

# O SIGNIFICADO PRÁTICO DOS ENSAIOS DE DESLIZAMENTO DE DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS

## The practical meaning of shear tests on rock mass joints

M.J. LEAL GOMES\*

**RESUMO** - No presente artigo analisa-se o problema da representatividade dos ensaios de resistência de descontinuidades, face à verificação de que na natureza os movimentos tangenciais se tornam frequentes à medida que crescem as dimensões das diaclases e das falhas e em virtude disso, também os desajustamentos da morfologia dos seus bordos. Acaba por se concluir que em diaclases ajustadas as pequenas amostras com o plano médio horizontalizado fornecem valores da resistência a favor da segurança. Mas em descontinuidades desajustadas, as pequenas amostras fornecem valores de significado duvidoso e só os ensaios “in situ” de grandes amostras têm alguma representatividade.

**SYNOPSIS** - In this paper the problem of the meaning of the joint strength tests is analysed in view of the probable hypothesis which says that in Nature, the sliding movements of the joints are more frequent as the discontinuity sizes increase (large joints, faults) and on account of this reason, the morphology of their walls must be mismatched. The paper ends by concluding that the small samples of matched joints with the middle plane in horizontal position provide safe strength values. But if the joints are mismatched, the small samples provide values with doubtful meaning and only “in situ” tests of large samples have some interest and are meaningful.

### 1 - INTRODUÇÃO

Na literatura e até no espírito dos investigadores e engenheiros, há a vaga noção de que os ensaios de deslizamento de descontinuidades em maciços rochosos, têm de ser considerados de maneira muito relativa, tais são as dúvidas que os respectivos resultados tantas vezes suscitam. Cita-se a título de exemplo a curiosidade, de, até meados da década de setenta, os investigadores que fizeram ensaios neste domínio, visando esclarecer o sentido do efeito de escala, terem encontrado efeitos de escala inversos (representados por uma regressão exponencial positiva), enquanto a partir dessa data, talvez por influência dos trabalhos de Bandis (1980), raros foram os que não encontraram efeitos de escala normais (representados por uma regressão exponencial negativa). Evidentemente que o facto de o efeito de escala ser normal ou inverso é da maior importância porque, em princípio, situa os valores dos ensaios das pequenas amostras no âmbito da segurança das obras. Se o efeito de escala for normal, as pequenas amostras estarão a desfavor da segurança e se for inverso, pelo contrário, estarão a favor da segurança.

Contudo, como veremos, o problema é mais complexo do que esta simples regra deixa suspeitar.

---

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

## 2 - O EFEITO DE ESCALA NAS DESCONTINUIDADES SÃS E AJUSTADAS

Leal Gomes (1998) mostrou que, por simples razões geométricas, as descontinuidades ajustadas e sãs deverão apresentar efeito de escala inverso da rugosidade e portanto, na fase dilatante dos deslizamentos até, pelo menos, cerca de 1MPa, com horizontalização da superfície média da descontinuidade, o efeito de escala na resistência deverá ser também inverso. É fácil compreender este argumento se se tiver em mente que cada vez que se subdivide uma amostra a amplitude da rugosidade dos provetes que se obtêm, se reduz. Por outro lado os parâmetros texturais como a inclinação média da rugosidade também se reduzem se se fizer a horizontalização da descontinuidade. Com efeito, quando essa subdivisão for levada até ao limite, com este procedimento, um perfil da superfície da junta reduzir-se-á a um segmento de recta horizontal. Se se não fizer essa horizontalização, pelo contrário, o segmento respectivo poderá aproximar-se muito da vertical.

Por outro lado tendo-se verificado que os contactos efectivos entre os bordos das descontinuidades são maiores e são mais afastados, com maiores vãos livres, nos grandes provetes (Bandis, 1980; Leal Gomes, 1998), mas que a respectiva percentagem da área de contacto efectivo ( $A_{ef}$ ) relativamente à área total ( $A_a$ ) dos provetes se reduz com o aumento das dimensões, a tensão normal efectiva ( $\sigma$ ) nesses contactos é maior nos grandes provetes do que nos pequenos. Ora Leal Gomes (1997, 1998) sugeriu que a variável tribológica que relaciona a resistência ao corte das descontinuidades com a tensão normal média aplicada

( $R = \frac{\tau}{\sigma}$ ), ao contrário de que o modelo de Patton postula, não é constante, mas sim crescente

para baixo valor de  $\sigma$ . Daí resulta também um efeito de escala inverso na resistência pois ela

é igual ao produto ( $\sigma_{ef} \cdot \frac{A_{ef}}{A_a} \cdot R$ ). Com efeito  $R$  cresce com  $\sigma_{ef}$ , também crescente, à

medida que as áreas totais das descontinuidades aumentam, e o efeito conjunto não é compensado pela redução de  $A_{ef}/A_a$ .

Há ainda que ter em conta que os provetes mais longos, não só apresentam ondulações com amplitude superior à das presentes nos pequenos, exigindo para a mesma inclinação da rugosidade maior energia na sua transposição (efeito este ignorado pelo modelo de Patton), o que favorece a resistência das amostras de maiores dimensões, como, no deslizamento, o bloco superior é obrigado a superar toda a altura das asperezas no seu movimento de galgamento translacional, enquanto nos provetes curtos se observa antes um movimento mais rotativo do bloco superior sobre as asperezas, de que resultam maiores deslocamentos de pico mas menores resistências (Leal Gomes, 1998) (Fig. 1).

Por todas estas razões as descontinuidades sãs, frescas e ajustadas deverão apresentar efeitos de escala inversos, os quais tendem a evanecer com o aumento da tensão normal média na descontinuidade porque então se perde o carácter dilatante do deslizamento que passa a fazer-se com o corte das asperezas.

Todavia, não há razões para admitir *a priori* que os efeitos de escala passam a ser então normais porque, ao contrário do que Bandis admite, o facto de eventualmente o efeito de escala no JCS ("Joint Compressive Strength") dos bordos da junta ser normal, pouco influi no problema. Com efeito, apesar do deslizamento se passar a fazer principalmente com corte das asperezas a variação das suas dimensões transversais entre os provetes grandes e pequenos, frequentemente não é tal que justifique a intervenção do diminuto efeito de escala em JCS na variação de resistência (Leal Gomes, 1998).

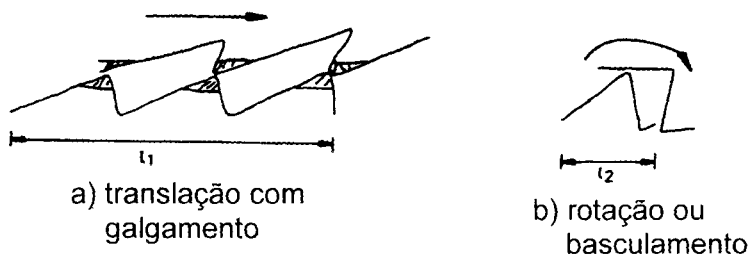


Figura 1 - Galgamento translacional ( provetes longos)  
e basculamento rotativo ( provetes curtos).

O facto de Bandis ter encontrado efeitos de escala normais nos ensaios referidos no seu trabalho clássico de 1980, ficou a dever-se a não ter horizontalizado a superfície média dos seus provetes, e ao mau ajustamento dos mesmos, que ele próprio refere (“rocking”). Este aspecto de primordial importância é também referido por Hencher et al. (1993), que tendo repetido os ensaios de Bandis no mesmo material sintético pulverulento que este usou, encontraram um efeito de escala com um máximo para as dimensões intermédias. Decerto também por terem ensaiado uma diferente combinação da atitude média das descontinuidades dos provetes, em que ela não era horizontal e o deslizamento se fazia declive acima ou declive abaixo da descontinuidade. Na fase dilatante, a importância deste aspecto é tanto mais gravosa quanto mais rugosa for a descontinuidade, porque além dos aspectos citados, equivale a somar ou subtrair a  $i$  (dilatância) um ângulo espúrio que afecta gravemente o valor de  $tg(\phi + i)$  do modelo de Patton, onde  $\phi$  é o ângulo de atrito residual.

### 3 - A IMPORTÂNCIA DO AJUSTAMENTO DOS BORDOS DA DESCONTINUIDADE

Do exposto deduz-se que se as descontinuidades forem bem ajustadas, as inclinações médias das diferentes ordens de rugosidade se deverão somar para se obter a resistência. Isto é, à inclinação da rugosidade  $i_1$  que oscila em torno da ondulação de maior ordem, deverá somar-se à inclinação média  $i_2$  desta e o factor respectivo no modelo de Patton será dado por  $tg(\phi + i_1 + i_2 + \dots)$ . Assim, as grandes amostras, com maiores ordens de ondulação, deverão ter maior resistência que as pequenas, onde só está presente a rugosidade, encontrando-se estas a favor da segurança. Além disso, há o efeito da amplitude da ondulação, como se disse não contabilizado no modelo de Patton, que favorece a resistência das grandes amostras onde se encontram essas ondulações de maior amplitude. Daqui resultam claros efeitos de escala inversos da resistência ao deslizamento.

Mas se as descontinuidades forem mal ajustadas ou desajustadas, o panorama é substancialmente diferente porque já não se pode contar com o imbricamento das pequenas asperezas que, em parte ou inteiramente, já não intervêm no deslizamento. Assim há que contar apenas com a inclinação média das grandes ondulações frequentemente mais suave do que a da rugosidade. Quanto à contribuição da sua amplitude também se mostrará muito reduzida face a uma situação de perfeito ajustamento, por se encontrarem os bordos deslocados (Fig. 2).

O modelo que se adequa a esta situação não é o de Patton, mas o de Peres Rodrigues e Charrua Graça (1985). Neste, o bloco superior do provete apoia-se numa das suas extremidades e roda em torno da chamada irregularidade significativa ou seja, daquela que oferece maior dificuldade para ser galgada.

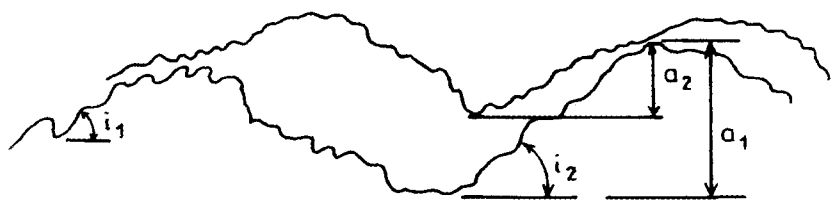


Figura 2 - Descontinuidade desajustada. Numa descontinuidade bem ajustada há que contar com a contribuição resistente da rugosidade ( $i_1$ ), da ondulação ( $i_2$ ) e com a amplitude da ondulação ( $a_1$ ).

Numa descontinuidade desajustada só resta a contribuição de  $i_2$  e de uma fracção de amplitude de ondulação ( $a_2$ ).

A mediana das alturas dessa irregularidade significativa ( $\bar{h}$ ) está relacionada com a área A da descontinuidade segundo uma função  $\ln A(\bar{h}^2)$ . Ora se for L o comprimento do provete e se a distribuição da irregularidade significativa for uniforme, vê-se que a mediana da dilatância, segundo este modelo, é dada por  $\bar{h}/(L/2)$ , em que  $L/2$  é a mediana das posições dessa irregularidade na descontinuidade. Facilmente se compreende que, crescendo a altura da irregularidade significativa muito mais lentamente do que as áreas, este modelo favorece o aparecimento de efeitos de escala normais da dilatância e decerto, da resistência (Fig.3).

Há resultados experimentais de Kutter e Otto (1990) que corroboram inteiramente estas considerações, mostrando as diaclases mal ajustadas efeitos de escala normais e as bem ajustadas efeitos de escala inversos.

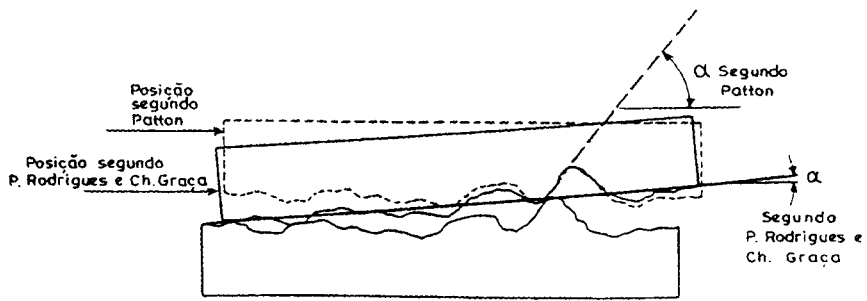


Figura 3 - Modelo de deslizamento de Peres Rodrigues e de Charrua Graça (1985).

#### 4 - O SIGNIFICADO PRÁTICO DOS ENSAIOS DE DESLIZAMENTO

Convém ainda referir que uma das causas dos efeitos de escala normais encontrados por tantos autores se deve a problemas de amostragem. Com efeito, as descontinuidades frequentemente encontram-se alteradas, com zonas esmagadas e desajustadas, as quais são deficientemente amostradas nos pequenos provetes, que não as contêm e que, por isso, têm maior resistência do que os grandes.

Pode pois enunciar-se como regra fundamental na programação dos ensaios de deslizamento, que é essencial observar o ajustamento dos bordos das descontinuidades *in situ*. Se o ajustamento ultrapassar a situação de pico, apenas restará a resistência correspondente aos parâmetros residuais, pouco ou nada afectados pelo efeito de escala. Se a situação de pico não tiver sido atingida mas ainda assim houverem desajustamentos, seja qual for a sua origem, dever-se-á aplicar a estas descontinuidades o modelo de Peres Rodrigues e de Charrua Graça (1985) na estimativa das suas resistências. Se o ajustamento for bom deverão ser contabilizadas as diversas dilatâncias, correspondentes às diversas ordens de rugosidade e de ondulação e ainda contar com a amplitude da rugosidade que não é levada em conta, explicitamente por nenhum modelo de resistência conhecido, por razões que se compreendem mal, mas devem ter a ver com a grande voga dos modelos de Patton e Barton a partir da década de sessenta. (Pode acrescentar-se que o modelo de Barton não considera explicitamente a amplitude das ondulações, mas fá-lo implicitamente, de forma vaga e incompleta, porque se vê que, nos perfis típicos de Barton e Choubey (1977), os JRC mais elevados correspondem a perfis com maiores amplitudes).

Ora, verifica-se no campo, que à medida que as dimensões das diaclases e das falhas crescem, nelas se vão sentindo mais claramente os deslocamentos tangenciais. Pode até dizer-se que, em certa medida, nos grandes traços da crosta os cisalhamentos estão sempre presentes. É bem sabido que as simples diaclases podem ser não só de tracção, mas de corte ou híbridas. São pois de esperar as descontinuidades desajustadas, sendo a situação agravada no que toca à sua resistência, pelas alterações e zonas esmagadas.

Mas dada a maneira como se fazem os ensaios das pequenas amostras, levando-as ao seu melhor ajustamento antes de serem colocadas nas câmaras das máquinas de corte, o problema inúmeras vezes é colocado a desfavor da segurança, mesmo que se tenha a precaução já referida de horizontalizar o seu plano médio. A estas amostras aplicar-se-á o princípio da soma das dilatâncias atrás enunciado. Se as grandes amostras (por exemplo, em ensaios *in situ*) forem também ajustadas, obter-se-á um efeito de escala inverso e as pequenas amostras estarão a favor da segurança. Mas, sobretudo em feições muito desenvolvidas, de grande área, são muito prováveis os deslocamentos tangenciais, as descontinuidades estão desajustadas e este princípio não é aplicável. Decerto se lhes adequa melhor o modelo de Peres Rodrigues e de Charrua Graça. E assim, nas condições desajustadas “*in situ*” devem corresponder-lhes efeitos de escala normais, ficando as pequenas amostras possivelmente, apesar de todas as precauções tomadas, a desfavor da segurança. Na melhor das hipóteses, tudo o que se poderá dizer desta situação é que, os ensaios a pequena escala, os ensaios *in situ* e principalmente as condições das descontinuidades incluídas nos maciços, não são comparáveis (Fig.4).

#### 5 - CONCLUSÃO

Vê-se pois que a observação *in situ* do ajustamento das feições é fundamental na avaliação do significado dos ensaios a grande e pequena escala. As rugosidades e ondulações desajustadas são parcial ou completamente inoperantes no que respeita à sua contribuição para

a resistência ao deslizamento. Só neste âmbito se podem compreender inteiramente os resultados de Mc Mahon (1985) que analisou por retroanálise vários escorregamentos e encontrou efeitos de escala normais. Concluiu também que a pequena rugosidade não tinha intervindo nos deslizamentos. Os preenchimentos e alterações dessas descontinuidades talvez expliquem só em parte os resultados obtidos por este autor.

Evidentemente que neste contexto a valorização dos ensaios a pequena escala é muito difícil. Pode até ser desinteressante realizá-los.

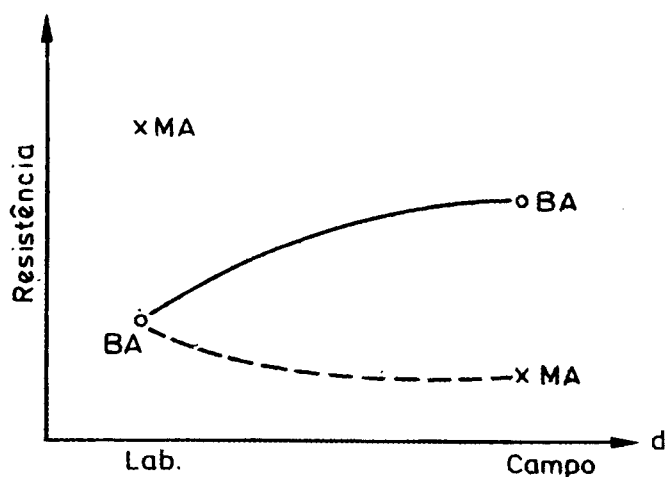


Figura 4 - Amostras bem ajustadas (BA) e mal ajustadas (MA) e respectivos efeitos de escala.  $d$  é a dimensão das amostras da descontinuidade; Lab (laboratório) e campo (ensaios *in situ*).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDIS, S. - *Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints*. Tese PhD, Universidade de Leeds, 1980.
- BARTON, N. e CHOUBEY, V. - *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics, 10, pp. 1-54, 1977.
- HENCHER, S.R.; TOY, J.P. e LUMSDEN, A.C. - *Scale dependent shear strength of rock joints*. Scale Effects in Rock Masses, Lisboa, Ed. Balkema, Rotterdam, 1993.
- KUTTER, H.K. e OTTO, F. - *Influence of parallel and cross joints on shear behaviour of rock*. Rock Joints, Ed. Balkema, Rotterdam, 1990.
- LEAL GOMES, M.J. - *Hipótese sobre a evolução da grandeza tribológica do deslizamento de descontinuidades em maciços rochosos*. 6º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, 1997.
- 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.
- MC MAHON, B.K. - *Some practical considerations for the estimation of shear strength of joints and other discontinuities*. Simpósio Int. sobre Fundamentals of Rock Joints, Bjorklinden, 1985.

PERES RODRIGUES, F. e CHARRUA GRAÇA, J.G. - *Scale effect on the strength characteristics of rock masses*. Simpósio Int. sobre *Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Engineering*, Zacatecas, México, 1985.