para a caracterização do maciço e rocha constituinte, nem a tais parâmetros, quando comuns, são atribuídos os mesmos pesos.

Por outro lado, a necessidade de uma verdadeira caracterização dos maciços, em vez de uma simples classificação, provem do facto que o elevado número de observações e ensaios necessários para a determinação das características geológicas, geomecânicas e geofísicas dos materiais, não é compatível com uma expedita classificação geotécnica dos maciços a escavar e, por isso, nalguns casos a mesma não é feita criteriosamente.

Resultados de observações e de ensaios sobre diferentes tipos de rochas têm demonstrado que as características dos maciços e rochas constituintes não são independentes umas das outras e que entre elas existem correlações mais ou menos fortes. Sendo assim, para uma adequada classificação geotécnica dos maciços rochosos e rochas constituintes será suficiente conhecer um número representativo de parâmetros definidores das características daqueles materiais.

Este trabalho baseia-se, fundamentalmente, em resultados obtidos em diferentes tipos de ensaio efectuados sobre amostras de granito com diversos graus de alteração (desde são a muitíssimo alterado), extraídas de sondagens das obras do Metro do Porto e têm por objectivo apontar critérios para uma expedita e fiável classificação geotécnica dos maciços rochosos e rochas constituintes que permita definir os processos de escavação mais seguros e mais económicos e os tipos de suporte mais adequados.

Referem-se ainda os diferentes tipos de ensaio efectuados, apresentam-se os resultados neles obtidos, indicam-se os diferentes valores que correlacionam, entre si, as características das rochas e os coeficientes de tais correlações, extraindo-se conclusões de ordem geral.

2 – ENSAIOS E RESULTADOS

Para a determinação de características geomecânicas e geofísicas dos granitos atravessados pelas obras do Metro do Porto, realizaram-se ensaios no laboratório e ensaios no campo sobre

amostras cilíndricas extraídas por meio de sondas rotativas. No laboratório, efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial, ensaios de compressão diametral (brasileiro), ensaios de compressão pontual e determinaram-se velocidades de propagação de ondas sísmicas; além destes, no campo foram efectuados ensaios de compressão pontual. Os ensaios realizados, quer no laboratório quer no campo, incidiram sobre amostras com diversos graus de alteração e pertencentes a diferentes zonas da obra.

Dado que, na maioria dos casos, se trabalhou sobre amostras cilíndricas provenientes de sondagens, era previamente conhecido o respectivo “log”, permitindo assim confirmar dados relativos à sua fracturação natural (RQD) e grau de alteração.

Dos diversos tipos de ensaios e determinações referidos, o de compressão pontual é o mais expedito, visto não ser necessária qualquer preparação da amostra a ensaiar e o ensaio poder ser efectuado sobre amostras irregulares (pequenos blocos). Para além disso, os ensaios podem ser efectuados no campo, dado que o respectivo equipamento é portátil.

2.1 - Ensaios laboratoriais

Nos ensaios laboratoriais, para além da determinação dos valores definidores das características de resistências às compressões uniaxial, diametral e pontual, além da velocidade de propagação de ondas sísmicas nos diversos tipos de granito ocorrentes ao longo da obra, havia o objectivo de averiguar da existência, ou não, de correlações entre aquelas características e quais os coeficientes de correlação. Para isso, na selecção das amostras destinadas a ensaios e determinações laboratoriais houve o cuidado de assegurar que as mesmas tinham comprimento suficiente para que sobre cada uma fossem efectuados os diversos tipos e número de ensaios que permitissem determinar aquelas características, por forma a que os valores a agrupar para as diferentes correlações respeitassem a rocha com o mesmo grau de alteração e com a mesma composição mineralógica. Na Tabela 1 indica-se o número de ensaios respeitantes a cada tipo.

Tabela 1 – Ensaios realizados sobre amostras das obras do Metro do Porto

Local	Compressão uniaxial	Compressão diametral (brasileiro)	Compressão pontual	Velocidade de propagação
Laboratório	62	45	69	73
Campo	----	----	2 041	----

Conforme atrás referido, tanto os ensaios de laboratório como os de campo incidiram sobre amostras de granito com estados de alteração bem diferentes, que vão desde rocha sã a rocha muitíssimo alterada. No que respeita aos provetes destinados a ensaios de laboratório, foi feita uma cuidadosa triagem prévia por forma a permitir determinar, para cada grau de alteração da rocha, intervalos de valores definidores das características em estudo. Na Tabela 2 indica-se o critério seguido para a classificação da rocha em função do seu estado de alteração e na Tabela 3 apresentam-se, para as diferentes características estudadas e para cada um dos graus de alteração da rocha, os intervalos em que se situam os valores determinados em ensaio laboratorial e que quantificam aquelas características. Para além dos valores das características referenciadas na Tabela 3, determinaram-se, também, os correspondentes valores de módulo de deformabilidade dinâmico, que, como é sabido, é função do valor da velocidade de propagação das ondas sísmicas.

De cada uma das amostras sujeitas a ensaios laboratoriais foram preparados diversos provetes (2 a 3 por característica) para serem determinadas as suas propriedades de resistência à compressão uniaxial, à compressão diametral, à compressão pontual e as velocidades de propagação de ondas sísmicas. Assim, garantiu-se que os valores que viriam a ser agrupados dois a dois para a

determinação de correlações entre as várias características em apreço respeitavam a idêntica rocha.

Tabela 2 – Grau de alteração das rochas ensaiadas em laboratório

Classificação	Descrição
W1	Rocha sã
W2	Rocha levemente alterada
W3	Rocha medianamente alterada
W4	Rocha alterada a muito alterada
W5	Rocha muito alterada a rocha parcialmente decomposta

Tabela 3 – Intervalos de valores característicos para cada grau de alteração da rocha ensaiada

Alteração	Resistência à compressão pontual (MPa)	Resistência à compressão diametral (MPa)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Velocidade de propagação de ondas sísmicas (m/s)
W1	De 6,52 a 9,21	De 8,10 a 9,94	De 81,9 a 133	De 4183 a 4562
W2	De 3,14 a 6,20	De 5,18 a 7,11	De 36,5 a 96,0	De 2395 a 4190
W3	De 1,18 a 3,80	De 1,51 a 4,00	De 14,8 a 37,9	De 1218 a 2840
W4	De 0,36 a 1,04	De 0,36 a 1,55	De 5,39 a 12,0	De 566 a 1153
W5	----	----	De 3,30 a 4,56	De 137 a 458

A seguir, constituíram-se conjuntos de pares de valores que permitiram determinar o tipo de correlação entre as grandezas em estudo e o coeficiente dessa mesma correlação. Na Fig. 1 apresenta-se, como exemplo, o resultado do tratamento do conjunto de pares de valores que definem as resistências à compressão pontual e as resistências à compressão diametral das diferentes amostras ensaiadas. O estudo estatístico dos valores das grandezas em apreço mostrou que existem boas correlações entre as características estudadas e que essas variações são bem definidas por equações tipo linear com passagem pela origem dos eixos coordenados.

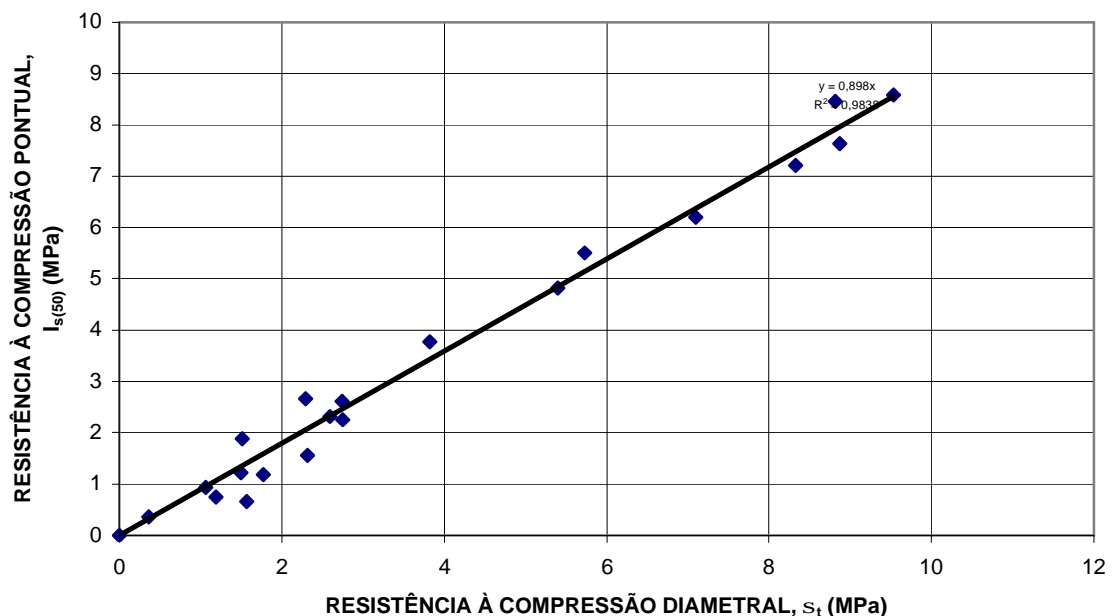


Fig. 1 – Correlação as resistências à compressão pontual e diametral.

2.2 - Ensaios de campo

No campo, apenas foram efectuados testes de compressão pontual sobre provetes cilíndricos. Estes ensaios, em número bastante elevado (2041), foram realizados em amostras extraídas ao longo de sondagens efectuadas em diferentes zonas das obras do Metro do Porto (Tabela 4). O elevado número de ensaios realizados em todas as zonas permitiu aplicar tratamento estatístico aos resultados obtidos. Assim, os valores de índice de resistência à compressão pontual $I_{s(50)}$ determinados nos ensaios realizados sobre amostras extraídas na mesma zona e com diversos estados de alteração, foram agrupados em intervalos de valores com a mesma amplitude, representados graficamente, em termos de frequência relativa acumulada e seguidamente determinados os valores da média, da mediana e da moda respeitantes àquelas distribuições. Na Fig. 2 apresenta-se um exemplo de tal representação gráfica.

Na Tabela 4 estão resumidos os valores obtidos nos ensaios de compressão pontual realizados no campo. De uma maneira geral, os diagramas respeitantes a frequências relativas acumuladas (de que é exemplo o apresentado na Fig. 2), mostraram que em cerca de 60% dos ensaios efectuados em cada zona foram obtidos valores inferiores ao do valor médio da zona e que o valor que ocorre com maior frequência (moda) se situa no início do ramo da distribuição.

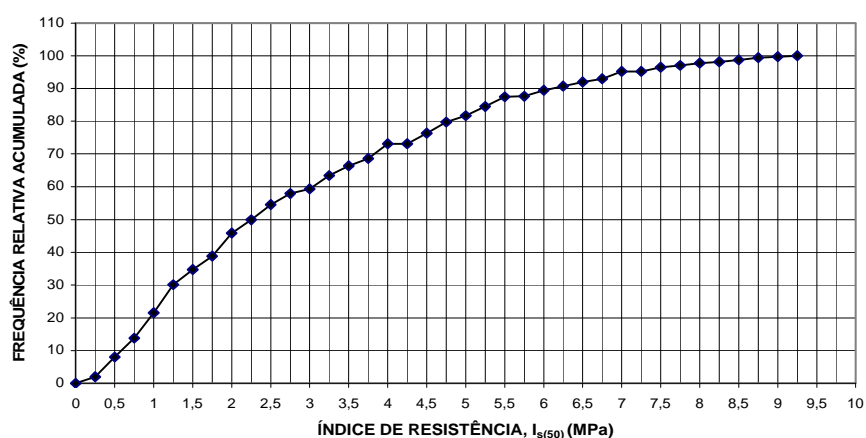


Fig. 2 – Distribuição da frequência acumulada do índice de resistência à compressão pontual.

Tabela 4 - Índices de resistência à compressão pontual, $I_{s(50)}$, determinados no campo

Zona	Sondagens ensaiadas	Número de ensaios	Valores das distribuições, $I_{s(50)}$ (MPa)		
			Média	Mediana	Moda
S. Bento	5	297	3,85	3,00	1,50
Túnel J	5	187	1,87	0,85	0,50
Heroísmo	12	496	2,11	1,75	1,25
Bolhão	5	264	1,51	1,15	1,25
Faria Guimarães	5	398	0,94	0,73	0,50
Marquês	5	399	2,99	2,25	1,25
GLOBAL	37	2041	2,22	1,35	1,00

3 – CORRELAÇÕES OBTIDAS

Conforme anteriormente mencionado, os valores que definem as resistências à compressão uniaxial, diametral e pontual, a velocidade de propagação de ondas sísmicas e o módulo de deformabilidade dinâmica de cada uma das amostras ensaiadas, permitiram determinar o tipo de correlações entre aquelas características e os coeficientes dessas mesmas correlações. Na Tabela

5 apresentam-se os factores que correlacionam, entre si, as características de resistência a compressões e módulo de deformabilidade dinâmico e os respectivos coeficientes de correlação.

Os resultados obtidos nos diferentes tipos de ensaio realizados no laboratório sobre amostras dos granitos atravessados pelas obras do Metropolitano do Porto, mostram que as diversas características determinadas (resistências à compressão uniaxial, à compressão diametral, à compressão pontual, módulo de deformabilidade dinâmico e velocidade de propagação de ondas sísmicas) apresentam, entre si, correlações bem definidas e bastante fortes, pois que todos os respectivos coeficientes de correlação são elevados (variam entre 0,962 e 0,992).

Tabela 5 – Factores de conversão e coeficientes de correlação entre as diferentes características

CARACTERÍSTICAS	Resistência à compressão uniaxial, (MPa)		Resistência à compressão diametral, (MPa)		Módulo de deformabilidade dinâmico, (GPa)	
	Conversão	Coef. Corr.	Conversão	Coef. Corr.	Conversão	Coef. Corr.
Índice de resistência à compressão pontual, $I_{s(50)}$ (MPa)	0,0658	0,968	0,898	0,992	$0,1354 \times 10^{-3}$	0,966
Resistência à compressão diametral, (MPa)	0,0732	0,979	----	----	$0,1485 \times 10^{-3}$	0,985
Resistência à compressão uniaxial, (MPa)	----	----	----	----	$1,9706 \times 10^{-3}$	0,962

4 – CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DAS ROCHAS ENSAIADAS

Seguindo os critérios usualmente aplicados para a classificação das rochas e, fundamentalmente, com base nos resultados obtidos nos diferentes tipos de ensaio e observações efectuados no laboratório sobre diversos grupos de provetes com distintos estados de alteração dos seus minerais constituintes, definem-se como valores característicos aproximados das rochas ensaiadas em laboratório e constituintes do maciço granítico atravessado pelas obras do Metro do Porto, os que se indicam na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores característicos das diferentes classes de rocha

Rocha		Alteração	Valores característicos			
Designação	Classe		Resistência a compressões (MPa)			Velocidade de propagação de ondas sísmicas, V_p (m/s)
			Uniaxial	Diametral	Pontual, $I_{s(50)}$	
Compacta e com alta resistência	I	W1	> 90	> 8,0	> 6,5	> 4200
Com grande resistência	II	W2	50 a 90	4,5 a 8,0	3,5 a 6,5	2700 a 4200
Com média resistência	III	W3	20 a 50	2,0 a 4,5	1,5 a 3,5	1300 a 2700
Com fraca resistência	IV	W4	5,0 a 20	0,5 a 2,0	0,4 a 1,5	600 a 1300
Com resistência desprezável	V	W5	< 5,0	< 0,5	< 0,4	< 600

Para uma visualização geral de todos os parâmetros definidores das características em apreço e dos graus de alteração da rocha que lhe estão associados, determinaram-se as médias dos valores que se situam nos intervalos correspondentes aos diversos estados de alteração da rocha e que quantificam as características estudadas (Tabela 3) e implantaram-se aqueles valores

médios, ordenados dois a dois, numa mesma figura (Fig. 3). Aquela figura, tal como a Tabela 3, mostra bem como os valores que quantificam as características estudadas estão intimamente ligados ao grau de alteração da rocha.

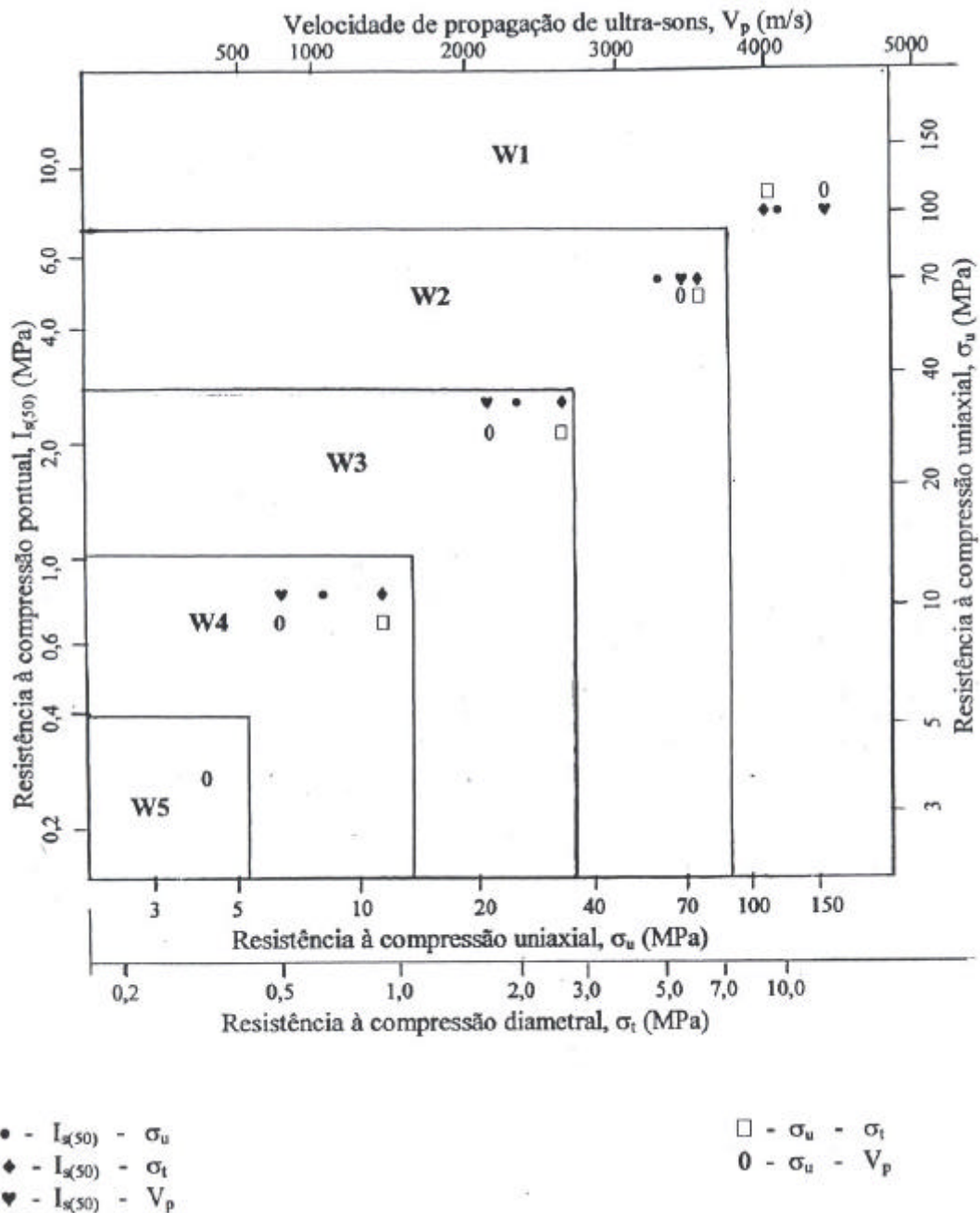


Fig. 3 – Características geomecânicas e geofísicas em função da alteração dos granitos

Todos os resultados obtidos nos ensaios efectuados em laboratório sobre amostras de granito provenientes das obras do Metro do Porto evidenciam excelentes correlações entre os valores definidores das diversas características estudadas e, também, a dependência desses mesmos valores do grau de alteração da rocha.

Entretanto, não foi esquecido o grau de fracturação da rocha e as dimensões médias dos blocos resultantes da fracturação (ou compartimentação do maciço rochoso). Principalmente nos casos

em que as características intrínsecas das rochas constituintes do maciço apresentam valores que vão de médios a muito elevados, a fracturação, quando muito intensa (afastamento médio entre fracturas da ordem de 20cm, ou inferior), tem grande influência, quer no que respeita à escavabilidade, quer no que respeita à capacidade portante do maciço. Considerando que o grau de fracturação de um maciço rochoso é um elemento fundamental a ter em conta na caracterização geotécnica desse mesmo maciço, é indispensável conhecer, mesmo que de forma aproximada, o afastamento médio entre diaclasas de cada uma das principais famílias de diaclasamento que constituem a compartimentação do maciço.

As excelentes correlações entre a resistência à compressão pontual $I_{s(50)}$ e as demais características geomecânicas e geofísicas da rocha granítica ensaiada e, ainda, a boa concordância entre aquela característica resistente e o grau de alteração da rocha, conduziram à elaboração da Tabela 7, na qual se apresentam os factores a considerar para uma expedita e, ao mesmo tempo, fiável caracterização geotécnica de maciços graníticos.

Tabela 7 – Factores a considerar numa expedita caracterização geotécnica de rochas graníticas

Rocha			Resistência à compressão pontual, $I_{s(50)}$ (MPa)	Grau de fracturação	
Classe	Descrição	Estado de alteração		Espaçamento entre fracturas (cm)	Descrição
I	Sã, compacta e com alta resistência	W1	> 6,5	> 200	Rocha muito pouco fracturada
II	Com grande resistência	W2	3,5 a 6,5	60 a 200	Rocha pouco fracturada
III	Com média resistência	W3	1,5 a 3,5	20 a 60	Rocha medianamente fracturada
IV	Com fraca resistência	W4	0,4 a 1,5	6 a 20	Rocha muito fracturada
V	Com resistência desprezável	W5	< 0,4	< 6	Rocha muitíssimo fracturada

Com base nos numerosos “logs” de sondagens disponibilizados para os diferentes maciços graníticos atravessados pelas obras do Metro do Porto, o comprimento das amostras para ensaios laboratoriais e, fundamentalmente, as observações realizadas sobre as amostras de sondagens efectuadas em diferentes zonas daquelas obras e sobre as quais incidiram os ensaios de campo, levam a supor que será de média a baixa a intensidade de fracturação das rochas ali ocorrentes (espaçamento médio entre fracturas da ordem de 30cm a 150cm). Nestas condições, os resultados obtidos nos ensaios de compressão pontual efectuados no campo, as fortes correlações entre os valores de resistência à compressão pontual e os valores das demais características determinadas em laboratório e, também, a bem vincada dependência daqueles mesmos valores do grau de alteração da rocha (Tabelas 3, 5 e 6 e Fig. 3), permitiram classificar, geotecnicamente, as rochas ocorrentes nas mencionadas zonas. Os correspondentes resultados são apresentados na Tabela 8 e nas Figuras 4 e 5, indicando-se, relativamente ao conjunto de rocha ensaiada no campo em cada zona, as percentagens de rocha de cada classe geotécnica, classes essas descritas e quantificadas na Tabela 6.

Tabela 8 – Percentagens das diferentes classes de rocha em cada zona estudada

ZONA	PERCENTAGENS DE OCORRÊNCIA (%)				
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
S. Bento	14,5	25,5	26,7	28,9	4,4
Túnel J	0,0	17,4	14,1	40,6	27,9
Heroísmo	0,0	7,4	36,3	46,4	9,9
Bolhão	0,0	1,5	15,5	78,0	5,0
Faria Guimarães	0,0	0,0	2,3	67,2	30,5
Marquês	7,9	26,5	31,9	28,2	5,5
GLOBAL	3,5	11,1	21,8	50,6	13,0

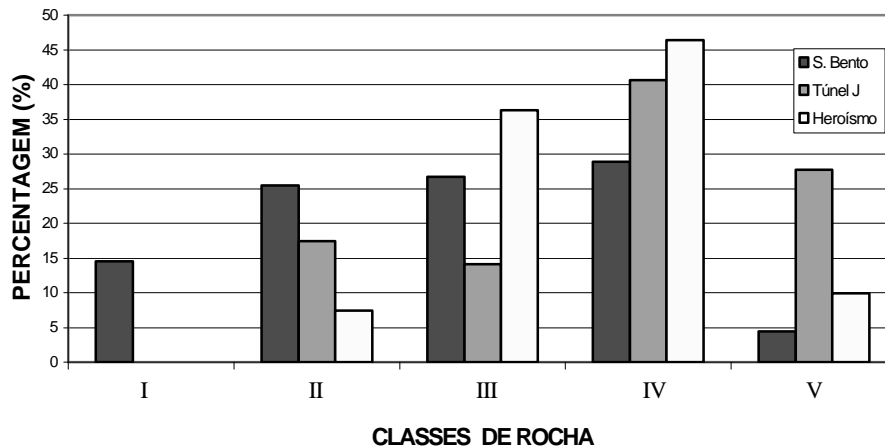


Fig. 4 – Percentagem das classes de rocha por zonas

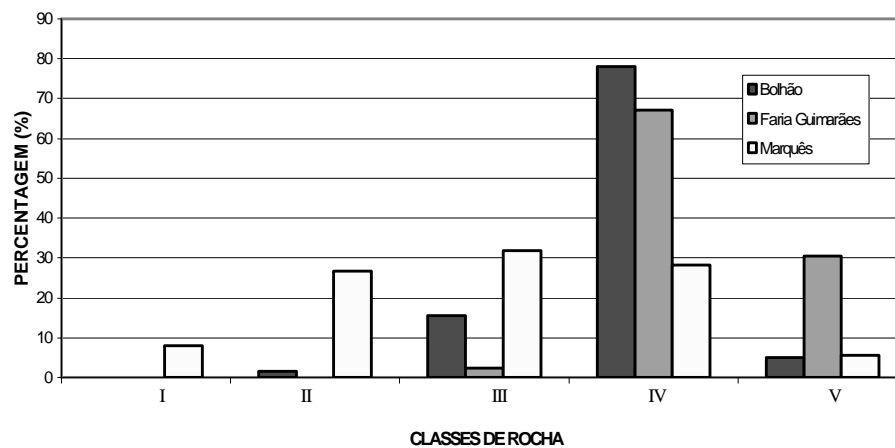


Fig. 5 – Percentagem das classes de rocha por zona.

5 – CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios e correspondentes correlações acima apresentados, permitem tirar algumas conclusões:

- De uma maneira geral, entre os valores definidores das propriedades geomecânicas e geofísicas de rochas graníticas existem fortes correlações.
- A ordem de grandeza dos valores definidores das características geomecânicas e geofísicas de rochas graníticas estão intimamente ligados ao menor ou maior grau de alteração da rocha.
- A caracterização da rocha granítica ocorrente nas diversas zonas atravessadas pelas obras do Metro do Porto (Tabela 8 e Fig. 4 e 5) indica que cerca de 50% dos granitos ocorrentes nas zonas de S. Bento e do Marquês e cerca de 25% dos que ocorrem nas zonas do Túnel J e do Heroísmo oferecem elevada resistência à escavação por métodos mecânicos ou de escarificação (ripagem) e apresentam boas capacidades auto-portantes. As restantes rochas que ocorrem naquelas quatro zonas oferecem média a muito baixa resistência à escavação e possuem fracas ou muito fracas capacidades auto-portantes. Já a totalidade dos granitos ocorrentes nas zonas do Bolhão e Faria Guimarães, não deverão oferecer resistência

significativa à escavação por processos mecânicos ou de escarificação e a sua capacidade auto-portante é bastante diminuta.

- Relativamente ao conjunto das seis zonas de onde foram extraídas as amostras ensaiadas no campo à compressão pontual, apenas cerca de 20% da rocha oferece grande resistência à escavação por processos mecânicos e possui apreciáveis capacidades de auto-sustimento.
- Todos os resultados apresentados neste trabalho e correspondentes análises indicam que, para uma expedita e fiável caracterização geotécnica de maciços graníticos, é suficiente que sejam conhecidos o valor da resistência à compressão pontual da rocha constituinte, o estado de alteração da rocha e o grau de fracturação do maciço (Tabela 7).

Por fim, considera-se ser de grande interesse prosseguir investigações no sentido de averiguar se os critérios sugeridos para a caracterização geotécnica de maciços graníticos podem ser extensivos a outros tipos de formações rochosas, independentemente da sua constituição e estrutura. Isto, porque numerosos ensaios e determinações feitas no CEGEO sobre amostras constituídas por três tipos distintos de calcário e por basalto, conduziram a resultados que, em termos de correlações, são bem concordantes com os que foram obtidos para os granitos do Porto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Transmetro e ao Metro do Porto a possibilidade de utilização dos dados constantes da presente comunicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Brown, E.T., Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods, Oxford, Pergamon Press, 1981.
- [2] Sharma, V. M., Saxena, K. R., In Situ Characterization of Rocks, A. A. Balkema Publishers, 2002
- [3] Stavrogin, A. N., Tarasov, B. G., Experimental Physics and Rock Mechanics, A. A. Balkema Publishers, 2001.