

## Repositório ISCTE-IUL

---

Deposited in *Repositório ISCTE-IUL*:

2018-06-20

Deposited version:

Post-print

Peer-review status of attached file:

Peer-reviewed

Citation for published item:

Resende, R., Muralha, J., Ramos, A. L. & Fortunato, E. (2016). Estudo do contacto e fecho em descontinuidades rochosas através de digitalização tridimensional. In Manuel Matos Fernandes, António Topa Gomes (Ed.), 15º Congresso Nacional de Geotecnia. Porto: Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Further information on publisher's website:

--

Publisher's copyright statement:

This is the peer reviewed version of the following article: Resende, R., Muralha, J., Ramos, A. L. & Fortunato, E. (2016). Estudo do contacto e fecho em descontinuidades rochosas através de digitalização tridimensional. In Manuel Matos Fernandes, António Topa Gomes (Ed.), 15º Congresso Nacional de Geotecnia. Porto: Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.. This article may be used for non-commercial purposes in accordance with the Publisher's Terms and Conditions for self-archiving.

---

### Use policy

Creative Commons CC BY 4.0

The full-text may be used and/or reproduced, and given to third parties in any format or medium, without prior permission or charge, for personal research or study, educational, or not-for-profit purposes provided that:

- a full bibliographic reference is made to the original source
- a link is made to the metadata record in the Repository
- the full-text is not changed in any way

The full-text must not be sold in any format or medium without the formal permission of the copyright holders.

---

# ESTUDO DO CONTACTO E FECHO EM DESCONTINUIDADES ROCHOSAS ATRAVÉS DE DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

## 3D SCANNING FOR THE STUDY OF CONTACT AND CLOSURE OF ROCK JOINTS

Resende, Ricardo; *Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL), ISTAR-IUL, Lisboa, Portugal, jrpre@iscte.pt*

Muralha, José; *Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, jmuralha@lnec.pt*

Ramos, Ana; *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, ana.l.g.ramos@gmail.com*

Fortunato, Eduardo; *Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, efortunato@lnec.pt*

### RESUMO

As descontinuidades marcam de forma decisiva a deformabilidade e a resistência, mas também a condutividade hidráulica e a transmissão de vibrações em maciços rochosos. Se a medição de certas características do material rochoso é uma tarefa corrente, já a caracterização da topografia das superfícies é difícil de medir e quantificar de forma inequívoca. Trabalhos anteriores empregam métodos de digitalização com e sem contacto e são múltiplas as abordagens para a análise da topografia das paredes de descontinuidades. No entanto, a maioria foca a caracterização individual de cada superfície sem avaliar a interação entre as paredes. Este trabalho apresenta um equipamento facilmente disponível para a digitalização de superfícies rochosas em ambiente laboratorial e o tratamento e análise dos resultados através de algoritmos de ajuste das superfícies e de mapeamento e cálculo de áreas de contacto e volumes de vazio durante o fecho das juntas, tendo-se encontrado resultados interessantes para o estudo das propriedades mecânicas, estáticas e dinâmicas, e da condutibilidade hidráulica.

### ABSTRACT

It is well established that joints are the most defining features of fractured rock masses and joint behaviour is mainly defined by wall strength, deformability and geometry. Many authors have employed both contact and non-contact scanning methods and multiple approaches to the analysis of rock surfaces, but most focus on the individual surface characterization without appraising wall to wall interaction. This work presents an easily available equipment for laboratory scanning of rock joints and the development of algorithms for surface fitting and mapping of contact areas and void volumes during closure. The analysis delivers interesting results regarding static and dynamic compliance and hydraulic conductivity of joints.

### 1 - INTRODUÇÃO

Nos maciços constituídos por rochas compactas a resistência, deformabilidade, condutividade hidráulica e dinâmica são comandadas pelas descontinuidades, que por sua vez são definidas pela sua rugosidade, resistência e rigidez do material das paredes e coeficiente de atrito básico. A rugosidade tem uma grande influência na resistência de pico e na resistência tangencial residual (Patton, 1966; Barton, 1973). A rugosidade das paredes e a sua posição relativa definem o volume vazio entre elas e assim condicionam a condutividade hidráulica (seja o fluido água, petróleo, gás ou outro), assim como o potencial de armazenamento (Elliott et al, 1985; Gale, 1990). Por outro lado, os contactos rocha-rocha controlam a resistência e deformabilidade, bem como os coeficientes de reflexão e transmissão dinâmicos (Cook, 1992). Por conseguinte, a topografia das superfícies tem sido estudada desde o início da mecânica das rochas e as técnicas para proceder à sua medição e processar os dados daí resultantes são alvo de atenção por um número considerável de investigadores.

Surgem duas dificuldades no estudo da rugosidade: primeiro, enquanto as propriedades de rocha são facilmente testadas e os resultados são fáceis de compreender, interpretar e utilizar, a sua rugosidade é difícil de medir e a interação entre as duas paredes de uma junta é ainda mais difícil de examinar. Em segundo lugar, quando os dados completos estão disponíveis não há uma única forma de, a partir deles, inferir ou estimar a deformabilidade, resistência, comportamento hidráulico ou dinâmico da junta.

Para além das ferramentas da geoestatística clássicas ou das análises fractais ou de Fourier (e.g., Gentier et al, 2000; Belém et al, 2000; Chilès & Delfiner, 2012), que têm como principal desvantagem considerarem apenas o comportamento de cada parede isolada, a simulação micromecânica tem

apresentado resultados promissores, tal como sugerido por Cundall (2000); Park & Song (2008) ou Resende et al (2010). As maiores dificuldades deste tipo de estudo estão associadas ao seu alto custo computacional (sendo que, no entanto, este aspeto é cada vez menos um obstáculo), e às poucas descrições precisas e de qualidade das superfícies rochosas. Atualmente há várias tecnologias disponíveis, descritas, por exemplo, em Ramos (2013), que permitem produzir dados em perfis 2D ou superfícies 3D.

Este trabalho apresenta um método para digitalizar superfícies de todos os tipos de rochas e minerais, incluindo os cristais, que frequentemente colocam problema aos métodos sem contacto. A superfície é percorrida por uma agulha que regista a altura em intervalos regulares. Os dados da rugosidade das descontinuidades recolhidos neste estudo estão disponíveis para *download*.

A amplitude dos mapeamentos tridimensionais é comparada com os valores derivados do bem conhecido parâmetro JRC – Joint Roughness Coefficient. Depois, usando um algoritmo de ajuste de superfícies tridimensionais, os contactos e o espaço vazio são obtidos através da análise combinada das superfícies superior e inferior, mostrando como estas interagem e fornecendo uma descrição espacial dos contactos e do espaço vazio da abertura da junta durante a reprodução numérica de um ensaio de fecho.

## 2 - EQUIPAMENTO E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

As juntas rochosas foram retiradas dos carotes de 120 mm recolhidos a 60-80 m de profundidade no local de construção da central hidroelétrica do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua da EDP. Trata-se de um granito de grão médio com duas micas e fenocristais de feldspato, classificado como W1-W3 e com RQD de 50 a 100. Algumas superfícies das juntas apresentam películas finas de óxido avermelhado e pequenas deposições de argila branca. Seguiu-se uma preparação das amostras semelhante à dos ensaios de deslizamento: as amostras de cerca 100 x 120 milímetros foram cortadas de cada carote e encabeçadas na sua posição natural em argamassa de cimento.

O equipamento de digitalização (Figura 1) é uma fresa/digitalizadora de precisão modelo MDX-20 do fabricante Roland, pertença do laboratório FabLab da EDP localizado em Lisboa (<http://fablabedp.edp.pt>). Este equipamento está normalmente disponível na maioria dos FabLabs em todo o mundo onde pode ser usado livremente ou com pequeno custo (consultar <http://wiki.fablab.is/wiki/Portal:Labs> para aceder à lista de FabLabs). A MDX-20 opera tanto como uma fresa controlada numericamente (CNC) de 3 eixos, que escava materiais macios, ou, substituindo o eixo por uma agulha conectada a um sensor piezoelétrico, como *scanner* de precisão. Pode digitalizar superfícies de dimensões horizontais máximas de 203 x 152 mm e altura até 60 mm com resoluções de 0,05 e 0,025 mm nos planos horizontal e vertical, respetivamente.

Testes de repetibilidade e estudos de resolução máxima mostraram que o procedimento seguido para a digitalização das descontinuidades era suficientemente preciso e confiável (Ramos, 2013) e que o nível de detalhe fornecido pela resolução de 0,5 mm é adequado ao tamanho de grão do granito e à rugosidade da superfície, o que pode ser visualmente confirmado na Figura 2. Quanto ao tempo de operação, uma superfície de 10.000 a 15.000 mm<sup>2</sup> é digitalizada em 6 a 8 horas com uma resolução de 0,5 mm, o que, tendo em conta que duplicar a resolução corresponde a quadruplicar o tempo, foi considerado como um compromisso aceitável.



Figura 1 - Equipamento de digitalização Roland MDX-20 em operação.

Quando comparada com métodos sem contacto (por laser ou infravermelhos), a digitalização mecânica é mais demorada mas apresenta algumas vantagens. A digitalização pode decorrer sem supervisão após o lançamento do processo, o equipamento é relativamente económico e está facilmente disponível, a precisão e a resolução estão perfeitamente definidas e os resultados são definidos numa grelha numérica regular mais conveniente para o processamento evitando erros decorrentes da interpolação numérica. Para além disso, os métodos sem contacto devem ser calibrados antes de cada utilização, exigem um posicionamento cuidadoso das amostras e a utilização de alvos de posicionamento e não funcionam bem com rochas com cristais refletivos como, por exemplo, micas ou quartzo. Finalmente, através de métodos de contacto é possível obter resultados na mesma localização em análises consecutivas sem pós-processamento adicional, o que é especialmente útil para estudar o desgaste da superfície resultante de ensaios de corte ou de fecho.

### 3 - ANÁLISE DE RESULTADOS

As características geométricas da rugosidade de discontinuidades rochosas, tanto em 2D e em 3D, têm sido definidas por diversos parâmetros, sendo o mais intuitivo a amplitude, mas existindo outros mais complexos baseados no ângulo de inclinação ou nas áreas da superfície total e nominal. Em trabalhos anteriores (Ramos, 2013 e Resende et al, 2014), os autores apresentaram o cálculo da dimensão fractal, correlograma, semivariograma, coeficiente R, entre outros.

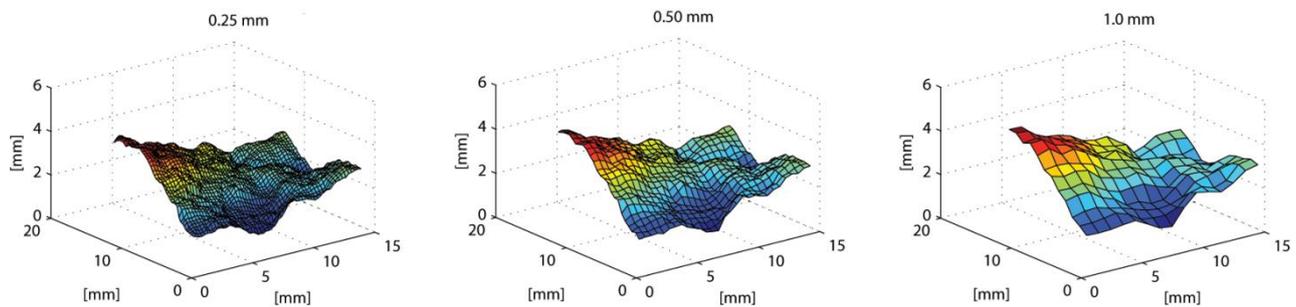


Figura 2 – Descontinuidade rochosa com 15x15 mm digitalizada com resoluções horizontais de 0,25, 0,5 e 1,0 mm.

#### 3.1 - Amplitude de superfícies isoladas

Para avaliar a variabilidade da amplitude na direção mais longa da amostra, que é direção da aplicação da força tangencial do ensaio de deslizamento, apresentam-se na Figura 3 as distribuições das amplitudes das metades superiores e inferiores das oito juntas por meio de diagramas do tipo *box-whiskers*, mostrando que as duas metades da mesma junta têm, em geral, distribuições semelhantes. Por outro lado, os métodos semi-empíricos de classificação 2D baseados na amplitude, amplamente usados para inferir a deformabilidade e resistência de juntas (Barton & Choubey, 1977) podem, se aplicados às superfícies 3D, conduzir a resultados desastrosos, tal como é demonstrado abaixo. A amplitude de um perfil pode ser utilizada para avaliar o JRC de uma através da equação [1] (Barton, 1981) onde  $l$  é o comprimento do perfil e  $a$  é a sua amplitude:

$$JRC = [450 + 50 \log_{10} l] \frac{a}{l} \quad [1]$$

A aplicação da expressão [1] aos dados da Figura 3, correspondentes não à amplitude de um perfil seleccionado, mas às amplitudes de todos os perfis na direção do deslizamento resulta em valores de JRC completamente errados, em muitos casos superiores a 20. Assim, para novos conjuntos de dados são necessários novos métodos, e a maior abundância de dados não substitui a avaliação humana informada pela experiência.

A Figura 4 mostra os histogramas de amplitude da base e topo de duas juntas com características de rugosidade distintas. Da análise das imagens verifica-se que, primeiro, o domínio de amplitudes é maior na junta 3 (à esquerda) e, depois, que há maior concordância entre a base e o topo na mesma descontinuidade (menor distância entre as curvas acumuladas e melhor concordância entre as amplitudes em cada intervalo de amplitude), o que pode levar à conclusão de que esta junta está mais bem ajustada e que terá um fecho mais rápido. É, no entanto, precipitado tirar tal conclusão da análise estatística global das amplitudes das duas metades. Com efeito, especialmente sob baixa tensão e nas fases iniciais de corte e fecho, a resposta é comandada por um pequeno número de pontos de contacto, pontos esses correspondentes a desajustes locais que serão estatisticamente desprezáveis. Tal como foi demonstrado por Cook (1992) a proximidade entre pontos de contactos tem uma grande influência na rigidez e na geometria dos canais de fluxo, devido à deformação elástica da matriz rochosa dos contactos.

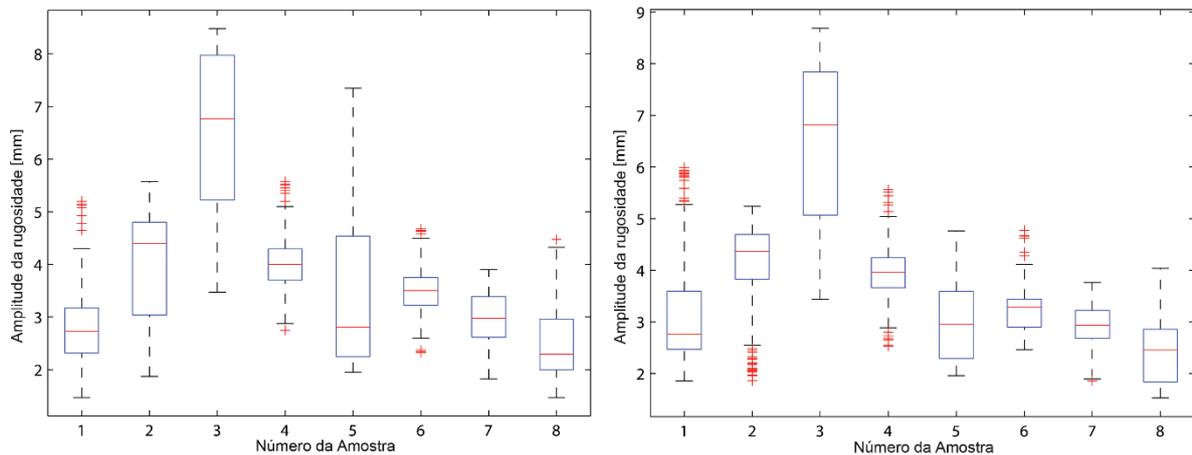


Figura 3 – Diagramas de amplitude da rugosidade das bases (esq.) e topos (dir.) todas as juntas ensaiadas. A marca central representa a mediana, os limites da caixa os quartis 25 e 75%, os bigodes marcam o limite dos dados excluindo outliers, representados por cruzes encarnadas.

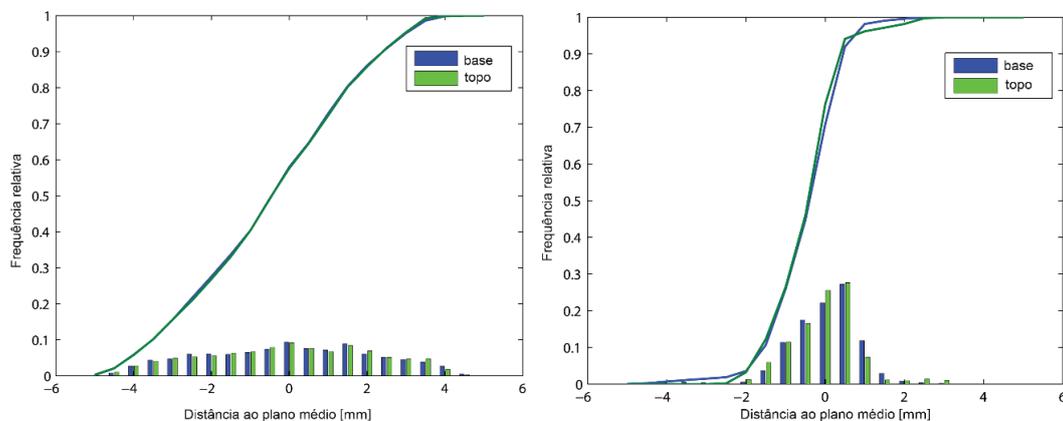


Figura 4 – Histogramas de frequência e curvas cumulativas de amplitude medida relativamente à média da base e topo das juntas 3 (esq.) e 5 (dir.).

### 3.2 - Ajustamento de superfícies e interação base-topo durante o fecho

A interação entre as superfícies das juntas comanda a evolução do comportamento estático, dinâmico e hidráulico, sendo este último regido pela abertura e pela forma desse espaço vazio entre as faces das discontinuidades. A observação, direta ou indireta, da interação das paredes é, no entanto, difícil. Trabalhos anteriores empregaram a injeção de resinas ou de metal líquido que, após a solidificação permitem a medição dos espaços vazios e contactos (Pyrak-Nolte et al, 1987), mas apenas num estágio do teste de fecho ou deslizamento. Também já foram usados o raio-x, a tomografia computadorizada (TAC) ou a ressonância magnética, mas estes métodos são dispendiosos e fornecem imagens de baixa resolução espacial (Re & Scavia, 1999; Dijk et al, 1999). Os métodos indiretos como os que se descrevem de seguida, por outro lado, inferem o comportamento global interno da junta através da topografia das superfícies.

Para encontrar a posição relativa “acasalada” das superfícies que representam a topografia das metades inferior e superior de uma junta utiliza-se o seguinte procedimento numérico. Em primeiro lugar, o topo é invertido e rodado, uma vez que foi digitalizado voltado para cima. Depois, é deslocado no seu plano e rodado em torno dos três eixos em pequenos incrementos, enquanto é calculada a soma dos desvios entre as superfícies, resultando um valor do afastamento global para cada combinação destes cinco graus de liberdade. Os deslocamentos e rotações correspondentes à distância mínima são considerados a posição “acasalada”. A parte superior é, em seguida, descida até se atingir o primeiro contacto. Quando isso acontece, a superfície superior é rodada em torno dos três eixos com fulcro da rotação no ponto de contacto inicial, até se atingir um segundo ponto de contacto, considerando-se então que as superfícies estão ajustadas e nulo o deslocamento normal da junta, visto que se verificou que o terceiro ponto de contacto e os posteriores ocorrem quase simultaneamente com o segundo.

O ensaio de fecho é então numericamente simulado fazendo descer a superfície superior por pequenos incrementos, correspondentes a aumentos do deslocamento normal. Ao longo do ensaio numérico calculam-se mapas das áreas de contacto e dos volumes de vazios, assim como os volumes e áreas de penetração e de vazios totais, a abertura média e o rácio entre área de contacto e a área total. As equações [2] e [3] permitem calcular a área acumulada de contacto e o volume de penetração:

$$Area\ Contacto = \sum_{i=1}^{colunas} \sum_{j=1}^{linhas} res^2, se\ h_{ij,topo} \leq h_{ij,base} \quad [2]$$

$$Volume\ Penetra\c{c}\tilde{a}o = \sum_{i=1}^{colunas} \sum_{j=1}^{linhas} (h_{ij,base} - h_{ij,topo}) \cdot res^2, se\ h_{ij,topo} \leq h_{ij,base} \quad [3]$$

sendo  $res$  a resolu\c{c}\tilde{a}o da digitaliza\c{c}\tilde{a}o e portanto  $res^2$  \u00e9 a \u00e1rea correspondente a cada ponto  $i,j$  da matriz de rugosidade e  $h_{ij}$  \u00e9 o valor da rugosidade em cada ponto, definido como uma cota topogr\u00e1fica. Este procedimento foi aplicado \u00e0s oito amostras, sendo apresentados nas Figura 5 e 6 os resultados para as juntas 3 e 5, respetivamente.

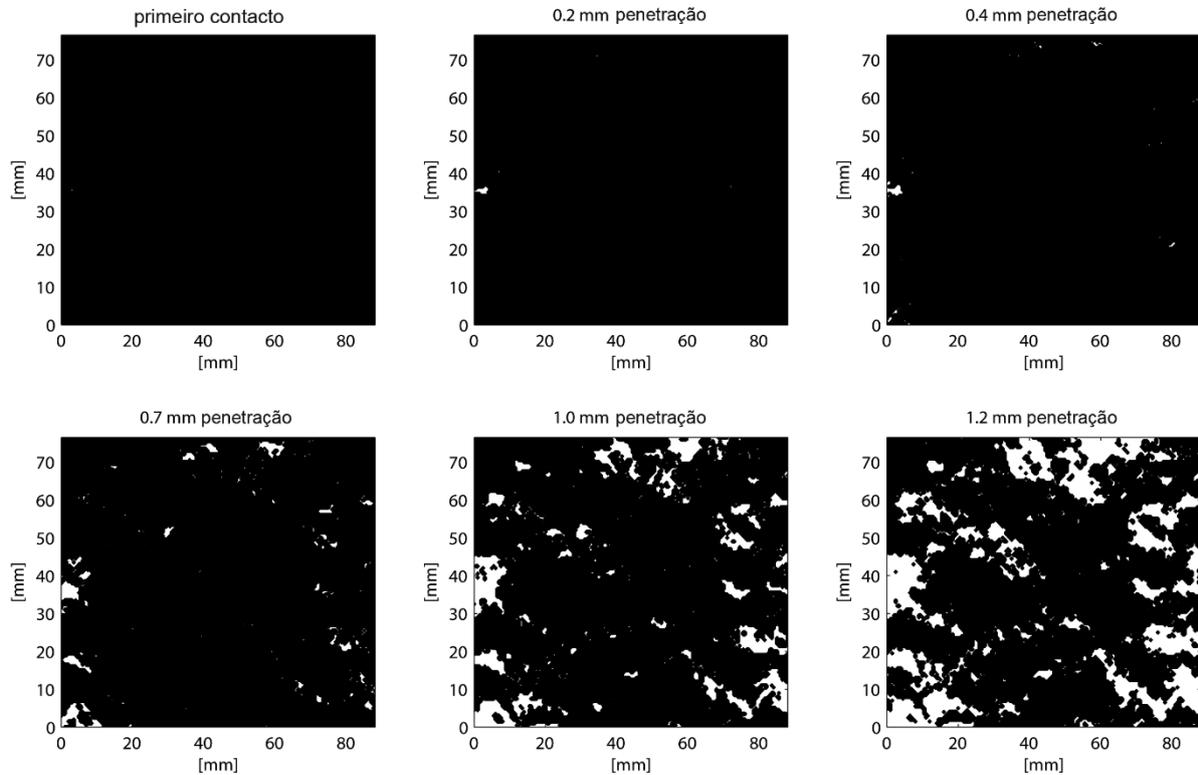


Figura 5 - Evolu\c{c}\tilde{a}o do contacto (\u00e1reas a branco) durante o ensaio num\u00e9rico de fecho da junta 3.

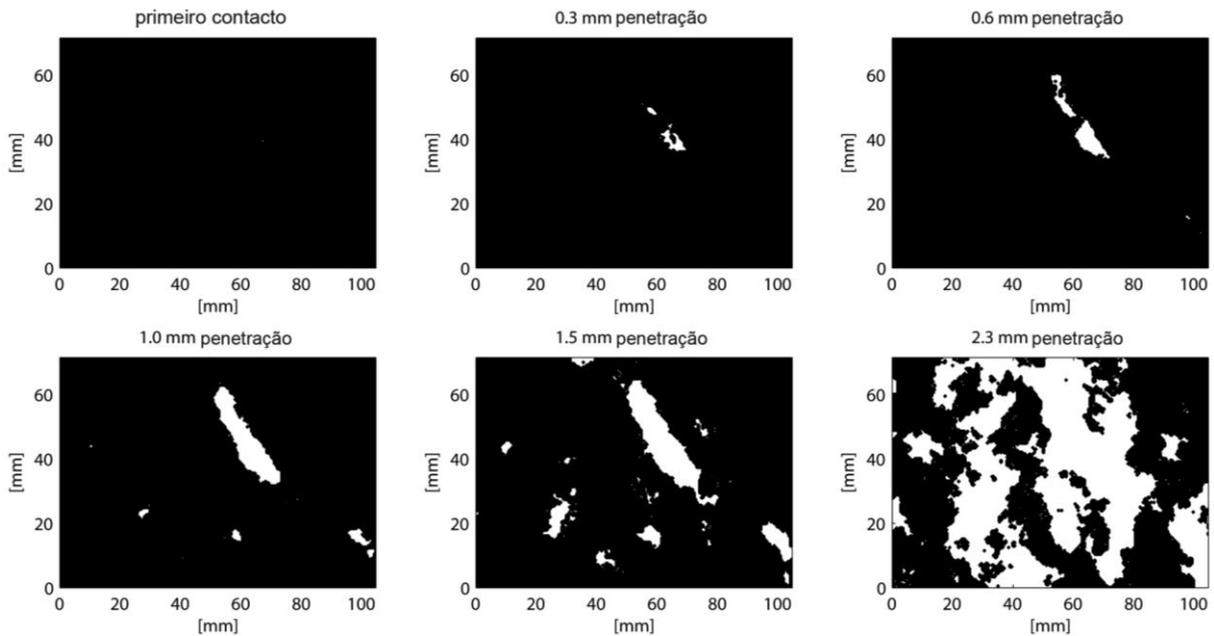


Figura 6 - Evolu\c{c}\tilde{a}o do contacto (\u00e1reas a branco) durante o ensaio num\u00e9rico de fecho da junta 5.

A Figura 7 mostra as curvas de evolu\c{c}\tilde{a}o do volume e da \u00e1rea de penetra\c{c}\tilde{a}o dos contactos com o deslocamento normal para as juntas das oito amostras. Nas juntas reais n\u00e3o ocorre interpenetra\c{c}\tilde{a}o, mas sim deforma\c{c}\tilde{a}o revers\u00edvel e irrevers\u00edvel dos contactos, gerando incrementos de tens\u00e3o e for\c{c}\tilde{a}as de rea\c{c}\tilde{a}o que n\u00e3o s\u00e3o diretamente considerados neste estudo, sendo expect\u00e1vel que o comportamento de

fecho real seja uma combinação das tendências registadas nas curvas de área de contacto e volume de penetração.

Finalmente, a Figura 8 permite inferir como a condutividade hidráulica e a capacidade de armazenamento podem evoluir durante o fecho das juntas, pois estes parâmetros dependem da abertura média, calculada como o volume do vazio entre as superfícies dividido pela área nominal comum. Pode-se concluir que, tal como observado em ensaios de laboratório (Cook 1992; Barton & Quadros 1997), a relação entre abertura e fecho é linear apenas em algumas juntas e na fase inicial do teste. Além disso, mesmo sob valores de fecho correspondentes a tensões de compressões extremas, persiste uma abertura residual que corresponde ao denominado fluxo irreduzível. Estas curvas não dão informação sobre a organização do espaço de contacto e vazio durante encerramento: existem canais que cruzam a junta facilitando a circulação de fluido, ou os vazios estão dispersos e isolados? Este tipo de informação pode ser induzido qualitativamente da observação de mapas de contacto, como os das Figuras 5 e 6, mas também pode ser obtido utilizando algoritmos apropriados da análise espacial das áreas de contactos, penetração ou vazio.

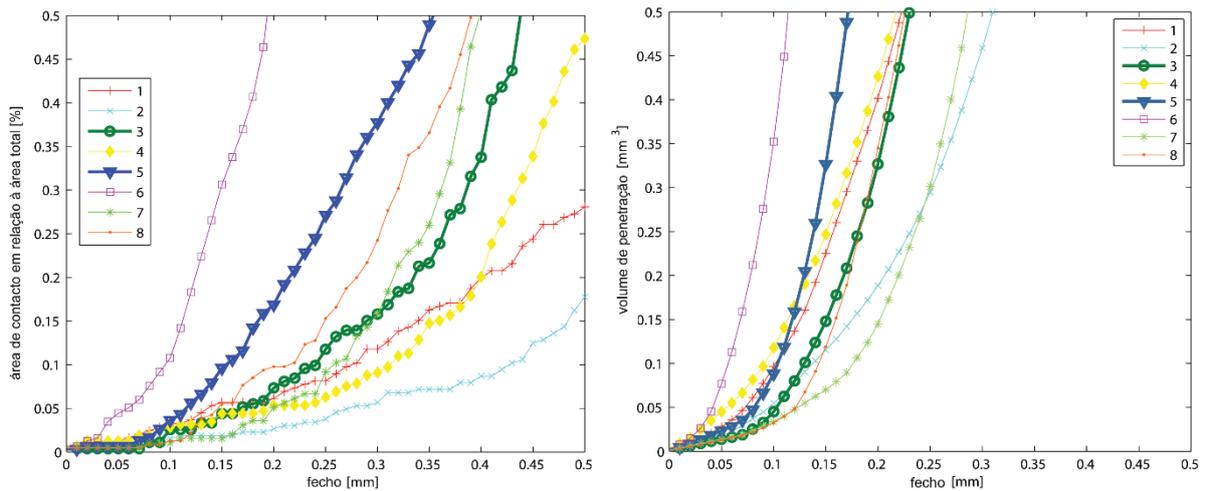


Figura 7 – Área de contacto relativa (esquerda) e volume de penetração (direita) versus fecho.

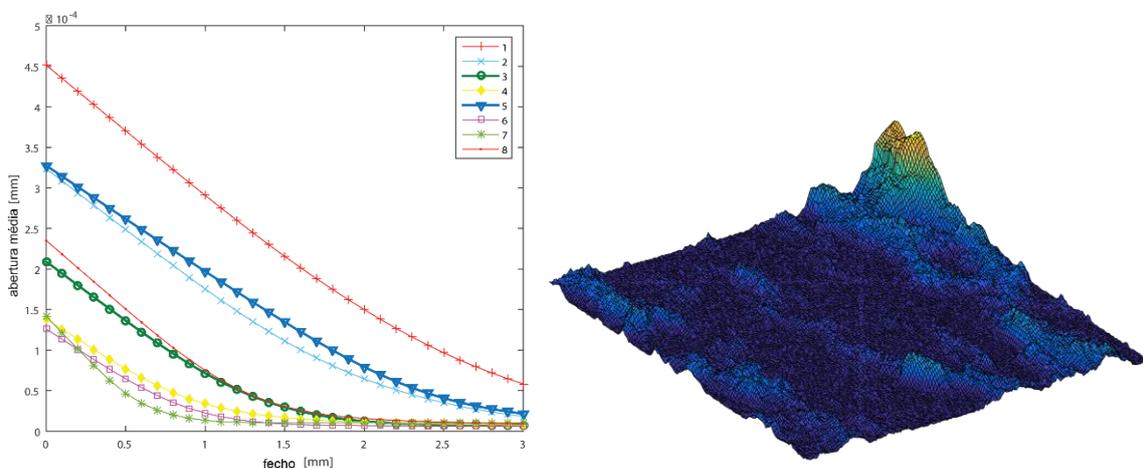


Figura 8 – Relação no início do ensaio de fecho entre a abertura média e o fecho (à esquerda) e o volume de vazios na junta 5 (direita).

#### 4 - CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Este trabalho apresenta aspetos da digitalização tridimensional de discontinuidades rochosas e da posterior análise das superfícies obtidas. Podem destacar-se como aspetos relevantes: a utilização de um equipamento, amplamente disponível e barato, vindo de outros campos de aplicação (design e engenharia de materiais), que se revelou eficiente na obtenção dos dados necessários à análise pretendida; a aplicação de uma abordagem eficaz para analisar de forma conjunta as superfícies tridimensionais das partes superior e inferior de discontinuidades, estimando a área de contacto, o volume de vazio e outras métricas em função do fecho.

Na simulação do fecho de descontinuidades apresentada foram assumidas simplificações significativas, sendo a mais relevante a não inclusão das forças geradas quando as asperezas das faces opostas se tocam e comprimem. Os autores acreditam que a forma mais adequada de incluir este fator são os códigos numéricos de análise micromecânica, tal como o PFC3D. As descrições numéricas das superfícies podem ser importadas para estes códigos, sendo depois possível integrar rigidez de contacto, resistência e deformabilidade da rocha, simulando assim o fecho, o corte e também o comportamento hidráulico e dinâmico.

É de realçar que os dados obtidos neste estudo são agora disponibilizados para utilização por parte de outros investigadores em Resende et al (2015).

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à EDP (Energias de Portugal) a autorização para o uso das amostras de descontinuidades do maciço da Barragem de Foz Tua e ao FabLab da EDP por permitir o uso do equipamento de digitalização.

## **REFERÊNCIAS**

- Barton, N. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, Vol. 7, pp.287–332.
- Barton, N. & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, Vol. 10, No 1-2, pp.1–54.
- Barton, N. (1981). Shear strength investigations for surface mining. 3rd International Conference on Stability in Surface Mining, Vancouver, Canada, pp.176–196.
- Barton, N. & Quadros, E. de (1997). Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No 3-4, pp 252.e1–252.e14.
- Belem, T., Homand-Etienne, F. & Souley, M. (2000). Quantitative Parameters for Rock Joint Surface Roughness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp.217–242.
- Chilès, J.-P. & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*, 2ª Edição, New York: Wiley.
- Cook, N.N. (1992). Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 29, No. 3, pp.198–223.
- Cundall, P.A. (2000). Numerical experiments on rough joints in shear using a bonded particle model. In F. K. Lehner & J. L. Urai, eds. *Aspects of Tectonic Faulting (Festschrift in Honour of Georg Mandl)*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 1–9.
- Dijk, P., Berkowitz, B. & Bendel, P. (1999). Investigation of flow in water-saturated rock fractures using nuclear magnetic resonance imaging (NMRI). *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 2, pp.347–360.
- Elliott, G.M., Brown, E.T., Boodt, P.I., Hudson, J.A. (1985). Hydromechanical behaviour of joints in the Carnmenellis granite, S.W. England. In O. Stephansson & P. G. Centek, eds. *Fundamentals of Rock Joints: Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*. Bjorkliden, Sweden, pp. 249–258.
- Gale, J. (1990). Hydraulic behaviour of rock joints. In N. Barton & O. Stephansson, eds. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*. Loen, Norway: Balkema, Rotterdam, pp. 351–362.
- Gentier, S., Gentier, S., Riss, J., Archambault, G., Flamand, R., Hopkins, D. (2000). Influence of fracture geometry on shear behavior. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 27, No. 1-2, pp. 161-174.
- Park, J.-W. & Song, J.-J. (2008). Numerical simulation of direct shear test on rock joint using PFC3D. In A. Majidi, ed. *5th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS5)*. Tehran, Iran: Curran Associates, pp. 1159–1166.
- Patton, F.D. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. In M. Rocha, ed. *Proc. 1st Congress of International Society for Rock Mechanics (ISRM)*. Lisbon, Portugal, pp. 509–513.
- Pyrak-Nolte, L.J., Cook, J.M. & Myer, L.R. (1987). Seismic visibility of fractures. In I. W. Farmer, ed. *28th US Symposium on Rock Mechanics*. Tucson: Balkema, pp. 47-56.

- Re, F., Scavia, C. (1999). Determination of contact areas in rock joints by X-ray computer tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(7), Vol. 36, No. 7, pp.883–890.
- Ramos, A. (2013). Caraterização e modelação numérica da rugosidade de descontinuidades rochosas. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Resende, R., Muralha, J., Ramos, A.L. & Fortunato, E. (2014). Characterization and Numerical Modelling of the Geometry of Rock Joints. In K. Kishida, ed. ARMS 8 - The 2014 ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium - Rock Mechanics for Global Issues - Natural Disasters, Environment and Energy. Sapporo: International Society for Rock Mechanics.
- Resende, R., Lamas, L.N., Lemos, J.V. & Calçada, R. (2010). Micromechanical modelling of stress waves in rock and rock fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 43, No. 6, pp.741–761.
- Resende, R., Muralha, J., Ramos, A.L. & Fortunato, E. (2015). Rock joint topography: three-dimensional scanning and numerical analysis. *Géotechnique Letters*, Vol. 5, No. 4, pp.318–323.