

UM PROTÓTIPO PARA ENSAIOS DE CORTE E DESLIZAMENTO DE JUNTAS

A PROTOTYPE FOR JOINT SHEAR AND SLIDE TESTING

Quintanilha de Menezes, José Eduardo, *FEUP, Porto, Portugal, menezes@fe.up.pt*

RESUMO

A caracterização dos parâmetros mecânicos das juntas rochosas, nomeadamente a resistência ao corte de pico e residual bem como as relações constitutivas tensões-deformações, pode ser abordada através de ensaios em laboratório com amostras recolhidas na sua maioria em sondagens. Um protótipo de equipamento de laboratório para ensaio de juntas rochosas, naturais e artificiais, é apresentado. Descrevem-se as suas especificações, nomeadamente as dimensões possíveis das amostras ensaiadas, forças normal e de corte máximas, velocidade de deslizamento e tipos de ensaios possíveis de realizar. Salienta-se a apresentação das características de automação do equipamento. Como exemplos de aplicação apresentam-se os resultados e conclusões de vários ensaios realizados sobre amostras de diaclases, juntas de alvenaria de granito e juntas argamassadas.

ABSTRACT

The characterization of peak and residual shear strength as well as stress-strain relationships in rock joints can be obtained with laboratory testing of joint specimens usually taken from cylindrical borehole cores. A new laboratory prototype for testing rock discontinuities is presented. The equipment specifications are described, namely sample dimensions, shear and normal maximum loads, shear testing speed and possible tests actually available. All hydraulic and electrical equipment components are connected to a computer where specific software controls test procedure and processes numerical results. Some data and conclusions from natural and artificial granite joint shear tests are presented.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico de formações rochosas é muito condicionado pelo conjunto de superfícies de descontinuidades existentes. As descontinuidades nos maciços rochosos têm normalmente uma resistência à tracção desprezável e uma resistência ao corte muitas vezes significativamente inferior à da matriz rochosa envolvente. A influência das descontinuidades na diminuição das capacidades resistentes e na rigidez dos maciços rochosos depende, entre outros factores, da sua orientação, espaçamento, continuidade e resistência ao deslizamento.

Os ensaios de corte e deslizamento de descontinuidades rochosas permitem a caracterização dos parâmetros mecânicos das juntas rochosas, nomeadamente a resistência ao corte de pico e residual, bem como as relações constitutivas tensões-deformações. A realização *in situ* deste tipo de ensaios é difícil porque exige condições específicas para aceder à descontinuidade a caracterizar, em volta da qual deve ser talhada sem grandes perturbações a amostra a ensaiar. Normalmente o ensaio *in situ* é conduzido numa galeria de reconhecimento onde é mais fácil encontrar pontos de apoio para os equipamentos de actuação hidráulica que aplicam as forças normal e de corte à amostra [1] [12]. Estes ensaios em grande escala são raros devido ao seu

custo e só se justificam em projectos de grandes escavações com condições geotécnicas adversas.

Mais comum é a realização de ensaios de corte e deslizamento de amostras de discontinuidades, normalmente retiradas de tarolos de sondagens. Existem equipamentos portáteis onde provetes cilíndricos contendo uma discontinuidade e encabeçados em blocos de cimento ou betão são ensaiados ao corte e deslizamento [4] [5] [6]. No entanto a informação obtida com este tipo de equipamento, apesar de imediata, é limitada a valores baixos das forças normal e de corte e, em muitos casos, sem medição dos deslocamentos produzidos na amostra.

Os equipamentos de laboratório para este tipo de ensaios permitem já a medição de deslocamentos e a realização de carregamentos normais e tangenciais cíclicos [2] [3] [7] [8] [9] [11] [13]. Permitem mais graus de liberdade que os equipamentos portáteis e a possibilidade da velocidade de corte e deslizamento ser constante durante o ensaio. Este tipo de equipamentos permite assim uma caracterização mais completa do comportamento mecânico das juntas. Nessa perspectiva inclui-se o protótipo descrito neste documento. A Figura 1 mostra um vista geral do equipamento cujos componentes, parte dos quais indicados no Quadro 1, foram seleccionados ou desenhados pelo autor em 1991 na sequência de um projecto financiado pelo Programa Ciência. Mais recentemente, o equipamento tem sido modificado e completado para aumentar a sua rigidez, precisão e automatizar todas as operações de execução e controlo de ensaios. Foi instalado um sistema hidráulico de montagem da amostra e construídas duas caixas de controlo e aquisição de dados ligadas a um computador com um programa específico que permite a visualização de vários valores e gráficos durante a execução do ensaio. O sistema electrónico de comando contém vários componentes de segurança activos para evitar eventuais danos no equipamento.

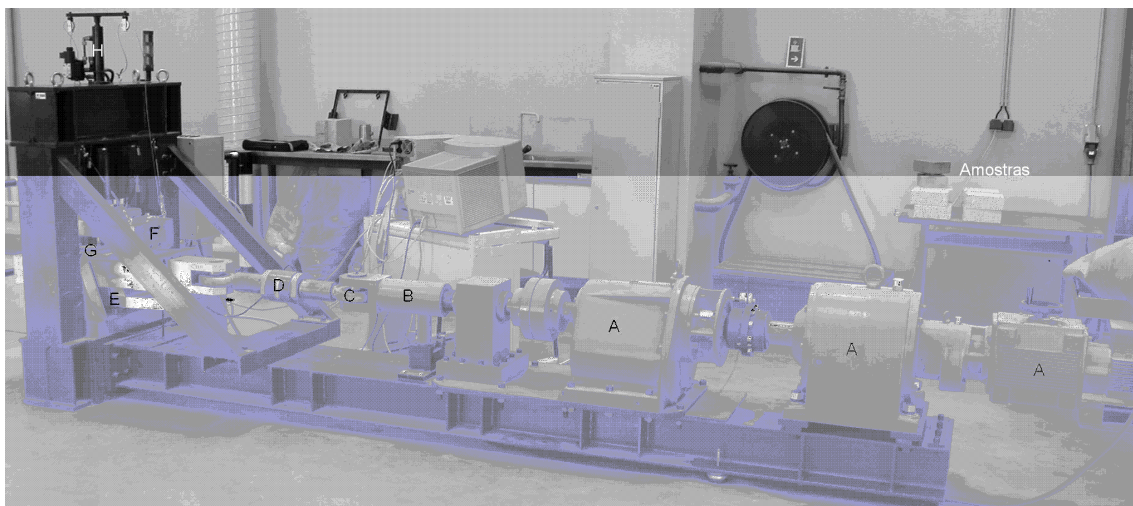


Figura 1 – Equipamento para ensaio de juntas rochosas

2. ESPECIFICAÇÕES DO EQUIPAMENTO

A estrutura de montagem dos vários componentes do equipamento foi desenhada de modo a ter uma grande rigidez. Está posicionada sobre elementos isoladores de vibrações e as suas dimensões em comprimento, largura e altura são, respectivamente, 5, 2 e 1,5 m. O seu grande comprimento justifica-se com a opção de alinhar segundo um mesmo eixo (x) o moto-variador

Quadro 1- Componentes do equipamento

	Descrição	Capacidade
A	Moto-variador e redutor	2,2kW/1500 rpm
B	Parafuso sem-fim	5 cm de curso
C	Rótulas	
D	Célula de tracção/compressão	500 kN ou 100 kN
E	Parte inferior da caixa de corte	70 mm
F	Parte superior da caixa de corte	70 mm
G	Amostra	200×200×150 mm ³
H	Elevador	

eléctrico, o redutor, o parafuso sem fim, as rótulas esféricas, a célula de tracção-compressão e a caixa de corte (Figura 1). Este eixo (x) pertence também ao plano de corte imposto pela geometria da caixa de corte. Esta pode conter uma amostra com uma altura máxima de 150 mm e cuja superfície de corte pode ter uma área máxima de 200×200 mm². No entanto, só em casos muito específicos é possível ensaiar uma amostra com dimensões iguais às da caixa. Como exemplo podem referir-se as amostras de juntas de alvenaria, argamassadas ou não, e as juntas de betonagem. Nestes casos as amostras são preparadas de acordo com o volume disponível da caixa de corte de modo que o plano a meia altura coincida com o plano de corte. A maior parte das juntas naturais são recolhidas em tarolos de forma cilíndrica recolhidos em sondagens, pelo que nestes casos é necessário encabeçar as duas partes da amostra em blocos de cimento de modo que o plano da descontinuidade fique coincidente com o plano médio da caixa de corte (plano xy). Entre os dois blocos de encabeçamento deverá existir uma folga, envolvendo a amostra da descontinuidade a ensaiar, entre 1 e 2 cm, dependendo da rugosidade da superfície.

A parte superior da caixa de corte tem 5 graus de liberdade (2 deslocamentos - y, z; 2 rotações - x, y). A parte inferior da caixa tem um grau de liberdade (x) imposto por um sistema de rolamentos lineares em V. Um sistema alternativo de placas de fricção permite ainda a rotação segundo o eixo z. Dois deslocamentos horizontais e quatro deslocamentos verticais são medidos por transdutores de grande precisão posicionados em pontos fixos, respectivamente, na caixa inferior e na caixa superior. Os deslocamentos verticais medidos em quatro pontos diferentes permitem avaliar a dilatação e eventuais rotações da parte superior da amostra durante o ensaio de corte. O valor máximo do deslocamento horizontal é de 50 mm e é imposto pela geometria da caixa de corte actual. Dois dispositivos localizados junto do parafuso sem-fim impedem que este limite seja excedido em ambos os sentidos.

O movimento horizontal é normalmente muito lento, facto que contribui para avaliar os parâmetros mecânicos em condições estáticas. Como o deslizamento é imposto de forma mecânica pode garantir-se uma velocidade de deslizamento constante no tempo. A velocidade máxima que se pode alcançar é de 25 mm/hora, no entanto, sendo a velocidade de rotação do moto-variador controlada pelo computador, é possível realizar ensaios de deslizamento com rigidez transversal constante através da alteração do programa.

A força horizontal é aplicada através do movimento do parafuso sem-fim que se situa entre a célula de tracção-compressão e o redutor. Existem duas células deste tipo disponíveis, de 100 e 500 kN, que permitem a execução de ensaios cíclicos em carregamentos transversais sequenciais de tracção/compressão (eixo x). A força normal é aplicada por um actuador hidráulico e controlada por uma célula de compressão, de 100 ou 500 kN. Para uma superfície de 200×200 mm² a tensão normal e a tensão de corte podem atingir o valor máximo de 12,5 MPa.

Duas caixas electrónicas ligadas a um computador controlam todos os procedimentos mecânicos e hidráulicos processando a informação transmitida pelas células de carga, transdutores de deslocamentos e velocidade de rotação, e dispositivos independentes de segurança. O utilizador pode escolher os valores dos parâmetros de controlo do ensaio e detalhar o modo como este se vai processar.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Entre os vários tipos de juntas que podem ser ensaiados no equipamento podem citar-se, para além das descontinuidades naturais (diaclasses, juntas de estratificação, superfícies de fractura, etc.), juntas de alvenaria, juntas argamassadas, juntas de betonagem e juntas de cimentação. Este último exemplo corresponde, por exemplo, à descontinuidade existente entre o tubo metálico para extrair ou armazenar petróleo ou gás natural que é cimentado ao furo no maciço. Neste caso a descontinuidade tem preenchimento de cimento a ligar aço e rocha.

O corte directo de rocha é também possível mas com limitações no tamanho máximo das amostras. A mesma limitação impõe-se no ensaio de juntas de betonagem onde poderá ser necessário utilizar uma percentagem considerável da capacidade máxima da máquina. Tudo depende das dimensões e da resistência do betão a ensaiar.

No conjunto de ensaios já realizados incluem-se descontinuidades em vários tipos de rochas (granitos, granodiorito, corneana e metagrauvaque), juntas de granito argamassadas e juntas de alvenaria de granito. Apresentam-se em seguida alguns resultados parciais de ensaios em juntas rochosas de natureza diferente. Tratam-se de excertos de trabalhos solicitados por várias entidades.

3.1 Ensaio de deslizamento em diaclases de granito

A partir de tarolos de uma sondagem foi retirada uma amostra com 71,5 mm de diâmetro de uma diaclase em granito de grão grosso localizada a uma profundidade de 11,5 m. O ângulo entre o plano da descontinuidade e o eixo da sondagem era de 46°. A amostra com 56 cm² de área foi submetida a 3 ensaios de deslizamento com tensão normal de 200, 400 e 600 kPa. A variação da tensão de corte com o deslocamento transversal nos três ensaios está representada pelas curvas da Figura 2.

No início de cada ensaio a rigidez transversal ou de corte é reduzida. O seu valor vai aumentando até que, a partir de 3 mm de deslocamento horizontal, o comportamento da junta entra numa fase diferente caracterizada por uma rigidez transversal (horizontal) de maior valor. De salientar que a parte inicial da curva inclui não só os ajustes entre as faces da junta mas também o fecho de folgas existentes entre a amostra e partes do equipamento. Na maior parte dos casos opta-se por não apresentar esta parte inicial da curva. A oscilação observada no valor da tensão de corte durante o deslizamento inicial poderá ser explicada em parte pelos ajustes entre as duas faces rugosas da diaclase. A rigidez ao corte tende a aumentar com o valor da tensão normal.

3.2 Ensaio de carga normal e deslizamento em juntas de alvenaria de granito

As juntas de alvenaria são descontinuidades artificiais em que não existe um encaixe perfeito entre as duas faces tal como acontece na generalidade das diaclases fechadas e pouco alteradas.

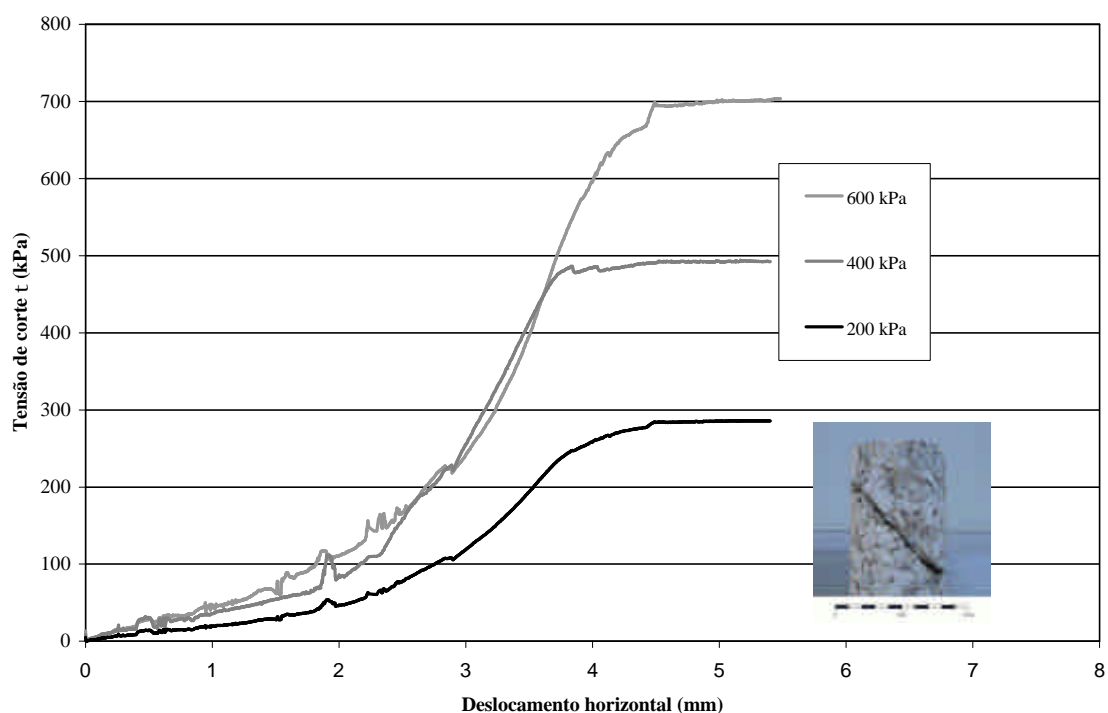


Figura 2 – Ensaio de deslizamento numa diaclase de granito

A rugosidade das juntas de alvenaria é resultado do método de corte e picagem da pedra correspondendo geralmente a um índice característico de baixo valor.

Com o ensaio de carga normal (Figura 3) pretendeu-se caracterizar a rigidez normal da junta. A realização deste ensaio foi em parte controlada pelo operador porque a força normal foi aplicada através de um actuador accionado manualmente. Verifica-se uma deformabilidade inicial elevada (rigidez normal k_n (1) de baixo valor) característica de um ajuste entre as faces da junta seguida de um aumento considerável da rigidez normal. Como é habitual verifica-se que, após uma descarga, existem deslocamentos verticais residuais. Ainda não foram realizados ensaios de carga normal com outro tipo de juntas porque só recentemente foi automatizado este tipo de ensaio.

$$k_n = \frac{\Delta S_n}{\Delta v} \quad (1)$$

Os valores medidos do deslocamento normal podem parecer um pouco elevados mas é muito provavelmente devido ao facto de se tratar de uma junta artificial onde não existe um encaixe perfeito entre as duas faces da descontinuidade. Para um ciclo de carga normal a descontinuidade exhibe um comportamento típico [10] com uma rigidez normal inicial reduzida e o seu aumento a partir de um determinado deslocamento normal. Na descarga verifica-se um deslocamento residual significativo resultante da perda de energia de deformação no esmagamento das pontas de contacto inicial entre as faces da junta. Nos ciclos de carga seguintes seriam de esperar deslocamentos menores para atingir a rigidez normal mais elevada.

No ensaio de deslizamento (Figura 4) verificou-se um ajuste das faces da junta mais reduzido devido ao facto de esta ter sido já pré-comprimida pelo ensaio de carga normal realizado anteriormente.

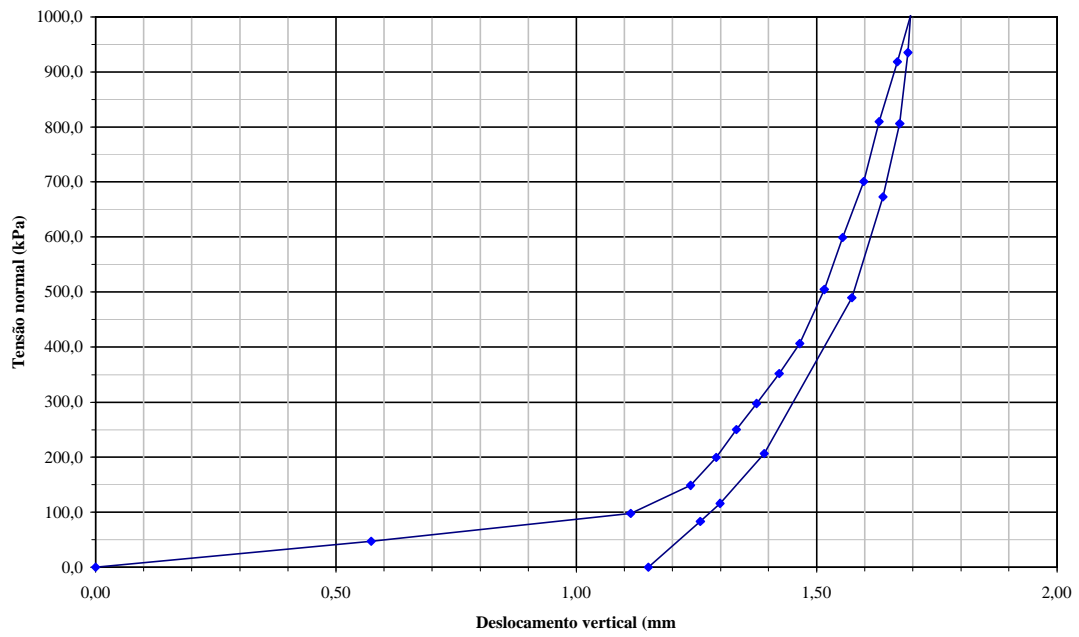


Figura 3 - Tensão normal *versus* deslocamento vertical (junta de alvenaria)

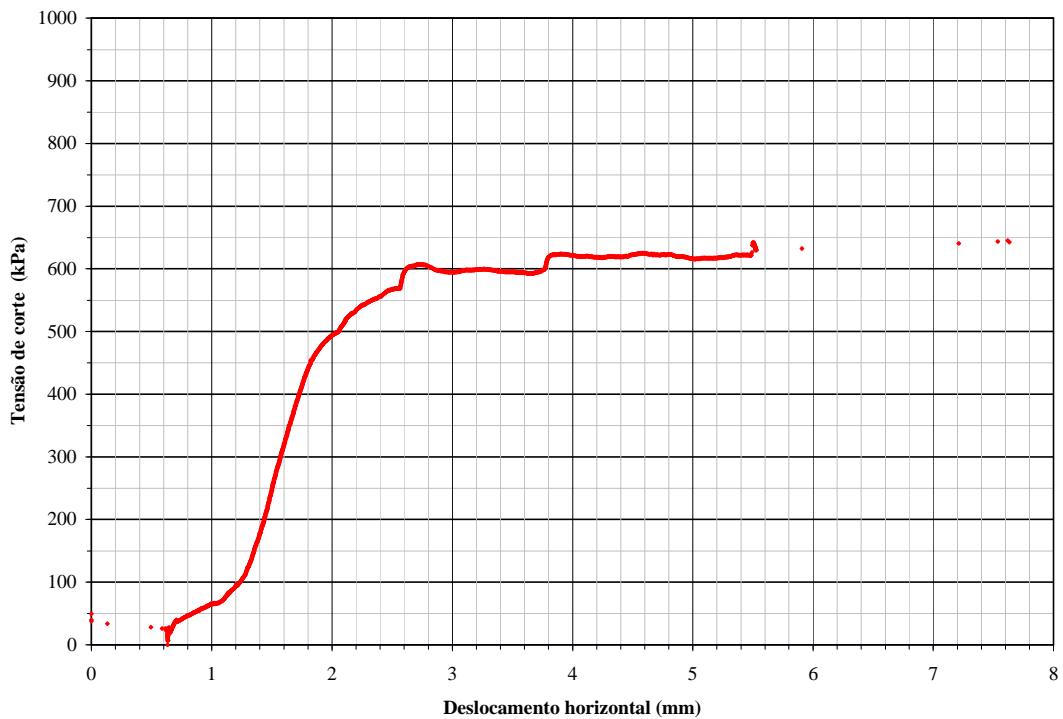


Figura 4 - Tensão de corte *versus* deslocamento horizontal (junta de alvenaria)

Esta descontinuidade não apresenta uma resistência de pico visível porque tem uma rugosidade bastante reduzida.

A deformabilidade de uma descontinuidade é caracterizada por três parâmetros de rigidez, nomeadamente a rigidez normal k_n e a rigidez transversal k_s (2) medida em duas direcções do plano, que normalmente apresenta o mesmo valor. Poderá ser diferente nas descontinuidades que apresentam uma textura com lineações.

$$k_s = \frac{\Delta t}{\Delta u} \quad (2)$$

3.3 Ensaio de corte numa junta argamassada de granito

Este ensaio faz parte de um conjunto em que foram testados vários traços de argamassas em juntas de alvenaria de granito. A argamassa correspondente ao ensaio da Figura 5 tinha um traço de 1:6:0,5:0,5 (cimento:areia:cal:água). Neste tipo de ensaio a rotura é frágil e, dependendo do estado de alteração da rocha e da composição da argamassa, a superfície de corte pode estar contida no volume de argamassa ou coincidir, no todo ou em parte, com uma interface argamassa/granito.

A tensão normal aplicada era de 250 kPa, observando-se uma resistência ao corte inicial de 950 kPa e uma resistência residual de 425 kPa.

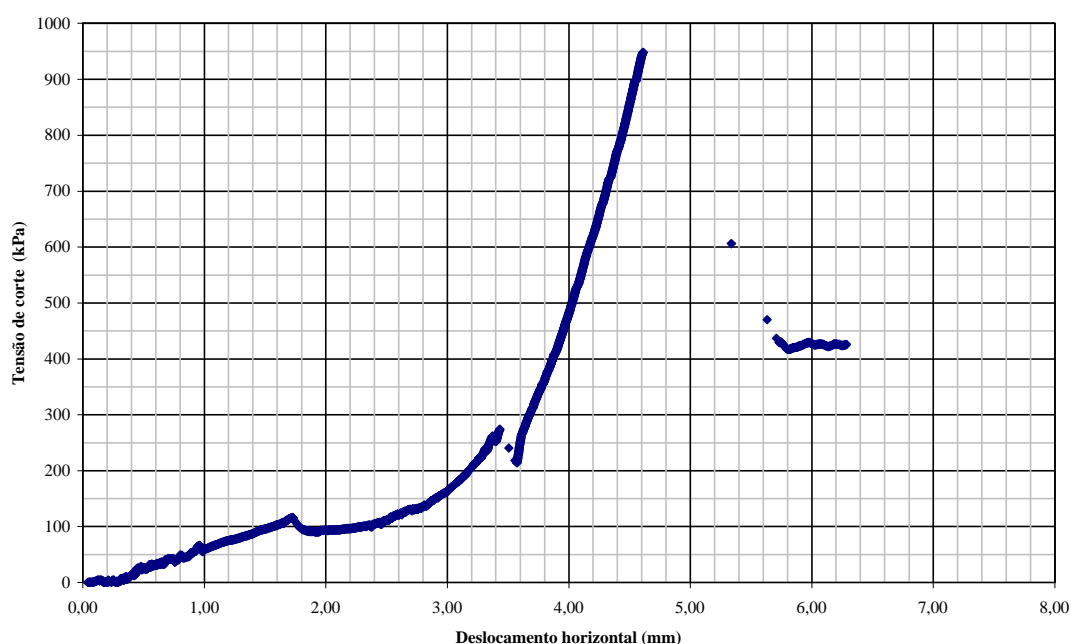


Figura 5 - Tensão de corte *versus* deslocamento horizontal (junta argamassada)

4. PERSPECTIVAS

O desenvolvimento futuro do equipamento pode enquadrar-se em duas vertentes: a programação de ensaios complexos com controlo automático em todas as suas fases e a construção de novos componentes que permitam alargar o conjunto de ensaios disponíveis.

Os ensaios de carga normal e deslizamento de descontinuidades podem ser bastante demorados devido à velocidade reduzida de deslizamento. O controlo automático de todos os componentes do equipamento possibilita a programação de um ensaio de carga normal (que pode ser cíclico), para medição da rigidez normal da descontinuidade, seguido de um ensaio cíclico de deslizamento composto por vários patamares de tensão normal, dispensando a intervenção do operador ou a sua permanência contínua durante os ensaios. Pretende-se desenvolver a automação do equipamento de modo a evitar qualquer intervenção ou permanência durante um ensaio.

As características do equipamento e o conjunto de componentes disponível abre perspectivas para a realização futura de outros ensaios da Mecânica das Rochas. Entre estes são já exequíveis o ensaio de compressão uniaxial e, com a aquisição ou construção de outros componentes, pretende-se executar ensaios de tracção directa, ensaio de tracção por compressão diametral ou ensaio Brasileiro, ensaio de compressão triaxial e ensaios de deformabilidade.

Entre os temas a abordar em futuros ensaios inclui-se a análise dos problemas de escala em ensaios de corte e deslizamento.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Brown, E.T. 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods, Oxford, Pergamon Press.
- [2] Dinis da Gama, C., Caranhola Pereira, H. & Reis e Sousa, M. 2002. Método expedito para determinação das características de corte de rochas e de deslizamento de diaclases. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 1; 461-470.
- [3] Hans, J. & Boulon, M. 2003. A new device for investigating the hydro-mechanical properties of rock joints. Int. Journ. for Num. and Analytical Meth. in Geomechanics; 27: 513-548.
- [4] Hencher, S.R. & Richards, L.R. 1982. The basic friction resistance of sheeting joints in Hong Kong granites. Hong Kong Engineer: 21-25.
- [5] Hoek, E. & Bray, J.W. 1999. Rock Slope Engineering. E & FN Spon Editors.
- [6] Hoek, E. 2000. Practical Rock Engineering. Author Edition.
- [7] Homand, F., Belem, T. & Souley, M. 2001. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads. Int. Journ. for Num. and Analytical Meth. in Geomechanics; 25: 973-999.
- [8] Muralha, J. 1995. Abordagem probabilística do comportamento mecânico de descontinuidades de maciços rochosos. Tese de Doutoramento, IST.
- [9] Muralha, J. 1999. A probabilistic model for the normal compliance of rock joints. 9th International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Paris. Proc. A.A. Balkema, Vol. 1: 499-502.
- [10] Priest, S. D. 1993. Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Ed. Chapman & Hall.
- [11] Quintanilha, J. E. 2004. A laboratory prototype for rock joint testing. EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium: 529-532.
- [12] Rocha, M. 1981. Mecânica das rochas. Lisboa : LNEC.
- [13] Vicente Silvestre, M. V. 1996. Geometrical and hydro-mechanical characterisation of discontinuities. Centre of Engineering Geology, Memoir N° 142, The Netherlands.