

CARACTERIZAÇÃO E MODELAÇÃO NUMÉRICA DA RUGOSIDADE DE DESCONTINUIDADES ROCHOSAS

Rock joint roughness characterization and numerical modelling

Ana Luísa Ramos*

Eduardo Fortunato**

Ricardo Resende***

José Muralha****

RESUMO – As descontinuidades dos maciços rochosos influenciam o seu comportamento mecânico e hidráulico e conseqüentemente as obras neles construídas. Este trabalho descreve o desenvolvimento e aplicação de uma técnica de digitalização das superfícies de descontinuidades rochosas que recorre a uma mesa digitalizadora, visando contribuir para a compreensão dos mecanismos de contacto e desgaste. As superfícies numéricas obtidas são analisadas usando parâmetros geoestatísticos que podem ser comparados com parâmetros semi-empíricos, como o JRC, permitindo quantificar a evolução da rugosidade após ensaios mecânicos de compressão ou deslizamento. Os resultados deste trabalho permitiram ainda a geração de descontinuidades que poderão ser usadas futuramente em modelos micromecânicos de partículas para simular o comportamento mecânico e hidráulico de descontinuidades.

SYNOPSIS – Rock joints influence the mechanical and hydraulic behaviour of rock masses and consequently of engineering works built on or in them. This work describes a scanning technique for the description of the roughness of rock joints, aiming at contributing to the analysis of contact and wear mechanisms. The numerical surfaces are characterized by geostatistical parameters that may be compared with empirical parameters, such as JRC, allowing the quantification of the roughness degradation after mechanical shear and compression tests. The results enabled the generation of synthetic surfaces that may be used in micromechanical models for the study of the mechanical and hydraulic behaviour of rock joints.

PALAVRAS CHAVE – Descontinuidades de maciços rochosos; digitalização de superfícies de descontinuidades rochosas, geração de superfícies.

NOTA DO EDITOR – Este artigo foi submetido à Revista Geotecnia em face da atribuição do Prémio Jovens Geotécnicos em Língua Portuguesa de 2014 ao seu primeiro autor, tendo por base a dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ao abrigo do protocolo existente entre estas duas entidades.

* Mestre em Engenharia Civil. E-mail: ana.l.g.ramos@gmail.com

** Investigador Principal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Professor Auxiliar Convocado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. E-mail: efortunato@lnec.pt

*** Professor Auxiliar, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa. E-mail: jrpre@iscte.pt

**** Investigador Principal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: jmuralha@lnec.pt

1 – INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico e hidráulico de um maciço rochoso é condicionado pela existência de descontinuidades, quer se trate de fálhas, superfícies de estratificação, diaclases, superfícies de xistosidade, foliação ou clivagens de fratura. O estudo da resistência ao corte das descontinuidades rochosas implica a análise de diversos fatores que irão influenciar o seu comportamento, como a rugosidade das paredes das descontinuidades, as características resistentes e atríticas do material rochoso das paredes, as tensões normal e tangencial aplicadas na descontinuidade, a condição das descontinuidades ao nível do desgaste, desagregação, presença de materiais de enchimento, presença da água e respetiva pressão (Muralha 1995; Kerstiens, 1999). No caso das diaclases, em que não se verifica um deslocamento tangencial significativo ao longo da superfície de rotura, a rugosidade tem bastante influência na resistência ao deslizamento (tensão máxima de pico e tensão residual). Devido à rugosidade, o deslocamento tangencial das diaclases só pode ocorrer mediante a existência de um deslocamento normal (dilatância), ou o corte das asperezas que constituem a rugosidade, ou ainda de uma combinação de ambos, dependendo da relação entre a tensão normal e a resistência das asperezas. Aumentando a tensão normal, as asperezas serão, inicialmente, desgastadas, danificadas e, por fim, sofrerão rotura por corte.

Analisando o comportamento típico de uma diaclase verifica-se que para um dado nível de tensão normal mantida constante, se for aumentada a tensão tangencial, o deslocamento tangencial começa por aumentar a uma taxa relativamente baixa até se atingir um valor máximo ou de pico da tensão tangencial, a partir do qual o deslocamento tangencial aumenta sem variação sensível da tensão tangencial. A rugosidade tem uma enorme influência na determinação e estimativa da resistência tangencial pelo que é fundamental a escolha do critério de rotura adequado para proceder a uma correta análise do comportamento e determinação da resistência ao corte. É possível encontrar na bibliografia da especialidade vários modelos de rotura de diaclases, nomeadamente:

- Modelo de Coulomb, associado a descontinuidades planas ou pouco rugosas em que a rugosidade tem pouca expressão;
- Modelo de Patton (1966), que reproduz um comportamento bilinear em função da tensão normal e inclui um parâmetro de rugosidade na formulação para baixas tensões, considerando que não se verifica o corte das asperezas;
- Modelo de Barton (1973), que foi o primeiro investigador a explicitar a influência da rugosidade na determinação da tensão tangencial máxima, de acordo com a equação (1):

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan \left(\phi_r + JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (1)$$

sendo τ_p a tensão tangencial de pico, σ_n a tensão normal, ϕ_r o ângulo de atrito residual, *JRC* (*Joint Roughness Coefficient*) o parâmetro que permite quantificar a rugosidade (relativamente subjetivo quando calculado através da comparação visual entre a superfície das diaclases e perfis tipo) (Barton e Choubey, 1977), *JCS* (*Joint Compressive Strength*) o parâmetro que permite avaliar a resistência das paredes das descontinuidades (dependente da resistência à compressão da rocha e do seu estado de alteração).

Neste trabalho analisa-se a rugosidade de diaclases através de diversos métodos, com o objetivo de proceder à sua caracterização, e de comparar os resultados obtidos. Procedeu-se à medição da rugosidade de 16 superfícies (8 bases e 8 topos) de 8 provetes com um *scanner* tridimensional. Faz-se a descrição e caracterização das superfícies de rugosidade das diaclases, bem como a sua reprodução e geração a partir de determinados parâmetros e técnicas, como os modelos fractais e a transformada de Fourier bidimensional. Realizam-se ainda ensaios de deslizamento entre os topos e respetivas bases e comparam-se as superfícies das diaclases, antes e após a realização dos mesmos. Um dos provetes, designado por 71, foi ensaiado para uma maior gama de tensões normais, o que permitiu estimar características mecânicas da diaclase. Além disso, esse provete foi digitalizado três vezes, após sucessivos ensaios, para se avaliar a influência destes na variação da rugosidade.

2 – MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A rugosidade é uma característica de difícil quantificação e os métodos utilizados na sua medição influenciam bastante a qualidade dos resultados obtidos. Atualmente existem métodos que fornecem dados a duas e a três dimensões. Os primeiros podem ser perfilómetros mecânicos com contacto, do tipo *roller-tip* e *needle-tip*, perfilómetros a laser, que utilizam a reflexão de feixes de luz, bem como métodos recorrendo a ultrassons. Os segundos baseiam-se em conceitos como a interferometria e técnicas que recorrem a câmaras de medição a três dimensões. Em geral, estes sistemas apresentam vantagens e desvantagens relacionadas com a rapidez da medição, a precisão, o tamanho da amostra, a repetibilidade, a resolução espacial, a facilidade de medição, de análise dos dados e de utilização *in situ* (Grasselli, 2001).

Neste estudo foi utilizado um *scanner* de contacto Roland MDX-20 (Figura 1) na medição da rugosidade das diaclases, permitindo a digitalização tridimensional das discontinuidades rochosas com uma resolução de 0,05 mm no plano horizontal (direções X e Y) e de 0,025 mm na vertical (direção Z). A agulha de 0,08 mm de diâmetro, ligada a um sensor piezoelétrico, constitui uma ferramenta de alta precisão, sendo capaz de proceder ao levantamento das coordenadas de objetos cuja dimensão máxima é de 203,2×152,4 mm², em planta, e até 60,3 mm acima da mesa de suporte. Neste caso utilizou-se uma resolução em planta de 0,5 mm, segundo ambas as direções, o que permite o levantamento de uma das duas superfícies de um provete em cerca de 6 a 10 horas com um detalhe adequado, pois o tamanho do grão presente na rocha de granito em estudo é de aproximadamente 2 mm e, por isso, uma maior resolução não aumentaria significativamente a qualidade dos dados obtidos. Um programa de computador comanda a digitalização, permitindo verificar a sua qualidade, exportar os dados, nomeadamente, para serem tratados no programa *MATLAB*, e obter a caracterização tridimensional da superfície rugosa (Ramos, 2013).

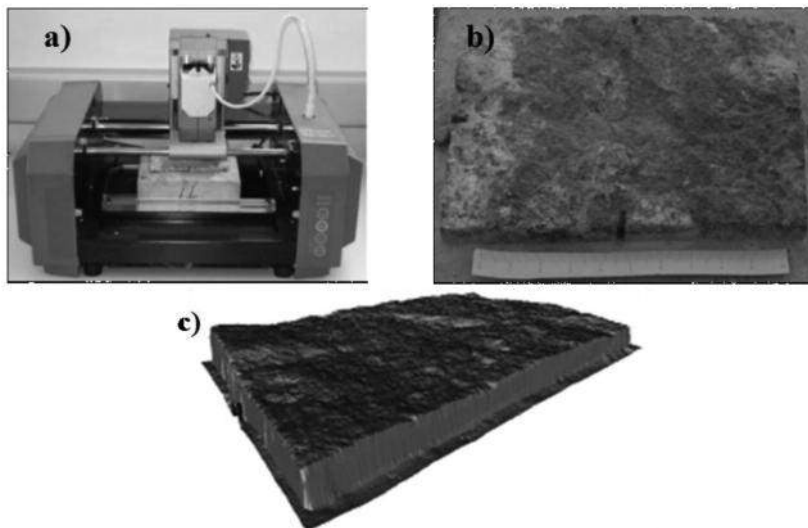


Fig. 1 – Digitalização: a) *scanner*; b) exemplo de um provete analisado; c) imagem digital do provete.

Com este equipamento estudou-se a rugosidade de um conjunto de amostras de diaclases recolhidas numa das sondagens realizadas no âmbito do estudo de caracterização geológico-geotécnico do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua. O material rochoso é constituído por granito de grão médio e duas micas com fenocristais de feldspato de cor amarelada a cinza esbranquiçado. As fraturas apresentam inclinações a 30°, 45° e 70° medidas em relação ao eixo de sondagem, com

deposição de óxidos avermelhados e finas películas argilosas alaranjadas e esbranquiçadas. Após a realização da sondagem, procedeu-se à recolha, carotagem, corte e encabeçamento das descontinuidades, tendo o cuidado de, em todas as operações, minimizar os danos nas descontinuidades. Na Figura 2 apresentam-se alguns passos da preparação das 16 superfícies de diaclases usadas neste trabalho.

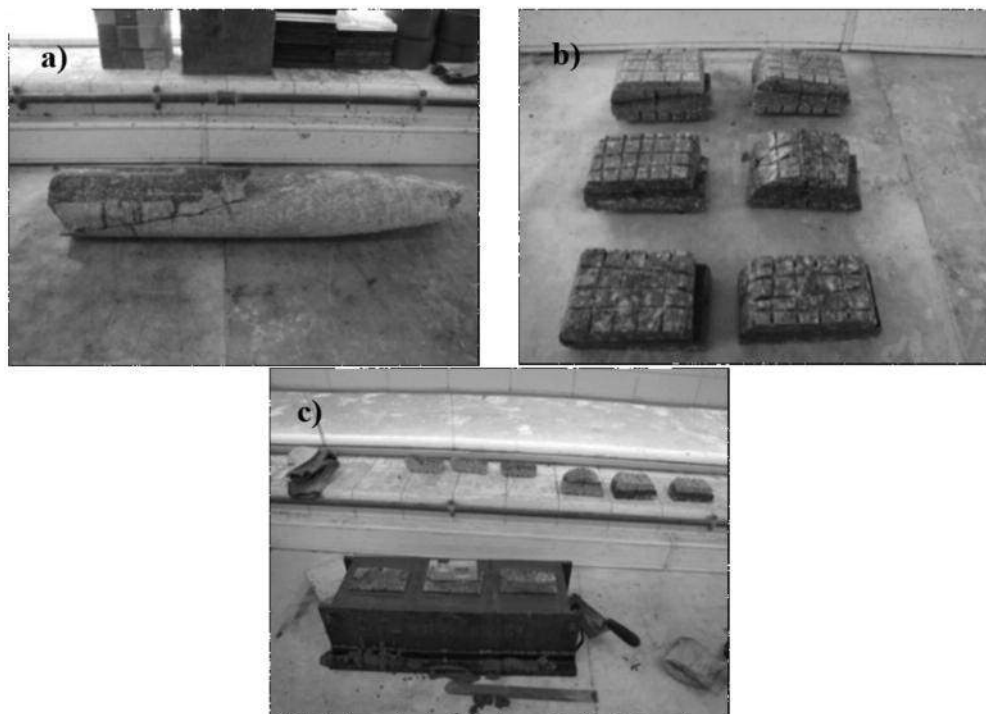


Fig. 2 – Preparação das diaclases: a) amostras; b) amostras após corte; c) encabeçamento de um provete.

No início do processo de digitalização concluiu-se que era necessário construir um quadro de *perspex* em forma de *L*, que se adaptou à estrutura do *scanner*, para garantir que em digitalizações sucessivas o provete fosse sempre colocado na mesma posição, assegurando a repetibilidade das medições e facilitando assim a interpretação dos resultados. Na Figura 3 apresentam-se para dois perfis, segundo as direções X e Y, os resultados de duas digitalizações efetuadas com e sem o quadro, bem como as diferenças respetivas. Para avaliação da adequação do processo calculou-se o erro quadrático médio dessas diferenças. Concluiu-se que os valores do erro sem e com quadro eram de $7,6 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ e $5,8 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$, na direção X, e de $3,6 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ e de $4,2 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$, na direção Y, respetivamente. Sendo os valores de erro com o quadro duas a três ordens de grandeza inferiores, confirmou-se a necessidade da sua utilização.

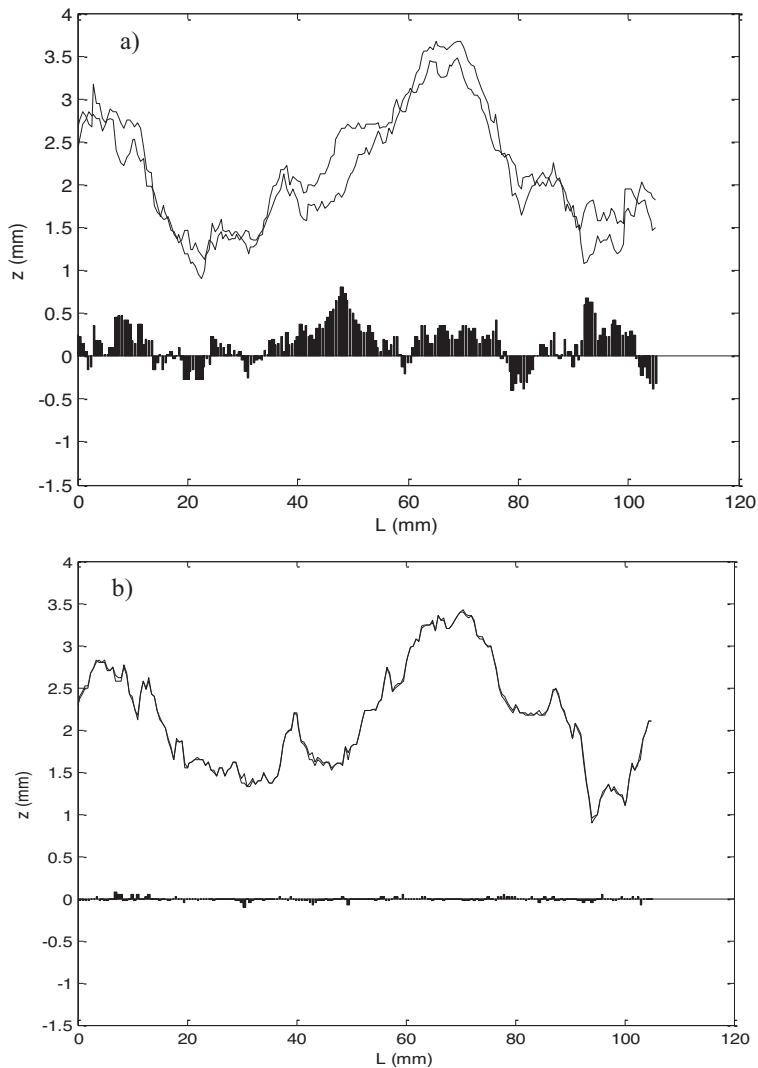


Fig. 3 – Resultados de duas leituras consecutivas de um perfil na direção X (curvas contínuas) e respectivas diferenças (barras). Provete colocado: a) sem a utilização do quadro; e b) com a utilização do quadro.

3 – ANÁLISE DA RUGOSIDADE

3.1 – Aspetos gerais

Devido à subjetividade de alguns dos métodos de determinação dos parâmetros que traduzem a rugosidade, como por exemplo o *JRC*, têm vindo a ser estabelecidas novas estratégias para determinar estes parâmetros, em particular de forma quantitativa, que permitam caracterizar e quantificar a rugosidade e gerar e reproduzir, quer perfis quer superfícies rugosas. No caso dos métodos estatísticos, recorre-se, por exemplo, à análise do valor quadrático médio de grandezas que se relacionam com a rugosidade e suas características, ou à análise da função de autocorrelação. Por outro lado, os métodos geoestatísticos permitem considerar a correlação espacial entre amostras, avaliar a sua dependência e, posteriormente estimar valores a partir de uma amostra

discreta. São bastante vantajosos quando os valores da amostra são afetados pela localização e relação com os seus vizinhos e, por isso, as variáveis não apresentam um padrão de distribuição definido pela estatística clássica como a normalidade e, sobretudo, a independência dos dados, havendo lugar ao conceito de estruturação espacial. A geoestatística utiliza o variograma (Chiles e Delfiner, 1999) como uma ferramenta essencial na avaliação da dependência e correlação espacial entre dois pontos vizinhos. O variograma ou o semivariograma permitem explorar a continuidade espacial de uma função aleatória $Z(i)$, sendo o semivariograma $\gamma(h)$ definido numericamente por:

$$\gamma(h) \cong \frac{1}{2(N-h)} \sum_{i=1}^{N-h} (Z_{i+h} - Z_i)^2 \quad (2)$$

em que $Z(i)$ é a variável aleatória regionalizada e h representa a distância entre os N pontos. Assim, o semivariograma representa o cálculo da semivariância (medida do grau de dependência espacial) da variável Z , em função da distância h entre pares de pontos, pelo que o seu valor deve aumentar com esta distância (Clark, 1979; Cressie, 1993).

Pelo seu lado, os modelos fractais permitem ultrapassar o problema da influência da escala de medição, que afeta alguns parâmetros estatísticos utilizados na caracterização da rugosidade. O conceito de fractal (Mandelbrot, 1977) está associado a um objeto cuja aparência é consideravelmente irregular e cujo aspeto da irregularidade se mantém qualquer que seja a distância (escala) a que está a ser observado, o que conduz à possibilidade de existirem objetos com dimensões topológicas não-inteiras. No caso da rugosidade de uma descontinuidade, a irregularidade da superfície da diaclase é mais complexa do que uma superfície plana ainda que não esteja associada diretamente a um volume, pelo que a sua dimensão se deve encontrar entre 2 (superfície) e 3 (volume). Em consequência, um perfil definido ao longo da superfície rugosa deve possuir uma dimensão fractal superior à unidade e inferior a dois. Existem diversos métodos para estimar a dimensão fractal de uma superfície ou perfil de rugosidade, nomeadamente os métodos dos divisores, da superfície dos prismas triangulares, das caixas ou das bolas, espectral e do variograma.

3.2 – Caracterização da rugosidade

Neste trabalho utilizaram-se diversos métodos para caracterizar a rugosidade. Em primeiro lugar procedeu-se à determinação da dimensão fractal das superfícies das diaclases considerando toda a superfície da diaclase e não apenas um ou vários perfis de rugosidade, o que deverá conduzir a resultados mais credíveis do que aqueles cuja aplicação está associada unicamente a perfis a uma dimensão. Para este efeito, procedeu-se à aplicação do *RTPM (Revised Triangular Prism Method)* (De Santis *et al.*, 1997) que permite a determinação direta da dimensão fractal (D) a partir da medição da área real da superfície definida para várias discretizações (várias resoluções da malha de pontos), calculada com base no somatório das áreas de todos os prismas que constituem a superfície, determinadas a partir das cotas dos vértices dos prismas, em relação a um plano de elevação. Considerando todos os provetes, o valor de D_A (dimensão fractal calculada pelas áreas) variou entre 2,253 e 2,440.

Procedeu-se em seguida à determinação da dimensão fractal a partir da avaliação do variograma, D_{v2} (Gneiting *et al.*, 2010). Aplicando os conhecimentos relacionados com os métodos geoestatísticos em geral, e o variograma em particular, foi estabelecida uma relação entre uma estimativa da dimensão fractal e o semivariograma. O método desenvolvido é semelhante, num aspeto, ao de Mandelbrot (1983), que determinava a dimensão fractal de uma superfície da diaclase procedendo à soma da dimensão fractal de um determinado perfil rugoso ($1 < D < 2$) com a unidade, obtendo assim

uma dimensão fractal entre 2 e 3. Contudo, este último método não é totalmente rigoroso pois a dimensão fractal não é igual qualquer que seja o perfil, dependendo, também, da direção que é considerada e, por isso, ignora questões como a anisotropia e a heterogeneidade. Assim, procedeu-se à determinação da dimensão fractal das superfícies calculando a média da dimensão fractal, D_{v2} , de todos os perfis segundo a direção do deslizamento, tendo-se obtido valores entre 2,239 e 2,331.

Concluiu-se que o método relacionado com a estimativa das áreas conduziu a uma maior dispersão de valores da dimensão fractal no conjunto de provetes ensaiados do que o método do variograma. No caso do provete 71, sobre o qual, como foi já referido, se realizaram estudos mais pormenorizados (ver secção 4), obtiveram-se valores, na base e no topo, de 2,381 e 2,391 e de 2,291 e 2,315, com o método das áreas e do semivariograma, respetivamente.

Analisando a relação entre o valor de JRC (valor médio) e a dimensão fractal (tomada na base dos provetes), D_{v2} , concluiu-se que o coeficiente de determinação dessa relação é relativamente baixo ($R^2=0,75$). É de notar que o valor de JRC é determinado visualmente, não sendo possível fazer uma classificação pormenorizada e inequívoca das asperezas, como a que resulta da aplicação do método numérico da dimensão fractal à avaliação da rugosidade.

Seguidamente determinou-se o índice de rugosidade da superfície, R_A , que se define como a relação entre a área real da superfície da descontinuidade e a área nominal, isto é, a projeção da superfície no plano médio. Os valores de R_A mais elevados estão, assim, associados a superfícies mais rugosas. O valor da área real pode ser determinado a partir do método aplicado para determinar a dimensão fractal. Neste caso, utilizando uma discretização de 0,5 mm obtiveram-se valores de R_A entre 1,035 e 1,077. No caso do provete 71, obtiveram-se valores de R_A de 1,041 e 1,039, para a base e para o topo, respetivamente. Comparando R_A e a dimensão fractal, concluiu-se que não foi possível obter uma correlação entre estas duas grandezas (Ramos, 2013).

O valor quadrático médio da inclinação entre dois pontos consecutivos, Z_2 , tendo por referência um plano médio, é também um indicador da rugosidade e permite considerar a inclinação da superfície das descontinuidades. Este parâmetro está relacionado com a distribuição no espaço e, por isso, com a textura da topografia da superfície rugosa. De acordo com Xia *et al.* (2003), os parâmetros característicos da textura da superfície rugosa estão estreitamente relacionados com a componente das irregularidades de um perfil de rugosidade. O parâmetro estatístico Z_2 foi calculado para todas as superfícies digitalizadas, de acordo com a equação (3):

$$Z_2 \cong \left(\frac{1}{(n-1)m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{z_{i+1,j} - z_{i,j}}{\Delta x} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

em que n e m são o número de pontos que definem o perfil de rugosidade em cada uma das direções, z é a cota desses pontos e Δx a distância entre pontos. Os valores de Z_2 variaram de forma importante com o valor de Δx , ou seja, a escala da medição. Para Δx igual a 0,5 mm, maior resolução possível, Z_2 variou entre 0,21 e 0,32 e para Δx igual a 24 mm, Z_2 variou entre 0,04 e 0,12. O provete 71 apresentou, na base e no topo, um valor de 0,22, para Δx igual a 0,5 mm, e 0,05 e 0,04, para Δx igual a 24 mm, respetivamente.

A partir das digitalizações determinaram-se as frequências das distâncias em relação ao plano médio de todos os pontos em análise. Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos para a base e topo dos provetes 69 e 71, por serem os que apresentaram maiores e menores amplitudes, respetivamente. Comparando a base e o topo dos provetes, concluiu-se que estes provetes são dos que apresentam, respetivamente, menores e maiores diferenças entre as amplitudes do topo e da base. Numa primeira abordagem, sem considerar a deformabilidade das superfícies em contacto (quantificada pelo JCS), seria possível afirmar que, hipoteticamente, o deslocamento normal de

fecho será menor para o caso do provete 69, já que a abertura será, também, menor, ao contrário do que acontecerá no provete 71.

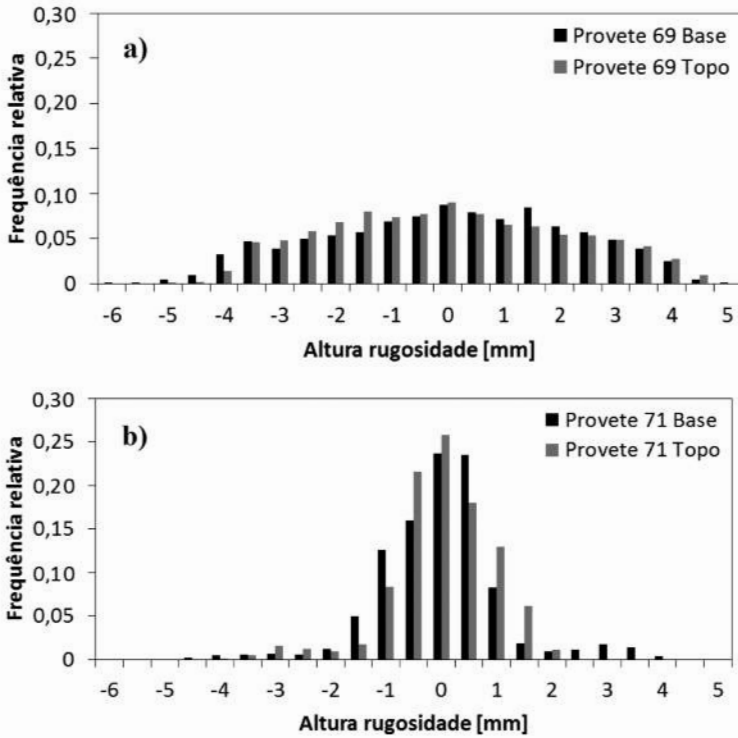


Fig. 4 – Histogramas da base e topo: a) provete 69; b) provete 71.

No caso de um perfil rugoso, a correlação entre pontos ao longo de um perfil (correlograma) permite saber se é possível determinar ou estimar a cota (z) de um determinado ponto a partir dos valores dos pontos que o precedem, ou a partir de que distância é que não existe relação entre as cotas. Neste trabalho testaram-se os valores de distância entre pontos de 0,5, 1,0, 2,5 e 5,0 mm. Concluiu-se que o coeficiente de correlação diminuiu à medida que a distância aumenta, ainda que se mantenha uma forte correlação ($R^2 > 0,90$) mesmo para distâncias entre pontos de 5 mm. Contudo, a dispersão é bastante visível para a distância 5 mm, o que pode comprometer a estimativa da cota de pontos para distâncias desta ordem ou superiores. A título de exemplo, apresentam-se na Figura 5 os resultados obtidos para um perfil da base do provete 71.

Procedeu-se também ao cálculo desta correlação para as superfícies. Neste caso, consideraram-se os perfis na direção do deslizamento, e concluiu-se igualmente que a dispersão vai aumentando à medida que a distância aumenta, tendo-se obtido valores do coeficiente de correlação de 0,994, 0,985, 0,948 e 0,872 para a base do provete 71.

A função de autocorrelação, ACF , que corresponde à função de autocovariância normalizada, bem como os semivariogramas permitem avaliar a dependência entre os valores da cota dos pontos que compõem os perfis de rugosidade, espaçados de uma certa distância, segundo uma determinada direção. Na Figura 6 apresentam-se as funções de autocorrelação e os semivariogramas obtidos para todos os provetes.

Foi calculada a distância em que a correlação é igual a 95, 90, 85 e 0%, e obtiveram-se valores (em mm) entre 0,84 e 1,61 no primeiro caso, 1,48 e 3,09 no segundo, 2,13 e 4,04 no terceiro e 15,19

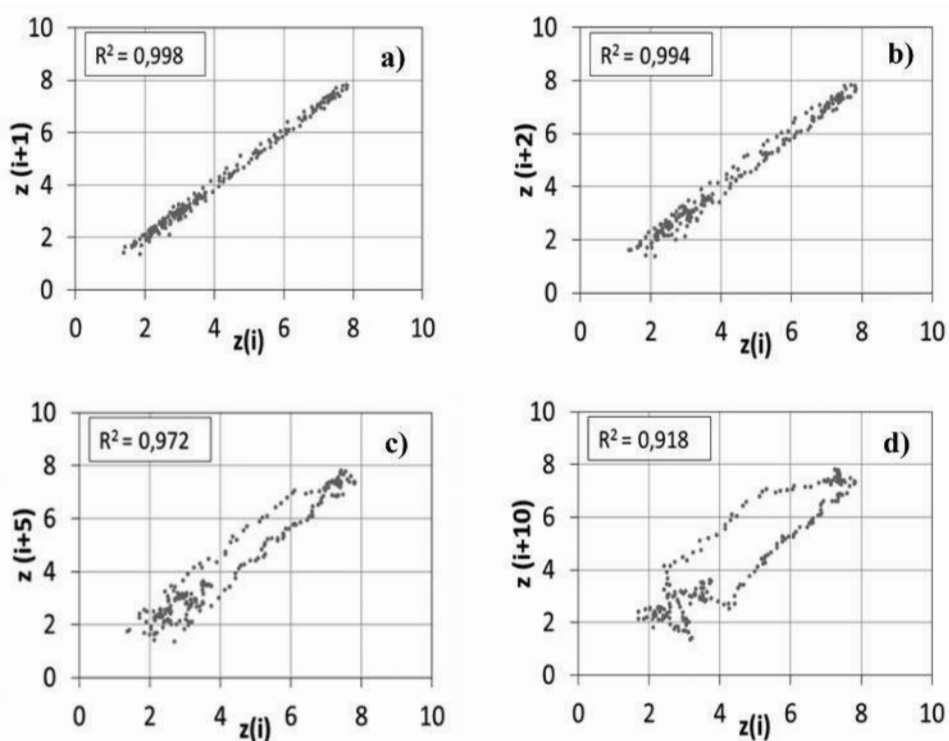


Fig. 5 – Correlogramas de um perfil para distância entre pontos (mm): a) 0,5; b) 1,0; c) 2,5; d) 5,0.

e 25,19 no quarto, respetivamente (Figura 6a). A partir dos resultados da função *ACF* apresentados para todas as superfícies é possível concluir que a análise deve ser realizada considerando apenas os primeiros valores, isto é, até aproximadamente 40 mm, cerca de um terço do comprimento dos provetes. Contudo, verifica-se que para valores superiores a 40 mm a função *ACF* apresenta uma certa periodicidade que pode estar associada ao facto de a superfície rugosa ser mais ou menos ondulada. Analisando a Figura 7 verifica-se que a base do provete 69 (Figura 7a) é bastante mais ondulada que o topo do provete 74 (Figura 7b), cuja periodicidade, evidenciada na figura, é bastante reduzida. As funções de autocorrelação têm um andamento semelhante em todos os provetes, podendo assim constituir um parâmetro de caracterização médio para este conjunto de superfícies de rugosidade (Ramos, 2013).

Em relação aos provetes em análise, apresenta-se na Figura 8 os resultados dos correlogramas, funções de autocorrelação e semivariogramas obtidos para o topo e base de cada provete. Em relação aos provetes em análise, os semivariogramas calculados para os topos são semelhantes aos das respetivas bases, como seria de esperar. No entanto, existem diferenças significativas entre os diversos provetes, ao contrário do que se verificou com a função de autocorrelação. Os semivariogramas dispersam para distâncias próximas de 60 mm e alguns provetes apresentam um pequeno patamar. Comparando as diversas técnicas de correlação, conclui-se que os valores determinados para o limite de correlação são bastante distintos entre si, sendo o valor alcançado através do semivariograma sempre significativamente mais alto.

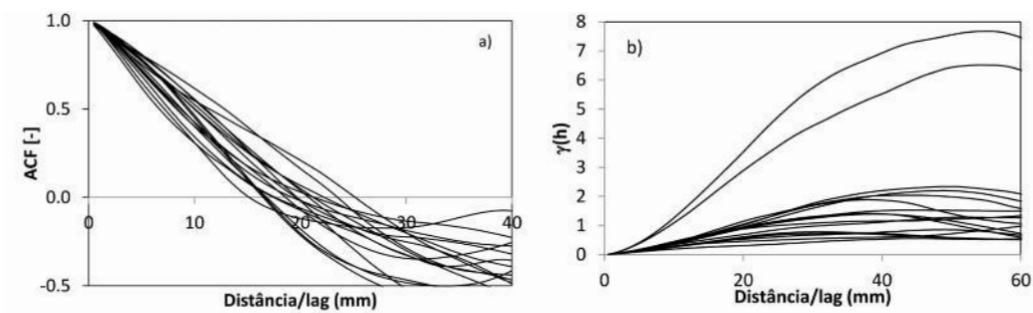


Fig. 6 – Análise da rugosidade: a) funções de autocorrelação; b) semivariograma.

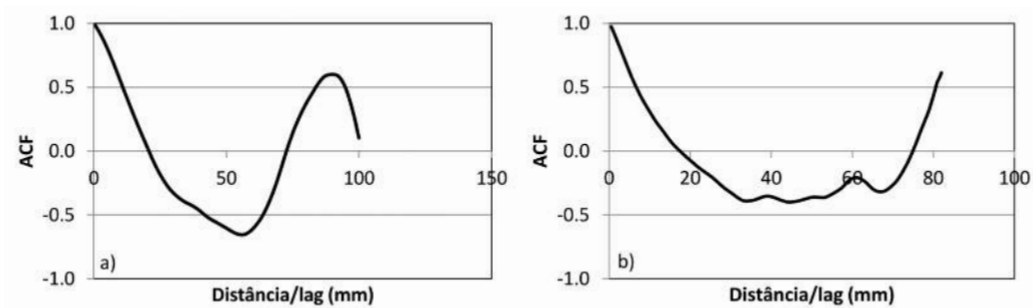


Fig. 7 – Funções de autocorrelação: a) provete 69; b) provete 74.

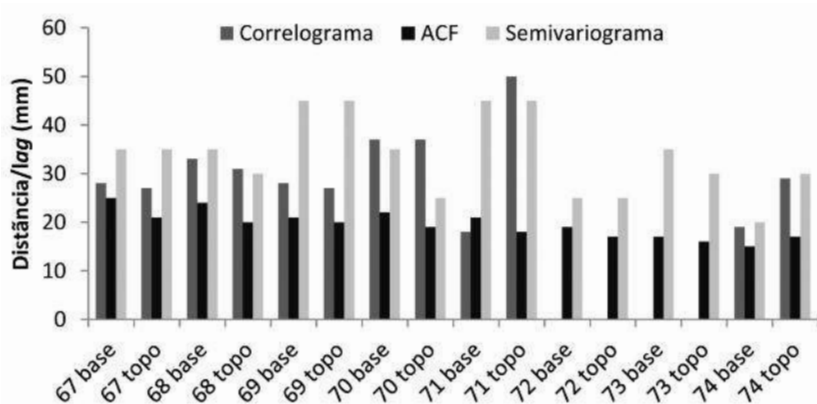


Fig. 8 – Comparação dos valores de limite de correlação determinados pelos diversos métodos.

3.3 – Reprodução e geração de superfícies de rugosidade

3.3.1 – Transformada de Fourier – reprodução e geração

A geração de uma superfície rugosa pode ser realizada a partir da aplicação da transformada de Fourier, e da sua inversa, a duas dimensões, usando o algoritmo *FFT2* do *MATLAB*. Considerando a dimensão correta dos provetes e, neste caso, como exemplo, a base do provete 67, definiu-se uma matriz com a mesma dimensão do provete analisado e constituída apenas pelas ondas com as dez frequências mais baixas em ambas as direções. Esta superfície está representada na Figura 9a, que evidencia a inexistência das asperezas da rugosidade fina. Quando se procede à geração usando as 30 primeiras ondas, a superfície gerada é mais rugosa em comparação com a anterior, sendo que na Figura 9b já são visíveis as asperezas. A partir dos valores de z das superfícies geradas é possível calcular a sua dimensão fractal tal como foi feito para as superfícies reais, e verificar a evolução da sua redução em relação à superfície real, quando não se consideram as frequências mais altas.

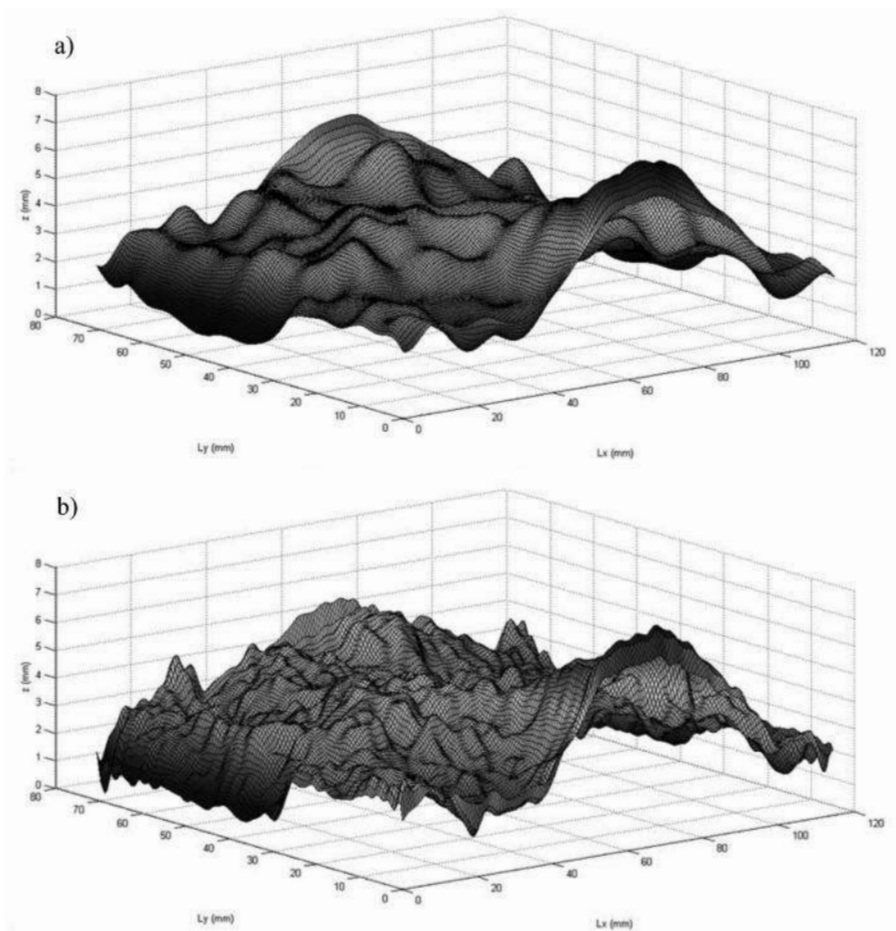


Fig. 9 – Superfície gerada pelo algoritmo FFT2 com a soma das primeiras: a) 10 ondas; b) 30 ondas.

A reprodução exata de uma superfície rugosa associada a uma matriz de ordenadas z com dimensão $[n \times m]$ a partir do algoritmo *FFT2* pode ser obtida caso se considere a soma de todas as frequências evidenciadas no espectro. Pela análise dos resultados verifica-se que a partir de cerca

de 20% do comprimento das diaclases não existe correlação e que na reprodução a partir da transformada de Fourier, as frequências superiores a este valor não precisam de ser consideradas, tal como se pode verificar no espectro de frequências apresentado na Figura 10.

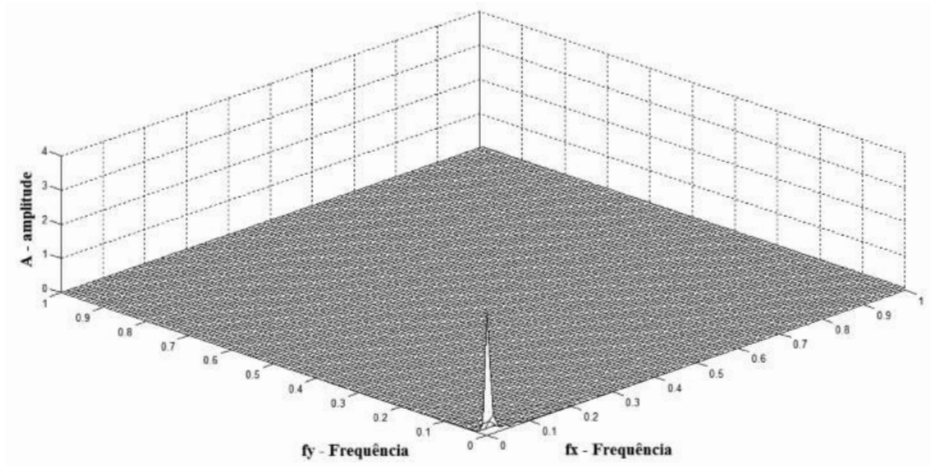


Fig. 10 – Espectro de frequências aplicando o algoritmo FFT2.

Aplicando estes conceitos, além de reproduzir discontinuidades conhecidas, é possível gerar novas superfícies, mantendo as amplitudes das diversas ondas semelhantes às superfícies naturais, e alterando apenas as fases que tomam valores aleatórios dentro do seu limite de variação ($-\pi$ a π). As superfícies obtidas a partir da distribuição de amplitudes de um provete mostraram-se um pouco mais rugosas (Figura 11) do que a superfície original, apresentando um valor mais elevado da dimensão fractal. No método do semivariograma o valor de $D_{v,2}$ artificial é próximo de 2,330 (o valor da superfície original é 2,272). No caso do método das áreas, o valor de D_A é cerca de 2,440 (o valor original é 2,302). Já a variância da superfície artificial é igual à da superfície real.

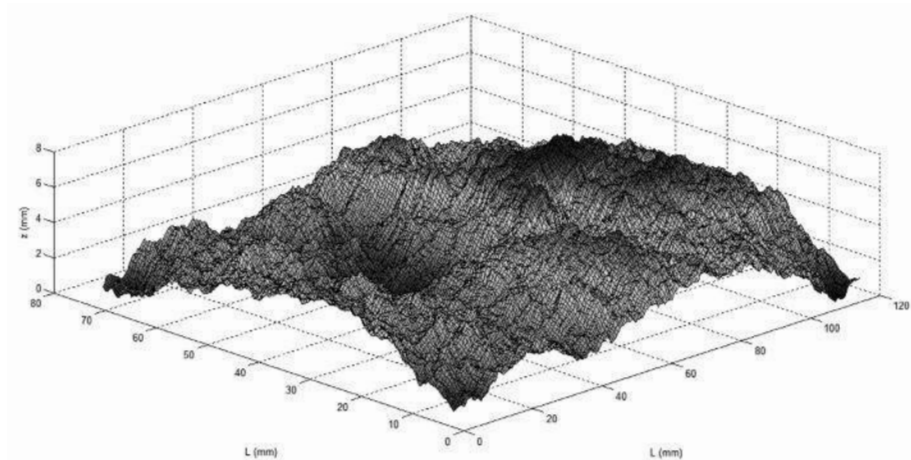


Fig. 11 – Geração de uma superfície rugosa aleatória aplicando a transformada de Fourier bidimensional (FFT2) com base numa distribuição de amplitudes real.

3.3.2 – Dimensão fractal – geração

Além da geração aplicando o conceito da transformada de Fourier é também possível gerar novas superfícies, como a apresentada na Figura 12, a partir do valor da dimensão fractal e variância das superfícies reais através do *diamond square algorithm* (Liu *et al.*, 2004). Neste método a rugosidade é representada, inicialmente, pela matriz T vazia preenchendo-se, em primeiro lugar, os valores dos cantos, a partir da geração de números aleatórios com um valor médio e uma dispersão conhecidos. De seguida, procede-se ao cálculo do ponto central, a partir dos valores dos quatro pontos dos cantos. O ponto médio é calculado a partir da média dos valores dos cantos adicionando-lhe uma determinada quantidade aleatória, procedendo-se, de seguida, ao cálculo dos pontos médios das fronteiras a partir da média dos pontos dos cantos e do ponto médio calculado na fase anterior, sendo-lhes adicionada, também, uma quantidade aleatória. Este processo prossegue até todos os elementos da matriz estarem preenchidos. A dimensão fractal D é introduzida no algoritmo através do expoente de Hurst, H , que varia entre 0 e 1, e é fulcral no cálculo da quantidade aleatória adicionada em cada ponto, tal como mostra a equação (4).

$$\sigma^2_n = \frac{\sigma^2_0}{(2^{2H})^n} \left(1 - \frac{2^{2H}}{4} \right) \quad (4)$$

σ^2_n - variância da distribuição $N(0, \sigma^2_n/2)$, que permite a geração da referida quantidade aleatória.

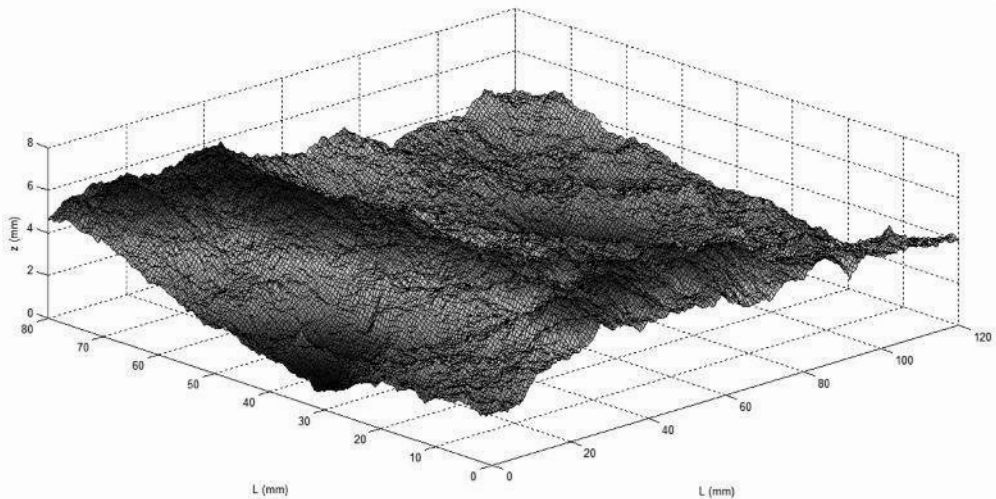


Fig. 12 – Geração com $D=2,35$ e $s_2=1,65 \text{ mm}^2$.

A quantidade aleatória adicionada a cada ponto calculado vai diminuindo ao longo das iterações do processo. A partir da geração conclui-se que a dimensão fractal tem mais influência nos resultados ao nível da rugosidade do que a variância. A influência da variância está mais relacionada com a amplitude e a ondulação da rugosidade.

Após a geração verifica-se que os valores obtidos a partir dos dois métodos de medição da dimensão fractal são diferentes, sendo que a superfície gerada artificialmente apresenta, na maior parte dos casos, uma rugosidade um pouco superior à da superfície original, de acordo com o método das áreas ($D_f > 2,35$). De acordo com o método do semivariograma, os valores são próximos de 2,35, o valor pretendido, ainda que a amplitude de variação seja bastante menor neste método.

4 – ENSAIOS DE DESLIZAMENTO

O equipamento do Laboratório de Mecânica das Rochas do LNEC no qual se realizaram os ensaios (Figura 13) é constituído por uma caixa de corte, dispoñdo de uma caixa de 200×200 mm², onde as duas metades que constituem a descontinuidade (previamente encabeçadas com argamassa de cimento) foram fixadas.

Para a caracterização da resistência e deformabilidade das descontinuidades rochosas realizaram-se ensaios de carga normal, com três ciclos de carga-descarga, até atingir a tensão normal máxima prevista para os ensaios seguintes. Seguiu-se o ensaio de deslizamento, com aplicação de uma tensão normal pré-definida seguida da aplicação de uma tensão tangencial crescente. Além destes ensaios, foram também realizados ensaios de deslizamento sem a aplicação de tensão normal, para além da correspondente ao peso do topo do provete.

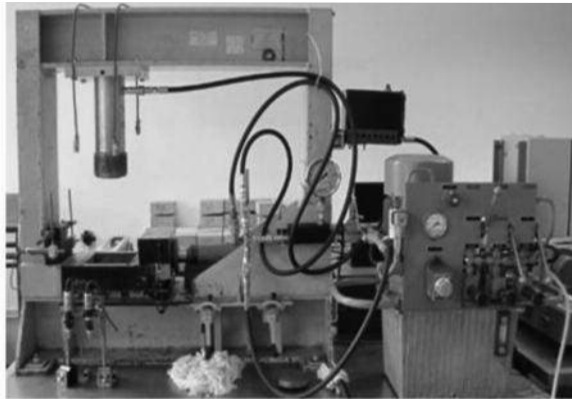


Fig. 13 – Aspetto do equipamento utilizado nos ensaios de deslizamento.

Nestes ensaios, os deslocamentos tangenciais foram provocados manualmente, sendo a dilatação determinada a partir do declive das curvas que relacionam o deslocamento normal com o deslocamento tangencial, representadas na Figura 14. Através da evolução da dilatação ao longo dos ensaios é possível analisar o desgaste da superfície rugosa causado pelos ensaios de deslizamento com aplicação de tensão normal.

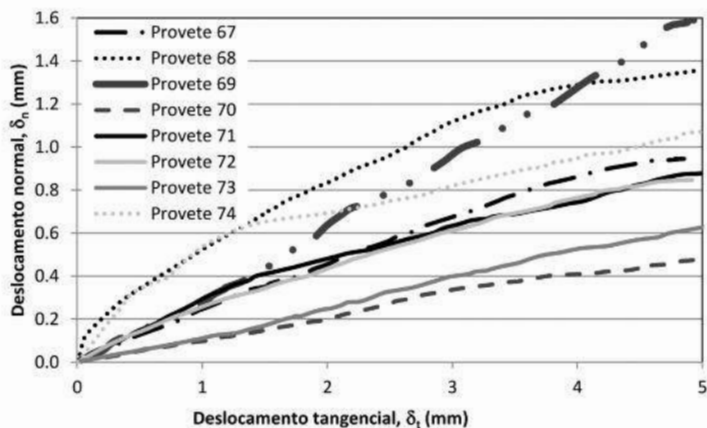


Fig. 14 – Resultados dos ensaios de deslizamento sem aplicação de tensão normal.

Os ensaios de deslizamento com tensão normal de 0,4 MPa, realizados sobre os 8 provetes, permitiram determinar valores de rigidez tangencial que variaram entre 0,7 e 1,7 MPa/mm (média de 1,0 MPa/mm), para valores da tensão tangencial de cerca de 0,3 a 0,4 MPa (média de 0,37 MPa).

Sobre o provete 71 realizaram-se 4 ensaios (Figura 15), com tensões normais de 0,4, 0,8, 1,6 e 3,2 MPa, que, de acordo com o critério de Coulomb, conduziram a valores do ângulo de atrito de 35,6°, coesão aparente de 0,11 MPa e ângulo de dilatância de cerca de 7 a 8° (Ramos, 2013).

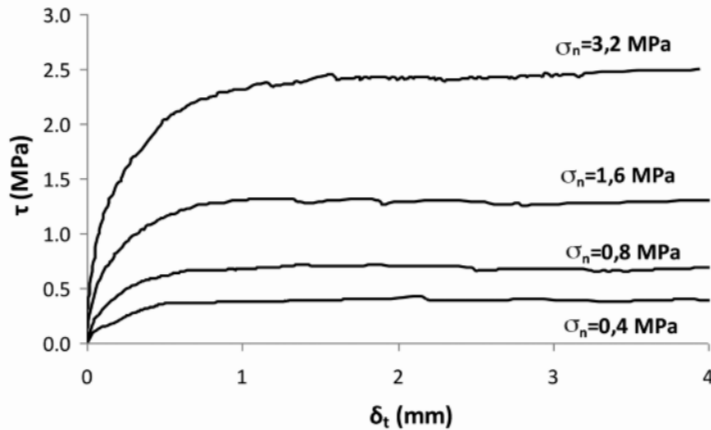


Fig. 15 – Resultados dos ensaios de deslizamento do provete 71.

Após a realização dos ensaios de deslizamento sob tensão normal, é expectável uma redução da dimensão fractal (D_f), do parâmetro R_f e do parâmetro estatístico Z_2 , já que ocorre um desgaste da superfície rugosa e, por isso, o desaparecimento de algumas asperezas, diminuindo, assim, a área real, relacionada com D_f e R_f , e o declive, relacionado com Z_2 . Numa análise geral, os resultados obtidos evidenciaram esta hipótese, ainda que, no caso de alguns provetes, a redução não tenha sido significativa. No que se refere à dimensão fractal, considerando o método das áreas ou o do semivariograma, a diminuição média foi de cerca de 0,7% e 0,6%, respetivamente. O parâmetro R_f teve uma diminuição média de 0,8%, e o parâmetro Z_2 diminuiu, em média, 2,8%.

Assim, conclui-se que o ensaio com a tensão de 0,4 MPa provocou pouco desgaste na superfície rugosa, pelo que, visualmente, as diferenças são quase imperceptíveis, apenas se notando um pequeno desgaste nas zonas de contacto cuja área não atinge 5% da área nominal da diacalse. Na Figura 16 apresentam-se as curvas de nível da mesma superfície de uma diacalse antes e após o primeiro deslizamento à tensão normal de 0,4 MPa e ainda das diferenças entre estas duas digitalizações. Esta figura, em que apenas nas diferenças se nota uma zona muito limitada com diferenças da ordem de 2 mm, evidencia o reduzido desgaste ocorrido.

Mesmo no caso do provete 71 (Figura 16), apesar de os deslizamentos terem sido realizados até à tensão de 3,2 MPa, como se trata de uma superfície pouco rugosa, os resultados ficaram aquém do esperado já que a diferença ao nível da dimensão fractal ou dos restantes parâmetros foi reduzida.

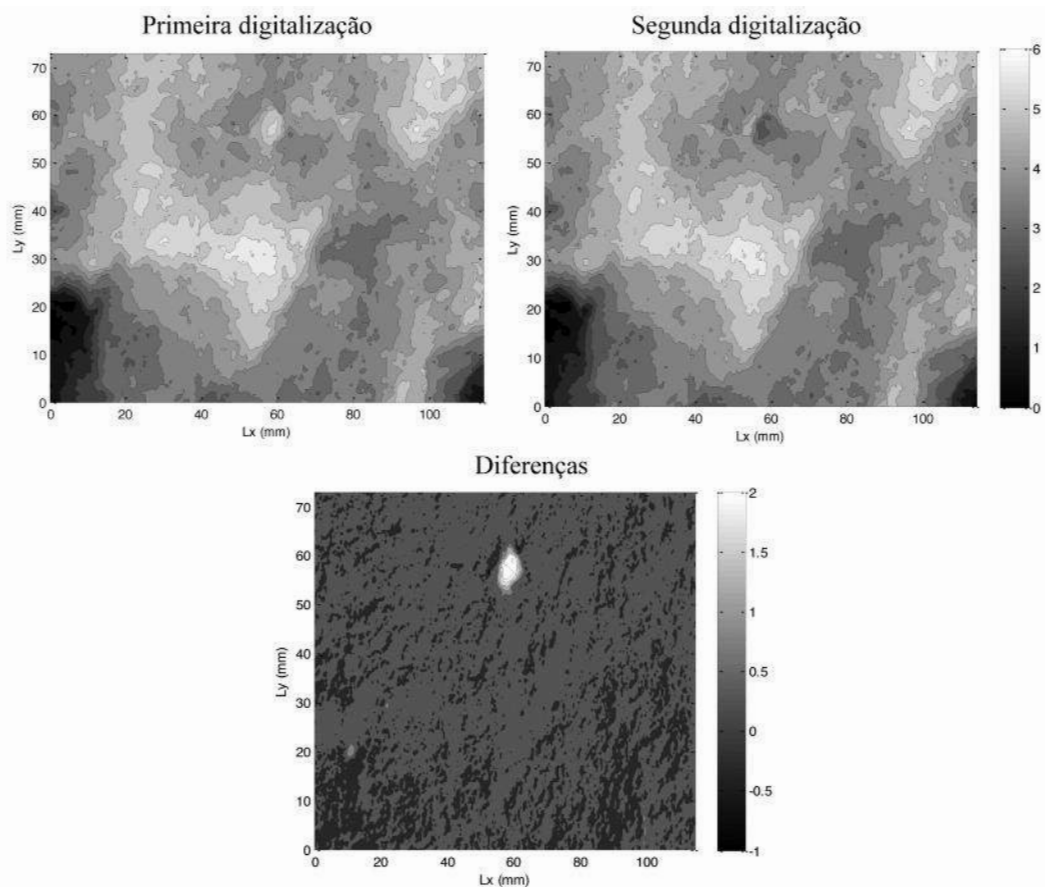


Fig. 16 – Superfícies do provete 71 antes do ensaio de deslizamento a 0,4 MPa (primeira digitalização) e depois do ensaio (segunda digitalização), e a correspondente diferença.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A rugosidade, conjuntamente com a resistência mecânica do material das paredes, é um dos parâmetros que mais influencia a resistência tangencial das diaclases rochosas. No entanto, é simultaneamente uma das propriedades mais difíceis de caracterizar, pela sua complexidade e variabilidade, bem como pela dificuldade da sua medição. Neste trabalho desenvolveu-se um método de medição de superfícies de diaclases robusto e com um nível da precisão e resolução espacial adequados ao estudo das características geométricas de discontinuidades. Este trabalho permite não só compreender de forma mais aprofundada o comportamento destas superfícies à escala da rugosidade, raramente estudadas a este nível, mas também suportar a modelação destas superfícies em modelos micromecânicos, como por exemplo o método dos elementos discretos de partículas.

A digitalização das faces das diaclases permitiu a obtenção de descrições numéricas precisas das suas topologias, apresentando inúmeras possibilidades, desde o estudo do ajustamento da base e do topo, caracterização estatística e geoestatística das superfícies ou a degradação da rugosidade após ensaios de corte. Neste trabalho apresenta-se principalmente o cálculo de diversos parâmetros estatísticos e modelos fractais, bem como a geração de novas superfícies artificiais a partir de

superfícies existentes. Em relação aos parâmetros estatísticos escolhidos, conclui-se que o Z_2 , apesar de privilegiar a direção de aplicação da tensão tangencial nos ensaios de deslizamento, permite obter um valor único que caracteriza a rugosidade e que está sobretudo associado ao declive da superfície, sendo possível perceber se esta é mais ou menos ondulada. Ao contrário do parâmetro Z_2 , a dimensão fractal da superfície, D , calculada por diversos métodos que são comparados, considera as características tridimensionais da descontinuidade e permite perceber se uma superfície é mais ou menos rugosa. Salienta-se ainda o caráter particular dos ensaios de deslizamento sem aplicação de carga normal, pois permitem comparar a dilatação e, conseqüentemente, o desgaste da superfície rugosa. Além deste facto, é também importante referir o caráter inovador da geração de superfícies de descontinuidade baseada na distribuição de amplitudes no domínio das frequências, que abre caminho para novos estudos no domínio da evolução da rugosidade durante os deslizamentos.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDP a possibilidade de estudar as diaclases do Aproveitamento Hidroeléctrico de Foz Tua e ao laboratório FabLab EDP pelo uso do *scanner* tridimensional Roland MDX-20.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N. (1973). *Review of a new shear-strength criterion for rock joints*. Engineering Geology, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Vol. 7, pp. 287-332.
- Barton, N.; Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics, Springer, Vienna, vol. 10, pp. 1-54.
- Chiles, J. P.; Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley-Interscience.
- Clark, I. (1979). *Practical geostatistics*. Applied Science Publishers.
- Cressie, N. (1993). *Statistics for spatial data*. Wiley Interscience.
- De Santis, A.; Fedi, M.; Quarta, T. (1997). *A revisitacion of the TPSM for estimating the fractal dimension of fractal surfaces*. Annali di Geofisica, Vol. XL, August 1997.
- Gneiting, T.; Sevcikova, H.; Percival, D.B. (2010). *Estimators of fractal dimension: assessing the roughness of time series and spatial data*. University of Washington, Department of Statistics, Technical Report no. 577.
- Grasselli, G. (2001). *Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description*. PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Kerstiens, C.M.D. (1999). *A generic UDEC model for rock joint shear tests, including roughness characterisation*. MSc Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, TU Delft.
- Liu, H., Bodvarsson, G.; Lu, S.; Molz, F. (2004). *A correct and generalized successive random additions algorithm for simulating fractional levy motions*. Mathematical Geology, 04/2004, vol. 36, pp.361-378.
- Mandelbrot, B.B. (1977). *The fractal geometry of Nature*. W.H. Freeman, New York.
- Mandelbrot, B.B. (1983). *Fractals. Form, chance and dimension*. W.H. Freeman, S. Francisco.

- Muralha, J. (1995). *Abordagem probabilística do comportamento mecânico de descontinuidades de maciços rochosos*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- Patton, F.D. (1966). *Multiple modes of shear failure*. PhD Thesis, Universidade de Urbana, Illinois.
- Ramos, A. (2013). *Caraterização e modelação numérica da rugosidade de descontinuidades rochosas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Xia, C.C.; Yue, Z.Q.; Tham, L.G.; Lee, C.F.; Sun, Z.Q. (2003). *Quantifying topography and closure deformation of rock joints*. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Elsevier, Vol. 40, Issue 2, pp.197-220.