

ENSAIOS DE CORTE DIRECTO DE DESCONTINUIDADES EM GRANITO COM PREENCHIMENTOS ARENOSOS*

Direct shear tests of granite discontinuities filled with sandy gouges

J. PAULINO PEREIRA **

RESUMO - Foi efectuado um estudo da resistência ao deslizamento de descontinuidades preenchidas com material arenoso no estado seco. As superfícies das descontinuidades eram planas e foram produzidas artificialmente por serragem de um bloco de granito são e de grão fino. Os resultados obtidos permitiram concluir que a resistência da descontinuidade com o preenchimento era sempre menor do que o da descontinuidade sem preenchimento. Os gráficos tensão tangencial máxima - espessura do preenchimento apresentam dois ramos distintos: um superior, onde se verifica o decréscimo da tensão tangencial com o aumento da espessura do preenchimento; e outro inferior, que mostra o aumento da tensão tangencial com o aumento da espessura (o atrito ao rolamento poderá controlar este tipo de comportamento).

SYNOPSIS - The ultimate shear strength of dry sandy gouges infilling artificial and flat discontinuities in sound and fine grained granite were studied by using a direct shear equipment. The results obtained concluded that the ultimate shear strength of the filled discontinuities was always lower than that of the unfilled discontinuity and they influenced the traditional plots shear strength vs. thickness which in our case show two branches: an upper one, presenting the decrease of the shear strength with the increase of thickness; and a lower one reproducing the increase of shear strength with thickness (rolling friction may control this behaviour).

1 - INTRODUÇÃO

As descontinuidades, com ou sem preenchimento, representam os planos de fraqueza que condicionam o comportamento mecânico dos maciços rochosos de razoável a boa qualidade pelo que o seu comportamento, quando submetidas a processos de corte ou de deslizamento, tem sido objecto de investigação desde a década de 60 e numerosos artigos foram publicados sobre elas. Numa fase inicial do desenvolvimento do conhecimento, para além da necessidade de avaliar correctamente a geometria e o posicionamento espacial de uma descontinuidade isolada e das várias famílias de descontinuidade, a determinação da sua resistência ao corte ou ao deslizamento surgia como um dos aspectos mais relevantes a ter em consideração. Por essa razão, procedia-se à realização de numerosos ensaios de laboratório para avaliar os parâmetros de resistência ao corte das descontinuidades num maciço rochoso. Depois de se coligir toda a informação, os especialistas de Mecânica dos Maciços Rochosos ou Mecânica das Rochas (geralmente engenheiros geotécnicos, engenheiros civis ou engenheiros de minas) podiam definir, por um lado, as superfícies onde a probabilidade de ocorrência de roturas era maior e, por outro, os volumes potenciais que se podiam destacar do maciço rochoso. Com

* Comunicação apresentada ao 9º Congresso da ISRM, Paris, 1999

** Doutor em Engenharia Civil (IST)

Professor universitário (IST) e Consultor

esta informação era possível projectar e construir obras e estruturas com os critérios de segurança adequados.

Nessa fase inicial, a importância dos ensaios de laboratório foi posta em destaque. No reconhecimento de campo, seleccionavam-se as descontinuidades com características de resistência mais fracas ou as descontinuidades mais representativas. As amostras eram então trazidas para o laboratório sendo submetidas a ensaios de corte directo, que eram os tradicionalmente utilizados para avaliar ou determinar os parâmetros de resistência ao corte ou ao deslizamento dos planos da descontinuidade. Em comparação com os ensaios *in-situ* de corte ou de deslizamento de descontinuidades, de estratos de baixa resistência ou de outros planos de fraqueza, os ensaios de laboratório eram preferidos porque apesar de menos fiáveis, eram de rápida execução e os seus custos eram bastante menores. Depois de uma análise crítica, os resultados podiam ser utilizados de forma apropriada para o dimensionamento de trabalhos de engenharia ou para o estudo do maciço rochoso.

Durante a década de 70, BARTON estudou as questões relacionadas com o comportamento das descontinuidades e efectuou uma revisão das metodologias que eram usadas. Sugeriu critérios para realização de ensaios de campo (ensaios de escorregamento simples, tilt tests) e estabeleceu um modelo empírico para estimar a resistência máxima de corte e de deslizamento (modelo empírico de BARTON), elaborou um catálogo dos vários tipos de descontinuidades e definiu classificações para as várias características, como, por exemplo, a rugosidade (JRC, Joint Roughness Coefficient), ou o estado de alteração do material-rocha adjacente (Já, Joint Alteration Coefficient) (BARTON, 1976). Estes critérios eram de fácil utilização no campo e suficientemente adequados para a maioria dos trabalhos de engenharia. Com esta metodologia, os ensaios de laboratório eram essencialmente utilizados para confirmação dos valores da resistência ao corte ou ao deslizamento das descontinuidades.

O recurso a modelos numéricos e computacionais permitiu complementar os procedimentos trabalhosos e demorados de determinação das superfícies e volumes potenciais de escorregamento e rotura do maciço rochoso. Numerosas figuras de rotura podiam ser testadas num curto período e o comportamento mecânico (resistência e deformabilidade) do maciço rochoso nas proximidades das estruturas ou dos restantes trabalhos podia ser rapidamente avaliado para vários cenários possíveis. Deste modo, as linhas de investigação com os ensaios de laboratório quase parou. Actualmente, a maioria dos artigos apresenta modelos numéricos para previsão do comportamento mecânico das descontinuidades, dos maciços rochosos e das estruturas ou obras construídas sobre o maciço rochoso ou no seu interior.

Contudo, o comportamento mecânico das descontinuidades ainda não está totalmente apreendido e há muitos domínios que ainda carecem de trabalho de investigação. Por essa razão, os ensaios de laboratório têm de ser realizados para várias situações. Aliás, a validação dos modelos numéricos depende da observação do que realmente acontece na realidade e os modelos empíricos nem sempre permitem obter resultados totalmente credíveis. Por exemplo, mesmo para descontinuidades sem preenchimento, os modelos empíricos existentes não permitem explicar ou avaliar o comportamento a longo prazo e a correspondente resistência residual, e o comportamento das descontinuidades preenchidas com materiais arenosos ou argilosos também não está claramente compreendido.

Várias linhas de investigação que vêm sendo seguidas para estudo de descontinuidades envolvem o estudo do seu comportamento hidromecânico, termomecânico ou outro que envolva a análise de mais de um parâmetro. Nestes casos, as diferentes fases de rotura e os mecanismos de rotura das descontinuidades isoladas devem ser claramente compreendidos,

pois caso contrário, os resultados previstos por modelação numérica tornam-se de pouca utilidade em virtude de poderem não representar a realidade. Julga-se que os resultados apenas serão interessantes quando for efectuada uma observação cuidadosa dos ensaios *in-situ* e de laboratório e se proceder à reprodução adequada desta realidade no modelo numérico.

2 - LIMITAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO

Para o estudo da resistência ao corte ou ao deslizamento de descontinuidades ou de zonas de baixa resistência, três tipos de equipamentos de laboratório são geralmente utilizados: equipamentos de corte directo, equipamentos de corte rotativo e células de carga triaxial. Os últimos dois são mais usados em trabalhos de investigação sendo o seu emprego relativamente reduzido noutras situações, por exemplo, não são geralmente utilizados para fins comerciais ou para actividades de projecto.

As células de carga triaxial são principalmente utilizadas quando se procura estudar a acção de tensões de confinamento laterais de elevada magnitude e a grande profundidade (por exemplo, em engenharia petrolífera) e são adequados para pequenos deslocamentos. Ao contrário dos seus congéneres para solos, os ensaios triaxiais raramente têm sido utilizados em engenharia geotécnica, engenharia civil ou engenharia de minas.

Os equipamentos de corte directo e de corte rotativo baseiam-se no mesmo princípio e ambos apresentam algumas desvantagens, tais como: a imposição de um plano de deslizamento ou de corte que pode ser muito diferente daquele que pode ocorrer na realidade; a dificuldade em controlar a rigidez do equipamento de ensaio, pelo que a maioria dos equipamentos do tipo comercial pode ser considerado como máquinas não rígidas; a variação da tensão normal durante o ensaio o que levou vários autores a tentarem corrigir os resultados recorrendo a algoritmos; a dificuldade ou mesmo a impossibilidade de medir pressões intersticiais induzidas pela água nos vazios. Quando se trata de ensaios de descontinuidades com preenchimento, dois problemas adicionais podem ocorrer: a extrusão e a perda lateral do material do preenchimento (os preenchimentos argilosos tendem a extrudir e os grãos dos solos que compõem os preenchimentos arenosos tendem a cair dos lados ou nas extremidades das amostras) devido ao facto da tensão intermédia na zona lateral e na extremidade de jusante ser nula; e a rotura progressiva pode ocorrer devido a uma distribuição não uniforme da tensão na área de corte ou de deslizamento.

No caso dos ensaios de corte directo, existem aspectos vários que também constituem matéria de preocupação: a direcção da tensão tangencial (geralmente ela é horizontal, de acordo com o equipamento de Casagrande), o que provoca uma distribuição não-uniforme das tensões durante o processo de corte (para corrigir este inconveniente, Rocha sugeriu que se procedesse à inclinação da direcção de aplicação da força tangencial nos equipamentos de corte directo, ROCHA, 1971); a variação da área de corte ou de deslizamento durante o ensaio o que afecta igualmente a distribuição de tensões. Contudo, outras desvantagens existem para os equipamentos de corte directo: o basculamento de um dos meios blocos da amostra sobre o outro e o deslocamento lateral do bloco superior sobre o inferior. Para grandes deslocamentos, verifica-se uma não uniformidade na distribuição da tensão que é progressiva e crescente, e que pode ter consequências nos resultados. Outra dificuldade acrescida é o reduzido tamanho das amostras de laboratório. Para a maioria dos equipamentos de corte directo, as amostras de grande dimensão são geralmente cubos ou paralelepípedos com arestas de 20 a 30 cm. Em numerosos casos, os equipamentos de corte directo disponíveis no mercado utilizam amostras com uma dimensão muito menor e da ordem de 10 a 15 cm de aresta.

Quando comparados com os equipamentos de corte directo, os equipamentos de corte rotativo apresentam vantagens mas também algumas desvantagens. Como desvantagens deve referir-se que a preparação da amostra é muito mais difícil, e portanto, torna-se mais dispendiosa, a área de ensaio é muito pequena, e apenas material-rocha macio ou de fraca resistência pode ser utilizado, pois caso contrário, as cargas necessárias para romper o material seriam muito elevadas mesmo para protuberâncias de pequena dimensão e a máquina não responderia de forma correcta. Contudo, os equipamentos de corte rotativo apresentam várias vantagens quando comparados com os correspondentes equipamentos de corte directo: o controlo da tensão normal e o controlo da rigidez do equipamento são mais fáceis de conseguir, não há uma variação significativa da área de corte ou de deslizamento, o deslocamento lateral é impedido e o basculamento de um dos blocos sobre o outro é reduzido. Deste modo os equipamentos de corte rotativo permitem obter uma melhor distribuição das tensões no plano de corte ou de deslizamento.

A maioria dos autores não menciona este tipo de limitações nos seus artigos e ensaios, embora eles possam afectar, de forma significativa, os resultados que se obtêm. Alguns procedem a “correções” dos resultados da resistência ao corte máxima ou residual, do deslocamento tangencial, da tensão normal, e do deslocamento normal utilizando outros parâmetros (por exemplo, a dilatação média medida no ponto central do bloco de rocha superior, ou a média entre os valores dos transdutores de montante e de jusante, etc). Outros calculam algoritmos numéricos de compensação para atingirem os mesmos objectivos.

A comparação entre os resultados obtidos com o mesmo tipo de material e o mesmo tipo de descontinuidades recorrendo a diferentes tipos de equipamentos de laboratório pode permitir compreender as limitações dos equipamentos e também os intervalos de validade e as condicionantes dos vários tipos de ensaios de corte ou de deslizamento.

3 - ENSAIOS DE CORTE DIRECTO EM DESCONTINUIDADES DE GRANITO PREENCHIDAS COM MATERIAIS ARENOSOS SECOS

Para estudar o comportamento mecânico de descontinuidades planas, produzida de forma artificial, e preenchidas com material arenoso seco, foi efectuada uma série de ensaios de corte recorrendo a um equipamento de corte directo (LNEC, Lisboa, Figura 1). Posteriormente alguns dos ensaios foram também efectuados em equipamentos de corte rotativo (Imperial College, Londres, Reino Unido).

O material-rocha que foi utilizado era um granito azul-acinzentado, de grão fino, são e duro, que foi recolhido no Sul de Portugal numa pedreira de rocha ornamental. O material-rocha era essencialmente constituído por quartzo e plagioclase, apresentava uma elevada percentagem de sílica (69-72 %) e de alumínio (14,5-15,6 %), um peso específico de 26,2 - 26,6 kN/m³, uma absorção de água baixa e da ordem de 0,3 a 0,4 %, uma elevada resistência à compressão uniaxial (46.100-51.200 MPa), um coeficiente de Poisson aceitável (0,16-0,19), e um elevado E/σ_c (279-318). Estes parâmetros permitem confirmar a boa qualidade do material-rocha utilizado.

As amostras de material-rocha eram representadas por paralelepípedos com um base quadrada de 17 x 17 cm² e cada meio bloco superior e inferior tinha uma altura de 7,5 cm. A descontinuidade foi produzida por serragem do bloco inicial que tinha uma altura de 15 a 17cm. As superfícies de descontinuidade eram planas sem quaisquer protuberâncias visíveis em qualquer ponto da superfície. O ângulo de atrito médio obtido em ensaio de deslizamento com equipamentos de corte directo foi de 35°.

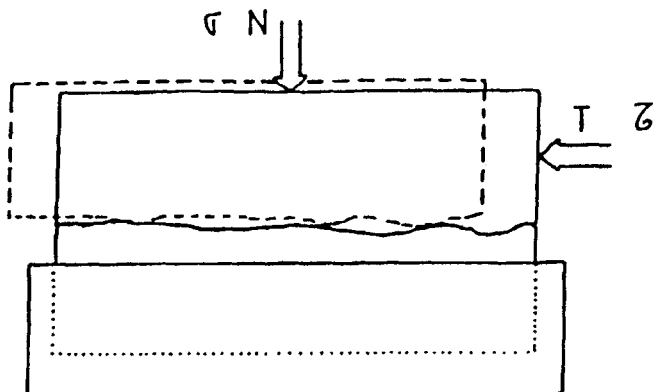


Figura 1 - Equipamento de corte directo (LNEC)

O preenchimento arenoso era uma areia lavada de rio com grãos siliciosos arredondados, que foi recolhida numa aluvião grosseira, na margem esquerda do rio Tejo, e existente nas proximidades de Almada. A areia foi peneirada e várias classes granulométricas foram estabelecidas: Classe A ($< 0,074$ mm, preenchimento fino); B ($0,074-0,149$ mm); C ($0,149-0,297$ mm); D ($0,297-0,500$ mm); E ($0,500-1,000$ mm). Depois de seco, os materiais das classes granulométricas anteriormente referidas foram submetidos a ensaios de corte directo com equipamentos que testavam amostras de pequena dimensão (área de ensaio de $5 \times 5 \text{ cm}^2$) e os resultados para baixas tensões normais foram os seguintes: B ($c=0$; $\phi = 36^\circ$); C ($c=0$; $\phi = 38^\circ$); D ($c=0$; $\phi = 34^\circ$); E ($c=0$; $\phi = 36^\circ$).

Os ensaios de corte directo das descontinuidades preenchidas foram efectuados recorrendo ao equipamento do LNEC (área de ensaio de $17 \times 17 \text{ cm}^2$). As tensões normais utilizadas foram as seguintes: $0,1 \text{ MPa}$, $0,3 \text{ MPa}$, $0,5 \text{ MPa}$ e $0,7 \text{ MPa}$. A altura do preenchimento variou em média desde a dimensão média do grão (h) até uma espessura de 6 vezes a dimensão média do grão ($6h$) - h , $2h$, $3h$, $4h$ e $6h$.

O movimento do bloco superior sobre o inferior e sobre o preenchimento foi contínuo e estável e não se registou qualquer comportamento do tipo stick-slip.

Mesmo para as maiores espessuras, a rotura foi sempre observada na interface material-rocha - preenchimento arenoso e nunca no interior do preenchimento.

Os gráficos tensão tangencial - deslocamento tangencial apresentaram diferentes tipos (Figura 2), de acordo com a espessura do preenchimento e sua classe granulométrica: Tipo I, o deslocamento tangencial iniciava-se aproximadamente quando a tensão tangencial máxima era atingida e o valor da tensão tangencial não variava até ao final do ensaio; Tipo II, o deslocamento tangencial aumentava com o aumento da tensão tangencial e a tensão máxima mantinha-se constante até ao final do ensaio; Tipo III, depois de atingir a tensão tangencial máxima, o gráfico mostrava uma quebra da tensão tangencial, de uma forma clara, embora a tensão de pico não fosse particularmente maior do que a tensão residual para a maioria dos ensaios. Os gráficos do Tipo I foram os mais frequentes para os ensaios envolvendo preenchimentos arenosos secos; os do Tipo II que reproduzem uma rotura progressiva foram

observados para preenchimentos das classe granulométricas mais grosseiras (classes D e E), e os do Tipo III foram observados essencialmente para espessuras mais elevadas e para tensões normais elevadas e podem estar relacionados eventualmente com a extrusão e a queda do material de preenchimento ou a rotura e o esmagamento dos grãos.

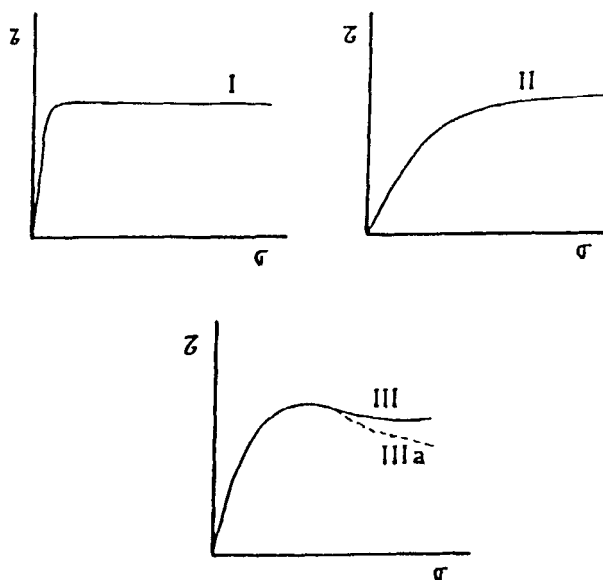


Figura 2 - Tipos de gráfico tensão tangencial - deslocamento tangencial

Para cada ensaio, determinou-se o parâmetro $\arctan \tau/\sigma$ (pico) que pode ser considerado como um ângulo de atrito pontual ($\tau = \sigma \cdot \tan \phi$).

Os gráficos deslocamento tangencial - deslocamento normal mostraram que o bloco superior baixou (dilatância negativa) o que pode ser explicado pela extrusão do preenchimento ou pela queda de grãos do material de preenchimento ou pelo esmagamento dos grãos do material de preenchimento. Esta situação foi claramente observada para preenchimentos espessos.

Para cada classe granulométrica, os resultados da tensão tangencial e de $\arctan \tau/\sigma$ (pico) foram sempre menores para as descontinuidades preenchidas do que para as descontinuidades limpas sem qualquer preenchimento. Por outro lado, registou-se de uma forma clara o decréscimo da tensão tangencial máxima com a redução da espessura do preenchimento. Geralmente, a tensão tangencial correspondente a uma espessura de h foi sempre menor do que a obtida para as outras espessuras, e a máxima tensão tangencial ocorria frequentemente para uma espessura de $6h$.

Para cada classe granulométrica, determinaram-se as médias dos valores de $\arctan \tau/\sigma$ (pico) obtidas recorrendo aos valores obtidos para a mesma classe granulométrica e para todas as espessuras.

A Fig. 3 reproduz o gráfico $\text{arc tan } \tau/\sigma$ (pico) - tensão normal: os preenchimentos mais grosseiros mostram valores mais baixos. Para cada classe granulométrica, os valores mais elevados de $\text{arc tan } \tau/\sigma$ (pico) ocorreram para as tensões normais mais baixas (0,1 MPa) e os valores mais elevados foram obtidos para σ de 0,5 MPa.

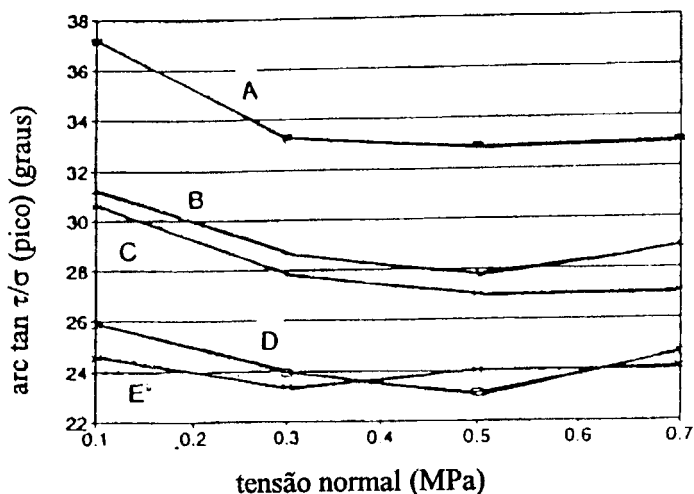


Figura 3 - Gráfico $\text{arc tan } \tau/\sigma$ (pico) - tensão normal

Os gráficos tensão tangencial - tensão normal para cada ensaio e para todas as classes granulométricas de preenchimento foram elaborados e a tensão tangencial foi comparada com a envolvente de rotura de uma descontinuidade plana e limpa sem qualquer preenchimento. A Fig. 4 reproduz um desses gráficos e representa os resultados obtidos para a classe granulométrica D.

Frequentemente, os valores foram alinhados segundo uma envolvente recta que apresentava uma boa correlação. Noutros casos, o valor para tensões normais elevadas não estava alinhado mas encontrava-se ligeiramente acima ou abaixo daquela linha, eventualmente devido ao esmagamento de grãos para tensões normais elevadas.

4 - COMENTÁRIOS

TULINOV & MOLOKOV (1971) que realizaram ensaios de corte *in-situ*, mencionaram o seguinte: “parece óbvio que o plano de corte em estratos espessos de material arenoso e com superfícies irregulares e rugosas deve ocorrer no material arenoso e neste caso os parâmetros de resistência ao corte devem corresponder aos do solo arenoso”.

KANJI (1974) estudou a resistência ao corte de interfaces entre solo e rocha. Concluiu que ela poderia ser menor do que a tensão tangencial do solo e explicou este resultado pelo alinhamento forçado de partículas do solo ao longo do plano de contacto ou no interior do solo.

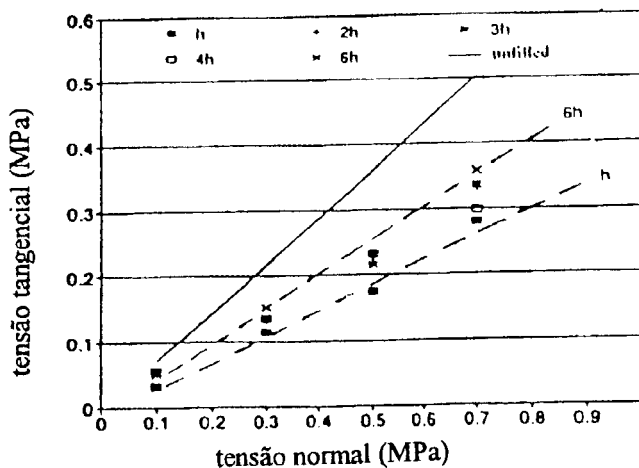


Figura 4 - Gráfico tensão tangencial - tensão normal (classe granulométrica D)

KUTTER e RAUTENBERG (1979) ao estudarem discontinuidades preenchidas em material-rocha, referem que os resultados de KANJI poderiam ser explicados pela tensão intersticial no material de preenchimento e ao longo da interface solo - material-rocha. Contudo, para os seus ensaios realizados com recurso a areia seca e a grãos arredondados ambas as explicações não eram adequadas. Como havia uma redução da espessura do preenchimento no decorrer dos ensaios, os autores efectuaram a correcção dos valores da tensão tangencial. Os resultados corrigidos mostraram que a tensão tangencial da discontinuidade preenchida era “igual ou maior, mas nunca menor do que a do material de preenchimento”, “a resistência ao corte de uma discontinuidade preenchida tendia a aproximar-se da do material de preenchimento, quanto mais plana fosse a superfície da discontinuidade”, “quanto mais espesso o solo de preenchimento, a resistência ao corte aproximava-se da resistência do solo”, “todas as discontinuidades rugosas preenchidas apresentam uma tensão residual mais elevada do que a do solo”. Estas conclusões foram aceites durante muitos anos como correctas. Contudo, importa mencionar que as correcções aos resultados efectuadas pelos autores afectaram e possivelmente de uma forma apreciável os valores de ensaio.

Alguns artigos mais recentes referiram que a tensão tangencial da interface poderia ser menor do que a do material de preenchimento mas não apresentaram qualquer explicação para esta situação para além das já referidas anteriormente. Em 1990, o signatário sugeriu que o atrito ao rolamento mobilizado entre os grãos ou entre eles e a superfície da discontinuidade poderia constituir uma explicação adequada para os resultados obtidos (PAULINO PEREIRA, 1990, a, b). Posteriormente alguns autores (PAPALIANGAS *et al.*, 1993, TOLEDO e DE FREITAS, 1993) adoptaram a mesma explicação na sequência de trocas de impressão havidas

com o signatário. Em 1997, apresentou-se uma série de ensaios que pôs em evidência o efeito do atrito ao rolamento em descontinuidades preenchidas com material arenoso seco (PAULINO PEREIRA, 1997).

O efeito do atrito ao rolamento influencia, de forma clara, a resistência tangencial de uma descontinuidade preenchida com material arenoso seco. Nesse caso, quanto maior for o diâmetro dos grãos, menor é a tensão tangencial obtida.

Geralmente os gráficos de resistência tangencial máxima - espessura do preenchimento, apresentados pela maioria dos autores, mostram um decréscimo de τ com o aumento da espessura (GOODMAN, 1970, LAMA, 1978, SUN *et al.*, 1981, PHIEN-WEJ *et al.*, 1990, PAPALIANGAS *et al.*, 1990 e 1993, TOLEDO e DE FREITAS, 1993). Contudo, a Figura 5 mostra que a tensão tangencial de descontinuidades preenchidas com material arenoso seco pode aumentar com o aumento da espessura, devido ao efeito do atrito ao rolamento claramente observado para preenchimentos de reduzida espessura.

Considera-se que o gráfico $\text{arc tan } \tau/\sigma$ (pico) / espessura do preenchimento - espessura do preenchimento pode ser uma forma mais adequada para reproduzir este tipo de variação do que o anterior gráfico (Figura 6).

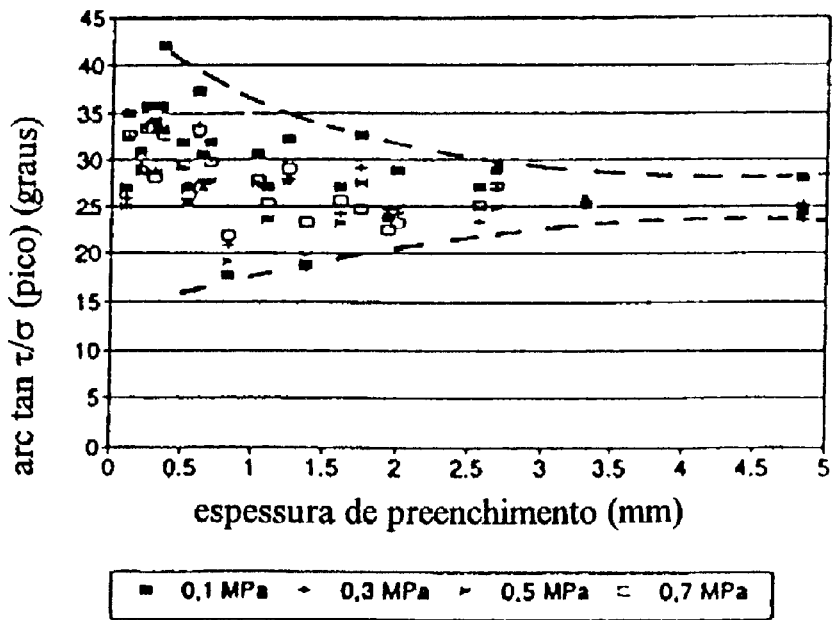


Figura 5 - Gráfico $\text{arc tan } \tau/\sigma$ (pico) - espessura de preenchimento

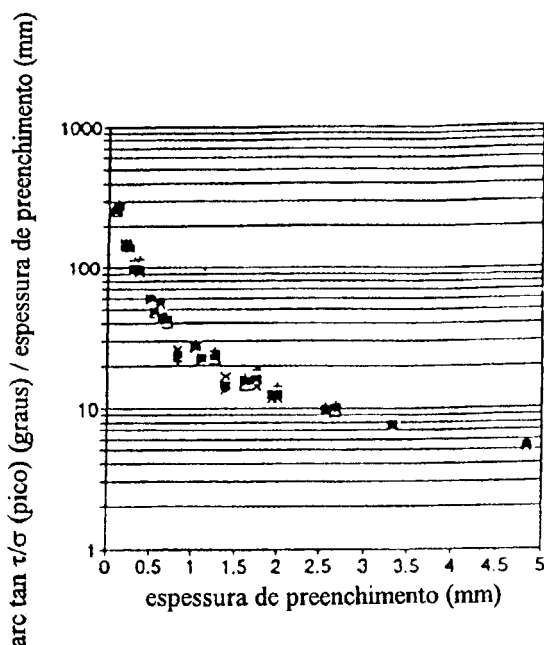


Figura 6 - Gráfico ($\text{arc tan } \tau/\sigma(\text{pico})/\text{espessura de preenchimento}$) - espessura de preenchimento

5 - CONCLUSÕES

O estudo das descontinuidades preenchidas não está ainda totalmente apreendido e não existem modelos adequados para prever a tensão tangencial máxima e a tensão tangencial residual quer para material de preenchimento arenoso quer argiloso.

Julga-se ser importante compreender as limitações dos equipamentos de ensaio de laboratório e dos próprios procedimentos de ensaio, mas qualquer correcção deverá ser cuidadosamente analisada de modo a não distorcer os resultados e os próprios ensaios.

Numa série de ensaios de corte directo recorrendo a descontinuidades preenchidas com material arenoso seco e com superfícies planas e artificialmente produzidas em material-rocha de granito são, a tensão tangencial das descontinuidades preenchidas foi sempre menor do que a das descontinuidades limpas sem qualquer preenchimento. Esta situação permite concluir que os preenchimentos granulares podem ser mais desfavoráveis do que geralmente é considerado e contribuem para reduzir as características geotécnicas dos maciços rochosos. O atrito ao rolamento que tem um valor menor do que o atrito ao deslizamento, é provavelmente mobilizado nos grãos do solo reduzindo a tensão tangencial (PAULINO PEREIRA, 1990, a, b, e 1997).

A resistência ao corte máxima varia com a espessura do material de preenchimento. A bibliografia refere que há um decréscimo da tensão tangencial máxima com o aumento da espessura do preenchimento. Contudo, os ensaios que foram realizados puseram em evidência que para materiais de preenchimento arenosos e grosseiros, os valores da tensão tangencial máxima poderiam ser menores para preenchimentos de reduzida espessura provavelmente devido à mobilização do atrito ao rolamento.

A variação da tensão tangencial com a espessura pode ser melhor representada por gráficos do tipo $\text{arc tan } \tau/\sigma$ (pico)/ espessura - espessura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTON, N.R. - *The shear strength of rock and rock joints*. Int. Jour. Rock Mech. & Min. Sci., 13:255-279, 1976.
- Goodman, R. - *The mechanical properties of rock joints*. Proc. 3th Int.Cong. Rock Mech. 1(A):127-140, 1970.
- KANJI, M.A. - *Unconventional laboratory tests for the determination of the shear strength of soil-rock contacts*. Proc. 3th Int.Cong. Rock Mech, 2: 241-247, 1974.
- KUTTER, H.K. e RAUTENBERG, A. - *The residual shear strength of filled joints in rock*. Proc. 4th Int. Rock Mech. Montreux (Switzerland). 1:221-227, 1979.
- LAMA, R.D. - *Influence of clay fillings on shear behaviour of joints*. Proc. 3rd Congress IAEG, 2(2): 27-34, 1978.
- PAPALIANGAS, T., HENCHER, S.R., LUMSDEN, A.C. e MANOLOPOLOU, S. - *Shear strength of modeled filled rock joints*. In Barton & Stephansson (eds). Rock Joints. 275-282. Rotterdam. Balkema, 1990.
- PAPALIANGAS, T., HENCHER, S.R., LUMSDEN, A.C. e MANOLOPOLOU, S. - *The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities*. Int. Jour. Rock Mech. & Min. Sci., 30:81-91, 1993.
- PAULINO PEREIRA, J.P. - *Mechanics of filled discontinuities*. In H.P. Rossmanith (ed). Mech. of Jointed and Faulted Rock. 375-380. Rotterdam. Balkema, 1990 a.
- PAULINO PEREIRA, J. - *Shear strength of filled discontinuities*. In Barton & Stephansson (eds). Rock Joints. 283-287. Rotterdam. Balkema, 1990 b.
- PAULINO PEREIRA, J. - *Behaviour of rock discontinuities with sandy infills in shear*. Int. Jour. Rock Mech. & Min. Sci., 34(3-4), paper 224, 1997.
- PAULINO PEREIRA, J. e DE FREITAS, M.H. *Mechanisms of shear failure in artificial fractures of sandstone and their implication for models of hydromechanical coupling*. Rock Mech. Rock Eng. 26: 195-214.
- PHIEN-WEJ, N. SHRESTHA, U.B. e RANTUCCI, G. - *Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints*. In Barton & Stephansson (eds). Rock Joints. 289-294. Rotterdam. Balkema, 1990.
- ROCHA, M. - *Mecânica das Rochas*. Lisboa, L.N.E.C., 1971.
- SUN, W., ZHENG, T. e LI, M. - *The mechanical effect of thickness of the weak intercalary layers*. Int. Symp. On Weak Rock. Tokyo (Japan). 1:44-49, 1981.
- TULINOV, R. e MOLOKOV, L. - *Role of joint filling material in shear strength of rocks*. Int. Symp. Rock Fracture ISRM. Nancy (France). Paper II-24, 1971.
- TOLEDO, P.E.C e DE FREITAS, M.H. *Laboratory testing and parameters controlling the shear strength of filled rock joints*. Geotechnique. 43: 1-19, 1993.