

DESENVOLVIMENTOS NA INTERPRETAÇÃO DO MÉTODO DAS ALMOFADAS PEQUENAS*

Recent advances in the interpretation of the small flat jack method

por:

C. Souza Martins**

L. Ribeiro e Sousa***

RESUMO — O LNEC tem vindo a desenvolver o método das almofadas pequenas (SFJ) para quantificação do estado de tensão *in situ* em maciços rochosos, baseado no método de libertação de tensões por abertura de rasgos, que permite ainda avaliar a deformabilidade dos maciços.

Para interpretação do método SFJ, foi desenvolvido um novo modelo admitindo comportamentos isotropos e anisotropos, com base no uso de um modelo de cálculo tridimensional por elementos finitos.

SYNOPSIS — LNEC has been developing the small flat jack (SFJ) method for the *in situ* measurement of the state of stress based on stress relief by opening slots, and also to evaluate the deformability of the rock mass. A new interpretation model for this method was developed, using a 3-D finite element model with isotropic or transverse anisotropic stress-strain behaviour.

1 — INTRODUÇÃO

Na análise de estruturas subterrâneas em maciços rochosos, é necessário efectuar previsões sobre as acções, particularmente as relacionadas com as que resultam da libertação do estado de tensão *in situ* ao longo das fronteiras de escavação das obras. Estas acções, que originam no maciço rochoso uma redistribuição do estado de tensão e um movimento deformacional dirigido para as aberturas, dependem do estado de tensão *in situ* instalado antes da construção das obras e, também, da sequência construtiva adoptada.

Previsões adequadas do estado de tensão devem ser efectuadas com base em medições *in situ*. Entre os vários métodos utilizados para tal fim, é dada especial ênfase aos relacionados com a libertação de deformações. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem vindo a desenvolver as suas próprias tecnologias de ensaio, particularmente o método SFJ ("small flat jack") e o método STT ("stress tensor tube"). O método SFJ é baseado na libertação parcial das tensões por abertura de rasgos, permitindo, ainda, avaliar a deformabilidade do maciço rochoso no local de ensaio.

Foi desenvolvido um novo modelo interpretativo deste método, com base no uso de um modelo tridimensional por elementos finitos, assumindo o maciço rochoso no modelo características de isotropia ou de um corpo transverso-isótropo. Foi, ainda, suposta a existência de uma fenda gerada no plano do rasgo, onde é aplicada a pressão pelos macacos planos, para as profundidades habitualmente seguidas nos ensaios.

O presente trabalho ilustra resultados obtidos com o respectivo modelo tridimensional, comparados com soluções equivalentes, quer analíticas, quer experimentais.

* Apresentado no 6.º Congresso da ISRM, Montreal, 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Especialista do LNEC, PAULO ABIB Engenharia, São Paulo, Brasil.

*** Investigador-Coordenador do LNEC.

2 — O MÉTODO SFJ

2.1 — Tecnologia de ensaio

O método do macaco plano consiste na execução de um rasgo numa parede exposta e no restabelecimento da posição inicial de pontos de medida por aplicação de pressões conseguidas através de macacos hidráulicos planos. As pressões necessárias ao restabelecimento estão em correspondência com as tensões normais actuates na superfície do rasgo. Este método utiliza, essencialmente, os chamados macacos planos que são constituídos por duas lâminas metálicas com determinada forma, soldadas perifericamente entre si, às quais se transmite uma determinada pressão por intermédio do óleo existente no interior dos macacos (Martins, 1985).

No que respeita a técnicas desenvolvidas utilizando este método, refere-se a tecnologia desenvolvida no LNEC com macacos planos de pequena área, designada sistema SFJ (Rocha *et al.*, 1966). Pode ser descrito sucintamente do seguinte modo (Fig. 1):

- i) Colocam-se numa superfície a estudar, depois de suficientemente aplanada, pares de bases de medida entre as quais se medem distâncias.
- ii) Com uma serra de disco diamantado abre-se um rasgo entre as bases, libertando-se assim a tensão normal existente no seu plano. Como consequência, varia a distância entre as bases de medida.
- iii) Introduce-se um macaco plano de forma circular, que preenche o rasgo, e injecta-se óleo sob pressão no macaco, medindo-se a distância entre as bases até que se obtenha a posição inicial. A pressão introduzida no macaco, para se obter o retorno à posição inicial (pressão de cancelamento), corresponde, à parte pequenos factores de correcção, à tensão normal existente na faceta correspondente ao rasgo aberto.

Admite-se, nestes ensaios, que as pressões aplicadas às almofadas para restituição das deformações associadas à abertura do rasgo são iguais à tensão normal actuante na superfície do rasgo, previamente existente no maciço rochoso, a menos de um factor correctivo que depende, essencialmente, da forma dos segmentos do rasgo. Utilizam-se no LNEC formas de segmento circular com flechas de 10,5, 17 e 24 cm, sendo os respectivos factores correctivos de 9%, 8% e 7%. O estado de tensão estimado corresponde ao que resulta da alteração induzida no campo de tensões, na sequência das obras de escavação.

A grande inovação da técnica do LNEC relativamente a outras já existentes (Borsetto *et al.*, 1983) está ligada ao processo de abertura do rasgo para o alojamento do macaco plano, que neste caso é executado por meio de um disco diamantado, enquanto que, em outros, os rasgos tradicionais são obtidos por furos circulares de diâmetros de 5 cm paralelos e parcialmente sobrepostos. Nestas técnicas, a operação de corte resulta bastante morosa, perturba o maciço rochoso e obriga à utilização de argamassa de cimento para uma melhor adaptação do macaco plano ao rasgo, com o agravamento de as características elásticas do cimento serem bastante diferentes do maciço envolvente.

O método SFJ permite, ainda, avaliar a deformabilidade do maciço rochoso no local do ensaio. Na técnica do LNEC, o módulo de deformabilidade era conseguido através de curvas experimentais, obtidas com base em resultados deduzidos a partir da utilização de um modelo reduzido (Rocha *et al.*, 1966).

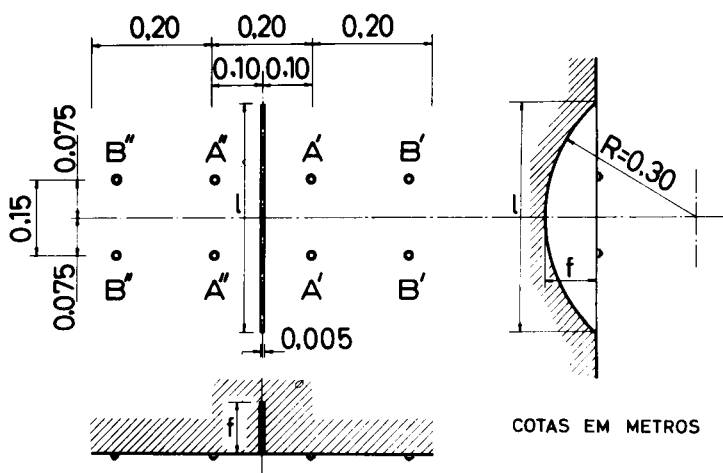


Fig. 1 — Sistema SFJ - geometria de um rasgo

2.2 — Dificuldades na aplicação do método

Analisa-se, em seguida, problemas existentes na aplicação do método SFJ, ao nível do modelo interpretativo e das técnicas de ensaio. Esta técnica apresenta vantagens inerentes à sua simplicidade e pelo facto de não ser necessário o conhecimento *a priori* das características mecânicas do maciço rochoso. Estes ensaios têm sido aplicados no LNEC, admitindo que o maciço rochoso é um meio homogêneo, isótropo e elástico e que as chamadas pressões de cancelamento correspondem à tensão normal actuante no rasgo.

Na realidade, surgem dificuldades na sua aplicação por vários factores, nomeadamente devido ao facto de o maciço rochoso ter um comportamento claramente diferenciado do modelo interpretativo referido, devido ao sistema de aplicação de carga e devido à técnica de medições utilizada.

Assim, a experiência mostra que a reversibilidade do comportamento da curva carga-descarga, inerente à hipótese do maciço homogêneo, elástico e isótropo, não é sempre correctamente verificada. Nota-se, por vezes, um efeito de histerese e uma deformação residual (a pressão nula), mais pronunciada sobretudo no primeiro ciclo, justificando-se o comportamento real com a influência de vários factores, com heterogeneidades e descontinuidades do maciço.

Uma outra dificuldade na interpretação do ensaio surge pelo facto de a zona ensaiada estar descomprimida e, por vezes, fracturada devido à influência dos processos de escavação, nomeadamente por explosivos, o que deve ser levado em conta na interpretação específica dos ensaios. Recomenda-se, por isso, a sua realização em zonas sãs e bem purgadas e de geometria o mais regular possível, de modo a evitar ao máximo a influência da descompressão e da fracturação. Surgem, também, problemas no que concerne às hipóteses admitidas para o comportamento do maciço rochoso, nomeadamente quando ocorrem roturas ou plastificações na zona do maciço envolvida ou quando se verifica um comportamento acentuadamente anisótropo do maciço.

Nas situações em que a resistência do material não for compatível com as tensões induzidas pela escavação das obras subterrâneas, podem ocorrer deformabilidades plásticas e uma redistribuição do estado de tensão, pelo que as medições efectuadas, com base em macacos planos não permitem uma previsão do estado de tensão inicial. Torna-se, pois, adequado, tendo em vista uma melhor interpretação destes ensaios, proceder a investigações geomecânicas nas zonas de ensaio (Faiella *et al.*, 1983).

Um outro factor importante referido diz respeito à anisotropia que é responsável por muitas inconsistências constatadas nos ensaios, e que requerem a utilização de modelos de interpretação mais refinados.

Um outro conjunto de dificuldades relacionadas com a interpretação destes ensaios está associado ao sistema de aplicação da carga e o seu modo de realização.

No que diz respeito ao sistema de aplicação de cargas, observa-se que a pressão de cancelamento é função do ponto de medida, isto é, não se consegue com a mesma pressão de cancelamento retornar os pontos de medida à sua posição original. Deve-se, entre outros factores, à hipótese de que a tensão normal não é uniforme na superfície do rasgo e, também, ao facto de que a pressão aplicada pelos macacos não é uniforme em toda a área do rasgo. Uma outra dificuldade pode resultar da existência de tensões tangenciais, cuja influência é de difícil avaliação sobre os deslocamentos resultantes da abertura do rasgo. No caso do sistema SFJ, porque o rasgo é de pequena espessura (5 mm), este efeito pode ser negligenciado, tal como foi constatado por Rocha *et al.* (1966). Devido à concentração de tensões nos bordos do rasgo, quando da aplicação da pressão pelo macaco plano, pode-se provocar a abertura de fracturas existentes ou originar fendas, cuja profundidade é *a priori* desconhecida e que pode vir a dificultar a interpretação dos ensaios. Esta última constatação tem sido considerada na análise de resultados obtidos com macacos de grande área LFJ.

Quanto à tecnologia utilizada no ensaio, a experiência tem demonstrado que a técnica seguida é relativamente fácil, rápida e económica, verificando-se, em relação à determinação do estado de tensão, um erro que, em regra, não ultrapassa os 20%. No entanto, julga-se necessário a introdução de algumas melhorias na técnica de ensaio, nomeadamente no que diz respeito à localização de pontos de medida, ao sistema de medição de deslocamentos e à aparelhagem utilizada.

3 — MODELO DE CÁLCULO PARA INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO

Para se tentar melhorar o modelo interpretativo dos resultados obtidos pelo método SFJ, construiu-se um modelo de cálculo tridimensional por elementos finitos, e, com base em cálculos efectuados com o mesmo, procurou-se estudar algumas das dificuldades mencionadas acerca da aplicação desta técnica de ensaio. Efectuou-se um estudo paramétrico para diferentes características mecânicas do maciço rochoso, admitindo a hipótese de se considerar a geração de uma fenda no plano do rasgo, aquando da aplicação da pressão pelo macaco plano, para as duas profundidades de rasgo (17 a 24 cm) mais utilizadas no LNEC (Martins, 1985).

Na Fig. 2, apresenta-se o modelo conceptual utilizado. A face onde é efectuado o rasgo corresponde à condição de fronteira de estado de tensão normal nulo e, nas restantes faces, admite-se que o deslocamento normal é impedido. O maciço é suposto homogéneo e elástico, admitindo-se a hipótese quer de isotropia quer de anisotropia. Para a anisotropia, considera-se um corpo transverso-isotrópo, com os planos de isotropia (estratos), paralelos ($\theta=0^\circ$) ou

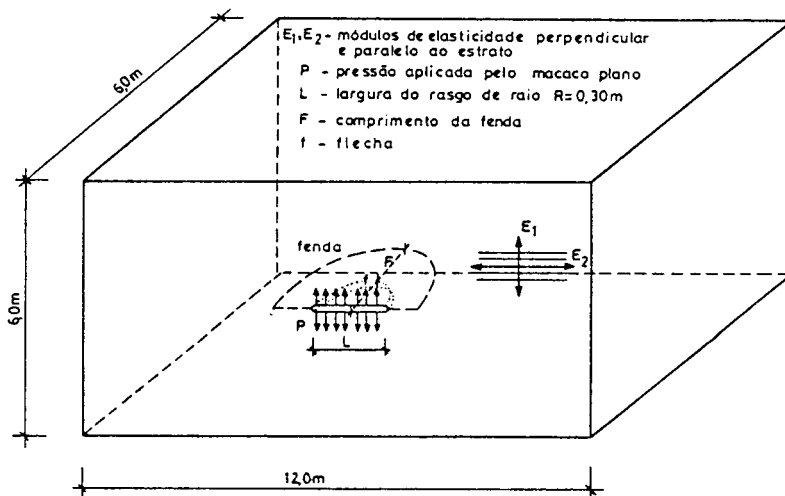


Fig. 2 — Modelo conceptual para análise do ensaio

normais ao rasgo ($\theta=90^\circ$), sendo o módulo de elasticidade perpendicular ao estrato E_1 unitário e o módulo paralelo ao estrato E_2 variável, e os coeficientes de Poisson ($\nu=\nu_1=\nu_2$) iguais a 0,2 ou 0,1. O módulo de distorção foi calculado por $G_1=1/4 (E_1 + E_2)/(1 + \nu)$.

No Quadro 1, sintetizam-se os casos analisados. Consideraram-se relações de anisotropia E_2/E_1 iguais a 4 e 8, para além do caso isótropo, que permite enquadrar os casos ocorrentes na prática. Para o caso isótropo e flecha igual a 24 cm, adoptaram-se vários comprimentos de fenda no plano do rasgo, com igual desenvolvimento em qualquer dimensão, cuja gama de valores vai desde o caso sem fenda até uma fenda de comprimento infinito.

QUADRO 1
Casos analisados por elementos finitos

Isotropia ($E_1 = E_2$)		Anisotropia $f=24\text{ cm}; F/f=0$	
Flecha (f)	Comprimento da fenda (F/f)	$\nu=0,1$	
		$\theta=0^\circ$	$\theta=90^\circ$
17 cm	0		
	0	$E_2/E_1=4$	$E_2/E_1=4$
	1/8		
	2/3		
24 cm	2		
	4,5	$E_2/E_1=8$	$E_2/E_1=8$
	infinito		

Construiu-se, então, um modelo tridimensional por elementos finitos, que permitiu simular as várias situações previstas. Por simplificações introduzidas, admitiram-se planos de simetria, pelo que a malha de cálculo foi limitada a um quarto do bloco, tendo sido utilizados elementos lineares isoparamétricos, de forma cúbica de 8 pontos nodais e de forma prismática de 6 pontos nodais, tendo a malha 2091 pontos nodais (Fig. 3).

Para simulação da pressão aplicada pelos macacos planos às superfícies do rasgo, admitiu-se uma pressão unitária uniforme, para as várias hipóteses de comprimento da fenda e considerou-se um estado de tensão inicial vertical (σ_z^0) unitário. A abertura de um rasgo, para este estado de tensão inicial, corresponde, em termos estruturais, à aplicação de uma pressão unitária, normal à superfície do rasgo, de sinal contrário, para a hipótese de rasgo sem fenda.

A consideração de um estado de tensão inicial admite outras componentes, nomeadamente as existentes no plano da superfície onde se efectua o rasgo (σ_x^0 e τ_{xz}^0), enquanto que as restantes (σ_y^0 , τ_{xy}^0 e τ_{zy}^0) podem ser desprezadas dado que a profundidade do rasgo é pequena e o estado de tensão normal à superfície livre é nulo.

Admitindo-se a componente de tensão σ_x^0 unitária, foi feito um cálculo para a situação de isotropia, flecha igual a 17 cm e sem fenda, tendo-se constatado de que esta componente não afecta os resultados dos ensaios, como era de esperar, devido à pequena espessura do rasgo (5 mm). No que diz respeito à consideração das tensões τ_{xz}^0 , não foi possível analisar a sua influência nos resultados dos ensaios, dado que o modelo adoptado tem dois planos de simetria.

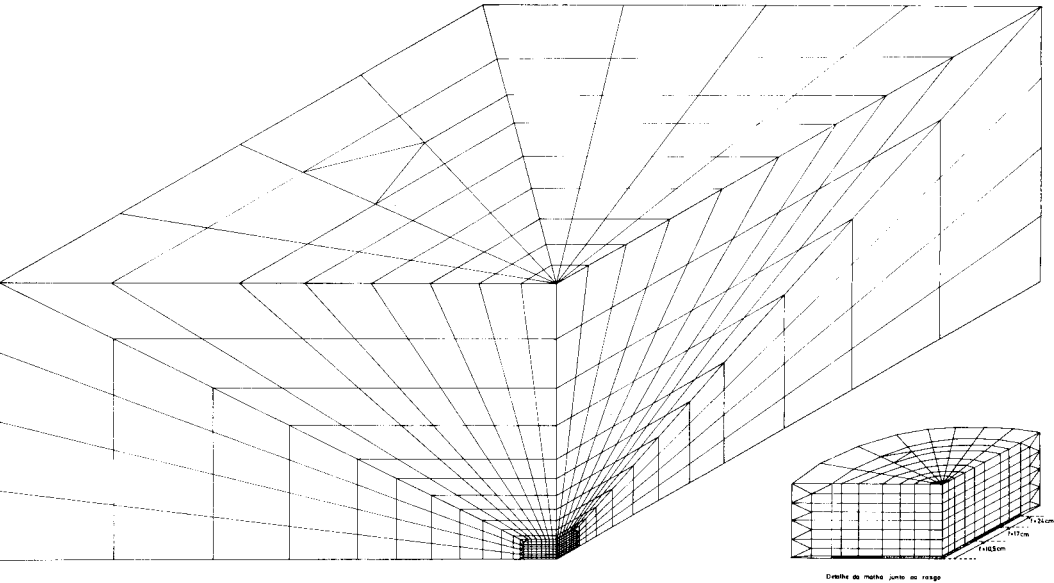


Fig. 3 — Malha tridimensional por elementos finitos

4 — ANÁLISE DOS ESTUDOS EFECTUADOS

4.1 — Meio isótopo

As primeiras análises efectuadas dizem respeito à situação de isotropia e à abertura de rasgos envolvendo flechas de 17 e 24 cm. Elaborou-se, então, a Fig. 4, onde se apresentam deslocamentos entre pares de pontos de medida situados na superfície a várias distâncias do plano do rasgo, ao longo de dois eixos perpendiculares ao rasgo, um no centro (secção AA') e o outro à distância de 7,5 cm (secção BB'), sendo esta distância usualmente empregue nos ensaios. Os resultados referem-se à hipótese de $\nu=0,2$. Para o caso de flecha igual a 24 cm, efectuou-se, ainda, um cálculo adicional com $\nu=0,1$, tendo-se constatado, para a hipótese de isotropia, que os valores são praticamente coincidentes, apresentando variações que, em regra, não excedem os 2%. Apresentam-se, também, os valores de deslocamentos obtidos por uma solução analítica, referente a um rasgo de forma elíptica e comprimento infinito submetido a tensões normal e paralela ao seu plano, para a hipótese de estado plano de tensão (Alexander, 1960). A partir das expressões da solução analítica pode-se concluir que a influência da espessura do rasgo é desprezável, bem como da tensão paralela ao rasgo, constatação esta já confirmada por resultados de elementos finitos.

Na Fig. 4, referente aos diagramas de deslocamentos calculados para pontos afastados do eixo do rasgo de 7,5 cm, apresentam-se, também, os correspondentes valores determinados por ensaios laboratoriais conduzidos num modelo prismático de $40 \times 50 \times 100$ cm, constituído de uma mistura de gesso, diatomite e água, que foi submetido a uma compressão uniaxial (Rocha *et al.*, 1966).

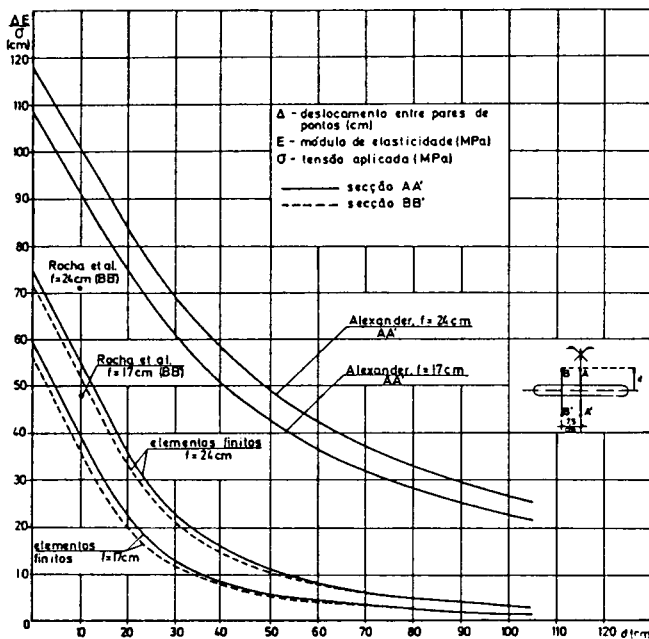


Fig. 4 — Curvas de deslocamentos em função da distância entre pares de pontos equidistantes do rasgo

Os estudos efectuados permitiram a obtenção completa dos campos de tensões e de deslocamentos provocados pela abertura do rasgo e aplicação da pressão de cancelamento, e proporcionaram uma melhor compreensão dos fenómenos envolvidos na aplicação deste método. Além disso foi possível estabelecer uma comparação dos resultados obtidos por outras vias, nomeadamente experimental e analítica. Assim, analisando os diagramas de deslocamentos para as flechas de 17 e 24 cm (Fig. 4), constata-se uma evolução semelhante, com uma atenuação para cerca de 20% para pontos a distâncias de 30 e 40 cm do rasgo, respectivamente para flechas de 17 e 24 cm. Como se pode observar, para distâncias de 30 cm, que correspondem aos pinos mais afastados habitualmente colocados nos ensaios SFJ, os valores dos deslocamentos são bastante reduzidos face aos máximos deslocamentos medidos na superfície do rasgo. Para as marcas situadas a 10 cm, cujos deslocamentos são habitualmente utilizados para determinação do estado de tensão e da deformabilidade, os deslocamentos são de 66% e 74% do deslocamento máximo, respectivamente, para $f=17$ e 24 cm. Verifica-se, ainda, que os deslocamentos obtidos considerando os dois rasgos são superiores, para $f=24$ cm, em cerca de 40% para uma distância de 10 cm, e bastante superiores para a distância de 30 cm, pelo que se considera desejável, aquando da utilização de rasgos de menor profundidade, a localização dos pinos a distâncias menores.

A comparação dos deslocamentos obtidos pelas soluções numéricas com os calculados pela solução de Alexander permitiu um primeiro controlo dos resultados obtidos nos cálculos, constituindo esta solução um limite superior em termos de deslocamentos, pois as hipóteses admitidas correspondem a um rasgo que se prolonga indefinidamente.

Comparando os valores dos deslocamentos obtidos pelo modelo experimental já referido e pela solução numérica, verifica-se que os valores obtidos por esta última via, para pares de pontos distanciados de 10 cm do rasgo e a uma distância de 7,5 cm do eixo (Δ_1), são cerca de 75% daqueles, no caso de $f=17$ cm, e de 73%, no caso de $f=24$ cm. No entanto, para os deslocamentos relativos entre pontos afastados de 10 cm e pontos afastados de 30 cm (Δ_2), verifica-se que, ao contrário da constatação anterior, os deslocamentos calculados pelo modelo experimental são bastante menores quando comparados com os resultados dos modelos numéricos, atingindo cerca de 54% para $f=17$ cm e de 53% para $f=24$ cm, respectivamente. Dos resultados obtidos por elementos finitos, constata-se que os deslocamentos Δ_2 , são, em valor absoluto, importantes quando comparados com Δ_1 , atingindo valores de cerca de 44% do deslocamento máximo.

Estas diferenças verificadas nos resultados, que se procura ilustrar para as curvas Δ_1 e Δ_2 , obtidas por via experimental, onde se implantaram os correspondentes valores numéricos (Fig. 5), podem ser justificadas pelas seguintes razões: *i*) no modelo experimental, os rasgos abertos dizem respeito a um modelo à escala geométrica de 1/5, pelo que os rasgos efectuados têm um raio de 6 cm e espessura 1 mm, sendo pois de esperar, face aos deslocamentos induzidos pela abertura e à aparelhagem disponível, a introdução de erros nos valores dos deslocamentos medidos; *ii*) no bloco ensaiado submetido à compressão uniaxial, por terem sido consideradas superfícies livres, induzem-se necessariamente deslocamentos que devem se situar ligeiramente acima das condições reais; *iii*) as soluções numéricas por elementos finitos, por utilizarem uma formulação em deslocamentos, são soluções mais rígidas relativamente à solução exacta do problema, pelo que, face à discretização utilizada e à experiência existente no uso destes modelos, se estima que o erro máximo cometido, por defeito, não deva exceder 10% (Martins, 1985).

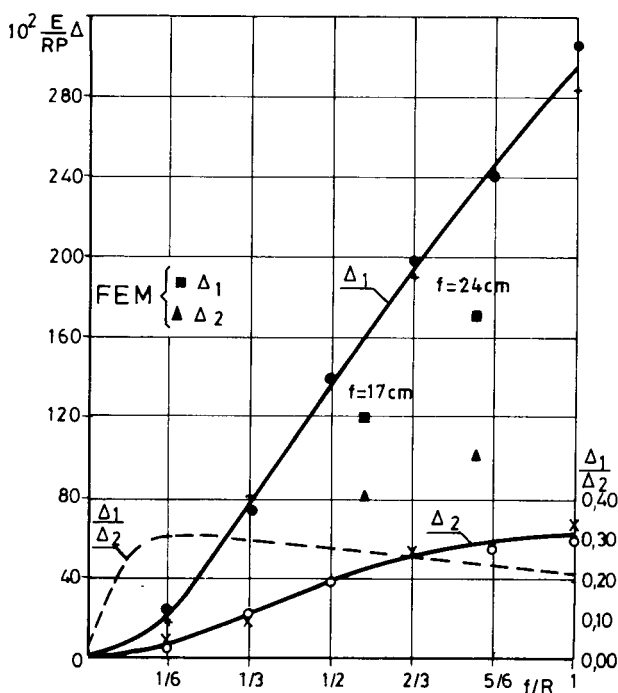


Fig. 5 — Curvas EA/RP versus f/R

Foram, então, elaboradas, com base nos resultados obtidos pelo modelo de cálculo, curvas E versus Δ/RP , sendo Δ o deslocamento entre pares de pontos equidistantes do rasgo de raio R e P a pressão de cancelamento. Na Fig. 6, apresentam-se estas curvas para a flecha de 24 cm e para pontos pertencentes a planos perpendiculares ao rasgo, passando a 7,5 cm do meio do rasgo e a meio do rasgo.

O módulo de deformabilidade E pode ser obtido por meio dos ábacos referidos, ou então pela seguinte expressão:

$$E = C_i \frac{P}{\Delta_i} \quad (1)$$

em que Δ_i é o deslocamento entre pares de pontos distanciados de z_i do rasgo, C_i o coeficiente obtido pelo modelo de cálculo referentes a estes pontos i (Quadro 2). E e P são expressos em MPa, C_i e Δ_i em cm.

Como se disse, constata-se, por um lado, que na zona de ensaio, devido à influência dos processos de escavação e regularização da superfície, o maciço está, por vezes, descomprimido e fracturado e, por outro, devido à concentração de tensões nos bordos do rasgo e aos processos utilizados para a sua abertura, ser possível, *a priori*, provocar a abertura de fracturas existentes e/ou originar novas fracturas, cuja profundidade é desconhecida. Estas evidências vêm, naturalmente, dificultar a análise dos resultados obtidos nos ensaios, pelo que se procurou analisar, com o uso do modelo tridimensional por elementos finitos, a influência da existência de uma fenda, pressuposta simplificada no plano do rasgo.

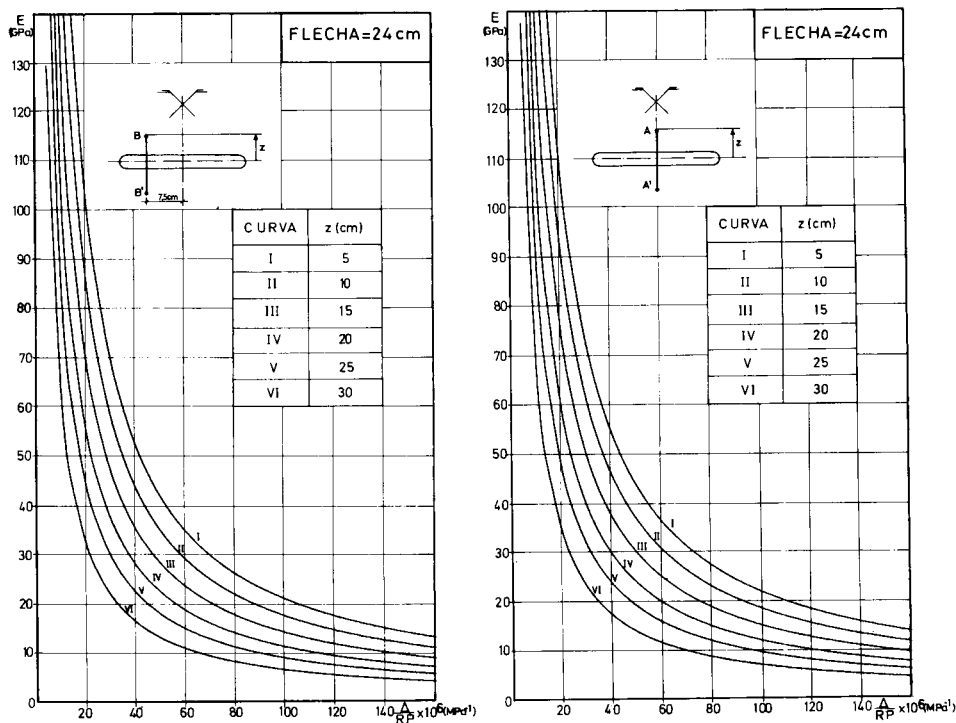


Fig. 6 — Curvas E versus Δ/RP para $f=24$ cm

QUADRO 2

Valores dos coeficientes C_i (cm)

Z (cm)	Distância do plano ao eixo do rasgo			
	x=0		x=7,5 cm	
	f=17 cm	f=24 cm	f=17 cm	f=24 cm
0,25	58,92	74,14	55,87	71,28
2,5	54,68	69,98	51,62	67,10
5,0	49,68	65,14	46,57	62,23
7,5	44,42	60,08	41,28	57,14
10,0	39,14	54,89	36,04	51,95
12,5	34,10	49,73	31,20	46,84
15,0	29,50	44,72	26,92	41,98
17,5	25,42	39,98	23,22	37,47
20,0	21,82	35,54	20,02	33,31
25,0	16,53	28,33	15,16	26,55
30,0	11,42	20,63	10,60	19,39

Consideraram-se fendas de comprimento F/f igual a 0; 1/8; 2/3; 2; 4,5 e infinito, para o caso de flecha igual a 24 cm e maciço isótopo com comportamento elástico linear (Quadro 1). Apresentam-se, na Fig. 7, os deslocamentos obtidos em pares de pontos superficiais equidistantes, ao longo de dois planos perpendiculares ao rasgo a distâncias $x=0$ e 7,5 cm, para os vários comprimentos de fenda, incluindo os casos de fenda de comprimento nulo e a solução analítica obtida por Alexander (1960).

Como se pode observar, os valores obtidos para a solução analítica são superiores, mesmo quando se comparam com a situação de fenda infinita, verificando-se, para pontos à superfície e junto ao rasgo, que os deslocamentos do caso sem fenda e fenda infinita são cerca de 62% e 95 , respectivamente, do deslocamento obtido pela solução analítica, diminuindo esta relação à medida que os pontos se afastam do rasgo.

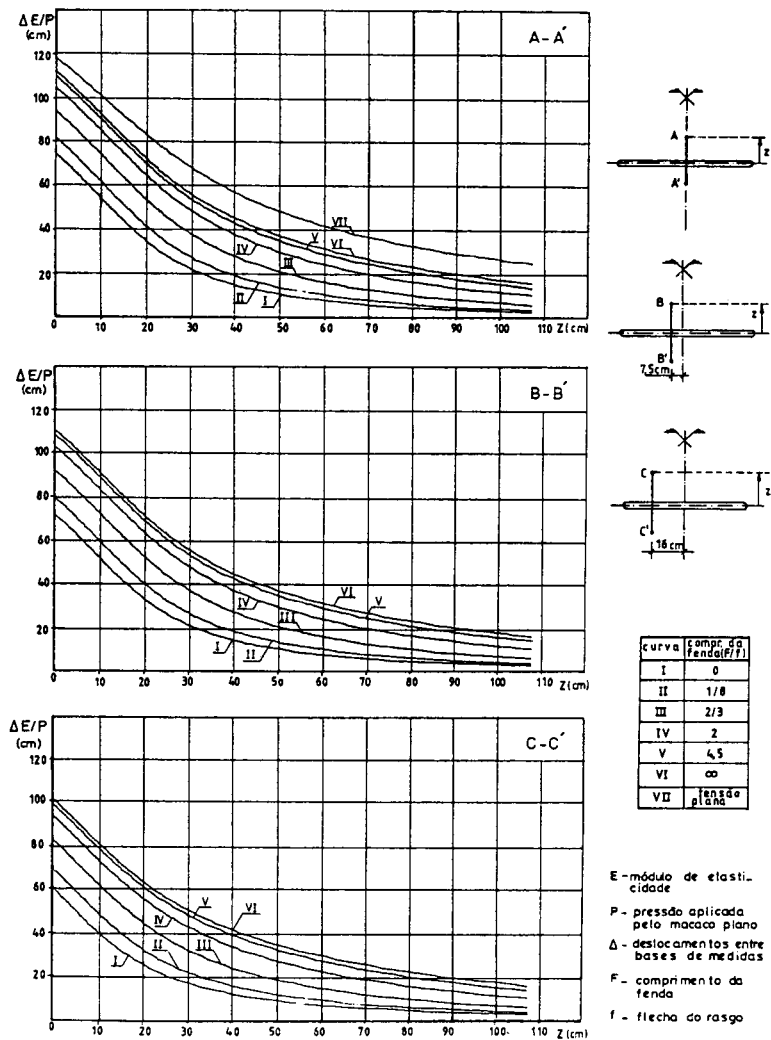


Fig. 7 — Relações $\Delta E/P$ em função da distância ao rasgo no caso de existência de fendas

Na Fig. 8, indicam-se ábacos que relacionam o parâmetro $\Delta E/P$ com a distância y à superfície, para pontos de medida situados a distâncias z do rasgo, para alguns comprimentos de fenda considerados e num plano perpendicular ao plano do rasgo a distância nula do eixo do rasgo.

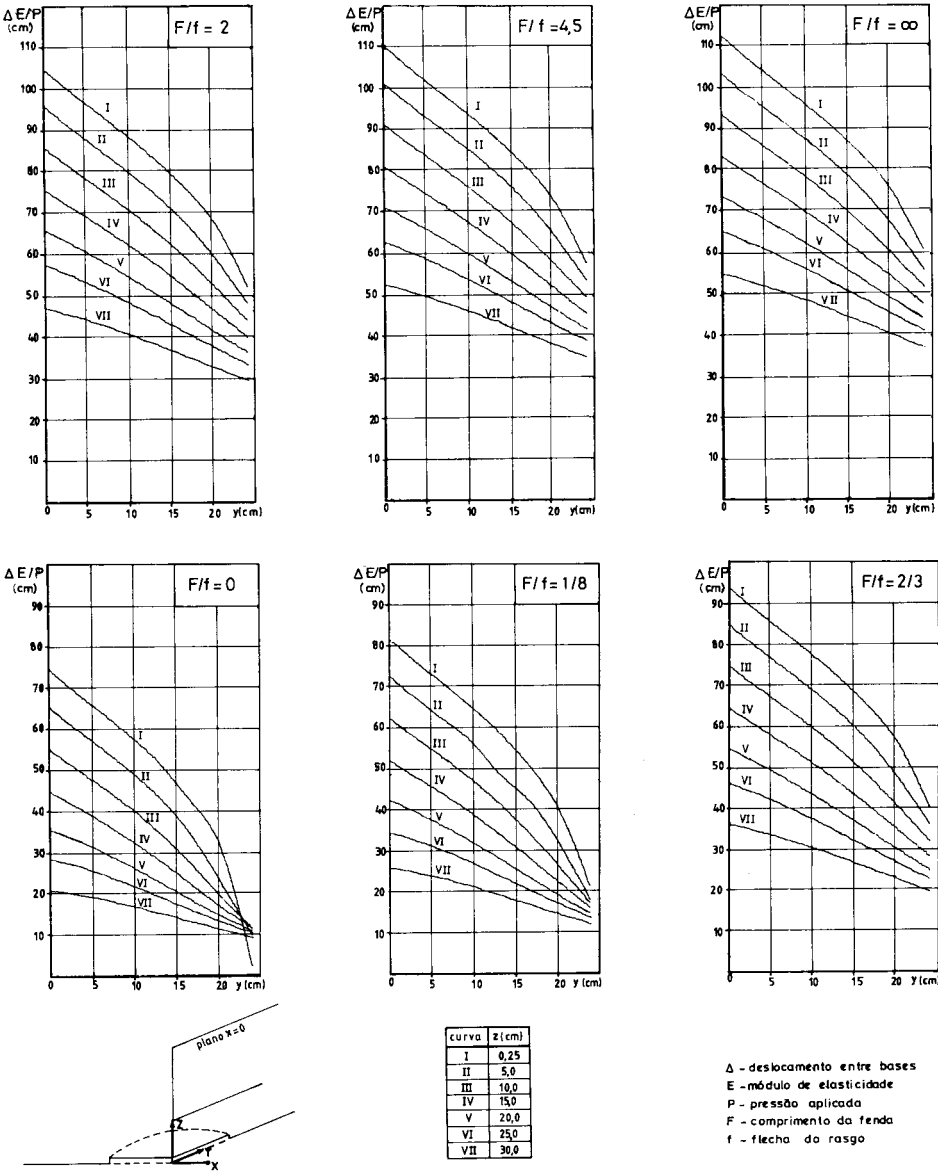


Fig.. 8 — Curvas $\Delta E/P$ para pontos interiores

O módulo de deformabilidade, consoante o ponto de medida *i* e comprimento de fenda, pode ser expresso de forma análoga a (1),

$$E=K_i \frac{P}{\Delta_i} \tag{2}$$

sendo *K_i* um parâmetro que representa o deslocamento de um ponto *i* para *E* e *P* unitários. Os valores de *K_i* expressos em cm são representados na Fig. 9 para pontos superficiais e para pontos interiores, num plano perpendicular à distância de 7,5 cm do eixo do rasgo.

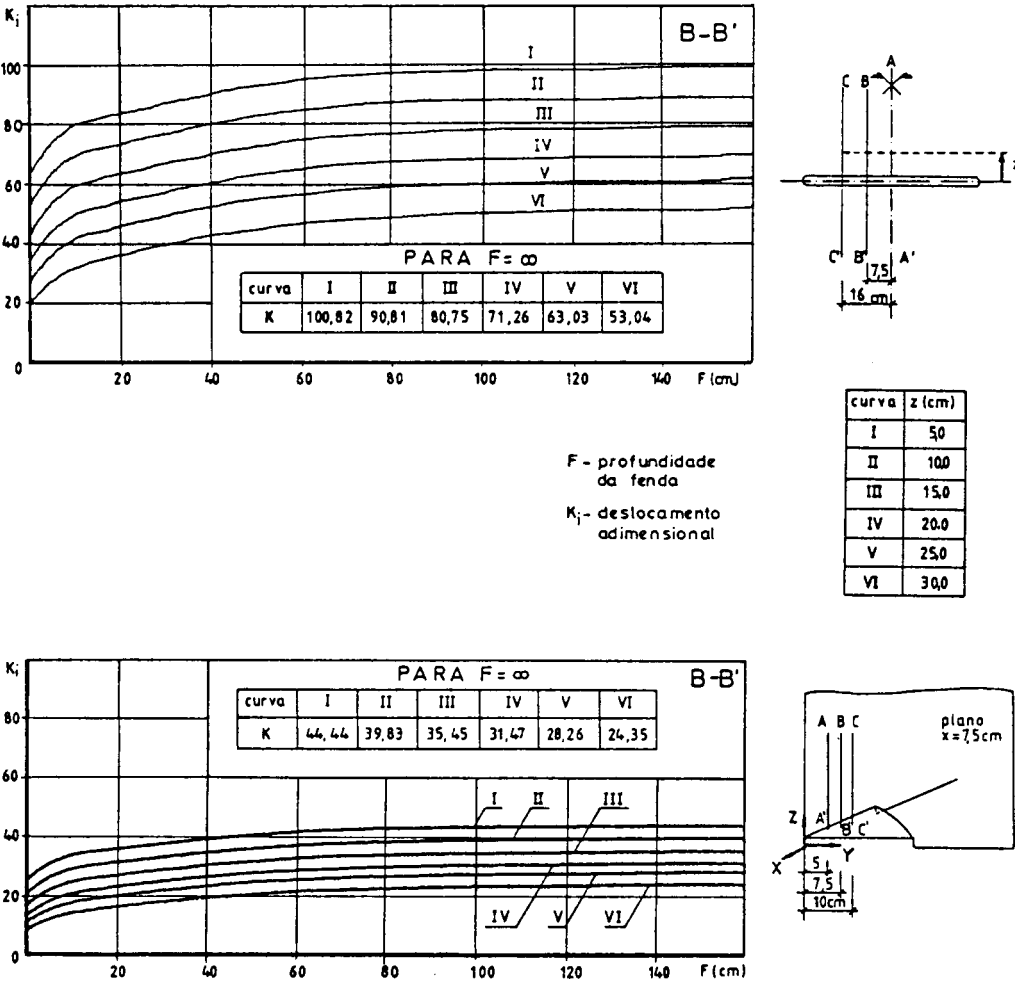


Fig. 9 — Variação de *K_i* para pontos superficiais e interiores (*x*=0)

4.2 — Meio anisótropo

Referem-se, ainda, as análises efectuadas para a hipótese de anisotropia, em que se admitiu um material transverso-isótropo, sendo a direcção normal ao plano de isotropia paralela ou perpendicular ao plano do rasgo, considerando-se o caso de $f=24$ cm e de não existência de fendas. Os resultados dos cálculos patenteiam a influência da anisotropia nos resultados dos ensaios, principalmente para grandes relações entre os módulos de elasticidade.

Apresentam-se, na Fig. 10, valores de $\Delta E_N/E_N/E_P$, sendo E_N o módulo de elasticidade perpendicular ao plano do rasgo e E_P o módulo paralelo, para a hipótese de meio homogêneo, e para pontos superficiais situados ao longo de três eixos conforme indicado na figura.

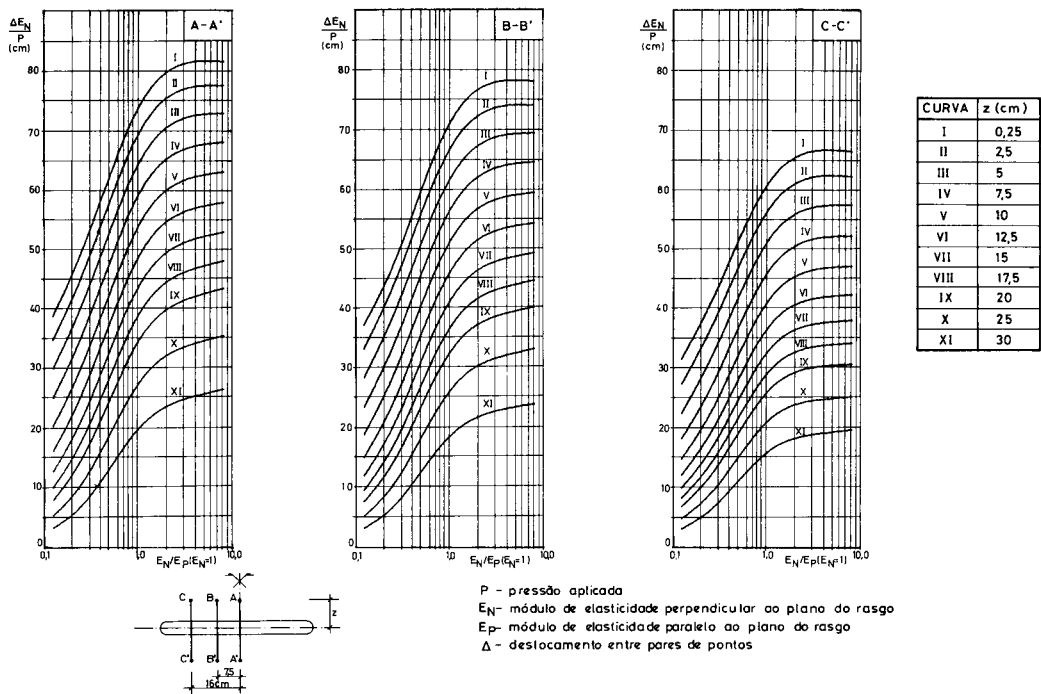


Fig. 10 — Relação $\Delta E_N/P$ em função de E_N/E_P

Assim, verifica-se que os deslocamentos obtidos no ensaio são influenciados não só pelo módulo de elasticidade normal ao plano do rasgo, mas também pela relação entre módulos. Observa-se que, quando o módulo de elasticidade paralelo ao rasgo é 4 ou 8 vezes superior ao módulo normal, os deslocamentos entre pares de pontos afastados de 10 cm do rasgo e num eixo afastado de 7,5 cm do centro se reduzem para 56 e 37%, respectivamente, quando comparados com a hipótese de isotropia com o módulo igual a E_N . Quando, por outro lado, o ensaio é efectuado perpendicularmente aos estratos, os deslocamentos entre aqueles pares de pontos, para relações entre módulos de 4 ou 8, são superiores em 15 e 16%, respectivamente.

Por estas constatações, pode-se concluir que, ao se utilizarem estes valores para determinação dos módulos de deformabilidade nas direcções normal ou paralela ao plano de estratificação, a adopção da hipótese de meio contínuo equivalente e isotrópico nem sempre será aceitável. Daí que se recomenda, face aos valores de módulos determinados nas duas direcções para a hipótese de meio contínuo equivalente, uma correcção destes valores, a partir da relação entre módulos calculados e com a utilização dos ábacos apresentados na Fig. 10. Uma sequência iterativa pode então ser estabelecida, verificando-se que, para pontos próximos do rasgo, são suficientes duas ou três iterações, e, para pontos mais distanciados, o número de iterações necessárias aumenta.

5 — CONCLUSÃO

Apresentou-se um método de ensaio para determinação do estado de tensão *in situ* nos maciços rochosos, em que o LNEC desenvolveu uma tecnologia de ensaio expedita, rápida e económica, o sistema SFJ. Este método permite, ainda, a possibilidade de determinar o módulo de deformabilidade do maciço.

Desenvolveu-se um novo modelo interpretativo para o ensaio com inclusão de comportamentos anisotrópicos e a possibilidade de fracturação do maciço, recorrendo ao uso de um modelo tridimensional por elementos finitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDDR, L. (1960). — *Field and laboratory tests in rock mechanics*. 3rd Australia-New Zealand Conf. on Soil Mech. and Foundations Engineering.
- BORSETTO, M.; GIUSEPPETTI, G.; MANFREDINI, G. (1983) — *Recent advances in the interpretation of the flat jack tests*. 5th Cong. of ISRM, Melbourne.
- FAIELLA, D.; MANFREDINI, G.; ROSSI, P. (1983) — *In situ flat jack tests: analysis of results and critical assessment*. Int. Symp. In Situ Testing, Paris.
- MARTINS, S. (1985) — *Contribuição para o estudo de estruturas subterrâneas associadas a empreendimentos hidroeléctricos*. Tese para especialista, LNEC, Lisboa.
- ROCHA, M.; LOPES, B.; SILVA, N. (1966) — *A new technique for applying the method of the flat jack in the determination of stresses inside rock masses*. 1st Cong. of ISRM, Lisboa.