

A HIERARQUIZAÇÃO DA HETEROGENEIDADE E O EFEITO DE ESCALA EM MACIÇOS ROCHOSOS

The hierarchization of the heterogeneity and the rock mass scale effect

M. J. LEAL GOMES*

RESUMO - No presente artigo refere-se a importância da hierarquização da debilidade da heterogeneidade como causa fundamental do efeito de escala não só nas propriedades mecânicas como nas propriedades em geral. Refere-se que, analisados sob este ponto de vista, alguns resultados intrigantes como a ausência de efeito de escala na resistência à tracção uniaxial e os efeitos de escala normais e inversos da resistência à compressão simples e da deformabilidade de algumas rochas, são facilmente explicados. Acaba-se por justificar a regra que impede extrapolações fora das dimensões ensaiadas e entre litologias aparentadas.

SYNOPSIS - In this paper the meaning of the hierarchization of the heterogeneity is referred as the essential reason of the scale effect, not only on the mechanical properties of the rocks but on the general properties of the rocks and rock masses. So, some intricate results, such as the absence of scale effect on the uniaxial tensile strength and the normal and the reverse scale effects on the uniaxial compressive strength and deformability of some rocks, are easily explained when analysed under this point of view. The rule that prohibits extrapolations out of the tested sizes and among close lithologies, is justified, at last.

1- INTRODUÇÃO

Durante muito tempo houve a noção desajustada de que os efeitos de escala normais (representados por uma regressão média exponencial negativa) eram os mais vulgares e convencionais e que os efeitos de escala inversos (representados por uma regressão média exponencial positiva - Fig. 1) eram espúrios ou necessitavam de ser compreendidos. Citam-se a este respeito os trabalhos de Houpert (1970) e Jackson e Lau (1990) que deram explicações tímidas e pouco convincentes, pela sua complexidade, para o facto de terem encontrado efeitos de escala inversos na resistência à compressão simples de algumas rochas.

Há que ter em conta que, mesmo em condições de homogeneidade, se proporcionam condições gerais para o aparecimento de efeitos de escala, em certas situações. Basta considerar que, para a mesma pressão exercida na superfície externa de esferas de diferente raio, se terão o interior das esferas de maior raio relativamente mais aliviados de tensões, pois o volume específico (volume/área exterior da esfera) é nelas maior. Pode assim admitir-se que, apenas por razões geométricas, se proporcionam efeitos de escala normais dos valores das tensões e se houver uma imperfeição onde se inicie a fracturação, efeitos de escala inversos da resistência. Contudo, Cunha (1991) refere que estas análises qualitativas ou de carácter energético, têm pouco mais do que um valor filosófico, já que não podem ser comprovadas nos laboratórios geomecânicos onde não se medem energias nos ensaios correntes.

* Engenheiro de Minas da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

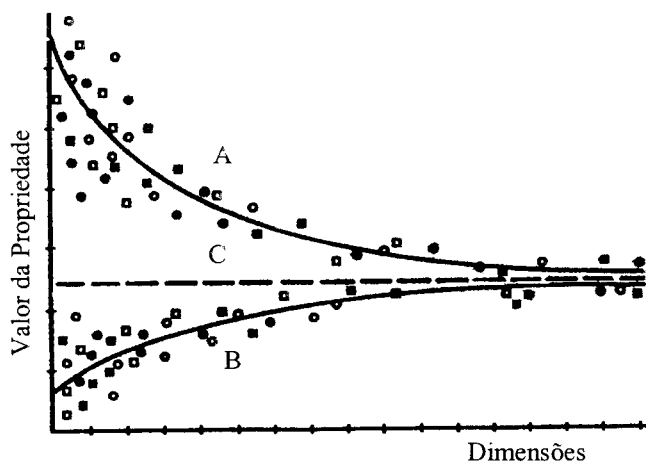


Fig. 1 - Efeito de escala normal (A) e efeito de escala inverso (B). C é um tipo de regressão que não corresponde a efeitos de escala das médias, embora ainda assim possa existir efeito de escala das dispersões, que geralmente se reduzem com o aumento das dimensões.

Leal Gomes (1998) tendo encontrado efeitos de escala inversos para a resistência à compressão simples (σ_c) e módulo de elasticidade (E) do granito intacto do Pontido (Vila Pouca de Aguiar) mostrou que, possivelmente, os efeitos de escala inversos são muito mais vulgares do que a literatura sobre o assunto deixa supor. Com efeito chegou às regressões

$$\sigma_c = 970,51.V^{0,033} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

e

$$E = 54900e^{0,0001V} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

(onde V é o volume dos provetes, variando a aresta da base dos provetes prismáticos homotéticos entre 3 cm e 9 cm, com altura igual a 2,5 vezes essa aresta) facilmente compreensíveis se se atender a que o referido granito é uma rocha ígnea porfiróide com grandes fenocristais de ortoclase, com dimensões até 2cm numa massa de cristais de diferentes minerais de dimensões até 4mm em que predomina o quartzo. Os cristais de ortoclase são cliváveis, menos resistentes e mais deformáveis que os de quartzo pelo que, ocupando às vezes quase toda a secção recta dos menores provetes, lhes conferem parâmetros geomecânicos mais pobres. Aumentando as dimensões desses corpos de prova, o esqueleto de cristais de quartzo em torno dos de ortoclase favorece as suas propriedades σ_c e E . Vê-se assim que o tipo de efeito de escala encontrado tem muito a ver com a distribuição da heterogeneidade.

2- A INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DA HETEROGENEIDADE

Weibull (1951) em trabalhos do princípio do século proporcionou uma interpretação estatística do fenómeno do efeito de escala na resistência. Admitiu que certos corpos como as barras de aço eram formadas por séries de elos resistentes e elos fracos (Fig. 2) em que, cedendo um elo fraco a integridade do corpo ficava comprometida. Afirmou que a probabilidade de cedência (S) dum corpo representado por este modelo era dada por

$$S = 1 - e^{-\int n(\sigma) k dv} \quad (3)$$

onde $n(\sigma)$ é o número de imperfeições com resistência inferior a σ no volume V .

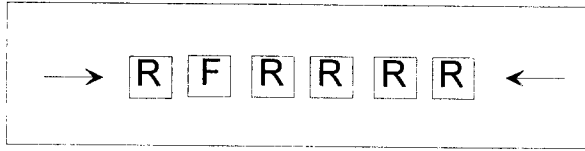


Fig. 2 - Modelo de solicitação de elos fracos (F) em série com elos fortes ou resistentes (R).

Para $n(\sigma)$ postulou uma distribuição

$$n(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \quad (4)$$

onde σ_u é o menor valor de σ para o qual se dá a cedência do corpo e σ_0 uma constante que visa manter a homogeneidade da relação. m é a chamada constante de Weibull que assume diferente valor não só em função da distribuição de elos fracos e resistentes em causa, mas também da maneira como estas relações são usadas, tendo para o mesmo material diferente valor consoante é deduzida num estudo de efeito de escala ou num controle de qualidade a dada escala.

Mas a grande consequência desta doutrina foi a sugestão de que a probabilidade de cedência cresce com o aumento do volume, por ser também mais provável encontrar um elo que comprometa a integridade do corpo num volume maior. É que feitas algumas simplificações, como admitir que σ_u é nulo, de 3) e 4) deduz-se facilmente por integração, que

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{-\frac{1}{m}} \quad (5)$$

onde os índices 1 e 2 se referem a dois provetes do mesmo material com diferentes dimensões.

Este quadro mental e o conseqüente efeito de escala normal a que dá origem, foi generalizado a quase todas as propriedades das rochas e dos maciços rochosos, como um vago princípio geral que embora admitindo exceções explicaria os efeitos de escala encontrados. Generalização essa indevida, como acentuou Brown (1971), que referiu ser aplicável, em rigor, somente à tracção, única situação a que é inteiramente legítimo aplicar estas concepções.

3- A HIERARQUIZAÇÃO DA HETEROGENEIDADE

Com efeito comprovou-se que em muitas situações, mesmo quando se obtêm efeitos de escala normais, elas são mais facilmente compreensíveis através de modelos de elos fracos solicitados em paralelo com elos resistentes (Fig. 3) ou mesmo de modelos mais complexos de

elos em série e em paralelo combinados, cuja crescente complexidade os torna menos sugestivos.

A grande diferença de comportamento entre os modelos de elos fracos solicitados em paralelo com os elos resistentes, relativamente aos dispostos em série, está em que, naqueles, a cedência de um ou mais elos fracos não compromete imediatamente a integridade do conjunto ao contrário do que acontece com estes últimos modelos.

Neste contexto é muito fácil explicar os efeitos de escala inversos que se obtiveram para σ_c e E do granito do Pontido, através de um modelo de elos fracos e/ou deformáveis em paralelo com elos resistentes, em que os fenocristais de feldspato são os elos fracos e deformáveis e os cristais de quartzo os elos resistentes e rígidos.

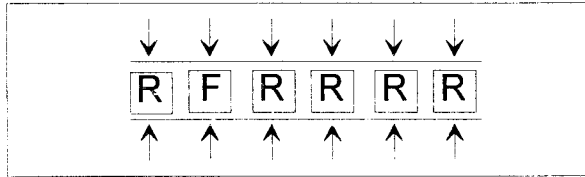


Fig. 3 - Modelo de elos fracos (*F*) solicitados em paralelo com elos resistentes (*R*).

Há que dizer que o modelo de elos fracos em série com elos resistentes corresponde a uma situação de estatística de extremos em que a simples presença de um elo fraco compromete só por si a integridade do corpo. Por outras palavras, ou existe pelo menos um elo fraco e é mais provável à medida que os volumes crescem e o corpo cede, ou não existe e o corpo resiste. Haimson (1990) fez ensaios de tracção uniaxial em calcários e a exemplo de outros autores que seguiram o mesmo procedimento noutras rochas, não encontrou qualquer efeito de escala. Este facto é fácil de compreender-se ao abrigo do que se acaba de expor, pois a probabilidade de haver um defeito na rocha onde se inicie a rotura quando solicitada à tracção, é muito alta logo a partir de dimensões muito pequenas dos provetes e portanto, para as escalas investigadas não se encontrou efeito de escala. Esse defeito seria o elo fraco em série com elos resistentes que teria em todos os provetes a mesma debilidade (ausência de hierarquização da heterogeneidade). A presença de mais de um elo fraco não altera este raciocínio pois basta ceder um deles para que se dê o colapso do corpo.

É que podemos emitir como requisito geral para que haja efeito de escala que exista uma hierarquização das debilidades dos elos fracos, sem a qual ele não se observará, seja normal ou inverso. E a este propósito cita-se o facto de já se ter observado efeito de escala normal em ensaios brasileiros para obtenção da resistência à tracção. É que este ensaio fornece este parâmetro indirectamente, através de uma compressão diametral dos provetes que determina o seu fendilhamento por tracção, segundo um plano que contém a direcção da compressão. Adequa-se-lhe portanto um modelo mais complexo do que o da tracção uniaxial, pois há hierarquização da debilidade da heterogeneidade ou, simplesmente, hierarquização da heterogeneidade (no sentido em que, por exemplo, as heterogeneidades correspondentes a uma microfenda e a uma diaclase correspondem a hierarquias diferentes porque têm debilidades diferentes quando solicitadas e, vários elos fracos associados, em paralelo, são mais débeis do que um único).

A hierarquização da heterogeneidade pressupõe um quadro de estatísticas de médias e está geralmente ligada a modelos de elos fracos solicitados em paralelo com elos resistentes. Neste modelo pode verificar-se aumento da debilidade dos elos fracos, quando, por exemplo, com o crescimento das dimensões do modelo, eles se associam na debilitação do corpo o que conduz

a efeitos de escala normais, ou pode, pelo contrário, haver crescimento da sua capacidade resistente se ao aumento das dimensões do corpo corresponder o seu reforço (no sentido em que se reforça um pilar) através do crescimento do número de elos resistentes em relação ao número de elos fracos.

Evidentemente que, nesta concepção, é essencial observar a distribuição dos elos fracos no corpo heterogêneo e, consoante eles estejam dispersos segundo uma lei uniforme ou associados e justapostos em determinados locais onde se acumulem preferencialmente, se terão debilidades e hierarquizações diferentes da heterogeneidade.

Com efeito, no tocante à resistência, se se tiver em conta que, de acordo com a mecânica da fracturação, esta depende das dimensões das microfendas onde se inicia, a hierarquização da debilidade pode dever-se a um afastamento da uniformidade de distribuição dos elos fracos no modelo, com a sua justaposição, com o aumento da escala, havendo debilitação, e a um crescimento da uniformidade se, com o aumento das dimensões em causa, houver reforço. Daí resulta tornarem-se mais frequentes a grande escala, no primeiro caso, as baixas resistências e no segundo, as altas, do que num modelo de menores dimensões. Na deformabilidade, a hierarquização da debilidade pode dever-se simplesmente à razão entre o número de elos fracos e fortes ou, se se preferir, entre o número de elos deformáveis e de elos rígidos.

Assim é muito fácil compreender o efeito de escala inverso na resistência das rochas intactas. Para as dimensões correspondentes, no modelo de elos fracos solicitados em paralelo com elos resistentes, há reforço dos elos fracos com o aumento das dimensões, estes principalmente minerais pouco resistentes e microfendas dispersos na massa rochosa. Ainda para maiores volumes, correspondentes já ao maciço rochoso, a heterogeneidade assume outra feição e hierarquia, quando surgem as diaclases, as diaclases persistentes e as falhas que enfraquecem de tal modo o conjunto estrutural que o efeito de escala geral se torna normal.

A uma escala macroscópica este conceito de hierarquização da heterogeneidade passa pela consideração das “dimensões características” de Haimson (1990) (menor dimensão da heterogeneidade que condiciona as propriedades à escala em questão (fendas nos provetes, diaclases à escala das obras, falhas à escala regional)), que conduz a curvas de efeito de escala com inflexões como as propostas por Charrua Graça (1985) (Fig. 4). Mas dentro de cada “dimensão característica” a tendência do efeito de escala pode ser muito diferente da tendência geral e até oposta a esta, como se viu acima.

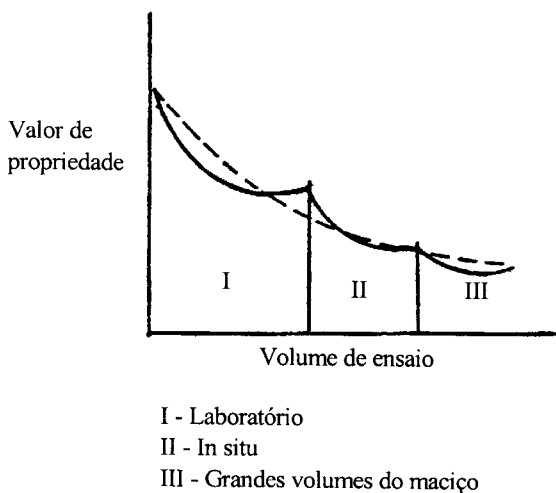


Fig. 4 - O efeito de escala em maciços rochosos (Charrua Graça, 1985).

Saliente-se que este conceito de hierarquização da heterogeneidade permanece válido para muitas outras propriedades. É assim que as falhas e as diaclases pertencem a hierarquias diferentes relativamente à permeabilidade, quando se consideram as propriedades hidráulicas dos maciços. E no conjunto das amostras de uma diaclase, as maiores têm uma heterogeneidade diferente das mais pequenas sob um ponto de vista hidráulico, se se atender a que a tortuosidade e o número de estrangulamentos entre os bordos presentes nos dois casos é diferente, correspondendo a diferentes hierarquias da abertura hidráulicamente efectiva, que é o valor cuja distribuição importa considerar. Daí que, principalmente para tensões normais na descontinuidade importantes, dentro de uma mesma “dimensão característica”, a condutividade hidráulica mostra um efeito de escala normal. Mas quando se consideram todas as “dimensões características” presentes num maciço, das micro-fendas e poros dos provetes laboratoriais aos “Karsts” e falhas das bacias hidrogeológicas, o efeito de escala é inverso (Leal Gomes, 1998).

E quando surgem ondulações de maior ordem (com maior amplitude e comprimento de onda) nas maiores amostras de descontinuidades, relativamente à simples rugosidade, dos pequenos provetes, se têm diferentes hierarquias de heterogeneidade da rugosidade e da morfologia de que, aliás, resultam diferentes propriedades mecânicas.

4 - CONCLUSÃO

Do exposto se deduz que para haver efeito de escala na resistência, por exemplo, não basta que a probabilidade de haver um elo fraco que comprometa a integridade do corpo seja maior (ou menor no caso de o efeito de escala ser inverso) com o aumento das dimensões da amostra de rocha. É preciso – até mesmo dentro da mesma “dimensão característica” – que haja aumento (ou redução) relativa da debilidade dos elos fracos com o crescimento da escala. A maneira mais fácil de conceber essa variação de debilidade é pela justaposição de um número cada vez maior de elos fracos com a mesma resistência cada um deles. Assim, dir-se-ia, no caso do efeito de escala na resistência da rocha ser normal, que a possibilidade de aparecerem maiores cadeias de elos fracos justapostos cresce com o aumento das dimensões dos provetes. Neste sentido a filosofia de Weibull volta a ter pertinência.

Este conceito de hierarquização da heterogeneidade permite facilmente compreender factos fundamentais como a divergência dos valores das propriedades e dos respectivos efeitos de escala entre litologias próximas e aparentadas (Kramadibrata e Jones, 1993) e a impossibilidade de extrapolação de regressões fora das dimensões e do contexto do conjunto de valores experimentais que as apoiam. É que mesmo em litologias muito próximas mas, por exemplo, correspondendo a episódios diferentes de formação, os elos fracos, representados por fissuras e alterações mineralógicas, podem ter aspectos e distribuições diferentes que logo mudam o quadro das reacções às solicitações. E extrapolar resultados e regressões fora do âmbito dos ensaios realizados não leva em conta a imprevisível hierarquização da debilidade da heterogeneidade que pode surgir fora desse domínio.

A hierarquização da heterogeneidade é pois uma concepção com grande capacidade explicativa que permite justificar facilmente muitos comportamentos anteriormente concebidos de forma algo confusa.

BIBLIOGRAFIA

- BROWN, E. T. - *Strength - size effects in rock material*. Symposium Soc. Internat. Mécanique des Roches, Nancy, 1971.
- CHARRUA-GRAÇA, J. G. - *Heterogeneidade e efeito de escala. Reflexos na segurança de obras em maciços rochosos*. LNEC, Lisboa, 1985.

- PINTO DA CUNHA, A. J. V. - *Comportamento e segurança de estruturas subterrâneas em maciços rochosos*. Tese para investigador coordenador; LNEC, Lisboa, 1991.
- HAIMSON, B. C. - *Scale effects in rock stress measurements*. Scale Effects in Rock Masses, Loen, Balkema, Rotterdam, 1990.
- HOUPERT, R. - *La résistance à la rupture des roches en compression simple*. 2nd ISRM Congress, Vol.2, Belgrado, 1970
- JACKSON, R.; LAU, J. S. O. - *The effect of specimen size on the laboratory mechanical properties of Lac du Bonnet grey granite*. Scale Effects in Rock Masses, Loen, Balkema, Rotterdam, 1990.
- KRAMADIBRATA, S.; JONES, I. O. - *Size effect on strength and deformability of brittle intact rock*. Scale Effects in Rock Masses, Loen, Balkema, Rotterdam, 1993.
- LEAL GOMES, M .J. - *O efeito de escala em maciços rochosos – O caso da resistência e deformabilidade das descontinuidades* Dissertação de doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 1998.
- WEIBULL, W. - *A statistical distribution function of wide applicability*. J. Appl. Mechanics, Vol.18, págs. 293-297, 1951.