

# CORRELAÇÕES ENTRE ALGUMAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ROCHAS GRANÍTICAS COM VISTA À ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

## CORRELATIONS BETWEEN SOME MECHANICAL PROPERTIES OF GRANITIC ROCKS FOR TUNNEL EXCAVATION

Martins, Francisco Ferreira, *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, ffm@civil.uminho.pt*

Miranda, Tiago Filipe da Silva, *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, miranda@civil.uminho.pt*

### RESUMO

A escavação de túneis em maciços rochosos é uma tarefa complexa que requer uma rigorosa caracterização dos mesmos. Essa caracterização envolve a determinação de várias características, nomeadamente a capacidade resistente da rocha e as características de fracturação do maciço. Para avaliar estas características são efectuados ensaios e o levantamento da orientação e espaçamento das diaclases, bem como o material de enchimento das mesmas. No presente trabalho, para avaliar a capacidade resistente de rochas graníticas, foram usados resultados de ensaios de compressão uniaxial, de carga pontual e com o esclerómetro de Schmidt. Foram estabelecidas correlações quer entre os parâmetros de resistência obtidos nestes ensaios quer entre esses parâmetros e o módulo de elasticidade. Foram obtidas boas correlações entre os parâmetros envolvidos.

### ABSTRACT

The excavation of tunnels in rock masses is a complex task that requires its accurate characterization. This characterization involves the determination of several characteristics, mainly the rock strength and the rock mass fracturation. To evaluate these characteristics, tests are performed and the orientation and joint spacing, as well as the filling material are surveyed. In this work, to evaluate the strength of granitic rocks results of uniaxial compression test, point load test and Schmidt hammer test were used. Correlations were established both between the strength parameters and between these parameters and the modulus of elasticity. Good correlations were obtained between the involved parameters.

### 1. INTRODUÇÃO

Quando se pretende construir uma obra num maciço rochoso é fundamental conhecer as suas características geomecânicas e hidrogeológicas. Nesse contexto, assumem particular importância o grau de fracturação e as características de resistência e deformabilidade do maciço.

O projecto da escavação de túneis deve indicar o tipo de suporte mais adequado bem como o melhor método para efectuar a escavação.

A partir da classificação RMR é possível escolher o tipo de suporte mais adequado ou, pelo menos, realizar o seu pré-dimensionamento. Entre os parâmetros usados nessa classificação figura a resistência à compressão uniaxial ou, em alternativa, o índice de carga pontual.

Em relação ao método de escavação, López Jimeno e Díaz Méndez (1997) apresentam a descrição de vários métodos que permitem classificar os maciços rochosos em função da sua escavabilidade. Esses métodos possibilitam a escolha dos equipamentos ou meios mais adequados para efectuar a escavação do maciço. No Quadro 1 são enumerados vários métodos bem como os parâmetros geomecânicos usados pelos mesmos.

Quadro 1- Métodos para classificação dos maciços rochosos em função da escavabilidade (López Jimeno e Diaz Mendes, 1997)

Método	Parâmetros geomecânicos
Atkinson (1977)	Resistência à compressão uniaxial
Franklin (1971)	Índice de resistência à carga pontual ( $I_{s(50)}$ ), resistência à compressão uniaxial, número de Schmidt, espaçamento entre fracturas, RQD.
Weaver (1975)	Velocidade sísmica, dureza, grau de alteração e parâmetros relacionados com as diaclases (espaçamento, continuidade, preenchimento e orientação)
Kirsten (1982)	Resistência à compressão, RQD, parâmetros do sistema de classificação Q de Barton ( $J_n$ e $J_r$ ), valor da disposição relativa dos blocos inclinados segundo a direcção de arranque ( $J_s$ ), factor de alteração da diaclase ( $J_a$ ).
Abdullatif e Cruden (1983)	Índice RMR
Scoble e Muftuoglu (1984)	Grau de alteração, Resistência à compressão uniaxial, Índice de resistência à carga pontual ( $I_{s(50)}$ ), espaçamento entre diaclases e espessura dos estratos.
Hadjigeorgiou e Scoble (1988)	Índice de resistência à carga pontual ( $I_{s(50)}$ ), Tamanho do bloco, grau de alteração, disposição estrutural relativa.
Singh (1989)	Espaçamento entre descontinuidades, resistência à tracção estimada a partir do índice de resistência à carga pontual e do ensaio brasileiro.
Romana (1981)	Resistência à compressão uniaxial, RQD e abrasividade.

A título de exemplo apresenta-se na Figura 1 o método de Franklin que, apesar de ser um dos métodos mais antigos, é um dos mais usados. Como se vê, esse método permite usar, em alternativa o índice de resistência a cargas pontuais ( $I_{s(50)}$ ), a resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) ou o número de Schmidt (N).

Isto significa que é possível correlacionar entre si esses três parâmetros. Na realidade, os trabalhos pioneiros de D'Andrea et al (1965, apud Attewell e Farmer, 1976) e Franklin et al (1971, apud Attewell e Farmer, 1976) mostraram que é possível correlacionar com algum rigor o índice de resistência à carga pontual com a resistência à compressão uniaxial. O ensaio de carga pontual é de fácil execução e pode ser aplicado no campo. Para além disso, é fácil preparar as amostras para o ensaio. Por isso, é muitas vezes usado em alternativa ao ensaio de compressão uniaxial que é um ensaio mais dispendioso que exige uma estrutura mais pesada e uma preparação mais cuidadosa da amostra. O ensaio com o esclerómetro de Schmidt apresenta-se como uma alternativa ao ensaio de carga pontual e tem a vantagem de poder ser realizado in situ sem ser necessário extrair uma amostra de rocha. Grasso et al. (1990) apresentam algumas correlações entre a resistência à compressão uniaxial e o número de Schmidt.

Analisando o Quadro 1 é possível constatar que, entre os nove métodos, quatro permitem usar directamente o Índice de resistência à carga pontual ( $I_{s(50)}$ ). Aliás, só o método de Weaver não usa a resistência à compressão uniaxial nem o índice de resistência à carga pontual.

Dada a simplicidade dos ensaios de carga pontual e dos ensaios com o esclerómetro de Schmidt, têm sido publicadas na literatura da especialidade muitas correlações entre a resistência à compressão uniaxial e o índice de carga pontual e entre aquela resistência e o número de Schmidt para diferentes tipos de rochas.

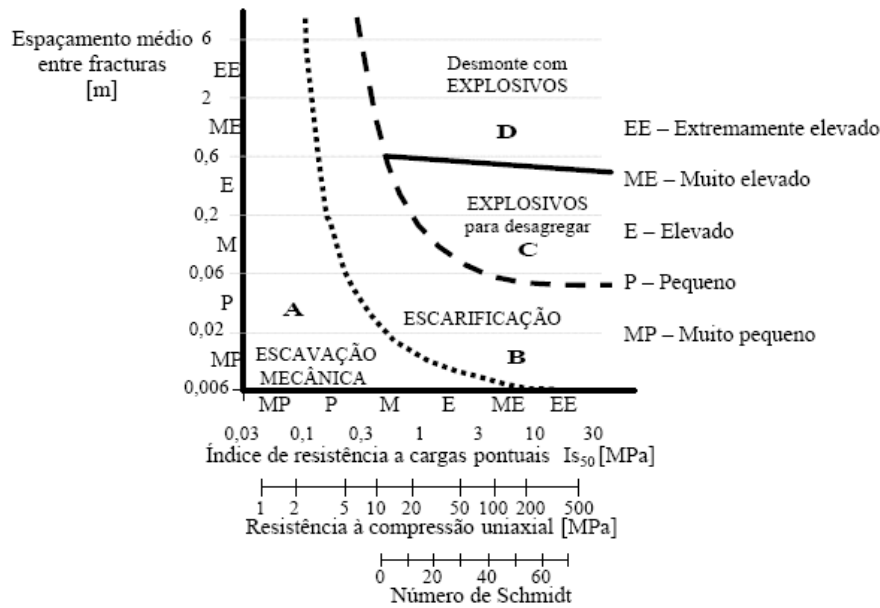


Figura 1 - Classificação da escavabilidade de maciços rochosos (Franklin, apud Dinis da Gama e Bernardo, 2002)

## 2. CORRELAÇÕES APRESENTADAS NA LITERATURA DA ESPECIALIDADE

Em geral são apresentadas correlações empíricas lineares entre  $\sigma_c$  e  $I_{s(50)}$  com dado factor de conversão, K:

$$\sigma_c = K \times I_{s(50)} \quad [1]$$

Bieniawski (1975) apresenta um factor de conversão K entre 20 e 24. Rusnak e Mark (1999) apresentam comparações publicadas entre o índice de carga pontual e a resistência à compressão uniaxial para rochas sedimentares. A maioria das estimativas coloca o factor de conversão K entre 16 e 24. Tziallas et al. (2009) apresentam factores de conversão para todos os tipos de rochas, rochas sedimentares, arenitos, rochas metamórficas e rochas ígneas. Esses factores variam entre 13,55 para rochas sedimentares e 18,15 para rochas metamórficas. No entanto, estes autores apresentam equações de regressão com ajustamento exponencial que, exceptuando as rochas metamórficas, apresentam um melhor coeficiente de determinação,  $R^2$ . Em relação às rochas ígneas, nas quais o granito se insere, estes autores apresentam as seguintes equações de regressão correspondentes a 34 pontos:

$$\sigma_c = 14,40 I_{s(50)} \quad R^2 = 0,88 \quad [2]$$

$$\sigma_c = 6,65 I_{s(50)}^{1,34} \quad R^2 = 0,91 \quad [3]$$

Basu e Aydin (2006) apresentam para granitos de Hong-Kong um coeficiente  $K=21$  com  $R^2=0,93$  numa correlação com 40 pontos. Estes autores apresentam ainda correlações de outros autores que estão sintetizadas no Quadro 2.

Thuro e Plinninger (2001) apresentam  $K=18,7$  com  $R^2=0,60$  usando os valores médios de 35 tipos diferentes de rocha. Singh e Singh (1993) apresentam para rochas quartzíticas  $K=23,37$

com um coeficiente de determinação  $R^2=0,980$ . Dinis da Gama e Reis e Sousa (2004) apresentam para o granito do Porto um valor de  $K=15,20$ .

Quadro 2 – Alguns valores de K em função do tipo de rocha (Basu e Aydin, 2006)

Referência	Tipo de rocha	K
Irfan e Dearman (1978)	Granitos do sudoeste da Inglaterra	30
Tugrul e Zarif (1999)	Granitos da Turquia	15
ISRM (1985)	Grande variedade de rochas	22
Brock e Franklin (1972)	Arenitos e outras rochas	24
Cargill e Shakoor (1990)	Arenitos, carbonatos e gnaisses	23

Quer o ensaio de compressão uniaxial quer o ensaio de carga pontual são ensaios destrutivos, enquanto que o ensaio com esclerómetro de Schmidt é um ensaio não destrutivo e ainda mais fácil de executar. Por isso, têm sido publicadas na literatura da especificidade várias correlações entre o número de Schmidt (N) e a resistência à compressão uniaxial,  $\sigma_c$ . Deere e Miller (1966) apresentaram um ábaco com várias curvas correspondentes ao peso volúmico seco,  $\gamma_d$ , tendo como abcissas o número de Schmidt e em ordenadas a resistência à compressão uniaxial. Grasso et al. (1992) apresentam uma síntese de correlações de vários autores entre a resistência à compressão uniaxial e o número de Schmidt e entre o módulo de elasticidade (E) e o número de Schmidt. Algumas dessas correlações apresentam também o peso volúmico seco,  $\gamma_d$  (ver Quadro 3).

Quadro 3 - Correlações entre  $\sigma_c$  e N e E e N (Grasso et al., 1992)

Referência	Correlações obtidas	Tipos de rocha
Deer e Miller (1966)	$\sigma_c = 10^{(0,00014 \gamma_d N + 3,16)}$ $E_t = 6,95 \cdot \gamma_d^2 \cdot N - 1,14 \times 10^6$	28 Unidades litológicas
Aufmuth (1973)	$\sigma_c = 6,9 \cdot 10^{[1,348 \cdot \log(\gamma_d N) + 3,16]}$ $E_t = 6,9 \cdot 10^{[1,061 \cdot \log(\gamma_d N) + 1,86]}$	25 Unidades litológicas
Beverly et al. (1979)	$\sigma_c = 12,74 \cdot \exp(0,185 \cdot \gamma_d \cdot N)$ $E_t = 192 \cdot (N \cdot \gamma_d^2) - 12710$	20 Unidades litológicas
Kidibinski (1980)	$\sigma_c = 0,447 \cdot \exp[0,045(N + 3,5) + \gamma_d]$	Várias rochas e carvão
Singh et al. (1983)	$\sigma_c = 2 \cdot N$	30 unidades sedimentares de arenitos e argilitos
Sachpazis (1990)	$N = 0,2329 \cdot \sigma_c + 15,7244$ $N = 0,5155 \cdot E_t + 17,488$	33 rochas carbonadas diferentes

No entanto, uma das correlações mais usadas foi apresentada por Barton e Choubey (1977, apud Dinis da Gama e Bernardo, 2002):

$$\text{Log}(\sigma_c) = 8,8 \times 10^{-4} \times (\text{Densidade da rocha}) \times N + 1,01 \text{ [MPa]} \quad [4]$$

Relativamente à relação entre a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade Tziallas et al. (2009) apresentam para as rochas ígneas a seguinte equação exponencial com um coeficiente de determinação de  $R^2=0,95$ :

$$E = 3576,5 \cdot e^{0,016 \cdot \sigma_c} \text{ [MPa]} \quad [5]$$

Begonha et al. (2010) apresentam para os granitos do Porto (45 registos) a seguinte correlação com  $R^2=0,982$ :

$$E[ GPa ] = 0,0183.\sigma_c^{1,3646}; \quad \sigma_c [ MPa ]$$

[6]

### 3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

No Quadro 4 são apresentados os resultados usados neste trabalho para estabelecer correlações entre os índices ( $I_{s(50)}$  e N) e as propriedades mecânicas ( $\sigma_c$  e E).

A regressão linear entre os valores de  $\sigma_c$  e  $I_{s(50)}$  é apresentada na Figura 2a. Como se pode ver foi obtida uma boa correlação entre os dois parâmetros. No entanto a forma tradicional da relação entre  $\sigma_c$  e  $I_{s(50)}$  não apresenta ordenada na origem. Uma vez que o valor de  $R^2$  obtido a partir da regressão com imposição de ordenada na origem nula não é comparável ao  $R^2$  padrão, deve ser usada uma medida diferente da validade do resultado.

Neste estudo, são usadas duas rectas paralelas à recta de regressão afastadas desta de dois erros-padrão da estimativa de  $\sigma_c$  sobre  $I_{s(50)}$ . (Figura 2).

Quadro 4 – Valores usados para estabelecer as correlações

Referência	Local	$I_{s(50)}$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)	N
Martins et al. (2001)	Viana do Castelo	7,88	128,23	30,81	60,05
	Viana do Castelo	8,85	131,28	35,25	57,76
	Guimarães	6,28	110,07	33,5	59,3
	Guimarães	4,27	74,17	24,38	54,43
Cavaleiro, V. M. P. (2001)	Covilhã	2,03	43,3	14,4	35,67
	Covilhã	1,11	24,5	7,4	18,5
Costa, A. M.(2001)	Porto	8,8	117,7	24,2	-
	Porto	5,9	83	18	-
	Porto	3,5	47	5,7	-
	Porto	0,8	6,7	0,6	-
Miranda et al. (2005)	Venda Nova	3,8	57,7	-	-
	Venda Nova	6,3	96,9	-	-
	Venda Nova	7	110,1	-	-
Antão, A. M. M. C. e Quinta Ferreira, M.(2004)	Guarda	-	74,3	10,5	-
	Guarda	-	67,6	10,6	-
	Guarda	-	24,9	3,7	-
	Guarda	-	6,7	1,8	-
Castro Gomes et al. (2002)	Covilhã	-	24	-	18
	Covilhã	-	43	-	34

De acordo com Spiegel et al. (2004) o erro-padrão é uma medida da dispersão em torno da recta de regressão de estimativa de y sobre x e é obtido através da expressão:

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{est})^2}{n}}$$

[7]

sendo  $y_{est}$  os valores estimados de y a partir da equação da recta de regressão.

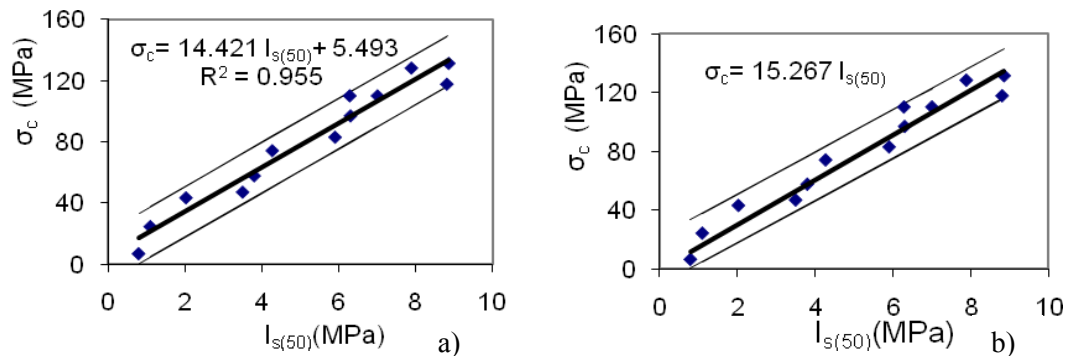


Figura 2 - Correlação entre resistência à compressão uniaxial e o índice de carga pontual a) com ordenada na origem; b) a passar pela origem.

O erro padrão da estimativa tem propriedades análogas às do desvio padrão. Por isso, para um número de pontos suficientemente grande, será de esperar que 95% dos pontos fique entre as duas rectas correspondentes a dois desvios padrão em relação à recta de regressão. No caso da Figura 2b todos os pontos da recta que passa pela origem estão incluídos entre essas duas rectas. Apesar do reduzido número de pontos, podemos concluir que a equação sem ordenada na origem é tão rigorosa como a equação de regressão padrão que inclui ordenada na origem.

As correlações entre  $\sigma_c$  e  $N$  são apresentadas na Figura 3. Na Figura 3a é apresentado um ajustamento linear enquanto na Figura 3b o ajustamento é exponencial. Como se pode ver são obtidas boas correlações nos dois ajustamentos, embora o exponencial seja melhor.

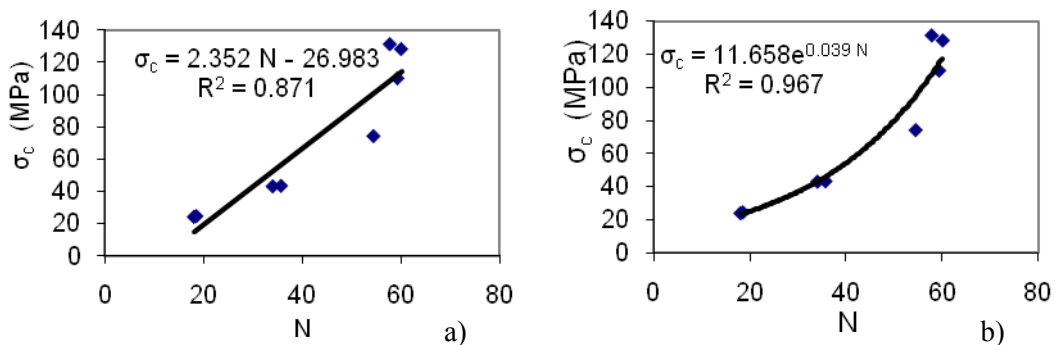


Figura 3 - Correlação entre a resistência à compressão e o número de Schmidt. a) ajustamento linear; b) ajustamento exponencial.

Na Figura 4 são apresentadas correlações entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. Os resultados obtidos são bons, sendo melhor o ajustamento com potência.

A Figura 5 apresenta as correlações entre o módulo de elasticidade e o número de Schmidt. Como se pode ver, são obtidos bons ajustamentos com coeficientes de determinação  $R^2$  superiores a 0,90.

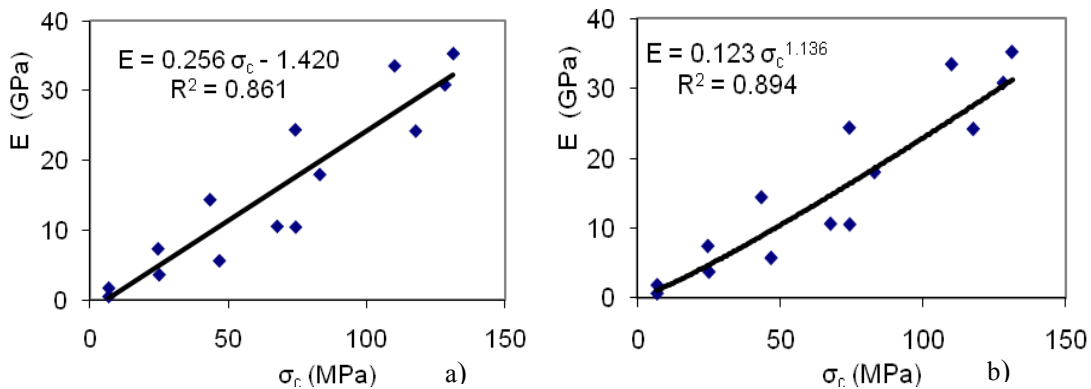


Figura 4 - Correlações entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. a) ajustamento linear; b) ajustamento com potência.

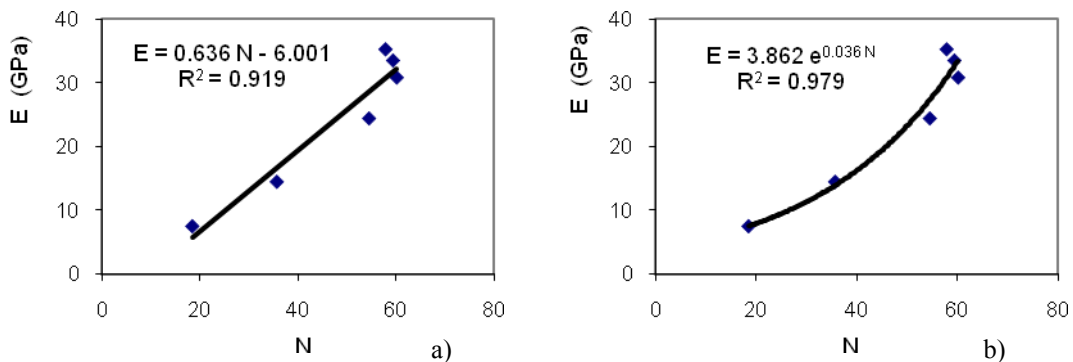


Figura 5 - Correlações entre o módulo de elasticidade e o número de Schmidt. a) ajustamento linear; b) ajustamento com exponencial.

#### 4. CONCLUSÕES

A resistência à compressão uniaxial é uma das características de resistência mais importantes no projecto de túneis.

A determinação dessa resistência implica o uso de equipamento pesado e cuidados especiais na preparação das amostras. Por isso, em geral, é realizado um número reduzido destes ensaios conjuntamente com um maior número de ensaios mais rápidos e simples. Em seguida são estabelecidas correlações entre a resistência à compressão uniaxial e os resultados desses ensaios mais simples. Entre os ensaios simples encontram-se os ensaios realizados com o esclerómetro de Schmidt e os ensaios de carga pontual, cujos resultados foram usados neste trabalho.

Neste estudo foram estabelecidas correlações entre algumas propriedades mecânicas de rochas graníticas de Portugal.

Foram obtidas boas correlações entre a resistência à compressão uniaxial e o índice de carga pontual, o número de Schmidt e o módulo de elasticidade. A correlação entre o módulo de elasticidade e o número de Schmidt também foi boa.

De realçar que o valor de K (relação entre  $\sigma_c$  e  $I_{s(50)}$ ) obtido no presente trabalho é da ordem de grandeza dos valores apresentados para rochas ígneas (Tziallas et al., 2009), para os granitos da Turquia (ver Quadro 2) e para os granitos do Porto (Dinis da Gama e Reis e Sousa, 2004).

No entanto, dado o número reduzido de ensaios, as expressões apresentadas devem ser usadas com prudência.

## REFERÊNCIAS

- Antão, A. M. M. C. e Quinta Ferreira, M. (2004). Efeito da alteração na resistência e no comportamento da deformação do granito da Guarda. *Actas do. 9.º Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 1, pp. 189-198.
- Attewell, P. B. and Farmer, I. W. (1976). *Principles of Engineering Geology*. Chapman and Hall, London.
- Basu, A. e Aydin, A. (2006). Predicting uniaxial compressive strength by point load test: Significance of cone penetration. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39 (5): 483-490. DOI 10.1007/S00603-006-0082-y.
- Begonha, A., Pamplona, J. e Sequeira Braga, M. A. (2010). Efeitos da meteorização dos granitos nas propriedades geotécnicas e físicas. *Ciências Geológicas – Ensino e Investigação e sua História, Vol. II, Capítulo III - Geologia de Engenharia*, Publicação comemorativa do “Ano internacional do planeta terra”, Associação Portuguesa de Geólogos, Sociedade Geológica de Portugal. J. M. Coteló Neiva, António Ribeiro, Mendes Victor, Fernando Noronha e Magalhães Ramalho (eds.), pp. 271-281.
- Bieniawski, Z. T. (1975), The point load test in Geotechnical Practice. *Engineering Geology*, 9: 1-11.
- Castro Gomes, J. P., Rodrigues Carvalho, J. A. e Pissarra Cavaleiro, V. M. (2002). Absorção de água e permeabilidade ao oxigénio do granito da Covilhã. 8.º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 1, pp.527-534.
- Cavaleiro, V. M. P. (2001), *Condicionantes geotécnicas à expansão do núcleo urbano da Covilhã*, Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Costa, A. M. E. F. (2001), *Concepção e Projecto de Túneis em Obras Viárias. Análise do Túnel 4 do Porto*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Deer, D. U. and Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties of rock*. Technical Report No. AFNL-TR-65.116. Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory.
- Dinis da Gama, C. e Reis e Sousa, M. (2004). Caracterização geotécnica expedita do granito do Porto para fins de escavação de túneis. *Actas do 9.º Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 1, pp.91-100.
- Dinis da Gama, C. e Bernardo, P. M. (2002), Escavabilidade de um trecho do rio Douro, *Actas do 8.º Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 3, pp.1105-1113.
- Grasso, P., Xu, S. e Mahtab, A. (1992). Problems and promises of index testing of rocks, *Proc. 33<sup>rd</sup> US Symposium Rock Mechanics*, Tillerson & Wawersik (eds.), Balkema, Rotterdam.
- López Jimeno, C., Díaz Méndez, B. (1997). *Clasificación de los terrenos según su excavabilidad. Manual de túneles y obras subterráneas*. Ed. C. López Jimeno. Entorno Gráfico, S. L. Madrid. pp. 83-211.
- Martins, F. F., Pinheiro, F. E. R., Pinheiro, D. S. e Martins, J. B. (2001), Correlations between pairs of properties of some Portuguese granitic rocks, *Geingegneria Ambientale e Mineraria (GEAM)*, Revista della Associazione Georisorse e Ambiente, 104: 247-249.



- Miranda, T.; Gomes Correia, A.; Ribeiro e Sousa, L.; Lima, C. (2005). Modelação numérica de uma central hidroeléctrica subterrânea utilizando parâmetros geomecânicos obtidos através de técnicas de inteligência artificial. *4.º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*. Maputo: 30 de Agosto a 1 de Setembro, 2005, pp. 807-816.
- Rusnak, J. e Mark, C. (1999) Using the point load test to determine the uniaxial compressive strength of coal measure rock, *Proc. 19th Int.Conference on Ground Control in Mining*, pp. 362-371.
- Singh, V. K. e Singh, D. P. (1993), Correlation between point load index and compressive strength for quartzite rocks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 11: 269-272.
- Spiegel, M. R.; Schiller, J. e Srinivasan, R. A. (2004), *Teoria e Problemas de Probabilidade e Estatística*, 2.ed., Porto Alegre: Bookman (Coleção Shaum).
- Tziallas, G. P., Tsiambaos e Saroglou, H. (2009). Determination of rock strength and deformability of intact rocks. Disponível em <http://www.ejge.com/2009/Ppr0960/Ppr0960w.pdf>. Acesso em 7/10/2010.
- Thuro, K. e Plinninger, R. J. (2001). Scale effects in rock strength properties. Part 2: Point load teste and point load strength index, *ISRM Regional Symposium, Eurock 2001, Rock Mechanics - a challenge for society*, Särkkä & Eloranta (eds), Swets & Zeitinger Lisse. pp. 175-180.