

EFEITO DE ESCALA NA DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA DOS MACIÇOS ROCHOSOS*

Scale effect on the deformability and strength characteristics of rock masses

por

J. G. Charrua Graça**

RESUMO — Define-se efeito de escala e discutem-se as suas origens. Apresenta-se um modelo para o efeito de escala na deformabilidade, discutindo-se resultados da sua aplicação a diferentes maciços. É também descrito um modelo para o efeito de escala na resistência das fracturas, e feita a apresentação de resultados comprovativos.

SYNOPSIS — Scale effect is defined and its cause is discussed. A model for scale effect on deformability is presented and results obtained with this model for some rock masses are shown and discussed. A model is also presented for scale effect on shear strength of joints as well as some results confirming it.

1 — INTRODUÇÃO

Tem-se experimentalmente observado que amostras geometricamente homotéticas de um determinado material (rocha ou maciço rochoso), quando submetidas a estados de tensão que respeitam as condições de semelhança, apresentam variações nas suas características mecânicas, e que essas variações dependem das dimensões da amostra.

Normalmente, conjuntos de amostras do mesmo universo mas com diferentes dimensões apresentam distribuições com diferentes parâmetros para as características que estejam em estudo.

A variação destas características com a dimensão de amostra é o que chamamos "efeito de escala".

Embora diferentes fenómenos possam ser apontados como causa da ocorrência do efeito de escala, pode considerar-se que, para a maior parte das características, este efeito é essencialmente função da heterogeneidade do material. Esta é a razão pela qual nos maciços rochosos, que são em geral altamente heterogéneos, o efeito de escala é tão importante.

O conhecimento do efeito de escala para cada propriedade pode ser obtido pela determinação de:

- a lei de variação do valor médio dessa propriedade com as dimensões de amostra;
- a lei da dispersão de valores obtidos para uma dada dimensão da amostra.

* Apresentado ao 6.º Congresso do ISRM, Montreal, 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Engenheiro Civil, Investigador-Coordenador do LNEC.

2 — EFEITO DE ESCALA NA DEFORMABILIDADE

2.1 — Um modelo explicativo

Foi mostrado (Peres Rodrigues, 1974) que o modelo de deformabilidade (E) de um corpo constituído por dois materiais (com modelos de deformabilidade E_1 e E_2) e que ocorram em proporções volumétricas ϕ_1 e ϕ_2 pode ser obtido por

$$E = \frac{1}{\frac{\phi_1}{E_1} + \frac{\phi_2}{E_2}} \quad (1)$$

se considerarmos uma distribuição aleatória uniforme para as ocorrências e admitirmos que o componente com módulo E_1 ocorre em elementos com dimensão a , a probabilidade de que uma amostra com a dimensão (na) contenha (k) destes elementos é dada por:

$$P_{na}^{(k)} = \frac{n!}{k! (n-k)!} \phi_1^k (1-\phi_1)^{(n-k)} \quad (2)$$

dado que

$$n\phi_1 > 4 \quad (3)$$

$$n(1-\phi_1) > 4, \quad (4)$$

a expressão binomial (2) pode ser aproximada pela distribuição normal

$$P_{na}^{(k)} = \frac{e^{-\frac{(k-n\phi_1)^2}{2n\phi_1(1-\phi_1)}}}{\sqrt{2\pi n\phi_1(1-\phi_1)}} \quad (5)$$

A equação (1) pode ser escrita sob a forma

$$\frac{1}{E} = \sum_i \frac{\phi_i}{E_i} \quad (6)$$

ou em termos de Deformabilidade $D=1/E$

$$D = \sum_i \phi_i D_i \quad (7)$$

como no caso em estudo

$$\begin{aligned} \phi_1 &= k/n \\ \phi_2 &= 1 - k/n \end{aligned}$$

a equação procedente torna-se

$$D = (D_1 - D_2) k/n + D_2 \quad (8)$$

A probabilidade de uma amostra com dimensão (na) ter uma Deformabilidade (D) será então:

$$P_{na}^{(D)} = \frac{\sqrt{\frac{n}{2\pi}} \frac{[D - D_1 \phi_1 - (1 - \phi_1) D_2]^2}{\phi_1 (1 - \phi_1) (D_1 - D_2)^2}}{\sqrt{2\pi \phi_1 (1 - \phi_1) (D_1 - D_2)^2}} \quad (9)$$

corresponde à expressão de uma distribuição normal com o valor médio

$$\bar{D} = D_1 \phi_1 + D_2 (1 - \phi_1), \quad (10)$$

e o desvio padrão

$$\sigma = (D_1 - D_2) \sqrt{\frac{\phi_1 (1 - \phi_1)}{n}} \quad (11)$$

No caso de corpos constituídos por (i) materiais, a expressão binomial (2) será substituída pela expressão multinomial

$$P_{na}^{(k_i)} = \frac{n!}{k_1! k_2! \dots k_i!} \phi_1^{k_1} \phi_2^{k_2} \dots \phi_i^{k_i} \quad (12)$$

Esta expressão pode ser aproximada pela expressão normal

$$P_{na}^{(D)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{n^{n(D - \sum_i D_i \phi_i)^2}}{\sum_i D_i^2 2\phi_i (1 - \phi_i) - 2 \sum_i \sum_j D_i D_j \phi_i \phi_j} \quad (13)$$

à qual corresponde o valor médio

$$\bar{D} = \sum_i D_i \phi_i \quad (14)$$

e o desvio padrão

$$G = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_i D_i^2 \phi_i (1 - \phi_i) - \sum_i \sum_j D_i D_j \phi_i \phi_j \right]} \quad (15)$$

as formulas (13), (14) e (15) generalizam as expressões (9), (10) e (11), deduzidas para o caso de corpos formados apenas por dois constituintes.

As expressões atrás mostram que: i) para o mesmo corpo (para o qual, portanto, as proporções de ocorrência dos materiais constituintes e as características de deformabilidade se mantêm), a dispersão das deformabilidades das amostras decresce proporcionalmente à raiz quadrada da sua dimensão (n); e ii) para o mesmo corpo, o valor da deformabilidade média das amostras com uma dada dimensão é constante e igual à deformabilidade média do corpo.

2.2 — Resultados do modelo

As expressões (14) e (15) que sintetizam o modelo permitem prever o comportamento dum corpo multicomposto em deformação elástica, e assim, por exemplo, analisar os resultados expectáveis de ensaios de deformabilidade de um maciço rochoso.

Considere-se um maciço o qual em 90% é constituído por rochas com um módulo de 40 000 MPa, e 10% por diaclases preenchidos por um material com um modulo de 200 MPa.

As curvas que definem as probabilidades extremas de 5% de ocorrência em função de (n) estão representados na Fig. 1, e nela se pode observar que são muito semelhantes às curvas obtidas em muitos trabalhos experimentais.

Curvas semelhantes foram obtidas para a situação específica de um maciço granítico.

Os resultados podem observar-se na Fig. 2.

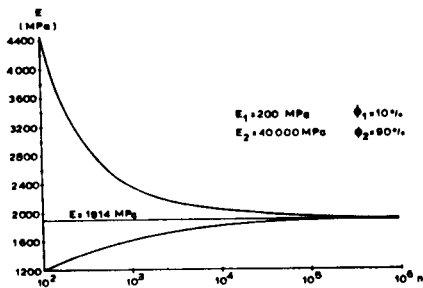


Fig. 1 — Curvas limitando 95% dos resultados expectáveis

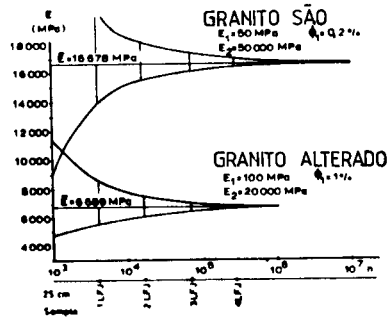


Fig. 2 — Curvas (5%) sobre um maciço granítico

2.3 — Resultados experimentais

O LNEC tem uma longa experiência de ensaios de deformabilidade com o Método LFJ, interessado diferentes volumes de maciço em função do número de LFJs utilizados. De recentes ensaios realizados temos um local com quatro LFJs, oito com três LFJs e dezoito com duas LFJs. Como para cada local se obtêm resultados de cada um dos LFJ e de todas as c+mbinações entre os LFJs utilizados, é possível analisar a relação entre os resultados e o volume interessado.

Na Fig. 3 mostram-se os resultados globais obtidos. Nesta figura representam-se em abcissas os volumes interessados no ensaio, em função do volume máximo ensaiado, e em ordenadas os valores de módulos de deformabilidade obtidos para o local.

No que concerne a distribuição de valores para uma dada dimensão, na Fig. 4 representa-se a curva de distribuição cumulativa das deformabilidades relativas para $V = 1/2$ assim como a distribuição normal mais provável.

Como se pode observar em ambas as figuras o modelo parece bem ajustado aos resultados.

Pensamos que resultados muito melhores poderiam ser obtidos se se utilizasse um parâmetro relacionado com a heterogeneidade de cada maciço (por exemplo o bloco unitário) em vez do volume.

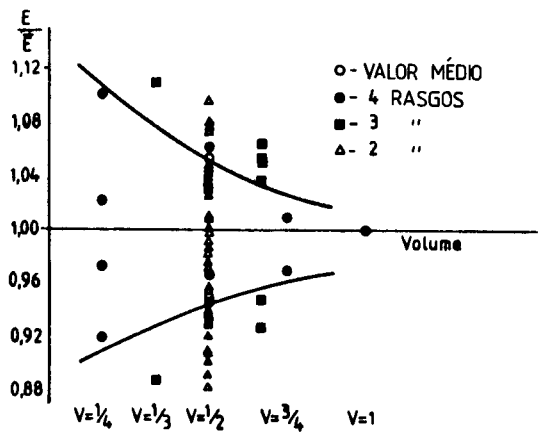


Fig. 3 — Módulo em função do volume

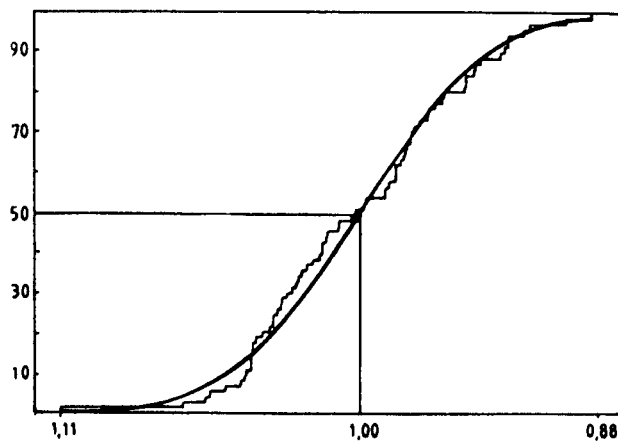


Fig. 4 — Curva de frequência acumulada de deformabilidades relativas

3 — EFEITO DE ESCALA NA RESISTÊNCIA

3.1 — Um modelo explicativo

Admitamos que a irregularidade duma superfície pode ser bem descrita como uma variável aliatória ergótica. Pode mostrar-se que o quadrado da mediana das amplitudes máximas (h) é uma função linear do logaritmo da área da superfície (Ω)

$$h^{-2} = K_1 \ln \Omega + K_2 \quad (16)$$

Se a irregularidade considerada for aquela apresentada após o deslocamento no deslizamento, o valor h corresponde ao galgamento ocorrido e pode ser expresso em termos de ângulo de galgamento (ΔF), uma realidade um acréscimo do ângulo de atrito para superfície plana (Fig. 5).

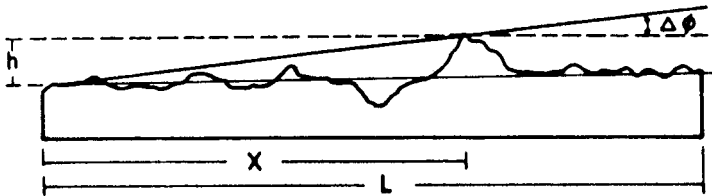


Fig. 5 — Irregularidade e ângulo $\Delta\phi$

$$\frac{h}{x} = \text{Tan } \Delta \phi \quad (17)$$

Como x pode ser igualmente qualquer valor entre 0 e L , para certa dimensão a variável

$$\frac{h}{\text{Tan } \Delta \phi} = x \quad (18)$$

Tem uma distribuição uniforme com o valor médio $2/2$, então:

$$\overline{\text{Tan } \Delta \phi} = \frac{h}{L/2} \quad (19)$$

e

$$\sqrt[2]{\overline{(\text{Tan } \Delta \phi)^2}} = K_1 \ln \Omega + K_2 \quad (20)$$

3.2 — Resultados do modelo

Num trabalho anterior (Peres-Rodrigues, Charrua Graça, 1985) foi já encontrada uma boa correlação entre resultados obtidos por outros autores e o modelo proposto, nomeadamente no que concerne à variação de resistência ao deslizamento com a dimensão da superfície sujeita ao esforço de corte (Fig. 6) e a dispersão de resultado para cada dimensão da superfície (Fig. 7).

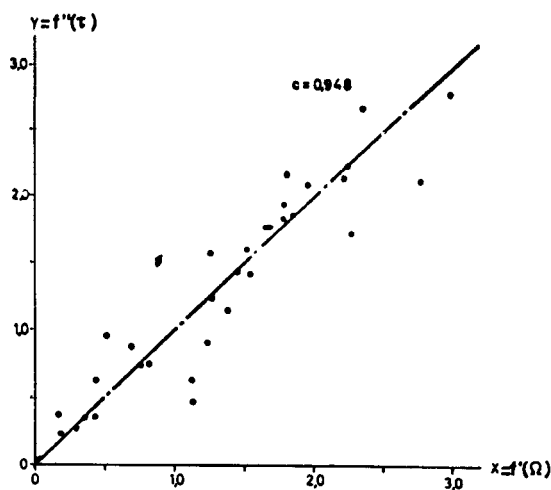


Fig. 6 — Correlação entre resistências e áreas de corte

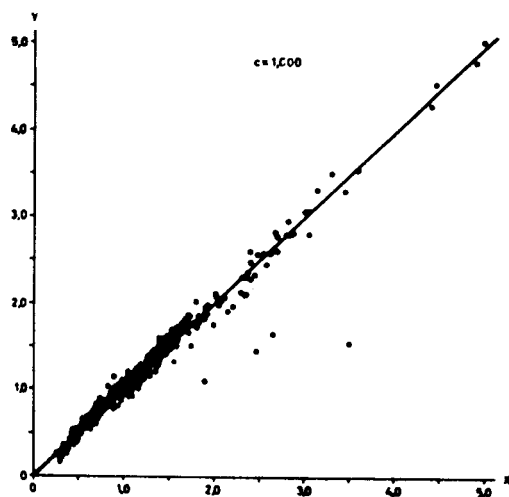


Fig. 7 — Interpretação da dispersão dos resultados como uma distribuição uniforme de x

Outros ensaios foram realizados sobre diaclases dum maciço de grês e argilitos, em laboratório (amostras $15 \times 15 \text{ cm}^2$) e em campo (bloco de $70 \times 70 \text{ cm}^2$).

A irregularidade das superfícies foi medida e analisada por meio de levantamentos como o representado na Fig. 8.

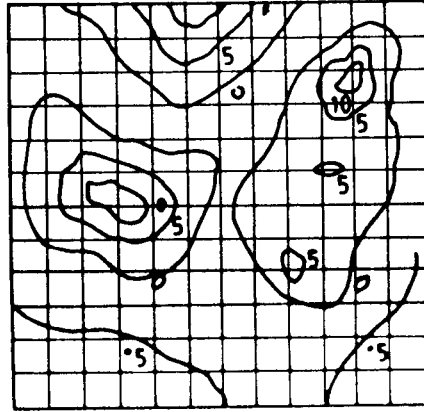


Fig. 8 — Topografia de uma superfície de corte

O comportamento das diaclases do grês está representado na Fig. 9 em que se apresentam rectas de Coulomb para as duas áreas das superfícies. Na figuras também são indicadas as amplitudes máximas das irregularidades encontradas.

Como se pode observar

$$\frac{\frac{\bar{h}_{70 \times 70}}{70}}{\frac{\bar{h}_{15 \times 15}}{15}} = \frac{\tan (32^{\circ}-25^{\circ})}{\tan (39^{\circ}-25^{\circ})} = 0,492 \quad (21)$$

sendo 25° o ângulo de atrito encontrado para superfícies planas.

Ensaio similares realizados para as diaclases do argilito (Fig. 10) ilustraram como aquele efeito depende da irregularidade da superfície, e evidenciaram que em superfícies planas como estas o valor de K_1 decresce para perto de zero, e não haverá aumento de h com a área, o ângulo de atrito mantém-se quase constante em face do aumento de área submetida ao esforço de corte.

O pequeno número de ensaios não permitiu no entanto, infelizmente, verificar o ajuste da lei de dispersão.

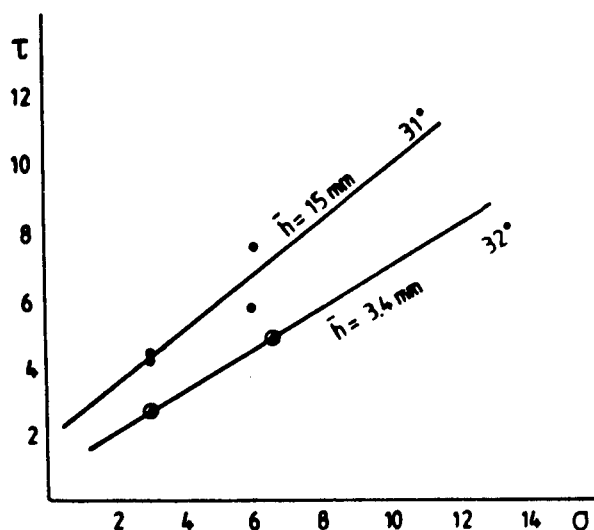


Fig. 9 — Diaclase de arenito

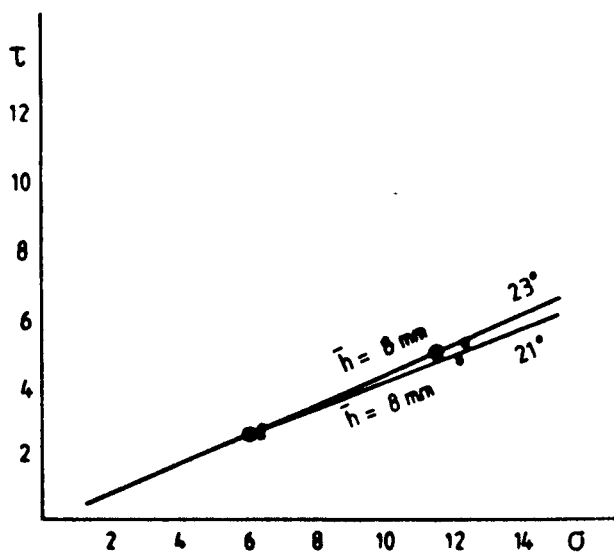


Fig. 10 — Diaclase de argilito

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- PERES-RODRIGUES, F. (1974) — *Modulus of Elasticity of a rock obtained from the Moduli of Elasticity of its constituents*. 2nd Int. Conf. IAEG. S. Paulo, Brasil.
- PERES-RODRIGUES, F.; CHARRUA-GRAÇA, J. G. (1985) — *Scale effect on the strength characteristics of rock masses*. Int. Symp. the role of rock mech. in exc. for mining and civil works. Zacatecas. México.