

# DETERMINAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DE MACIÇOS ROCHOSOS POR MEIO DE ENSAIOS DE ALMOFADAS PLANAS DE GRANDE ÁREA

## DETERMINATION OF THE DEFORMABILITY OF ROCK MASSES USING THE LARGE FLAT JACK TEST

Bernardo, Francisco; *Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, francisco.antunes.bernardo@gmail.com*

Figueiredo, Bruno; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, brunof@Inec.pt*

Lamas, Luís; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, lllamas@Inec.pt*

Muralha, José; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, jmuralha@Inec.pt*

### RESUMO

Os ensaios de macacos planos de grande área são utilizados para medir a deformabilidade de maciços rochosos e fornecem dados importantes para o projeto de grandes obras. Este ensaio consiste na abertura de um rasgo no maciço rochoso no qual é inserido um macaco plano de grande área. O macaco aplica pressão às paredes do rasgo através de óleo bombeado para o seu interior e são medidos os deslocamentos no maciço. A maior dificuldade na interpretação do ensaio reside no efeito provocado pela abertura de uma fenda de tração durante a aplicação de pressão pelo macaco plano. Para melhorar a compreensão sobre os efeitos da fenda de tração e assim melhorar a interpretação dos resultados do ensaio, desenvolveu-se um modelo numérico tridimensional do ensaio. O modelo permite estabelecer relações entre a tensão *in situ* perpendicular aos rasgos, a resistência à tração do maciço, as pressões aplicadas e a profundidade da fenda.

### ABSTRACT

Large flat jack tests are used to assess rock mass deformability in the design stages of large projects. This test consists in cutting a thin slot in the rock mass in which a flat jack with large dimensions is inserted; oil pressure inside the jack loads the slot walls while the rock mass deformation is measured by displacement gauges located inside the jack and at the surface. The main difficulty regarding interpretation of large flat jack tests has to do with the effect of the tension crack that may develop in the rock mass during the tests. A three-dimensional numerical model was developed for the interpretation of large flat jack test results. The model was used to establish the relations between the *in situ* stress perpendicular to the slots, the rock mass tensile strength, the applied pressures and the crack depth.

### 1 - INTRODUÇÃO

A deformabilidade dos maciços rochosos desempenha um papel muito importante no projeto de grandes obras como barragens de betão, pontes, galerias subterrâneas ou túneis, uma vez que o seu comportamento depende dos deslocamentos ocorridos no maciço rochoso em que se encontram fundadas ou inseridas. Para o projeto destas importantes estruturas, não é adequado caracterizar a deformabilidade do maciço rochoso apenas através da realização de ensaios de laboratório em amostras intactas e extrapolando os resultados para a escala do maciço rochoso utilizando índices subjetivos como o RMR, Q ou o GSI. A realização de ensaios *in situ*, envolvendo volumes representativos de maciço rochoso, permite estimar a sua deformabilidade e assim diminuir o nível de incerteza durante a fase de projeto.

O ensaio de macacos planos de grande área (LFJ) é um ensaio de campo utilizado para estimar a deformabilidade e permite testar volumes representativos de maciço rochoso (Rocha, 1974). A preparação do ensaio LFJ consiste na abertura de um rasgo no maciço rochoso, por meio de uma serra circular, no qual é inserido um macaco plano de grande área. O macaco plano aplica depois pressões às paredes do rasgo através de óleo, sendo os deslocamentos ocorridos medidos através de defómetros.

O equipamento utilizado para a abertura dos rasgos com cerca de 1,50 m de profundidade, inclui uma máquina de corte constituída por uma serra circular com 1 m de diâmetro montada num quadro de suporte que possibilita o seu avanço e que aloja o sistema que transmite a rotação (Figura 1). Para possibilitar o avanço da coluna de suporte da serra circular, é aberto, previamente, um furo central com um diâmetro de 168 mm e uma profundidade de 1,10 m. Após a abertura do rasgo, o macaco plano é inserido no seu interior e o furo central é preenchido com argamassa (Rocha, 1974; Wittke, 1990).

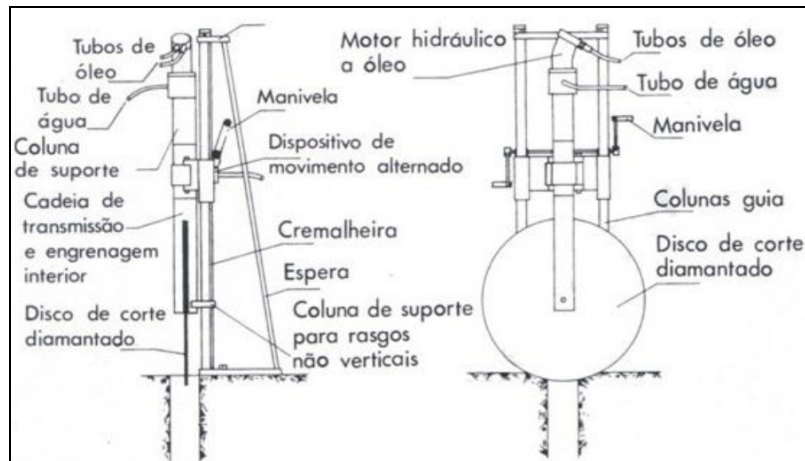


Figura 1 – Ensaio LFJ. Equipamento para a abertura dos rasgos

Cada macaco plano é constituído por duas chapas de aço, com menos de 1 mm de espessura, soldadas no seu contorno (Figura 2 a)). No seu interior existem quatro defómetros (A1 a A4) que medem a abertura dos rasgos (Figura 2 b) e c)). Cada defómetro é constituído por quatro extensómetros eléctricos de resistência. A sua calibração é realizada antes de serem instalados e soldados no interior do macaco plano. Antes da abertura do rasgo são instalados dois pares de marcas (C1/C2 e C3/C4) centrados em relação ao eixo de simetria do macaco plano (Figura 3)) para medir os deslocamentos na superfície do maciço rochoso.

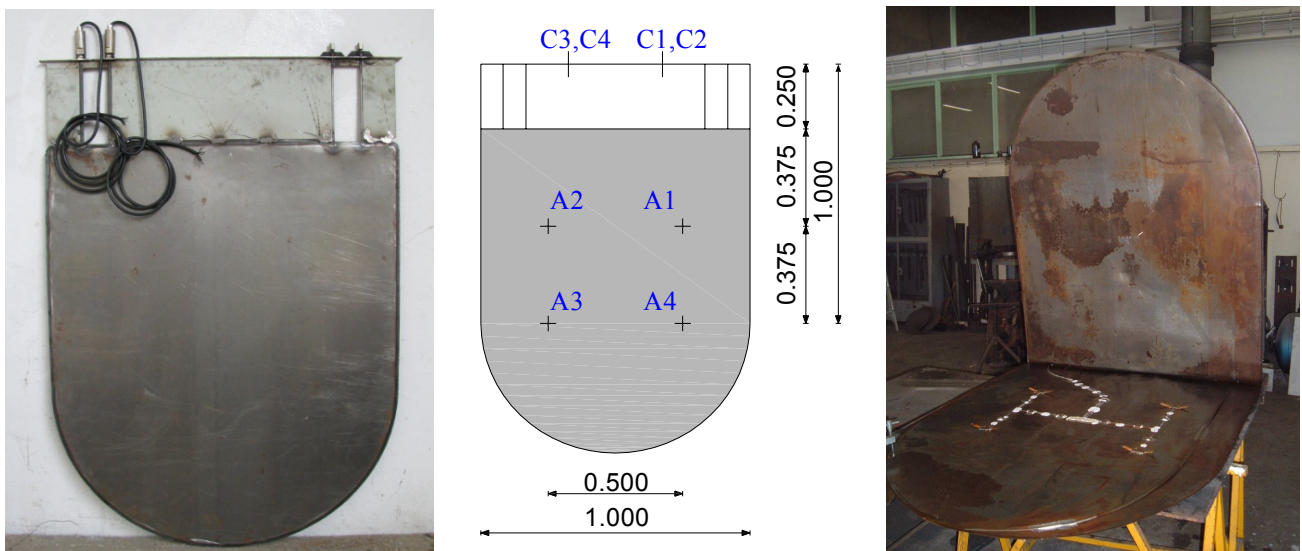


Figura 2 – Ensaio LFJ. a) Macaco plano de grande área; b) Localização dos defómetros; c) Defómetros no interior de um macaco plano

Inicialmente os macacos planos são cheios com óleo e pressurizados com uma pressão inicial de 0,05 MPa, de modo a garantir o total encosto das faces do macaco plano às paredes do rasgo. O ensaio LFJ consiste na realização de, pelo menos, três ciclos de carga e descarga com pressões máximas crescentes (Figura 4 a)). No final é geralmente realizado um ciclo até à carga máxima durante o tempo conveniente, que não deve ser inferior a uma hora, para o estudo dos parâmetros de fluência. Os resultados diretos do ensaio são as relações entre as pressões aplicadas e os deslocamentos medidos pelos defómetros e pelas marcas. Na Figura 4 b) apresenta-se um exemplo representativo destas relações.

A interpretação dos resultados do ensaio não é direta, devido ao eventual desenvolvimento de uma fenda de tração segundo o plano dos rasgos que cresce com o aumento pressão aplicada pelos macacos planos. O início da abertura desta fenda e a sua propagação depende não só da pressão aplicada ao maciço mas também das tensões *in situ* e da resistência à tração, que geralmente são desconhecidas (Pinto, 1981; ISRM, 1986).

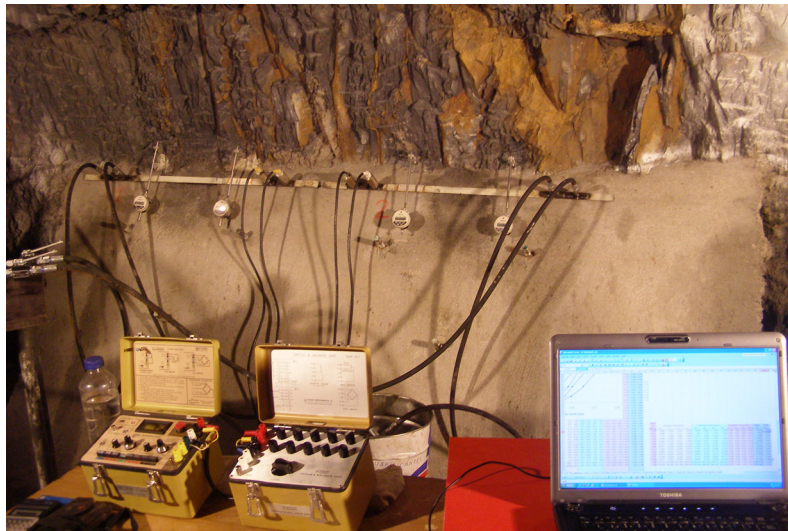


Figura 3 – Ensaio LFJ. Local de um ensaio com dois macacos planos em dois rasgos contíguos

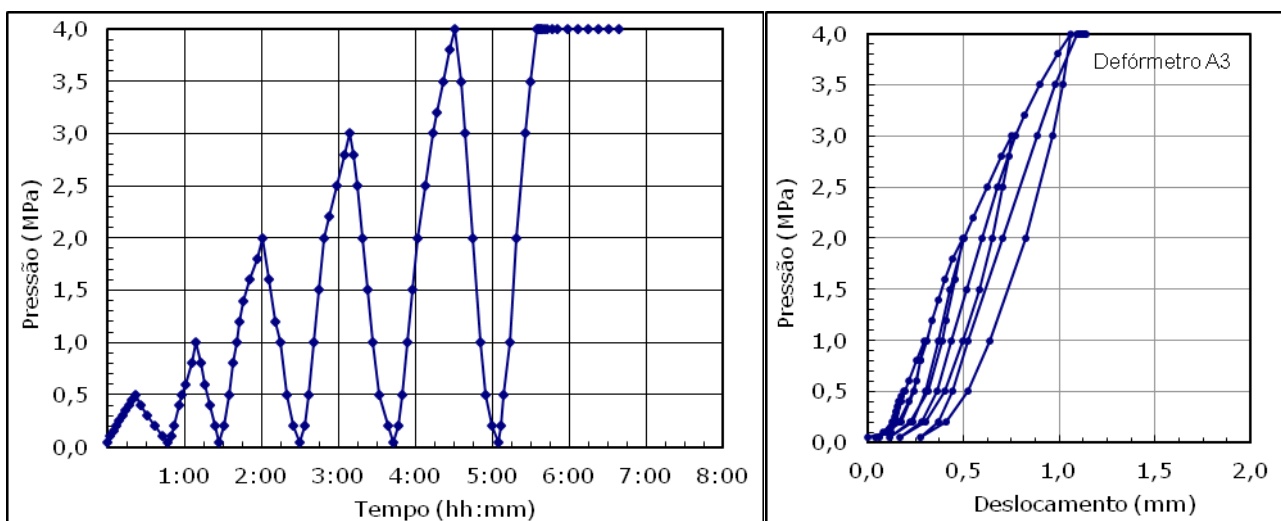


Figura 4 – Ensaio LFJ. a) Cronograma de um ensaio; b) Resultados num dos defôrmetros

Para melhorar a interpretação dos resultados foi desenvolvido um modelo tridimensional do ensaio. Este permite simular várias geometrias de ensaio em que são abertos um ou dois rasgos contíguos no mesmo plano, podendo este ser inclinado em relação à superfície do maciço. O modelo permite, também, simular todo o procedimento de ensaio, incluindo a fase de abertura do furo central e dos rasgos e os ciclos de carga e descarga (Figueiredo *et al.*, 2011).

Neste artigo serão apresentadas algumas aplicações realizadas com este modelo. Estas consideram diferentes geometrias de ensaio, diversas relações entre a tensão *in situ* normal aos rasgos e a resistência à tração do maciço rochoso, as pressões aplicadas em ciclo de carga ou descarga e a área carregada (um ou dois macacos planos). Neste artigo é também abordada e discutida a influência da resistência à tração.

## 2 - MODELO NUMÉRICO

Para a interpretação dos resultados do ensaio LFJ desenvolveu-se um modelo tridimensional de diferenças finitas, programado no programa FLAC3D (Itasca, 2009). O modelo permite simular a preparação e execução do ensaio independentemente do ângulo do plano em que os rasgos são abertos. A malha do modelo constitui um paralelepípedo com 30m x 30m x 15m com 149.440 blocos.

De modo a simular, com detalhe, a iniciação e propagação da fenda de tração no maciço rochoso, foi utilizada uma malha muito refinada no contorno dos rasgos. Na Figura 5 a) é possível visualizar a totalidade da malha do modelo, onde as zonas mais escuras representam as regiões mais refinadas da malha do modelo. Na Figura 5 b) mostra-se um plano transversal onde é possível observar uma simulação em que o plano dos rasgos é inclinado e na Figura 5 c) ilustra-se em pormenor a região em torno dos rasgos.



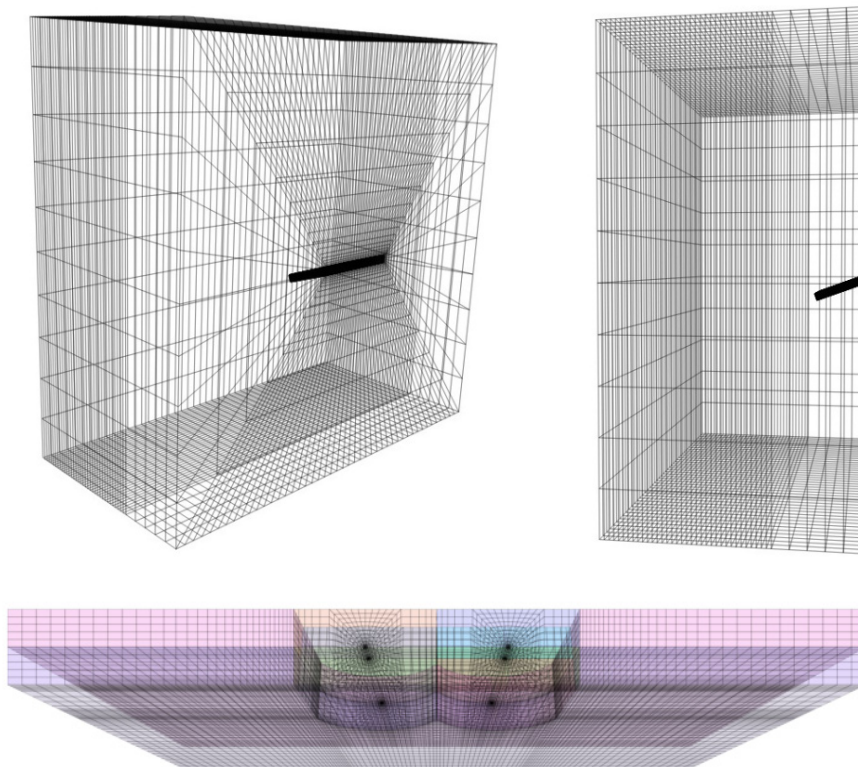


Figura 5 – Malha do modelo numérico. a) Perspectiva da malha; b) Plano transversal da malha; c) Pormenor da região dos rasgos

Para simular a abertura da fenda de tração no plano dos rasgos, foram utilizados elementos de interface com uma resistência à tração finita. Os elementos de interface mantêm-se elásticos se as tensões que os solicitam se mantiverem inferiores a uma tensão limite pré-estabelecida. Caso contrário, a tensão de toma um valor nulo, desenvolve-se a fenda de tração e verifica-se um comportamento não-linear e histerético, visualizável nas curvas de tensão-deformação que o modelo permite obter.

O modelo numérico realiza cálculos que simulam a abertura dos rasgos e a realização de ciclos de carga e descarga, considerando as seguintes fases:

- instalação da tensão *in situ*;
- escavação do furo central do rasgo da direita;
- abertura do rasgo da direita e preenchimento do furo central com argamassa;
- escavação do furo central do rasgo da esquerda;
- abertura do rasgo da esquerda e preenchimento do furo central com argamassa.

Após a fase de preparação segue-se a fase de pressurização dos rasgos que pode ser simulada considerando os seguintes casos (Figura 6):

- dois macacos planos pressurizados em dois rasgos contíguos;
- um macaco plano pressurizado em dois rasgos contíguos;
- um macaco plano pressurizado num rasgo.

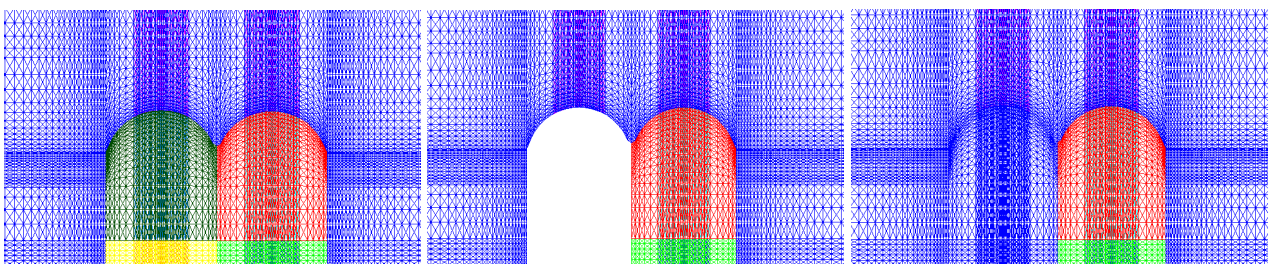


Figura 6 – Tipos de pressurização. a) Dois rasgos abertos e pressurizados (Ensaio LFJ típico); b) Dois rasgos abertos e apenas um rasgo pressurizado; c) Um rasgo aberto e pressurizado

O modelo permite conhecer a profundidade da fenda  $h$ , nomeadamente segundo os alinhamentos representados na Figura 7 e permite determinar os deslocamentos no maciço rochoso para cada incremento de pressão nos locais correspondentes aos defómetros assinalados, na mesma figura, com letras.

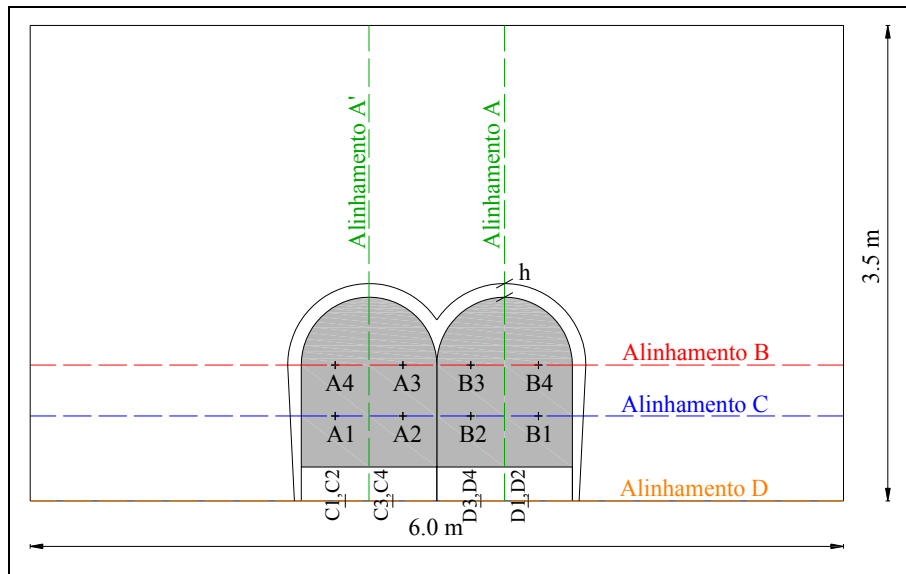


Figura 7 – Localização dos locais de medição dos deslocamentos e dos alinhamentos de medição da fenda de tracção

### 3 - CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DA FENDA DE TRACÇÃO

#### 3.1 - Objetivo

As pressões aplicadas pelos macacos planos no contorno dos rasgos excedem frequentemente a resistência à tração do maciço rochoso, provocando o desenvolvimento de uma fenda de tracção no plano dos rasgos. Uma vez que a determinação do módulo de deformabilidade do maciço rochoso depende da extensão da fenda em cada patamar de pressão, a interpretação dos resultados do ensaio complica-se devido ao desconhecimento das dimensões da fenda, mesmo que esta seja visível na superfície do maciço rochoso (Figura 8).



Figura 8 – Fenda de tracção visível da superfície exterior do maciço rochoso

Além da pressão aplicada existem outros dois parâmetros que influenciam a profundidade da fenda de tracção: a resistência à tração do maciço rochoso  $\sigma_t$  e a tensão inicial *in situ* normal ao plano dos rasgos  $\sigma_{zz}$ . O primeiro é um parâmetro característico do maciço rochoso que depende da resistência à tração da rocha intacta e da existência de discontinuidades. Em maciços rochosos de boa qualidade e sem discontinuidades relevantes, este parâmetro pode ser considerado igual à resistência à tração da rocha. Em situações onde o maciço rochoso esteja muito alterado e fraturado o valor da resistência à tração pode ser considerado nulo. O segundo depende da localização e orientação dos rasgos.

### 3.2 - Influência da tensão *in situ* e da resistência à tração na profundidade da fenda

Para apresentar as relações entre profundidade da fenda  $h$ , a pressão aplicada  $p$ , a tensão *in situ*  $\sigma_{zz}$  e a resistência à tração  $\sigma_t$  recorreu-se à abordagem proposta por Pinto (1983). Nesta abordagem considera-se que o maciço rochoso é isotrópico e que tem comportamento elástico e linear, podendo assim a tensão no contorno da fenda  $\sigma_1$  resultante da pressão aplicada  $p$  ser descrita como uma função  $f(h)$  da profundidade da fenda  $h$ :

$$\sigma_1 = f(h) p \quad [1]$$

A tensão de compressão  $\sigma_2$  no limite da fenda para uma situação em que nenhuma pressão se encontra aplicada, pode ser escrita como uma função  $g(h)$  da profundidade fenda:

$$\sigma_2 = g(h) \sigma_{zz} \quad [2]$$

A fenda atinge uma profundidade  $h$  quando a tensão  $\sigma_1$  devido à aplicação da pressão  $p$  iguala a soma da tensão de compressão  $\sigma_2$  com a resistência à tração  $\sigma_t$ :

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_t \quad [3]$$

Substituindo as equações [1] e [2] na equação [3] e dividindo ambos os membros por  $f(h)$ , obtém-se a seguinte equação:

$$p = \frac{g(h)}{f(h)} \sigma_{zz} + \frac{1}{f(h)} \sigma_t = \psi(h) \sigma_{zz} + \varphi(h) \sigma_t \quad [4]$$

É então possível obter uma relação simples entre  $p$ ,  $\sigma_{zz}$  e  $\sigma_t$ :

$$\frac{p}{\sigma_{zz}} = \psi(h) + \varphi(h) \frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}} \quad [5]$$

A equação [5] mostra que para cada valor da profundidade da fenda  $h$  a relação  $p/\sigma_{zz}$  varia linearmente com a relação  $\sigma_t/\sigma_{zz}$ . Se se considerar que as funções  $\psi(h)$  e  $\varphi(h)$  podem ser representadas por funções quadráticas de  $h$  dadas por:

$$\begin{aligned} \psi(h) &= a + b h + c h^2 \\ \varphi(h) &= d + e h + f h^2 \end{aligned} \quad [6]$$

a equação [5] pode ser escrita como:

$$\frac{p}{\sigma_{zz}} = a + b h + c h^2 + d \frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}} + e \frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}} h + f \frac{\sigma_t}{\sigma_{zz}} h^2 \quad [7]$$

A equação [5] pode também ser utilizada para determinar a relação  $p/\sigma_t$ . Neste caso, a equação da superfície tridimensional pode ser escrita através da expressão:

$$\frac{p}{\sigma_t} = a \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_t} + b \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_t} h + c \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_t} h^2 + d + e h + f h^2 \quad [8]$$

A equação [8] é utilizada para o caso particular e improvável em que a tensão *in situ*  $\sigma_{zz}$  é nula e onde, portanto, a equação [7] não pode ser utilizada.

### 3.3 - Cálculo da profundidade da fenda de tração

Por forma a poder estabelecer relações entre a profundidade da fenda de tração e as relações  $\sigma_t/\sigma_{zz}$  e  $p/\sigma_{zz}$ , realizou-se uma análise paramétrica envolvendo um grande número de cálculos numéricos utilizando valores plausíveis para as gamas de variação dos parâmetros em causa (Bernardo, 2011). O resultado de cada cálculo é um conjunto de valores ( $h$ ;  $\sigma_t/\sigma_{zz}$ ;  $p/\sigma_{zz}$ ) que se ajusta bem à equação [7].

Na simulação numérica foram considerados cinco valores de resistência à tração  $\sigma_t$  (0, 1, 2, 4 e 8 MPa), uma tensão *in situ* de 1 MPa e pressões  $p$  entre 0,5 MPa e 32 MPa. Todos os cálculos foram realizados utilizando o modelo apresentado no ponto 2, e considerando um módulo de elasticidade de 1 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2.

Realizaram-se para o caso de dois macacos planos pressurizados uma série de cálculos que permitiram obter um conjunto de valores  $(h; \sigma_t/\sigma_{zz}; p/\sigma_{zz})$ . Com este conjunto e utilizando uma regressão múltipla foi possível determinar os parâmetros de  $a$  a  $f$  que definem a superfície tridimensional mais provável para relacionar a profundidade da fenda  $h$  e as relações  $\sigma_t/\sigma_{zz}$  e  $p/\sigma_{zz}$ . Esta superfície apresenta-se na Figura 9 e permite estimar a profundidade da fenda de tração se forem conhecidos os valores da tensão *in situ* e da resistência tração.

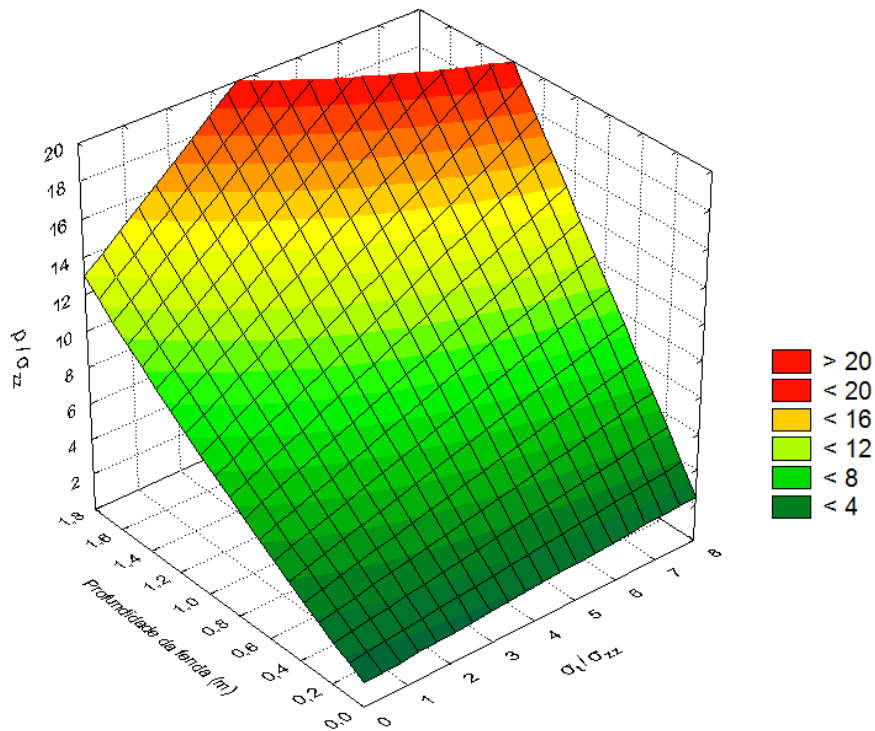


Figura 9 – Superfície tridimensional para estimar a profundidade da fenda para o caso de dois macacos planos

Fixando algumas das variáveis, com a equação [7] é também possível obter gráficos que relacionam as restantes duas variáveis, tendo sido obtidos os seguintes gráficos:

- relação entre a profundidade da fenda de tração e  $p/\sigma_{zz}$  para vários valores da relação  $\sigma_t/\sigma_{zz}$  (Figura 10 a));
- variação de  $p/\sigma_{zz}$  com  $\sigma_t/\sigma_{zz}$  para vários valores de profundidade da fenda (Figura 10 b));
- variação de  $p/\sigma_t$  com a profundidade da fenda para vários valores da relação  $\sigma_{zz}/\sigma_t$  (Figura 11 a)).

Os pontos apresentados na Figura 10 a) correspondem a alguns dos cálculos realizados com o modelo numérico. Através deles é possível observar que se obteve um ajuste satisfatório.

Sendo possível utilizar o ensaio LFJ para estimar a tensão *in situ*  $\sigma_{zz}$  (Figueiredo *et al.*, 2010) e uma vez que a resistência à tração não varia de forma significativa, utilizando a Figura 10 a), é possível estimar a profundidade da fenda à medida que durante os ciclos de carga-descarga do ensaio a pressão aumenta ou diminui.

Utilizando uma metodologia igual à descrita foram obtidas relações similares às indicadas para os restantes casos descritos na Figura 6, ou seja, para o caso de um macaco carregado e dois rasgos e para o caso de um macaco carregado e apenas um rasgo aberto. A Figura 11 b) apresenta os gráficos que relacionam  $p/\sigma_{zz}$  com a profundidade da fenda de tração para os três casos analisados.

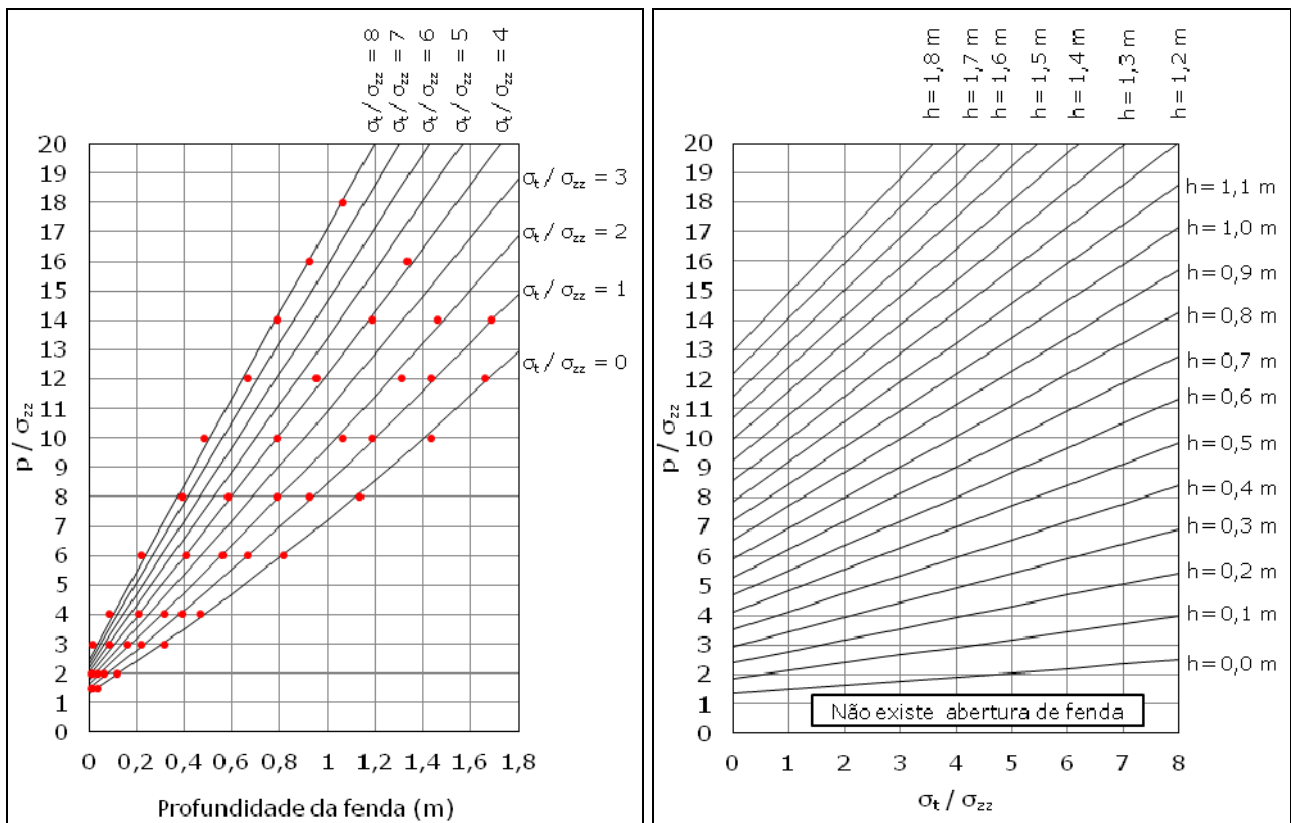


Figura 10 – Relações entre as variáveis. a) Variação da relação  $p/\sigma_{zz}$  com profundidade da fenda para vários valores de  $\sigma_t/\sigma_{zz}$ ; b) Variação da relação  $p/\sigma_{zz}$  com  $\sigma_t/\sigma_{zz}$  para vários valores da profundidade da fenda

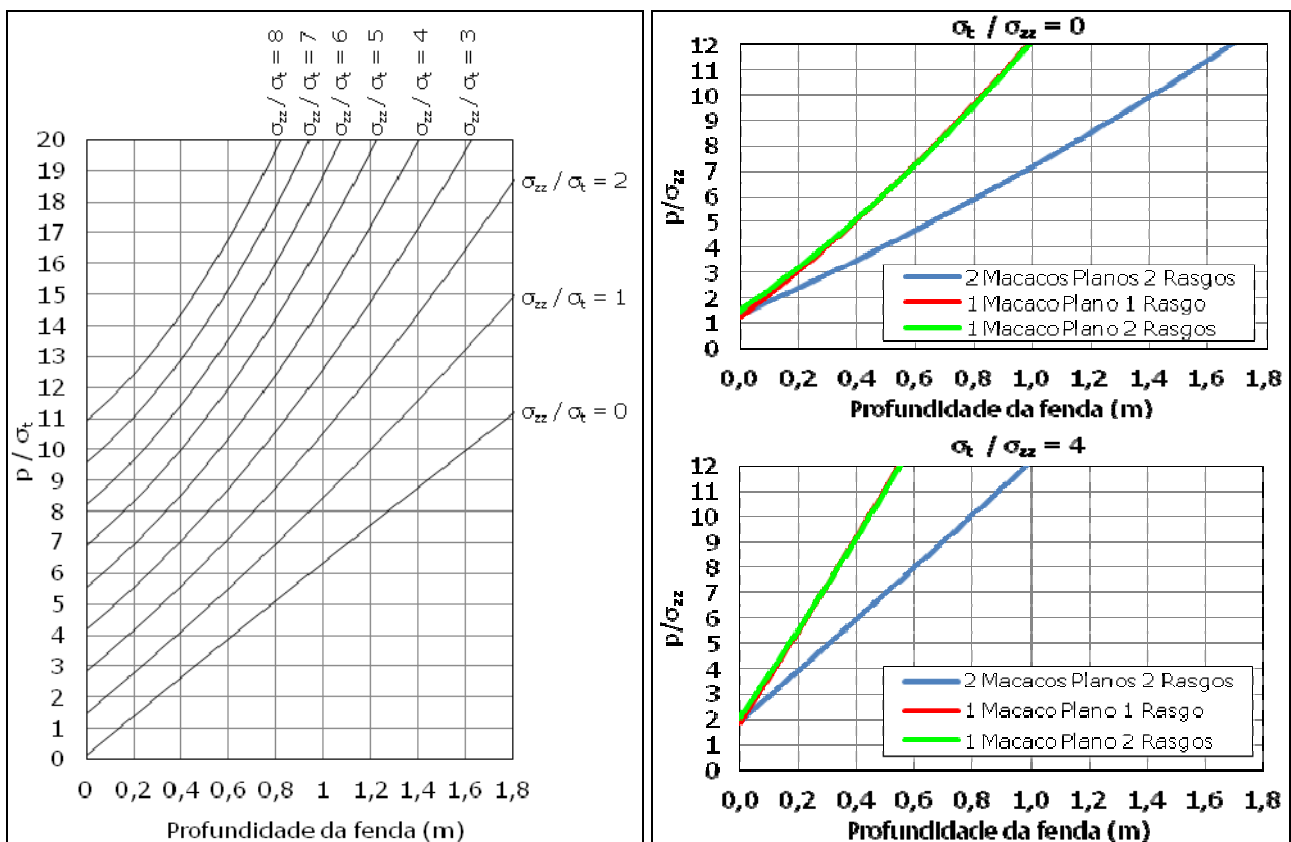


Figura 11 – Relações entre as variáveis. a) Variação da relação  $p/\sigma_t$  com a profundidade da fenda para vários valores de  $\sigma_{zz}/\sigma_t$ ; b) Variação da profundidade da fenda de tração para vários valores de  $p/\sigma_{zz}$  com  $\sigma_t/\sigma_{zz} = 0$  e  $\sigma_t/\sigma_{zz} = 4$ .



A Figura 12 permite observar as tensões normais à interface para um cálculo em que é atribuído o valor de 4 MPa para a relação  $p/\sigma_{zz}$  e em que a resistência à tração é definida como nula. Nesta figura a região a vermelho indica a zona do maciço em que no contorno dos rasgos se desenvolveu a fenda de tração.

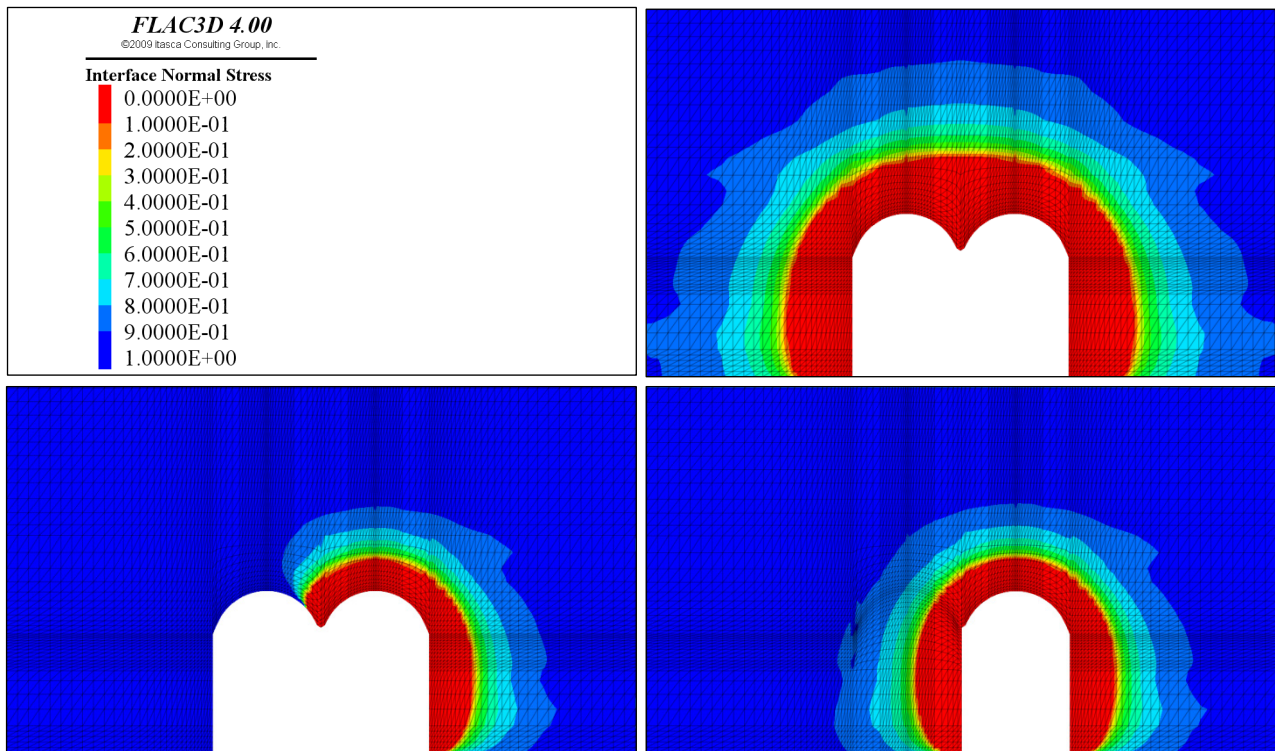


Figura 12 – Tensões normais à interface para  $p/\sigma_{zz}=4$  MPa e  $\sigma_1/\sigma_{zz} = 0$

#### 4 - CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Existem várias metodologias para a interpretação dos resultados do ensaio LFJ e conseqüente para a determinação do módulo de deformabilidade. O modelo que tem vindo a ser utilizado para interpretar os resultados do ensaio baseia-se na teoria da elasticidade para corpos homogêneos, isotrópicos e elásticos lineares, e simula o caso particular de dois macacos pressurizados inseridos em dois rasgos perpendiculares à superfície do maciço rochoso cujas dimensões são infinitas, e em que o ensaio se realiza numa câmara de ensaio retangular com 3,5 m de comprimento por 2,5 m de largura (Pinto, 1983). A abertura do rasgo  $\delta_i$  em cada local de medição  $i$  pode ser descrita em função da pressão aplicada  $\Delta p$  através da expressão:

$$\delta_i = k_i (1 - \nu^2) \frac{\Delta p}{E} \quad [9]$$

em que  $E$  representa o módulo de elasticidade,  $\nu$  o coeficiente de Poisson, e  $k_i$  é um coeficiente dependente do número, da combinação de macacos planos, da localização do local de medição  $i$ , da geometria da câmara de ensaio e da profundidade da fenda.

Os coeficientes  $k_i$  podem ser utilizados para a interpretação dos resultados do ensaio independentemente dos parâmetros do maciço rochoso (módulo de deformabilidade, coeficiente de Poisson, resistência à tração e tensão *in situ*). Pinto (1981, 1983) apresenta os valores de  $k_i$  em função da profundidade da fenda para vários casos de ensaio. Uma vez definidos os valores de  $k_i$  para os defómetros é possível obter o módulo de deformabilidade  $E$  mais provável do maciço rochoso minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre ambos os membros da equação [10]:

$$E = (1 - \nu^2) \Delta p \frac{\sum k_i^2}{\sum k_i \delta_i} \quad [10]$$

O modelo numérico foi utilizado para simulação de várias situações de geometria e de carregamento, algumas delas não consideradas na anterior metodologia. Em todas as situações foi adotado um módulo de deformabilidade de 1 GPa e um coeficiente de Poisson igual a 0,2. Para cada incremento de pressão foi calculada a profundidade da fenda e os deslocamentos nos pontos de medição, de forma a obter os valores de  $k_i$ . Os coeficientes  $k_i$  podem, então, ser utilizados para interpretação dos resultados do ensaio,

independentemente dos parâmetros do maciço rochoso (módulo de deformabilidade, coeficiente de Poisson, resistência à tração e tensão *in situ*).

As Figuras 13, 14 e 15 mostram os diagramas onde se pode observar a variação dos coeficientes  $k_i$  com a profundidade da fenda para os três casos representados na Figura 6. O Quadro 1 apresenta os valores dos coeficientes  $k_i$  obtidos com o modelo numérico. Estes diagramas mostram que os valores dos coeficientes aumentam com a profundidade da fenda até atingirem um valor máximo. Por exemplo, para o caso de dois macacos e dois rasgos, o diagrama mostra que o valor dos coeficientes  $k_i$  nos locais dos defómetros A2 e B2 são superiores aos coeficientes calculados para os restantes locais. Este facto pode ser explicado por os defómetros A2 e B2 se encontrarem mais perto da superfície exterior do maciço rochoso, estando assim menos expostos ao confinamento existente na região interior onde se encontram os defómetros A3 e B3.

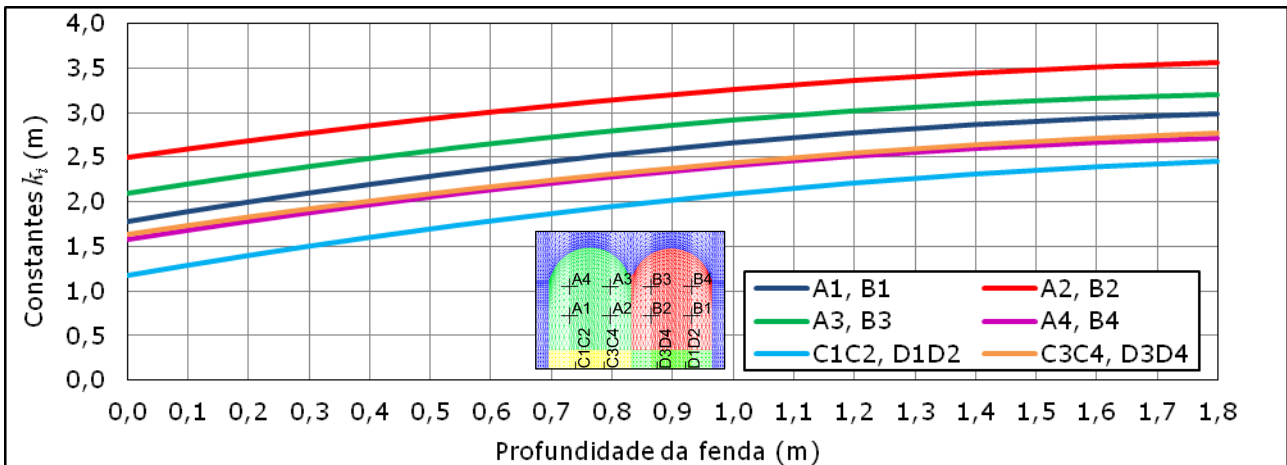


Figura 13 – Variação dos coeficientes  $k_i$  com a profundidade da fenda para dois macacos e dois rasgos

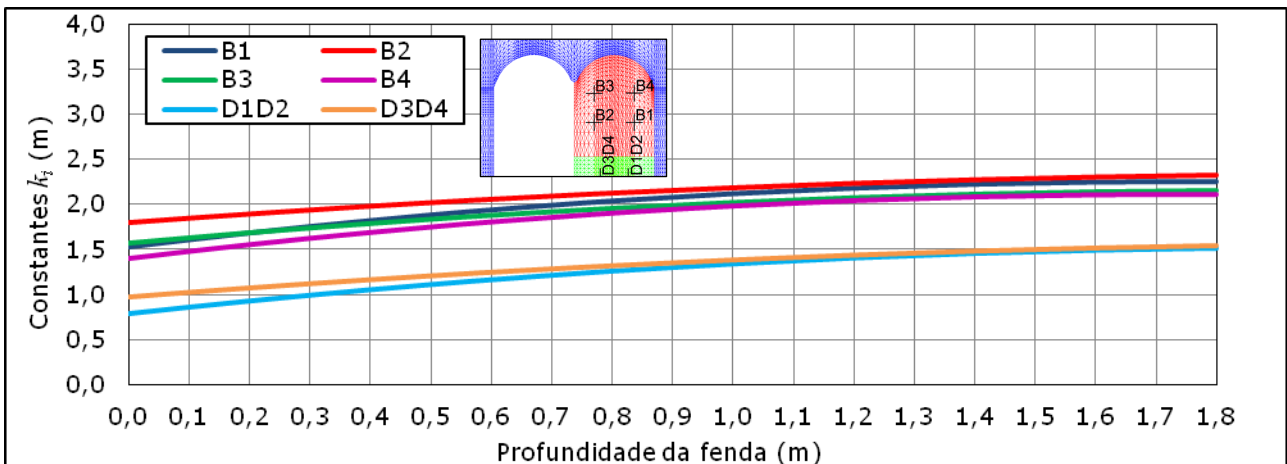


Figura 14 – Variação dos coeficientes  $k_i$  com a profundidade da fenda para um macaco em dois 2 rasgos

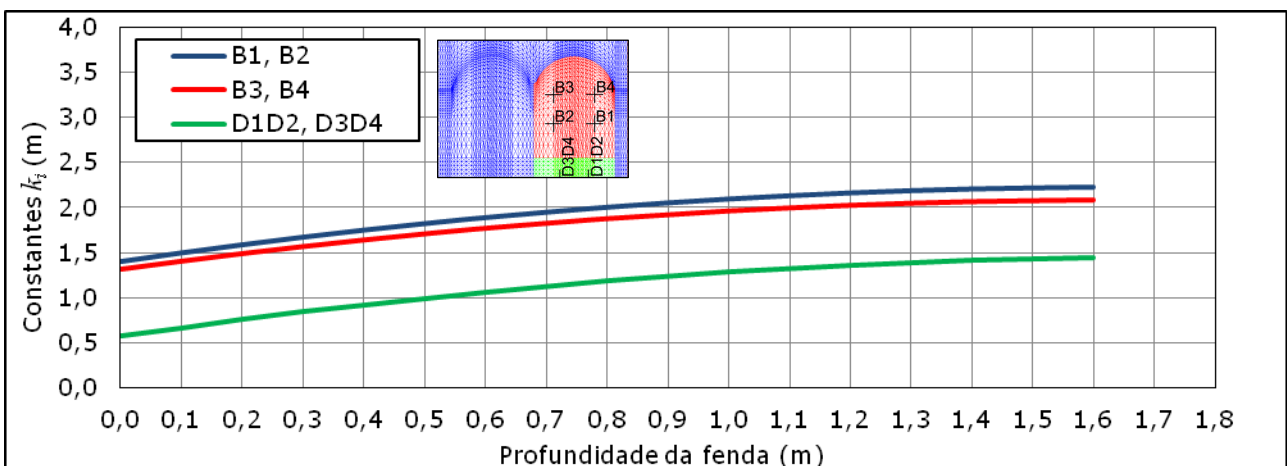
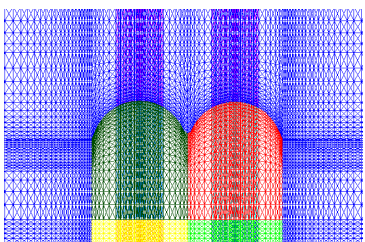
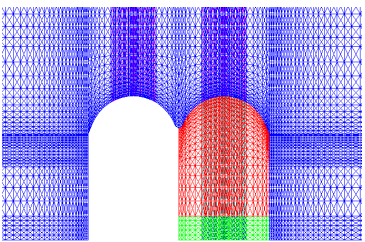
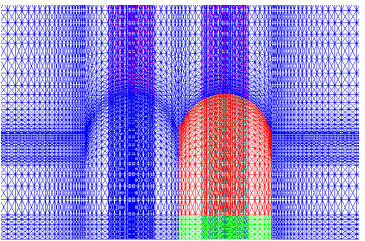


Figura 15 – Variação dos coeficientes  $k_i$  com a profundidade da fenda para um macaco e um rasgo

Quadro 1- Coeficientes  $k_i$  calculados com o modelo numérico

Caso	Local de medição	Profundidade da fenda (m)				
		0,0	0,2	0,5	1,0	1,6
	A1, B1	1,764	1,969	2,237	2,577	2,811
	A2, B2	2,458	2,630	2,856	3,149	3,362
	A3, B3	2,083	2,279	2,533	2,851	3,056
	A4, B4	1,569	1,767	2,025	2,352	2,577
	C1C2, D1D2	1,115	1,313	1,576	1,920	2,182
	C3C4, D3D4	1,542	1,716	1,947	2,252	2,487
	B1	1,532	1,689	1,888	2,126	2,255
	B2	1,795	1,891	2,018	2,183	2,303
	B3	1,570	1,686	1,835	2,020	2,138
	B4	1,401	1,555	1,750	1,982	2,105
	D1D2	0,787	0,926	1,107	1,335	1,486
	D3D4	0,975	1,076	1,210	1,386	1,519
	B1, B2	1,317	1,490	1,708	1,961	2,082
	B3, B4	1,406	1,590	1,824	2,094	2,225
	D1D2, D3D4	0,572	0,757	0,994	1,281	1,446

## 5 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O ensaio de macacos planos de grande área foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico de fundações de barragens na fase de prospecção geotécnica. Devido aos elevados custos associados aos ensaios *in situ* e, por vezes, devido ao uso excessivo de sistemas de classificação ou correlações empíricas, o ensaio LFJ tem vindo a cair em desuso. Contudo, para o projeto de estruturas importantes, sensíveis à deformabilidade do maciço rochoso de fundação, após uma avaliação preliminar utilizando métodos indiretos e empíricos é essencial obter através de ensaios de campo parâmetros de deformabilidade representativos. O ensaio LFJ, na configuração de dois macacos planos adjacentes, apresenta-se como uma solução interessante face à sua relação entre custo e eficácia, uma vez que permite mobilizar durante o ensaio elevados volumes de maciço rochoso que podem, assim, ser considerados representativos.

A dificuldade na interpretação dos resultados do ensaio LFJ deve-se à potencial abertura de uma fenda de tração durante a aplicação de pressão pelos macacos planos. O início e propagação da fenda dependem da tensão *in situ*, da resistência à tração e da pressão aplicada. Recentemente foi desenvolvido um novo modelo que permite reproduzir a exata geometria do ensaio durante todas as suas fases, e a abertura da fenda de tração. Este modelo permite estimar a tensão *in situ* perpendicular aos rasgos e a deformação do maciço rochoso durante os ciclos de carga e descarga (Figueiredo *et al.*, 2010 e 2011).

Este artigo apresentou uma metodologia para determinar a profundidade da fenda de tração para várias geometrias e condições de aplicação da pressão a partir dos valores de pressão aplicada, da resistência à tração e da tensão *in situ* perpendicular aos rasgos. Foi demonstrado que, para cada profundidade de fenda, a relação de  $p/\sigma_{zz}$  varia linearmente com a relação  $\sigma_t/\sigma_{zz}$ , e que portanto todos os cálculos podem ser realizados em função de parâmetros adimensionais. Os valores dos coeficientes  $k_i$  utilizados para

estimar o valor do módulo de deformabilidade foram apresentados como função da profundidade da fenda para várias geometrias de ensaio e condições de carregamento.

Neste momento encontram-se a ser realizados estudos que consideram a inclinação do plano dos rasgos em relação à superfície do maciço rochoso, e diferentes condições de fronteira por forma a simular a geometria das câmaras de ensaio.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho enquadra-se no programa de investigação do LNEC, denominado "Determinação dos parâmetros geomecânicos de maciços rochosos" e inclui o trabalho levado a cabo para a realização da dissertação de mestrado de um dos autores na Universidade Nova de Lisboa.

## **REFERÊNCIAS**

- Bernardo, F. 2011. *Modelação numérica do ensaio de macacos planos de grande área para determinação da deformabilidade de maciços rochosos*. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa.
- Figueiredo, B., Lamas, L. & Muralha, J. 2010. Determination of in situ stresses using large flat jack tests. ISRM International Symposium 2010 and 6th Asian Rock Mechanics Symposium, New Delhi.
- Figueiredo, B., Lamas, L. & Muralha, J. 2011. Numerical simulation of a large flat jack test with cyclic loading. Proceedings of the 6th International Conference on Dam Engineering, LNEC, Lisbon.
- ISRM 1986. Suggested method for deformability determination using a large flat jack technique. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 23: pp. 131-140.
- Itasca 2009. FLAC3D, Version 4.0, User's Manual. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Pinto, L.J. 1981. Determination of the deformability modulus of weak rock masses by means of large flat jacks. Proceedings of an International Symposium on Weak Rock, Tokyo, pp. 447-452.
- Pinto, L.J. 1983. Deformabilidade – Ensaio LFJ. Desenvolvimentos recentes da Mecânica das Rochas. LNEC, Lisboa.
- Rocha, M. 1974. Present possibilities of studying foundations of concrete dams. Proceedings of the 3rd ISRM International Congress on Rock Mechanics, Denver, USA, pp. 879-897.
- Wittke, W. 1990. Rock Mechanics. Theory and applications with case histories. Springer-Verlag, Berlin.