

# ESTUDO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES HIDROMECAÑICAS DE DIACLASES DE GRANITO\*

An experimental study of the hydromechanical properties of granite joints

LUÍS NOLASCO LAMAS\*\*

**SUMÁRIO:** Realizou-se um estudo experimental em diaclases de granito provenientes de um empreendimento hidroeléctrico subterrâneo, com o objectivo de obter valores dos parâmetros que descrevem o seu comportamento hidromecânico. O artigo inicia-se com uma breve revisão crítica das idealizações hidromecânicas que têm sido usadas para diaclases, a que se segue a descrição do equipamento e do procedimento de ensaio. Os resultados dos ensaios são apresentados e analisados, e discutem-se os parâmetros obtidos.

**SYNOPSIS:** An experimental study was carried out in granite joints coming from an underground hydroelectric power scheme, with the purpose of obtaining values of the parameters that describe their hydromechanical behaviour under normal stress. The paper starts with a brief critical review of the hydromechanical idealisations that have been used for the joints, followed by the description of the testing equipment and testing procedure. The test results are then presented and analysed, and the parameters obtained are discussed.

## 1 – INTRODUÇÃO

O comportamento hidromecânico dos maciços rochosos é influenciado de uma forma decisiva pela presença de diaclases. Estas são, em grande medida, responsáveis pelo escoamento que ocorre através do maciço rochoso e constituem os elementos mais sensíveis relativamente às deformações devidas a variações no estado de tensão. Assim, os estudos hidromecânicos de maciços rochosos fracturados devem prestar especial atenção ao papel das diaclases e à correcta avaliação das suas propriedades.

Tendo esta constatação em mente, realizaram-se ensaios hidromecânicos laboratoriais em amostras de diaclases de granito provenientes da central subterrânea do empreendimento hidroeléctrico do Alto Lindoso, localizado no Norte de Portugal. Foi possível desta forma estudar a influência da tensão normal na deformação das diaclases e nos caudais escoados através delas. Estes ensaios fizeram parte de um programa de ensaios mais vasto do mesmo maciço rochoso, o qual se concentrou fundamentalmente no comportamento das diaclases e incluiu a caracterização geométrica do sistema de diaclasamento e o estudo da topografia das superfícies das diaclases, com determinação de parâmetros para descrição da sua rugosidade e abertura. Este conjunto de ensaios permitiu a determinação de parâmetros que foram

---

(\*) Comunicação apresentada ao 8º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Tóquio, Setembro, 1995

(\*\*) Investigador Auxiliar do LNEC, presentemente no Laboratório de Engenharia Civil de Macau

subsequentemente utilizados numa análise numérica global do comportamento hidromecânico do circuito de alta pressão do Alto Lindoso (Lamas, 1993).

## 2 – IDEALIZAÇÕES HIDROMECAÑICAS

Um dos parâmetros fundamentais para a determinação do caudal escoado numa diaclase é a sua abertura. Usando a lei de Darcy para escoamento laminar paralelo, o caudal é proporcional ao cubo da abertura (lei cúbica). A abertura, por sua vez, é muito dependente da tensão normal na diaclase. Para o estudo da influência deste parâmetro muitos autores têm tentado estabelecer correlações experimentais entre o fecho da diaclase sob tensão normal e as suas propriedades hidráulicas.

Louis (1968) constatou que, para diaclases rugosas, a lei de Darcy não pode ser utilizada e expressou o caudal,  $q$ , para rugosidades relativas  $(k / D_h) > 0,033$ , em que  $k$  é a rugosidade absoluta e  $D_h$  o diâmetro hidráulico da diaclase, como:

$$q = \frac{g}{12 \nu_w \left[ 1 + 8.8 (k / D_h)^{1.5} \right]} (E^f)^3 J \quad (1)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\nu_w$  é a viscosidade cinemática,  $E^f$  é a abertura mecânica e  $J$  é o gradiente hidráulico.

Witherspoon *et al.* (1980), com base nos resultados dos ensaios executados por Iway (1976), propõem a introdução do conceito de abertura hidráulica residual,  $e_{res}^f$ . Iway constatou que, mesmo sob tensões normais muito elevadas, para as quais não é possível distinguir a deformação da diaclase da da rocha, só aproximadamente 15% da área das duas superfícies das diaclases está em contacto. A diaclase pode considerar-se completamente fechada do ponto de vista mecânico, mas pode existir ainda um caudal irreductível que por ela escoa. A abertura hidráulica residual é definida como a abertura equivalente que, usando a lei cúbica de Darcy, corresponde ao caudal irreductível obtido em ensaios a tensões normais muito elevadas, e deve ser adicionada à abertura mecânica por forma a poder-se usar a lei de Darcy. Os mesmos autores demonstraram, também, que a introdução de um factor correctivo  $f$  (com  $f \geq 1$ ), que tem em consideração os desvios relativamente às condições de escoamento paralelo e plano, melhora o ajustamento da lei de Darcy aos resultados dos ensaios que analisaram. A lei cúbica toma, então, a seguinte forma:

$$q = \frac{1}{f} \frac{g}{12 \nu_w} (E^f + e_{res}^f)^3 J \quad (2)$$

Com base nos resultados experimentais obtidos em diaclases rugosas em granito, Elliot *et al.* (1985) constataram que a lei cúbica é apenas válida se for introduzido um factor  $F$ , a que chamaram “joint condition factor”:

$$q = \frac{1}{F} \frac{g}{12 v_w} (E^f)^3 J \quad (3)$$

De acordo com estes autores,  $F$  é uma constante adimensional que traduz a condição das superfícies da diaclase e tem de ser determinada experimentalmente. O seu valor reflecte o grau de encaixamento entre as duas superfícies da diaclase e é influenciado pela rugosidade, continuidade das diaclases, eventual depósito de detritos, história de carregamento, perturbação da amostra e efeitos de escala. Para  $F = 1$ , a equação (3) transforma-se na lei cúbica para superfícies paralelas. Comparando esta equação com a equação de Louis,  $F$  corresponde ao factor correctivo contido entre os parêntesis rectos desta última. No entanto,  $F$  inclui o efeito de outros factores para além da rugosidade, pode tomar valores maiores ou menores do que 1 e tem de ser determinado experimentalmente.

Barton *et al.* (1985) analisaram os dados de Witherspoon *et al.* (1980) e argumentam que o método utilizado por estes levou a que fossem obtidas conclusões erróneas. Usando dados de vários ensaios, aqueles autores derivaram uma lei empírica que relaciona a abertura mecânica da diaclase,  $E^f$ , com a abertura hidráulica  $e^f$ :

$$e^f = \frac{JRC^{2.5}}{(E^f / e^f)^2} \quad (\text{em } \mu\text{m}) \quad (4)$$

em que  $JRC$  é o conhecido “joint roughness coefficient”. Esta equação é apenas válida para  $e^f \leq E^f$ . Para  $e^f > E^f$  ou  $JRC = 0$  tem-se que  $e^f = E^f$ . A abertura hidráulica determinada desta forma pode então ser utilizada na lei cúbica para cálculo de caudais. Comparando este modelo com as equações de Louis, pode observar-se que  $e^f = E^f$  corresponde a escoamento laminar paralelo em diaclases com baixa rugosidade relativa e  $e^f \leq E^f$  corresponde a escoamento laminar não paralelo para rugosidades relativas elevadas.

Generalizando os conceitos de abertura hidráulica e mecânica para os outros modelos apresentados até aqui, a lei cúbica pode ser escrita da seguinte forma:

$$q = \frac{g}{12 v_w} (e^f)^3 J \quad , \quad \text{ou} \quad q = K^f J \quad \text{com} \quad K^f = \frac{g(e^f)^3}{12 v_w} \quad (5)$$

em que  $K^f$  é o coeficiente de permeabilidade e  $e^f$  é dado por:

$$\begin{aligned}
\text{(Louis):} \quad e^f &= f_L E^f & \text{com} \quad f_L &= \sqrt[3]{\frac{1}{1 + 8.8 (k / D_h)^{1.5}}} \\
\text{(Witherspoon et al.):} \quad e^f &= f_W (E^f + e_{res}^f) & \text{com} \quad f_W &= \sqrt[3]{\frac{1}{f}} \\
\text{(Elliot et al.):} \quad e^f &= f_E E^f & \text{com} \quad f_E &= \sqrt[3]{\frac{1}{F}} \\
\text{(Barton et al.):} \quad e^f &= f_B E^f & \text{com} \quad f_B &= \frac{E^f}{JRC^{2.5}}
\end{aligned} \tag{6}$$

em que  $f_L, f_W, f_E$  e  $f_B$  são factores correctivos que podem ser considerados como parâmetros de acoplamento hidromecânico, pois relacionam directamente as aberturas mecânicas com as aberturas hidráulicas.

Na Fig. 1 estão representados diagramas da abertura hidráulica em função da abertura mecânica segundo estes modelos. No modelo de Louis a curva relativa a  $k = 16,5 \mu\text{m}$  apresenta uma descontinuidade para  $E^f = 250 \mu\text{m}$ , que corresponde a uma rugosidade relativa de 0,033, e é a transição de escoamento não paralelo para paralelo. Esta transição corresponde, no modelo de Barton *et al.*, ao ponto em que as curvas atingem a linha recta relativa a  $e^f = E^f$ . Este modelo e o modelo de Louis, embora este de uma forma menos relevante, prevêem uma maior diferença entre  $E^f$  e  $e^f$  para valores baixos de  $e^f$ , o que contrasta com os outros modelos, nomeadamente o de Witherspoon *et al.*. Uma razão para esta aparente contradição pode dever-se ao facto de, para descontinuidades perfeitamente encaixáveis, como as fissuras de tracção, que correspondem à maioria dos ensaios realizados pela maior parte dos autores, não ter sido obtido um caudal irreduzível e ocorrerem caudais muito pequenos para baixos valores de  $E^f$ . Deve-se notar que os modelos de Louis e Barton *et al.* correspondem a prever caudais proporcionais a  $E^f$  levantado a potências superiores a 3. Este fenómeno foi também verificado recentemente por outros autores.

Gale (1982) executou ensaios com escoamento radial em descontinuidades, naturais e induzidas, em amostras de gnaiss granítico, com tensões normais até 30 MPa. Este autor verificou que a lei cúbica é válida para tensões relativamente baixas, mas que para tensões mais elevadas existe um gradual afastamento dos valores teóricos devido à progressiva canalização do escoamento.

Raven e Gale (1985) verificaram um importante efeito de escala devido à rugosidade. O afastamento em relação à lei cúbica aumentava com a dimensão da amostra e o número de ciclos de carregamento. Para uma tensão normal constante, quanto maior era a amostra menor era a condutividade da diaclase.

Gentier (1986) executou ensaios com escoamento radial em descontinuidades em diaclases em granito e introduziu um corante na água para estudar a distribuição dos canais através dos quais a água sai da amostra. O número de terminações destes canais nos lados das amostras diminuía rapidamente até tensões de 10 MPa, e a partir de aí tendia para a estabilização. Esta autora concluiu que, só para tensões baixas, quando o número de canais é tal que permite considerar que o escoamento envolve toda a área da diaclase, é possível usar os modelos tradicionais com correcções para a rugosidade. Para tensões mais elevadas, o efeito da canalização é dominante.

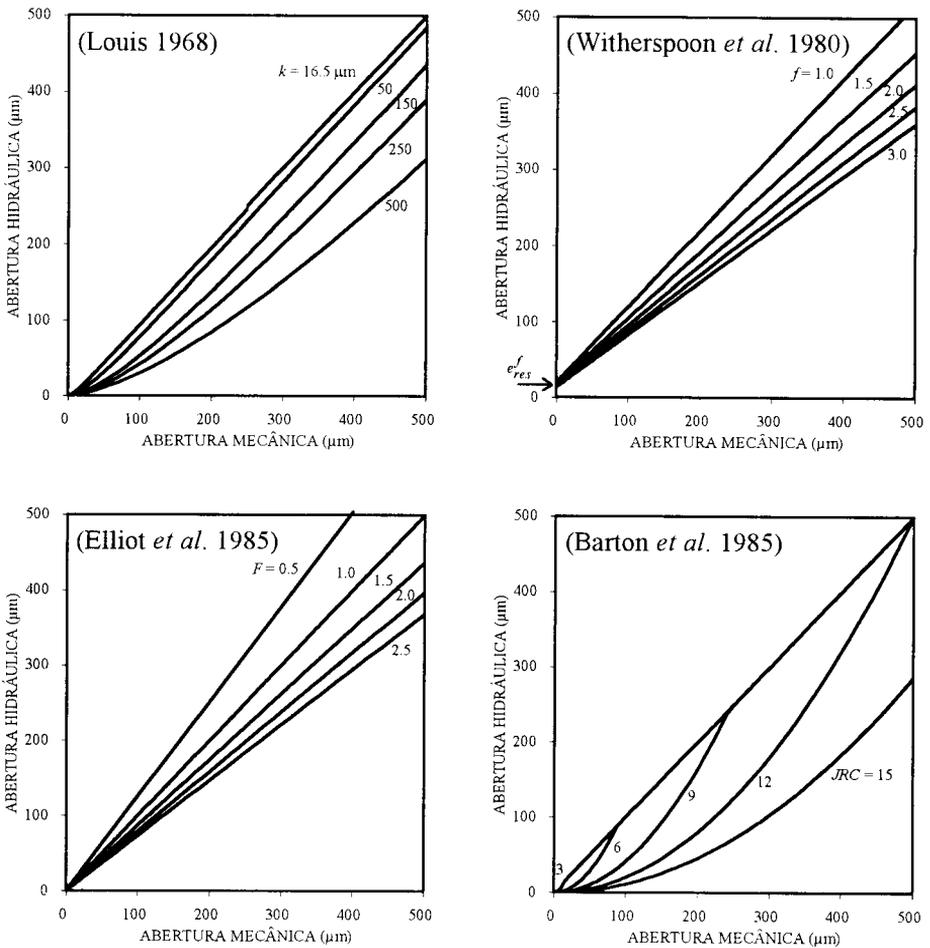


Fig. 1 – Abertura hidráulica em função da abertura mecânica segundo vários modelos

Pyrak-Nolte *et al.* (1987) executaram ensaios de escoamento em diaclases circulares em que a água escoava entre quadrantes opostos do perímetro. Estes autores verificaram a existência de um caudal residual para tensões elevadas e, mesmo para tensões baixas, verificaram não existir concordância entre os resultados dos ensaios e a lei cúbica. Obtiveram valores do expoente muito superiores a 3, atingindo em alguns casos o valor de 9,8.

Cook (1988) afirma que a abertura hidráulica de diaclases naturais em compressão, com as superfícies em contacto parcial, diminui mais rapidamente com o valor da tensão do que o fecho da diaclase, pois a tensão distribui-se sobre a área total da diaclase enquanto que a correspondente diminuição da abertura hidráulica ocorre apenas nos espaços vazios adjacentes às áreas em contacto. Fazendo uma série de hipóteses simplificativas relativamente à quantificação dos efeitos da tortuosidade e das áreas de contacto entre as duas superfícies da diaclase, Cook desenvolveu uma solução analítica que pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{q - q_{\infty}}{\frac{g}{12 v_w} J(E_0^f)^3} = (1 + \log(E^f / E_0^f)) \frac{(E^f / E_0^f)^2}{2 - (E^f / E_0^f)} \quad (7)$$

Esta equação expressa o caudal normalizado em função da abertura normalizada e está representada graficamente na Fig. 2, em escalas logarítmicas, para  $q_{\infty} = 0$  e  $q_{\infty} \neq 0$ . Esta solução analítica, baseada numa série de hipóteses simplificativas, é útil para uma demonstração qualitativa do problema do escoamento de fluidos em diaclases fechadas, *i.e.* em diaclases em que ambas as superfícies estão em contacto. Pode-se verificar que o declive das curvas obtidas pela formulação de Cook é superior a 3, o que justifica os resultados experimentais obtidos por diversos autores. A curva para  $q_{\infty} = 0$  mostra o efeito da tortuosidade e da variação da área de contacto, sendo o caudal proporcional à abertura elevada a potências que aumentam continuamente com o valor da tensão. Para  $q_{\infty} \neq 0$ , quando a tensão atinge valores elevados não se verificam mais variações no caudal.

Têm sido realizados recentemente vários trabalhos experimentais e teóricos para estudo do escoamento em diaclases isoladas, considerando a variação da abertura de uma forma estatística e a formação dos canais principais por onde se dá o escoamento. O escoamento na diaclase, bem como a sua variação com o fecho da diaclase, pode então ser modelado usando métodos numéricos. Este tipo de trabalhos é importante pois permite compreender a forma como a água na realidade escoa através de caminhos no interior das diaclases. No entanto, eles aparentam ser mais dedicados a problemas de diaclases sujeitas a tensões normais muito elevadas, em que ocorrem caudais extremamente reduzidos, e portanto mais aplicáveis em domínios como o transporte de poluentes ou de fluidos contaminados por radioactividade, que envolvem períodos de tempo muito longos.

Para os domínios usuais de interesse em engenharia civil, e mais concretamente em túneis e poços sob pressão, é suficiente a utilização de expressões relacionando as aberturas mecânica e hidráulica do tipo da equação (6). A validade destas equações e a determinação dos seus parâmetros deve ser feita relativamente aos resultados de ensaios hidromecânicos em diaclases.

### 3 – EQUIPAMENTO DE ENSAIO

Todos os ensaios hidromecânicos em diaclases foram realizados na unidade de ensaios hidrogeotérmicos em rocha existente no Imperial College, na Universidade de Londres. Uma descrição completa desta unidade pode encontrar-se em Zhao (1987) e Elliot e Brown (1988). O sistema é composto por uma prensa rígida com uma câmara triaxial, com a possibilidade de fazer variar a temperatura e incluir escoamento através da amostra

As forças axiais são aplicadas por um sistema de ciclo fechado servo-controlado, utilizando quer a força quer o deslocamento como parâmetro de controlo. A pressão de confinamento é aplicada por um intensificador de pressão de ciclo fechado servo-controlado, utilizando a pressão, o deslocamento ou a variação de volume como parâmetro de controlo (Fig. 3). Os deslocamentos axiais são medidos entre as extremidades da montagem de ensaio, por meio de 2 LVDT's diametralmente opostos, e os deslocamentos radiais são medidos por dois pares de braços em consola com extensómetros, colocados em posição diametralmente oposta. A câmara triaxial pode ensaiar provetes com diâmetros até 102 mm e comprimentos até 204 mm, e no seu interior está instalado o equipamento de medição.

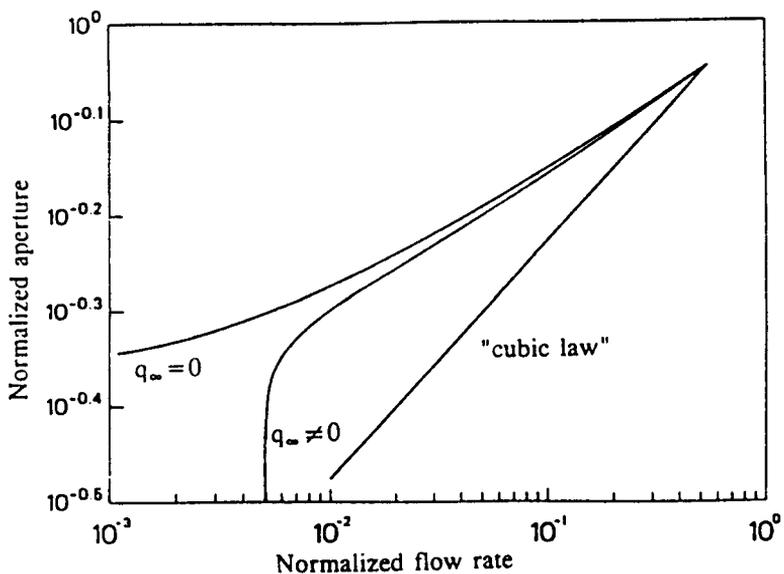


Fig. 2 – Abertura em função do caudal (segundo Cook, 1988)

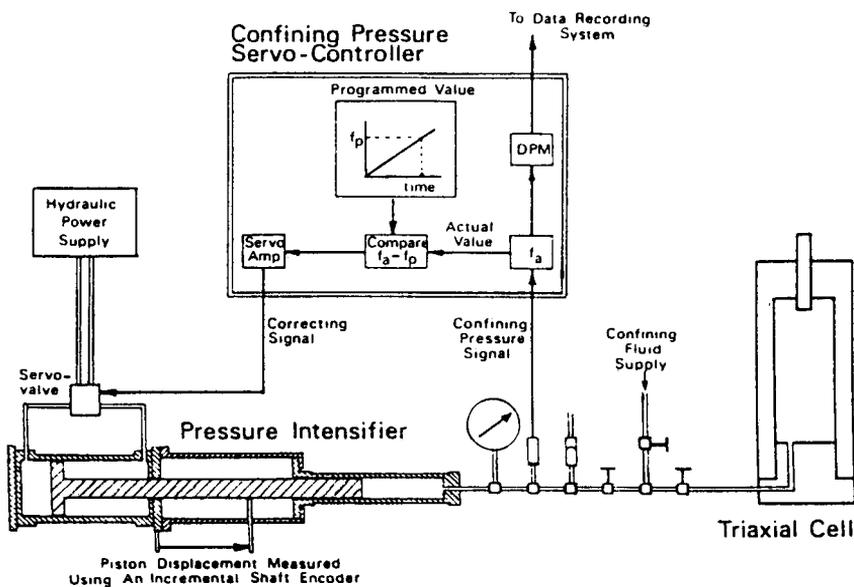


Fig. 3 – Sistema de aplicação da pressão de confinamento (segundo Elliot e Brown, 1988)

Pode estabelecer-se um escoamento de fluido por meio de circuitos independentes de montante e de jusante. (Fig. 4), com os quais é possível criar uma diferença de pressão através da amostra, dando portanto origem ao escoamento. A medição da pressão de montante é feita por meio de um transdutor de pressão de diafragma e a diferença de pressão é medida por um transdutor de indutância magnética. O volume de fluido que passa através da amostra é calculado através do deslocamento dos pistões dos acumuladores de montante e de jusante.

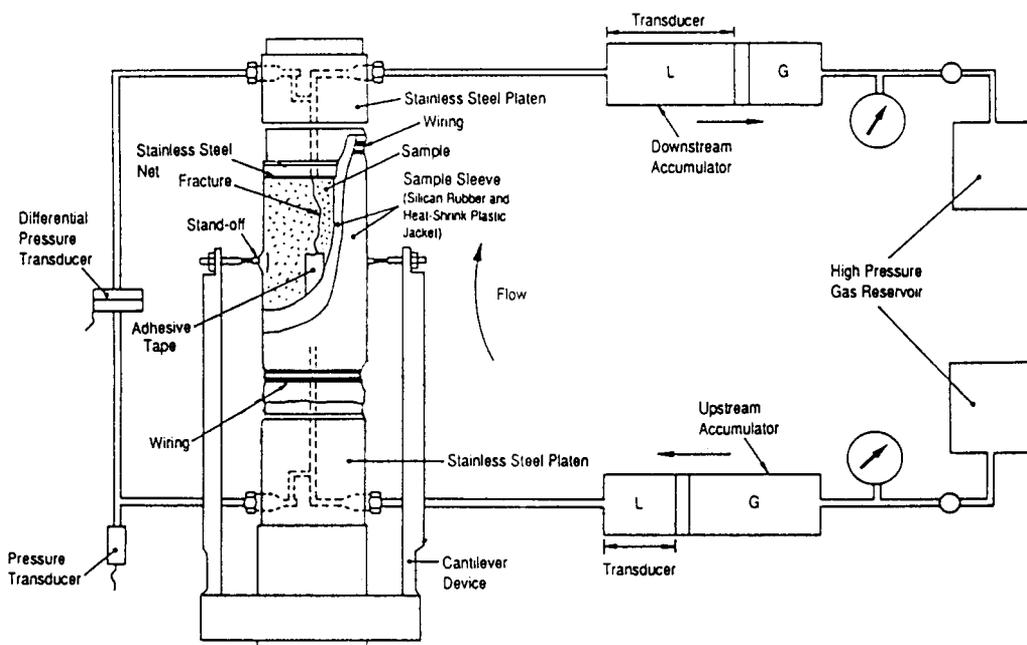


Fig. 4 – Sistema de aplicação de fluido sob pressão e montagem de ensaio

Os dados relativos às grandezas medidas são fornecidos por unidades de condicionamento e adquiridos automaticamente por meio de um microprocessador. A aquisição de dados e o seu processamento são feitos utilizando software dedicado e a saída pode ser em forma de listas de resultados ou em forma gráfica. Durante a execução dos ensaios a evolução das grandezas medidas ao longo do tempo, até um máximo de 5, é visualizada num segundo monitor ligado ao computador.

#### 4 – PROGRAMA DOS ENSAIOS

Os ensaios hidromecânicos consistem em estabelecer um gradiente hidráulico entre as duas extremidades de uma amostra com uma diaclase na direcção axial, gerando um fluxo de água da extremidade inferior para a superior da amostra. Ao mesmo tempo é aplicada a pressão de confinamento lateral, que corresponde a uma tensão normal na diaclase.

Cada amostra, com o diâmetro de 51 mm, foi cortada com um comprimento de 102 mm e os topos foram regularizados com uma esmeriladora de precisão. As intersecções da diaclase com a superfície lateral da amostra foram seladas e os dois suportes para o sistema de consolas de medição das deformações diametrais foram colados a meia altura da amostra, num diâmetro perpendicular ao plano da diaclase. A amostra foi então fixa aos pratos de aço, através dos quais a força axial é aplicada, os quais têm ranhuras por forma a distribuir melhor a água em circulação, e procedeu-se posteriormente à instalação da camisa de silicone e de uma camisa de “teflon”, que encolhe com a temperatura. Esta camisa compósita foi deixada endurecer à temperatura de 35 °C e atada com arames aos pratos de aço. A amostra foi então colocada na máquina rígida e o dispositivo de medição de deformações laterais foi colocado na sua posição. Uma vez feitas todas as ligações eléctricas a montagem de ensaio foi introduzida na câmara triaxial.

Antes da realização dos ensaios hidromecânicos, cada amostra foi submetida a 5 ciclos de carga e descarga até pressões de confinamento de 5, 10, 20, 20 e 20 MPa, respectivamente, por forma a colocá-las em condições iniciais, em termos de abertura, semelhantes às existentes na natureza, no local onde foram recolhidas, a uma profundidade média de 340 m. Com estes ciclos tentou-se também eliminar o comportamento irreversível frequentemente observado durante os primeiros ciclos, tanto no comportamento mecânico como hidráulico.

Durante os ensaios hidromecânicos controlaram-se três parâmetros: a pressão de confinamento e as pressões de água de montante e jusante. Os parâmetros medidos foram o deslocamento diametral, os volumes de água nos acumuladores de montante e de jusante e o tempo.

Os ensaios foram programados com 12 patamares de diferença de pressão da água, com valores que variaram entre 0,01 MPa e 1,00 MPa. Em cada um destes patamares foi executado um ciclo de carga e descarga. O valor da tensão máxima atingida em cada ciclo dependeu da diferença de pressão da água, porque para os valores iniciais mais baixos o caudal diminui até valores muito reduzidos a níveis de tensão baixos, enquanto que, para valores elevados da diferença de pressão da água esta redução do caudal só ocorre para níveis superiores de tensão. A tensão máxima de cada ciclo variou entre 2 MPa e 10 MPa. Em cada ciclo, durante a fase de carga, a níveis escolhidos da tensão efectiva, realizaram-se ensaios de permeabilidade. Após ter-se atingido a tensão máxima de cada ciclo, procedeu-se à descarga até uma tensão efectiva próxima de zero. A Fig. 5 mostra um diagrama da sequência de ensaio que foi programada..

A duração de cada ensaio de permeabilidade dependeu do caudal obtido, mas variou na maioria dos casos entre 40 e 200 segundos. Durante cada ensaio foram feitas, em média, seis leituras de todos os parâmetros, a intervalos de tempo aproximadamente iguais. Para verificar se tinham sido obtidas condições de escoamento em regime permanente, o volume de água escoado foi representado graficamente em função do tempo. Em quase todos os ensaios os pontos do gráfico ajustaram-se muito bem a uma linha recta, o que confirma as condições de regime permanente. A Fig. 6 mostra um exemplo deste gráficos para a amostra A07, para um patamar com uma diferença de pressão da água de 0,07 MPa.

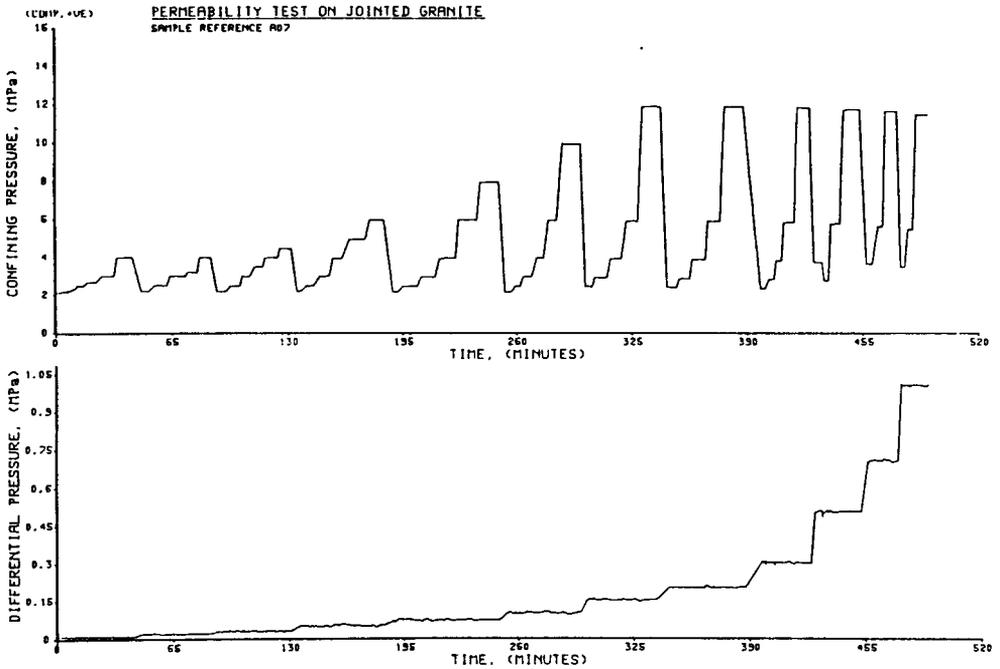


Fig. 5 – Sequência de ensaio dos ensaios hidromecânicos

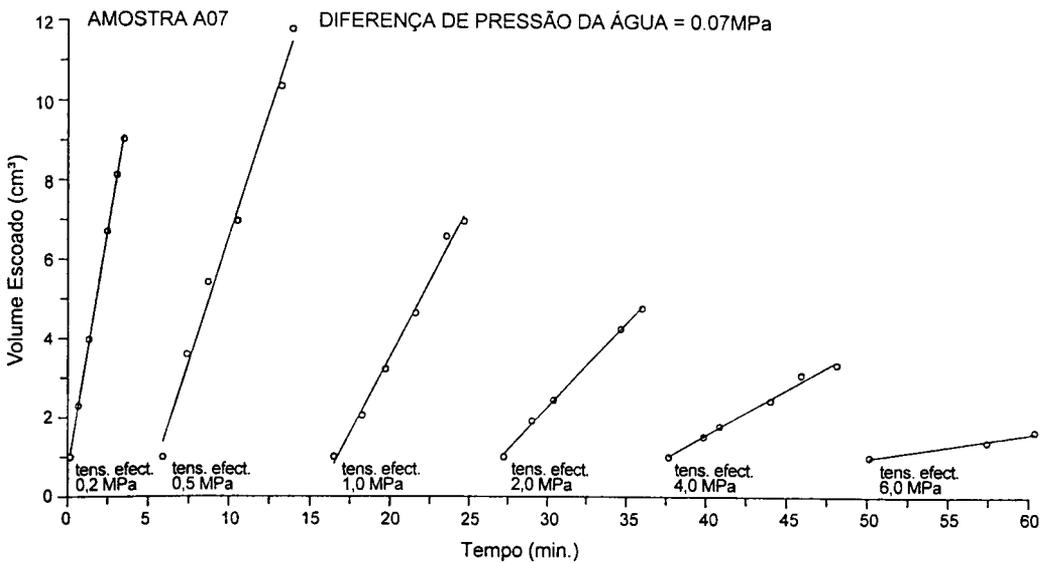


Fig. 6 – Volume escoado em função do tempo para um ensaio de permeabilidade tipo

## 5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS

Foram ensaiadas um total de 6 amostras. Em algumas delas, devido a oscilações inesperadas da diferença de pressão da água, não foi possível seguir exactamente a sequência de ensaio planeada e foi necessário desprezar os resultados de alguns ensaios de permeabilidade. Em duas amostras só foi possível considerar os resultados de um número muito reduzido de ensaios válidos.

Os caudais – calculados a partir de análises de regressão do volume de água escoado em relação ao tempo – foram introduzidos em gráficos em função dos gradientes hidráulicos. Em muitos casos – principalmente para gradientes hidráulicos elevados – não se obteve uma relação linear. Uma vez que apenas interessam a este estudo condições de escoamento laminar, os resultados deste ensaios foram também desprezados.

### 5.1 – Ajustamento e validação da lei cúbica

Para interpretação dos resultados, utilizou-se um procedimento semelhante ao de Elliot *et al.* (1985), com base na idealização hidromecânica expressa pela terceira das equações (6), envolvendo a consideração do parâmetro de acoplamento hidromecânico  $f_E$ . A abertura hidráulica,  $e^f$ , foi calculada, para cada ensaio de permeabilidade, a partir daquela equação, com  $v_w = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s para uma temperatura de 20 °C. Para as amostras ensaiadas, com uma largura  $w = 51$  mm, tem-se:

$$q = \frac{wg}{12 v_w} (e^f)^3 J = C (e^f)^3 J \quad \text{ou} \quad \frac{q}{J} = C f_E^3 (E^f)^3 \quad (8)$$

O parâmetro  $f_E$  foi calculado por meio de uma regressão linear entre  $e^f$  e deslocamento normal relativo da diaclase, tal como ilustrado na Fig. 7, em que está representada a recta de correlação. Como se pode ver no Quadro I, obtiveram-se em todas as amostras coeficientes de correlação,  $R$ , superiores a 0,89.

O valor de  $f_E$  é muito próximo da unidade nas amostras A01, A02 e A07, indicando a existência de escoamento laminar paralelo. O valor para A03 é relativamente baixo, o que se pode eventualmente dever-se à deposição de detritos criados durante os ciclos de carga e descarga. Para a amostra A06 obteve-se um valor anormalmente baixo, o que indica que se registaram caudais muito pequenos. Um valor anormalmente alto de  $f_E$  foi calculado para a amostra A08, o que corresponde a caudais muito elevados. Estes valores anormais devem-se, possivelmente, a dificuldades que existiram durante a realização dos ensaios. Não considerando estes dois resultados obtém-se um valor médio  $f_E = 0,88$ .

O mesmo fenómeno de uma grande dispersão dos resultados foi também observado por Elliot *et al.* (1985) que obtiveram, numa série de ensaios em diaclases naturais em granito, valores de  $f_E$  entre 0,075 e 1,077, por Zhao (1987) que obteve para o mesmo tipo de diaclases valores entre 0,422 e 1,838, e por Gale (1982), cujos resultados, quando analisados usando o parâmetro  $f_E$ , fornecem valores entre 0,182 e 2,426.

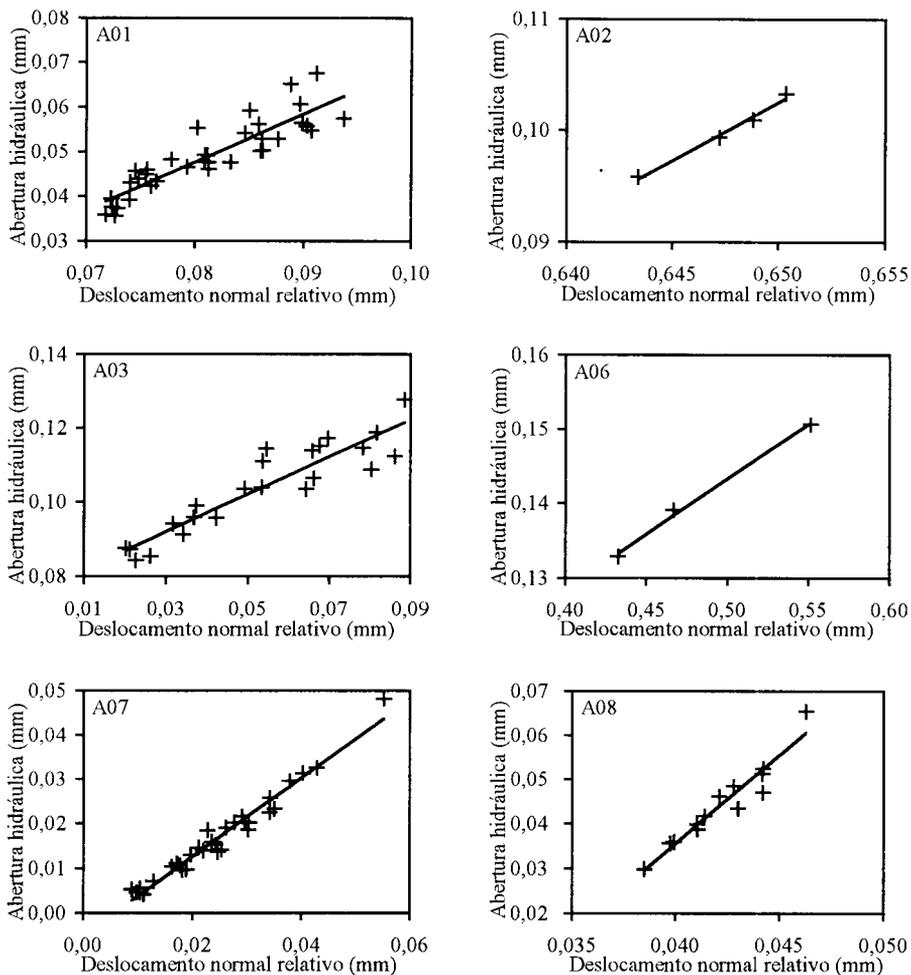


Fig. 7 – Abertura hidráulica em função do deslocamento normal relativo das diaclases

QUADRO I  
Resultados da validação da lei cúbica

Amostra	$N$	$f_E$	$R$	$\log(C f_E^3)$	$B_1^*$	$B_2$	$R$	$E_0^f$ *	$R$
A01	36	1,081	0,893	-4,278	-4,352	3,044	0,907	0,069	0,985
A02	4	1,045	0,993	-4,322	-4,294	2,986	0,993	0,107	0,999
A03	23	0,506	0,918	-5,268	-5,380	3,048	0,927	0,251	0,991
A06	3	0,148	0,998	-6,876	-6,897	3,007	0,998	1,099	1,000
A07	32	0,882	0,982	-4,544	-3,904	2,519	0,973	0,045	0,989
A08	13	3,978	0,959	-2,581	-2,498	2,914	0,967	0,016	0,992

\* as unidades de comprimento e tempo são mm e s

As aberturas mecânicas reais podem também ser calculadas a partir da análise da Fig. 7, pois a intercepção da recta com o eixo das abcissas é o deslocamento normal relativo máximo, que seria obtido para as condições de fecho total da diaclase.

Com a finalidade de verificar a validade da lei cúbica, traçaram-se gráficos logarítmicos de  $q/J$  em função de  $E^f$  (representados na Fig. 8) e realizou-se uma análise de regressão:

$$\log\left(\frac{q}{J}\right) = B_1 + B_2 \log(E^f) \quad (9)$$

Para a lei teórica da equação (8),  $B_1 = \log(C f_E^3)$  e  $B_2 = 3$ . O Quadro I indica os valores para todas as amostras bem como os coeficientes de correlação. Embora haja uma grande dispersão dos resultados, principalmente no caso das amostras A01 e A03, há um ajustamento razoável a linhas rectas, sempre com  $R > 0,90$ . Verifica-se, em geral, um bom ajustamento entre as rectas de regressão e a lei cúbica. Com excepção da amostra A07, os coeficientes  $B_1$  são muito semelhantes aos valores teóricos e o coeficiente  $B_2$  é muito próximo de 3.

A amostra A07 pode considerar-se um caso especial: os pontos correspondentes às aberturas mecânicas mais elevadas estão bem alinhados ao longo da recta teórica, mas os seis pontos relativos às menores aberturas – que são extremamente reduzidas, inferiores a 0,007 mm – mostram uma tendência para se desviarem daquela recta, e para um caudal irreduzível, independente do fecho da diaclase. Este fenómeno é o que foi descrito na secção 2, ilustrado pela curva para  $q_\infty \neq 0$  na Fig. 2. Ignorando estes pontos, obtiveram-se os valores  $B_1 = -4,527$ ,  $B_2 = 2,992$  e  $R = 0,962$ , o que mais uma vez mostra boa concordância com a lei cúbica

É agora possível determinar a abertura inicial das diaclases,  $E_0^f$ . Uma vez que não existe um valor de referência para o deslocamento normal da diaclase, foi primeiro necessário assumir uma tensão normal de referência considerada equivalente às condições iniciais, que aqui se considerou igual a 0,1 MPa. Os valores mais prováveis das aberturas iniciais foram determinados por meio de uma regressão linear entre os logaritmos da tensão efectiva e da abertura mecânica. Os seus valores, bem como os coeficientes de correlação obtidos estão indicados no Quadro I.

Obteve-se um valor anormal de  $E_0^f$  para a amostra A06, para a qual só foram considerados 3 ensaios de permeabilidade válidos. Para a amostra A08 o valor calculado é extremamente baixo e não é considerado realista, o que explica o valor anormalmente elevado de  $f_E$ . Nestas condições, as amostras A06 e A08 não foram consideradas na análise global das aberturas mecânicas iniciais.

## 5.2 – Comportamento mecânico das diaclases sob tensão normal

Os modelos de Goodman (1976), Bandis *et al.* (1983) e Pinto (1987) foram seleccionados para o estudo dos resultados obtidos para a tensão normal ( $\sigma_n$ ) em função do deslocamento normal ( $\delta_n$ ). As suas expressões matemáticas são:

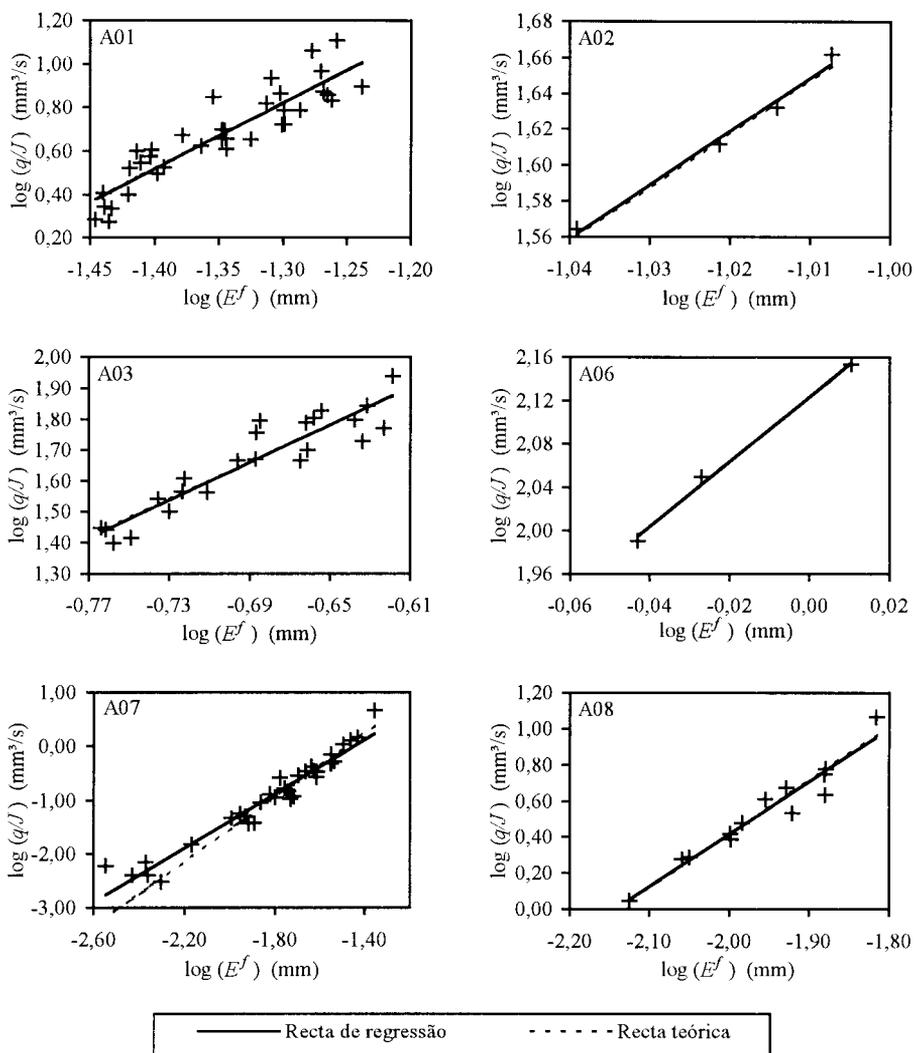


Fig. 8 – Validação da lei cúbica

$$\text{(Goodman): } \frac{\sigma_n - \sigma_{n0}}{\sigma_{n0}} = S \left( \frac{\delta_n}{E_0^f - \delta_n} \right)^t$$

$$\text{(Bandis et al.): } \sigma_n = \frac{\delta_n}{a - (a/E_0^f)\delta_n} \quad (10)$$

$$\text{(Pinto): } \sigma_n = \sigma_f \left[ \left( 1 - \frac{\delta_n}{E_0^f} \right)^{-1/2} - 1 \right]$$

em que  $\sigma_{n0}$  é uma tensão inicial de referência e  $S$ ,  $t$ ,  $a$  e  $\sigma_f$  são parâmetros empíricos. A Fig. 9 mostra diagramas dos valores obtidos de  $\sigma_n$  em função de  $\delta_n$ , bem como as curvas que melhor se ajustam, determinadas por meio de regressões com os vários modelos. Os parâmetros e os coeficientes de correlação obtidos são apresentados no Quadro II. Em todos estes modelos o parâmetro adicional que é necessário é a abertura mecânica inicial da diaclase.

QUADRO II  
Modelos para a tensão normal em função do deslocamento normal

Amostras	Goodman			Bandis*		Pinto*		Log*	
	$S$	$t$	$R$	$b$	$R$	$\sigma_f$	$R$	$n$	$R$
A01	96,58	2,467	0,976	0,3481	0,581	15,41	0,742	7,531	0,885
A02	1193	2,358	0,998	0,1390	0,437	18,59	0,833	14,28	0,917
A03	213,8	2,114	0,970	0,2485	0,628	14,46	0,912	9,454	0,975
A06	71,23	1,623	0,999	0,3404	0,795	6,470	0,980	6,335	0,991
A07	9,517	1,108	0,979	0,8620	0,779	3,874	0,977	3,249	0,988
A08	27,62	1,930	0,995	0,6856	0,658	5,724	0,879	4,451	0,938

\* as unidades de tensão e comprimento são MPa e mm

Apenas o modelo de Goodman se ajusta bem aos resultados experimentais. Este facto é de esperar, já que este modelo usa mais um parâmetro que os outros, mas a qualidade do ajustamento obtido com os outros modelos foi, em alguns casos, inesperadamente mau. O modelo com que se obteve pior ajustamento foi o de Bandis, sempre com  $R < 0,8$ . Os valores de  $R$  obtidos com o modelo de Pinto são significativamente mais elevados, com bom ajustamento para as amostras A06 e A07, mas a observação da Fig. 9 mostra que este modelo não é adequado para as outras amostras. Em termos gerais, as dificuldades observadas com os modelos de Bandis e de Pinto têm a ver com a aparente impossibilidade de simular grandes curvaturas a deformações baixas, obedecendo ao mesmo tempo à condição de tenderem assintoticamente para o valor do fecho máximo.

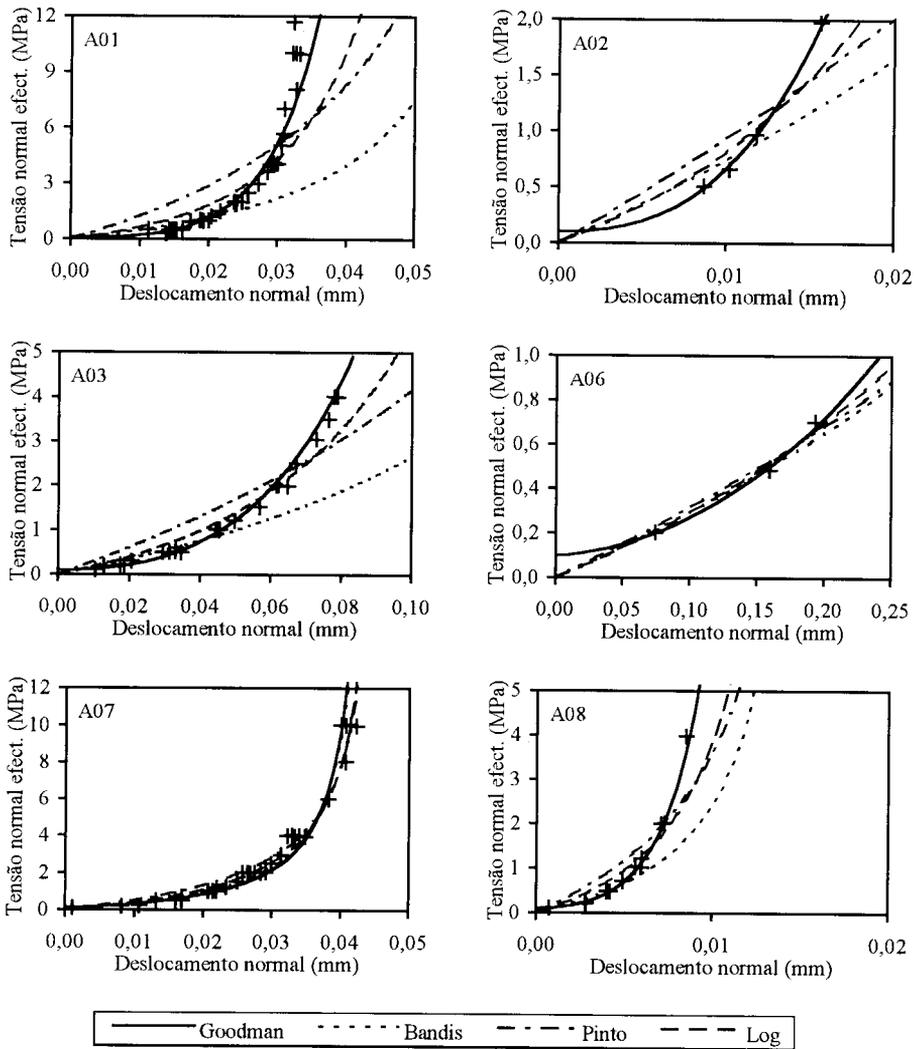


Fig. 9 – Tensão efectiva em função do deslocamento normal das diaclases

Devido aos problemas inerentes ao modelo de Goodman, nomeadamente o valor nulo da rigidez inicial e a necessidade de três parâmetros, que o torna menos apropriado para utilização em modelos numéricos, decidiu-se investigar outras funções matemáticas, que pudessem eventualmente ajustar-se melhor aos resultados experimentais. Após tentar vários tipos de funções matemáticas com dois parâmetros, que obedecessem à condição básica para simular este tipo de resultados, *i.e.* rigidez inicial não nula e comportamento assintótico da tensão normal para o fecho máximo, concluiu-se que a seguinte função é a que melhor se ajusta aos resultados experimentais:

$$\sigma_n = \left[ -\log \left( \frac{E_0^f - \delta_n}{10 E_0^f} \right) \right]^n - 1 \quad (11)$$

em que  $n$  é um parâmetro determinado a partir de uma análise de regressão dos resultados experimentais. O valor de  $n$  para todas as amostras, bem como os coeficientes de correlação, estão indicados no Quadro II. As curvas obtidas estão representadas na Fig. 9. Este modelo ajusta-se melhor aos resultados dos ensaios do que os outros modelos com dois parâmetros, porque consegue simular grandes curvaturas a pequenas deformações. Os valores de  $R$  são muito mais elevados mas, no entanto, este modelo não consegue um ajustamento tão bom como o modelo de Goodman. Contudo, uma vez que é mais correcto do ponto de vista matemático e só necessita de dois parâmetros, é mais adequado para ser utilizado em simulações numéricas.

### 5.3 – Comportamento hidráulico das diaclases sob tensão normal

Existem muitos tipos de equações propostas por diversos autores para simulação do comportamento hidráulico das diaclases sob tensão normal (Walsh 1981, Gale 1982, Swan 1983, Tsang e Witherspoon 1981, Pyrak-Nolte *et al.* 1987). Estas equações relacionam a permeabilidade da diaclase sob um determinado nível de tensão,  $K^f$ , com a permeabilidade a uma tensão de referência, que em muitos casos é zero,  $K_0^f$ . O valor de  $K_0^f$  é definido em função da abertura mecânica inicial e é multiplicado por uma função empírica da tensão por forma a obter-se  $K^f$ . Na presente análise, no entanto, não é necessário ajustar novos modelos empíricos aos resultados dos ensaios.  $K^f$  é relacionado com  $e^f$  através da lei cúbica,  $e^f$  é relacionado com  $E^f$  via  $f_E$ , e  $E^f$  é relacionado com  $\sigma_n$  mediante os modelos empíricos de deformação da diaclase. Tem-se, então:

$$K^f = K_0^f f(\sigma_n) \quad \text{em que:} \quad K_0^f = C f_E^3 (E_0^f)^3$$

$$f(\sigma_n) = \left( \frac{E^f}{E_0^f} \right)^3 \quad (12)$$

Para o novo modelo logarítmico da equação (11) tem-se:

$$K^f = C f_E^3 (E_0^f)^3 \times 10^{3[1-(\sigma_n+1)^{1/n}]} \quad (13)$$

A Fig. 10 representa diagramas do caudal normalizado (ou permeabilidade) em função da tensão normal efectiva, assim como a curva correspondente à equação (13), com os parâmetros apresentados no Quadro II. Observa-se a típica diminuição do caudal de uma forma assintótica para tensões normais efectivas crescentes. A qualidade do ajustamento da lei logarítmica pode considerar-se adequado.

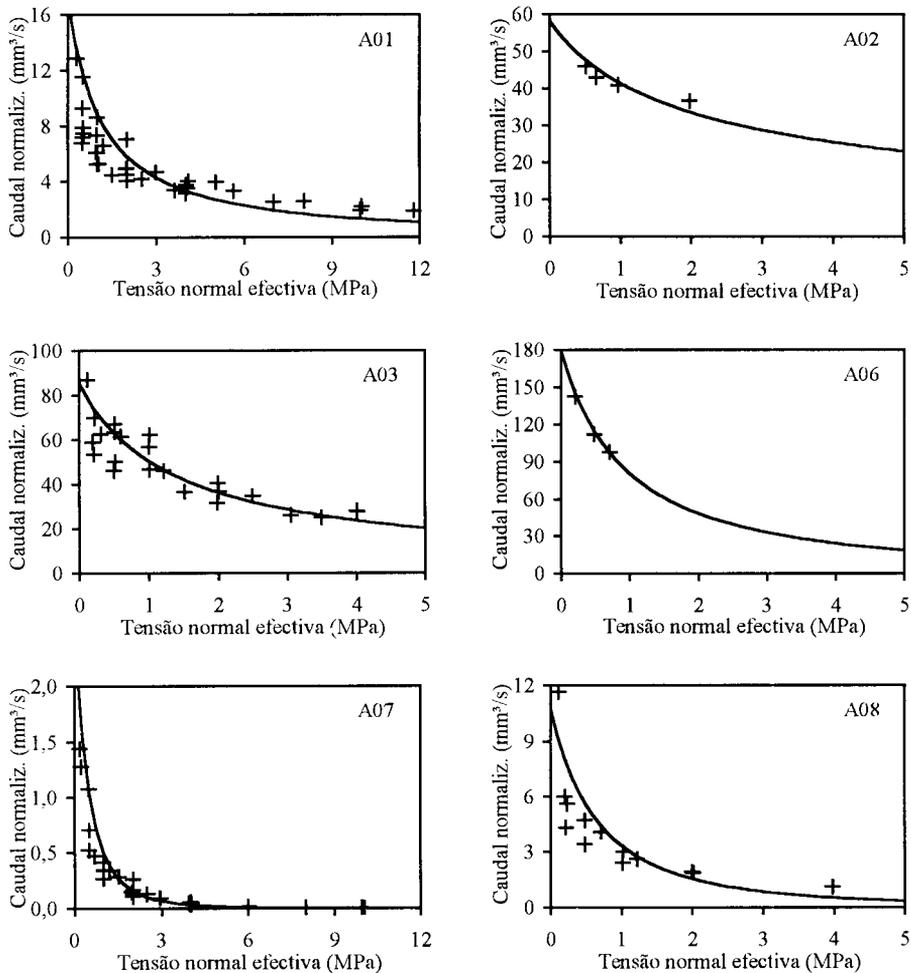


Fig. 10 – Caudais normalizados, em função da tensão normal efectiva

## 6 – CONCLUSÕES

Nos domínios usuais de interesse em engenharia civil, as idealizações do comportamento hidromecânico das diaclases podem ser expressas em termos de uma relação entre uma abertura hidráulica equivalente, para a qual é válida a lei cúbica de Darcy do escoamento laminar paralelo, e a abertura mecânica obtida dos ensaios.

Os resultados dos ensaios hidromecânicos mostraram que, introduzindo o parâmetro de acoplamento hidromecânico  $f_E$ , se obteve um ajustamento muito bom com a lei cúbica. Em

seis ensaios obtiveram-se caudais proporcionais à abertura mecânica elevada a potências entre 2,914 e 3,048. Isto está aparentemente em contradição com as conclusões de alguns outros autores, mas pode justificar-se pela relativamente baixa rugosidade das diaclases do Alto Lindoso ( $JRC \leq 8,3$ ) e também pelo facto de a tensão normal não ter atingido valores tão elevados como os reportados pela maioria desses autores. O efeito da tortuosidade e da canalização do escoamento não foi, por isso, muito significativo.

A dispersão dos resultados obtidos é relativamente elevada e não foi possível obter qualquer correlação com as propriedades geométricas das diaclases, nomeadamente a rugosidade. O facto de a rugosidade das diaclases não apresentar um espectro mais largo deverá ter contribuído para isso.

As leis empíricas habitualmente utilizadas para o estudo do comportamento mecânico sob tensão normal não se mostraram adequadas para se ajustarem aos resultados dos ensaios. Foi deduzida uma nova lei, que utiliza apenas dois parâmetros: o fecho máximo e um expoente,  $n$ , determinado experimentalmente. Embora se tivesse obtido um melhor ajustamento com modelos com três parâmetros, considera-se aconselhável, sempre que possível, ter um número reduzido de parâmetros. Isto é particularmente importante quando se pretende incluir estas leis em modelos numéricos do comportamento do maciço rochoso, pois frequentemente não existem valores experimentais destes parâmetros e eles têm de ser assumidos ou extrapolados utilizando a experiência.

A análise hidromecânica é feita relacionando o caudal com a abertura mecânica (usando a lei cúbica e o parâmetro  $f_E$ ), e a abertura mecânica com a tensão (usando uma lei empírica). Não são necessárias equações empíricas relacionando o caudal directamente com a tensão.

A análise em termos de valores médios forneceu para as diaclases ensaiadas os valores:  $f_E = 0,88$ ,  $E_0^f = 0,080$  mm e  $n = 5,30$ . Estes valores, juntamente com os resultados de outros ensaios realizados nas mesmas diaclases, e outros dados disponíveis, puderam ser directamente utilizados como dados de partida para o modelo de análise global do comportamento hidromecânico dos túneis e poços sob pressão do empreendimento do Alto Lindoso (Lamas 1993).

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Electricidade de Portugal pela permissão em utilizar resultados do empreendimento hidroeléctrico do Alto Lindoso, e ao Imperial College, da Universidade de Londres, onde uma parte importante do trabalho experimental foi realizado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bandis S., Lumsden A.C. & Barton N. - *Fundamentals of rock joint deformation*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, No. 6, pp. 249-268, 1983.
- Barton N., Bandis S. & K. Bakhtar - *Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 2, pp. 121-140, 1985.
- Cook N.G.W. - *Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress*. 1<sup>st</sup> Jaeger Memorial Lecture, Univ. of Minnesota, 1988.

- Elliot G.M. & E.T. Brown - *Laboratory measurements of the thermo-hydro-mechanical properties of rock*. Quarterly J. of Engng Geol., Vol. 21, pp. 299-314, 1988.
- Elliot G.M., Brown E.T., Boodt P.I. & J.A. Hudson - *Hydromechanical behaviour of joints in the Carnmenellis granite*. Proc. Int. Symp. on Fundamental of Rock Joints, pp. 249-258, Björkliden, 1985.
- Gale J. - *The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships*. Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mech., Berkeley, pp. 290-298, 1982.
- Gentier S. - *Morphology and hydromechanical behaviour of a natural fracture in a granite under normal stress* (em Français). Tese de Doutorado, Orléans, 1986
- Goodman R.E. - *Methods of Geological Engineering in discontinuous rock*. West Publishing Company, West St Paul, Minnesota, 1986.
- Iway K. - *Fundamental studies of fluid flow through a single fracture*. Tese de Doutorado, Univ. da Califórnia, Berkeley, 1976.
- Lamas L. - *Contributions to understanding the hydromechanical behaviour of pressure tunnels*. Tese de Doutorado, Univ. de Londres, 1993.
- Louis C. - *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses*. Tese de Doutorado, Univ. de Karlsruhe, 1968.
- Pinto J.L. - *A rheological model of the behaviour of rocks and rock masses*. Proc. 6th Cong. Int. Soc. Rock Mech., pp. 1085-1088 Montréal, 1987.
- Pyrak-Nolte L.J., Myer L.R., Cook N.G.W. & P.A. Witherspoon - *Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock*. Proc. 6th Congress Int. Soc. Rock Mechanics, pp. 225-232, Montréal, 1987.
- Raven K.G. & J. Gale - *Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 4, pp. 251-261, 1985.
- Swan G. - *Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements*. Rock Mech., Vol. 16, pp. 19-38, 1983.
- Tsang Y.W. & P.A. Witherspoon - *Hydromechanical behaviour of a deformable rock fracture subject to normal stress*. J. Geophys. Res., Vol. 86, No. B10, pp. 9287-9298, 1981.
- Walsh J.B. - *Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 429-435, 1981.
- Witherspoon P.A., Wang J.S.Y., Iwai K. & J.E. Gale - *Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture*. Water Resources Res., Vol. 16, No.6, pp. 1016-1024, 1980.
- Zhao J. - *Experimental studies of the hydro-thermo-mechanical behaviour of joints in granite*. Tese de Doutorado, Univ. de Londres, 1987.