

DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS ANISOTRÓPICOS A PARTIR DE AMOSTRAS INTEGRAIS*

Determination of permeability in anisotropic rock-masses from integral samples

por

MANUEL ROCHA** e FERNANDO FRANCISS***

RESUMO – É apresentado método que permite a caracterização da permeabilidade dos maciços rochosos como grandeza anisotrópica – isto é, a determinação do tensor permeabilidade – a partir da caracterização da fissuração do maciço por meio de amostras integrais.

Para isso, é estabelecida teoria que permite o cálculo do tensor permeabilidade a partir do conhecimento da atitude e da abertura das fissuras e, no caso de haver enchimentos, do coeficiente de permeabilidade destes. Estas grandezas são determinadas em amostras integrais, apoiando-se a referida teoria na hipótese de que as fissuras são contínuas e planas e com as mesmas características das secções das fissuras contidas nas amostras. A fim de ter em consideração desvios que se verifiquem em relação a esta hipótese são introduzidos factores de correcção, deduzidos a partir de resultados de ensaios de pressão *in situ*. Para a determinação do tensor permeabilidade num ponto dum maciço rochoso basta considerar uma só amostra integral, desde que seja representativa da fissuração.

São apresentados resultados de aplicação os quais levam a considerar o método como muito promissor.

SYNOPSIS – A method is presented which makes it possible to characterize the permeability of a rock mass as an anisotropic magnitude – i. e. to determine its permeability tensor – from a characterization of its fracturing by means of integral samples.

For the purpose, a theory is developed by means of which the permeability tensor can be calculated from the attitudes and openings of the fractures and – if infillings are present – also from their coefficient of permeability. This theory is based on the assumption that the

* Manuscrito recebido em Fevereiro 1976. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

** Presidente do Conselho Superior dos Laboratórios de Engenharia Civil; Professor de Mecânica das Rochas, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

*** Professor da Pontifícia Universidade Católica; Chefe do Departamento de Geotecnologia, Sonda-técnica, S. A., Rio de Janeiro.

sampled fractures are continuous and plane, and have the same characteristics as the section of the fractures present in the samples. Possible deviations with respect to this assumption are taken into account by means of correcting factors derived from the results of pressure tests *in situ*. The permeability tensor of a rock mass at a point can be determined from a single integral sample, provided this is representative of the fracturing.

Results of the application of the method are presented, which show it to look very promising.

1 – INTRODUÇÃO

Os fenómenos da percolação através de maciços rochosos têm grande importância prática no respeitante não só à grandeza dos caudais de infiltração, em especial em obras hidráulicas, mas também às solicitações que a percolação impõe aos maciços, influenciando muitas vezes de maneira decisiva a sua segurança. É pois de grande importância dispor de técnicas que permitam a adequada caracterização da permeabilidade dos maciços rochosos.

Dado o papel dominante que tem em regra a fissuração dos maciços na sua permeabilidade, esta tem sido caracterizada mediante ensaios *in situ*, os bem conhecidos ensaios de pressão em furos de sondagem. Estes ensaios apresentam contudo uma severíssima limitação pois eles conduzem à caracterização da permeabilidade por uma grandeza escalar: o volume de água absorvido na unidade de tempo, por unidade de comprimento do furo e por unidade da pressão aplicada ou sob dada pressão, ou então o resultado do ensaio é mesmo expresso em termos de um coeficiente de permeabilidade. Ora é bem sabido que a permeabilidade é uma das propriedades dos maciços que pode apresentar mais acentuada anisotropia, sendo corrente as permeabilidades extremas diferirem de várias ordens de grandeza. Anisotropias acentuadas da permeabilidade podem conduzir a comportamentos completamente diversos de taludes, de fundações de obras hidráulicas, etc., conforme a orientação da anisotropia.

É portanto indispensável dispor de métodos que permitam caracterizar a permeabilidade como grandeza anisotrópica. Para isso podem ser realizados ensaios em furos com diversas direcções, sendo mesmo possível deduzir as três permeabilidades principais a partir de ensaios em três furos desde que sejam dirigidos segundo as direcções principais de permeabilidade, o que implica o prévio conhecimento destas direcções (Snow, 1966), (Louis, 1974). No entanto, a realização de ensaios em várias direcções levanta o problema do tempo e do custo, tanto mais que por cada ponto a caracterizar será necessário fazer passar vários furos: seis no caso mais geral.

O presente trabalho apresenta novo método para determinação da permeabilidade, como grandeza anisotrópica, a partir da caracterização do maciço por meio de amostras integrais. Este tipo de amostras permite conhecer a atitude, a abertura e o enchimento das fissuras do maciço rochoso, de tal modo que é possível calcular as direcções principais de permeabilidade e a grandeza dos coeficientes de permeabilidades principais a partir da soma das contribuições das várias fissuras para o tensor permeabilidade. Como no cálculo se admitem várias hipóteses simplificadoras, em especial que as fissuras são contínuas no seu plano, reconhece-se a necessidade de introduzir factores de correcção, a partir de alguns ensaios de pressão em furos de sondagem. No caso de ser relevante a contribuição da percolação através da própria rocha, essa contribuição também pode ser tida em consideração na determinação da permeabilidade do maciço.

2 – AMOSTRAGEM INTEGRAL

Apesar de o método da amostragem integral ter já sido apresentado em vários trabalhos (Rocha, 1971), (Rocha and Barroso, 1971), indicam-se aqui os seus aspectos essenciais.

O método consiste na obtenção de amostras integrais, orientadas, a partir do maciço rochoso previamente armado com varão que assegura a integridade de todo o material amostrado. Para isso, é em primeiro lugar aberto um furo de sondagem com um diâmetro D , até à profundidade à qual se deseja extrair a amostra integral (Fig. 1a); depois é aberto furo com um diâmetro d , coaxial com o anterior e com um comprimento igual ao da amostra a obter (Fig. 1b), destinado a alojar o varão que arma a amostra, cujo azimute é definido por meio das barras de posicionamento (Fig. 1c), através das quais, na fase seguinte, é introduzido um aglutinante destinado a ligar o varão ao maciço rochoso (Fig. 1d); depois de o aglutinante ter endurecido, é retomada a abertura do furo de diâmetro D , pelos métodos correntes, sendo obtida a amostra integral (Fig. 1e).

O método tem sido aplicado com êxito a formações de natureza muito diversa – desde rochas duras a intensamente meteorizadas e até mesmo solos residuais – fornecendo ampla informação sobre os maciços rochosos, em especial sobre a atitude, abertura e enchimento das fissuras. As amostras integrais têm

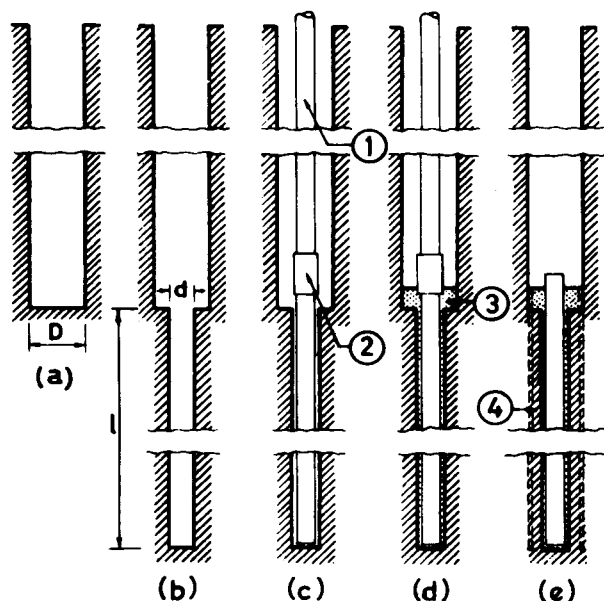


Fig. 1 – Método de amostragem integral

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| (1) Barras de posicionamento | (3) Aglutinante |
| (2) Peça de ligação | (4) Amostra integral |

sido obtidas em furos com o diâmetro D igual e superior a 76 mm e o comprimento L tem variado de 1,5 a 3 m.

No art. 6 serão dadas indicações sobre a maneira como são determinadas a atitude e a abertura das descontinuidades.

3 – IDEALIZAÇÃO E AMOSTRAGEM DO MACIÇO ROCHOSO

Com vista a permitir o cálculo da contribuição de cada fissura para a permeabilidade, admite-se que as fissuras interceptadas por um dado furo de sondagem são planas e contínuas no seu plano, e que a abertura de cada fissura é constante e o seu enchimento tem as mesmas características, quando exista. Assim se passa da estrutura real do maciço rochoso, Fig. 2a, para a estrutura idealizada da Fig. 2b.

A hipótese da continuidade das fissuras no seu plano é a mais grosseira, devendo contudo notar-se que o facto de ocorrerem em regra fissuras com

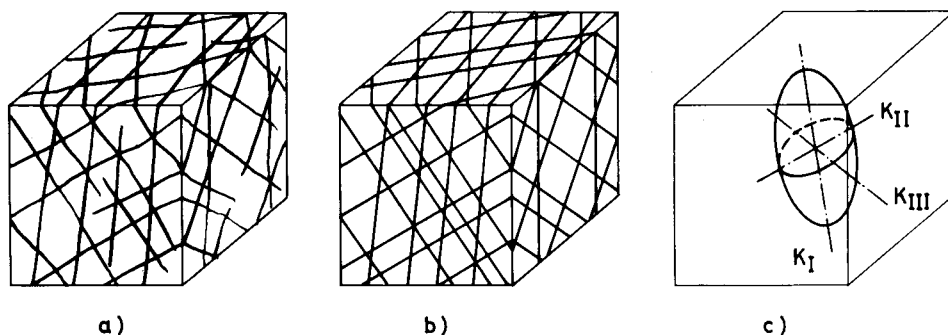


Fig. 2 – Idealização do maciço rochoso

várias orientações permite certa continuidade à percolação através do maciço. Como já foi referido, no método de caracterização da permeabilidade objecto do presente trabalho é introduzida correcção com a qual se procura atenuar desvios resultantes dessa hipótese.

Em regra a orientação das fissuras – definida pela direcção da normal – varia no espaço, apresentando certas concentrações correspondentes às famílias, isto é, a conjuntos de fissuras subparalelas. No caso mais geral, a abertura e o enchimento também variarão, mesmo dentro de uma família.

Uma vez que se deseja tratar o maciço como um meio contínuo, Fig. 2c, é necessário que fissuras com cada uma das orientações, aberturas e enchimentos, consideradas relevantes para a permeabilidade do maciço, ocorram em número suficientemente grande em volumes que possam ser considerados pequenos em face da geometria do problema em consideração. Deste modo se poderá substituir o maciço fissurado por um meio contínuo, podendo as características deste meio variar quase continuamente de volume para volume.

Uma questão fundamental que se levanta é a das dimensões que deve ter uma amostra de modo a ser representativa do maciço rochoso, em particular no respeitante à permeabilidade. Essas dimensões devem ser tais que a amostra contenha um número suficientemente elevado de fissuras com as diversas orientações, aberturas e enchimentos. Assim, no caso de um maciço com uma só família de fissuras contínuas, supostas com a mesma abertura e enchimento, a amostra tem de conter um número suficientemente grande de fissuras de tal modo que a sua permeabilidade seja próxima da permeabilidade

do maciço. Isto é, se forem consideradas amostras com volumes crescentes V_1, V_2, V_3, \dots , Fig. 3a, a sua permeabilidade, por exemplo o coeficiente de permeabilidade K segundo o plano das fissuras, sofrerá inicialmente grandes flutuações tendendo para um valor estável, Fig. 3b: uma amostra para ser representativa tem pois de ter volume superior a V_r , variando o valor de V_r conforme a precisão que se desejar obter na determinação da permeabilidade.

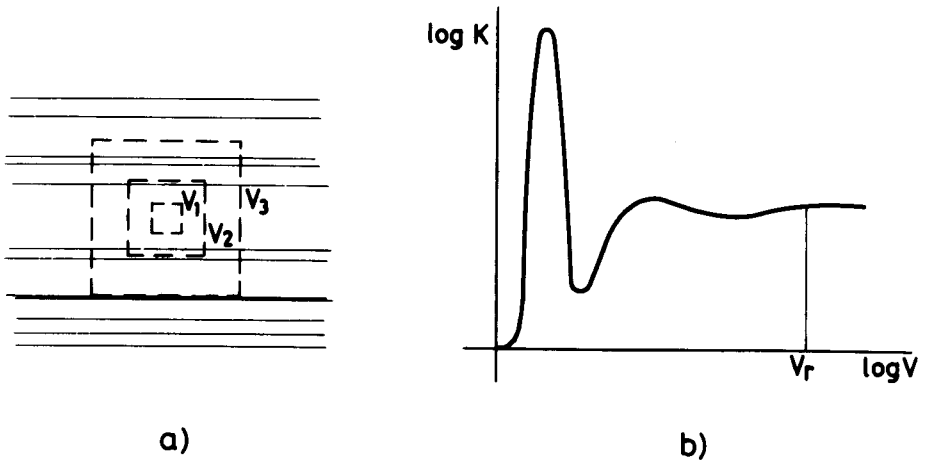


Fig. 3 – Variação do coeficiente de permeabilidade com o volume da amostra

Se a abertura das fissuras for variável, o volume da amostra deve além disso garantir que a amostra é representativa da distribuição das aberturas no maciço, isto é, cada intervalo de aberturas, $e, e + \Delta e$, deve estar representado por número adequado de fissuras. No caso de fissuras sem enchimento, como a sua contribuição para a permeabilidade varia com o cubo da abertura, será necessário cuidar especialmente da representatividade das maiores aberturas.

O que acabamos de dizer estende-se, de maneira óbvia, ao caso de haver a considerar duas, três ou mais famílias de fissuras com dadas orientações.

No caso geral de as orientações das fissuras apresentarem uma distribuição espacial qualquer, uma amostra para ser representativa tem de conter um número adequado de fissuras que representem cada uma das famílias de fissuras correspondentes a normais contidas num dado ângulo sólido elementar.

Isto é, dum modo geral o sistema de fissuras numa amostra representativa pode decompor-se em famílias constituídas por fissuras subparalelas. Além disso, é necessário que a amostra assegure a representatividade das aberturas e enchimentos ocorrentes em cada família.

Portanto, uma amostra para ser representativa tem em regra de conter um número muito elevado de fissuras. Por isso, é-se forçado muitas vezes na prática a aceitar amostras com uma representatividade precária, tal como é aliás corrente na caracterização de outras propriedades dos maciços rochosos.

Como no presente trabalho os maciços rochosos são amostrados por meio de furos de sondagem, impõe-se discutir a qualidade da amostragem obtida. Para isso, considere-se uma família de fissuras cuja normal faz um ângulo Θ com um furo de sondagem, Fig. 4. Se o espaçamento das fissuras for l , o número médio n de fissuras interceptadas por um comprimento L do furo de sondagem é

$$n = \frac{L}{l} \cos \Theta$$

Portanto, quando Θ tende para 90° o número n tende para zero, mesmo quando L tenha valor elevado. Isto é, a amostragem de famílias subparalelas ao furo de sondagem é necessariamente precária, como é bem sabido.

Portanto, no caso de as fissuras estarem dispostas segundo um certo número de famílias com orientações bem definidas, os furos devem ser

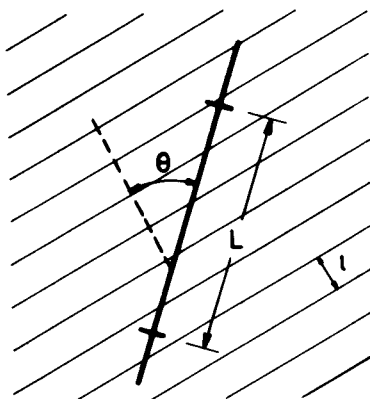


Fig. 4 – Amostragem numa família de fissuras

dirigidos de modo a interceptarem todas as famílias, segundo ângulos que proporcionem melhor amostragem das famílias com permeabilidade mais relevante. No caso de distribuição espacial qualquer, os furos de sondagem devem ser paralelos aos planos das fissuras menos relevantes, do ponto de vista da permeabilidade, isto é, com maior espaçamento e(ou) menor abertura e(ou) enchimento menos permeável. Nota-se que, deste modo, nem a precisão do valor da permeabilidade segundo a direcção do furo ficará apreciavelmente afectada, uma vez que as fissuras não subparalelas ao furo fornecerão as contribuições mais relevantes para esse valor.

Para melhorar a amostragem convém utilizar comprimentos L elevados, de acordo com os valores de Θ e l esperados. Como os comprimentos das amostras integrais são em regra inferiores a 3 m, será muitas vezes conveniente associar diversas amostras, extraídas no mesmo furo ou em furos paralelos, e considerá-las como se se tratasse de uma só amostra.

4 – PERMEABILIDADE DUM SISTEMA DE FISSURAS

Considere-se um maciço rochoso sujeito a percolação e seja Φ o potencial hidráulico e $\vec{J} = -\text{grad } \Phi$ o gradiente hidráulico, num volume elementar representativo. Em virtude da anisotropia, o vector caudal específico \vec{V} não terá em regra a direcção de \vec{J} . Caracterizar a permeabilidade do maciço rochoso é definir uma relação que permita determinar a direcção e a grandeza de \vec{V} a partir do conhecimento de \vec{J} . Veremos que a relação que adoptamos é um tensor, que representamos por $\|K\|$ e designamos tensor permeabilidade

$$\vec{V} = \|K\| \vec{J}$$

É feita a seguir a determinação da permeabilidade duma família de fissuras paralelas, a partir do conhecimento das leis de percolação numa fissura; depois são considerados conjuntos de famílias e finalmente será tratado o caso geral de fissuras com qualquer distribuição.

4.1 – Para uma fissura sem preenchimento, Fig. 5, uma vez que se admita um escoamento laminar, a velocidade média de percolação na fissura, \vec{V} , isto é, o caudal específico através da fissura, é dado por

$$\vec{V} = K_f \vec{J}_f \quad (1)$$

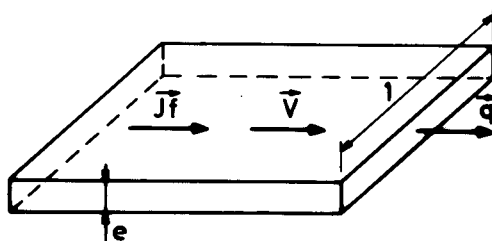


Fig. 5 – Escoamento numa fissura

onde \vec{J}_f é o gradiente hidráulico actuante no plano da fissura e K_f a condutividade hidráulica da fissura. Este coeficiente depende da abertura e da fissura, do coeficiente de viscosidade cinemática do líquido, ν , e da rugosidade relativa das paredes da fissura, $r = \frac{h}{2e}$, onde h é a rugosidade absoluta, isto é, a altura média das asperezas; adoptamos para K_f a expressão empírica (Louis, 1969)

$$K_f = C e^2 \quad (2)$$

onde

$$C = \frac{g}{12 \nu (1 + 8,8 r^{1,5})}$$

representando g a aceleração da gravidade. Como se verifica na Fig. 6, o valor de C é mais acentuadamente influenciado pela rugosidade para valores de r superiores a cerca de 0,1, atingindo o valor de $3 \times 10^5 \text{ (ms)}^{-1}$ para $r = 0,33$, limite superior das rugosidades consideradas por Louis. As variações de K_f provenientes da atribuição a r de valor incorrecto serão tidas em consideração através da correcção a que se refere o art. 5.1.

Portanto o caudal \vec{q} por unidade de largura da fissura é

$$\vec{q} = K_f e \vec{J}_f \quad (3)$$

donde

$$\vec{q} = C e^3 \vec{J}_f$$

No caso de fissuras preenchidas subsistem as expressões (1) e (3), sendo K_f o coeficiente de permeabilidade do material de enchimento da fissura.

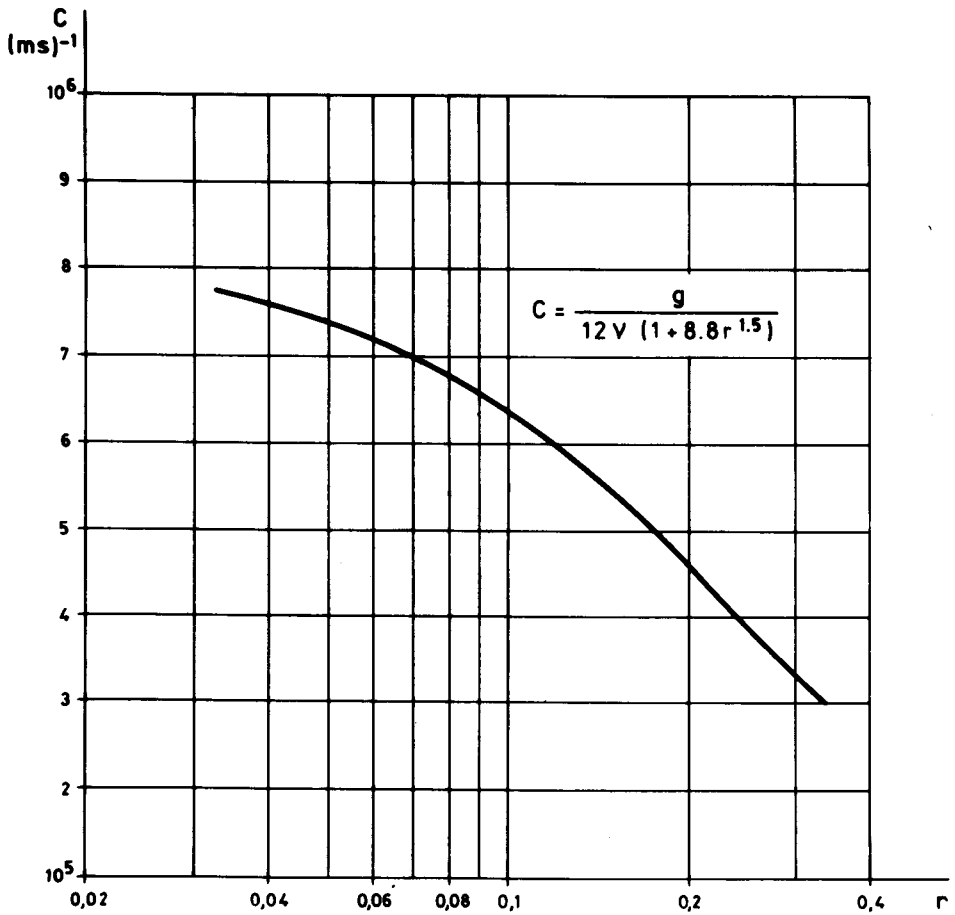


Fig. 6 – Variação do coeficiente C com a rugosidade relativa r

4.2 – Considere-se um maciço rochoso cortado por uma família de fissuras, preenchidas ou não, com aberturas e_i e coeficientes K_{fi} , submetido a um gradiente hidráulico \vec{J}_f paralelo às fissuras, Fig. 7. O caudal específico que atravessa o maciço rochoso, isto é, a velocidade média de escoamento, \vec{V} , será dada por

$$\vec{V} = \frac{1}{L} \sum \vec{q}_i = \frac{\sum K_{fi} e_i}{L} \vec{J}_f$$

sendo L um segmento perpendicular às fissuras, de comprimento suficientemente grande para o volume correspondente ser representativo da permeabilidade do

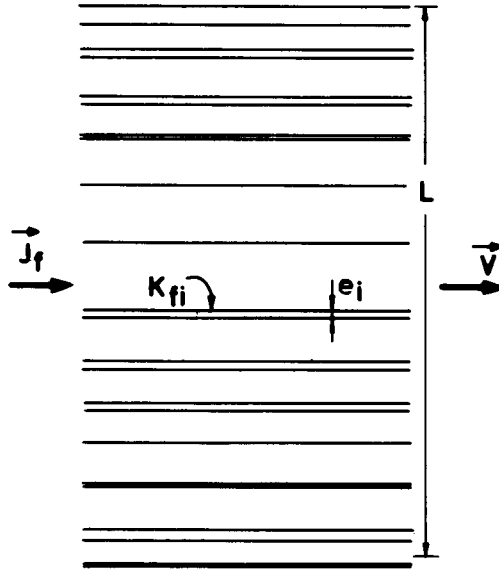


Fig. 7 – Escoamento por família de fissuras

maciço. Designando por K o coeficiente de permeabilidade do maciço rochoso segundo as fissuras, é

$$\vec{V} = K \vec{J}_f \quad (4)$$

sendo

$$K = \frac{\sum K_{fi} e_i}{L} \quad (5)$$

Pode escrever-se

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_i + \dots$$

com

$$K_i = \frac{K_{fi} e_i}{L}$$

isto é, o coeficiente de permeabilidade do maciço é igual à soma dos coeficientes de permeabilidade K_1, K_2, \dots , correspondentes à ocorrência, separadamente, de famílias constituídas pela repetição de cada fissura amostrada, com um espaçamento médio L . Tal corresponde bem ao conceito de a amostragem feita pelo comprimento L ser representativa da fissuração do maciço.

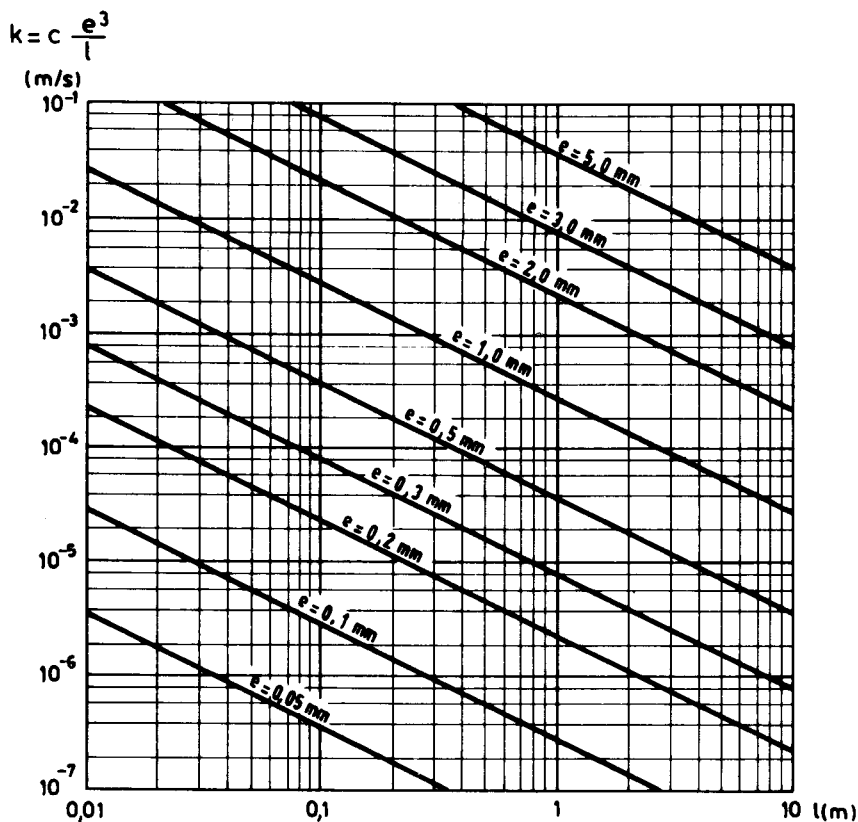


Fig. 8 – Coeficiente de permeabilidade de família de fissuras

No caso de família de fissuras sem enchimento, atendendo a (2), vem

$$K = \frac{\sum C_i e_i^3}{L}$$

Se a abertura for constante assim como a rugosidade das fissuras, vem

$$K = \frac{C e^3}{l}$$

designando por l o espaçamento médio das fissuras, $\frac{L}{n}$, sendo n o número de fissuras ocorrentes no comprimento L . A Fig. 8 apresenta os valores do coeficiente de permeabilidade K em função do espaçamento médio l e das fissuras; adoptou-se $C = 3 \times 10^5 (\text{ms})^{-1}$.

Para família de fissuras preenchidas com o mesmo material de coeficiente de permeabilidade K_f , e com a mesma abertura, tem-se

$$K = K_f \frac{e}{l}$$

Portanto, a relação entre os coeficientes de permeabilidade de maciços em que o espaçamento e a abertura das fissuras sejam os mesmos, mas em que num as fissuras se encontram abertas e no outro preenchidas com um material com coeficiente de permeabilidade K_f , é dada pela expressão

$$A = \frac{C}{K_f} e^2$$

Na Fig. 9 está representada esta relação A em função da abertura das fissuras, na hipótese de ser $C = 3 \times 10^5 (\text{ms})^{-1}$. Verifica-se que, mesmo para valores bastante elevados de K_f , a permeabilidade através de fissuras preenchidas é desprezível em face da correspondente a fissuras abertas. Por isso, é frequente

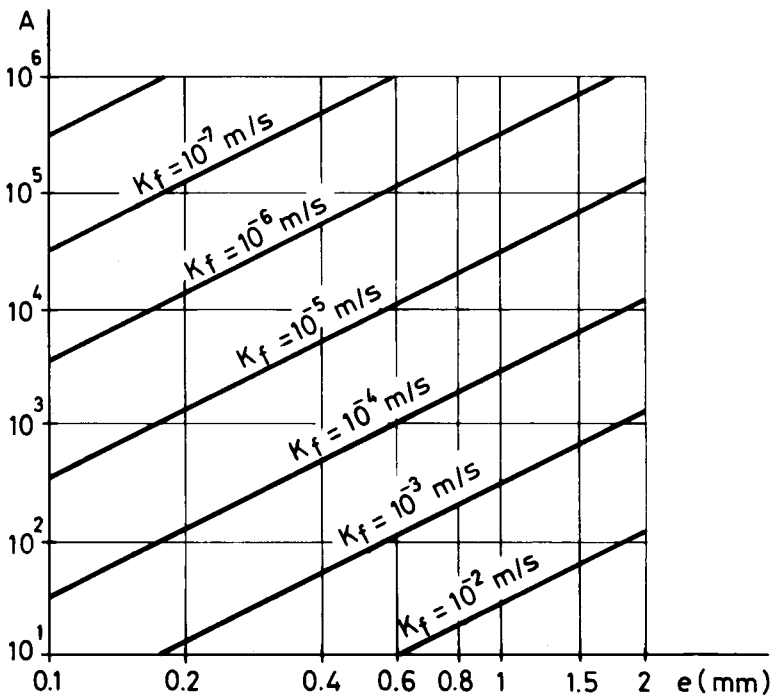


Fig. 9 – Relação entre coeficientes de permeabilidade de famílias de fissuras abertas e preenchidas com material de coeficiente de permeabilidade K_f

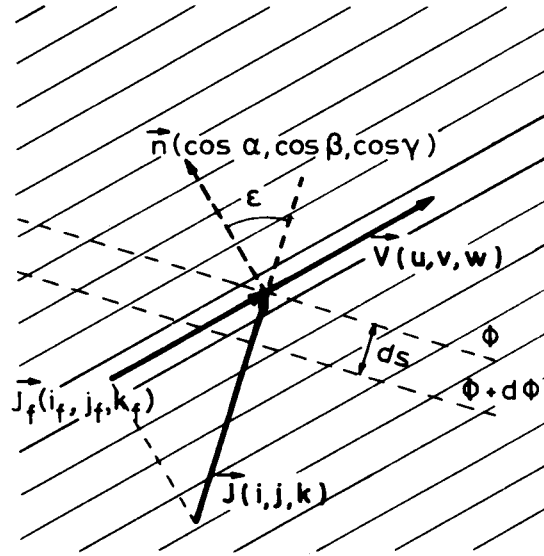


Fig. 10 – Caso geral do escoamento através família de fissuras

não ter interesse considerar a contribuição de fissuras preenchidas para a permeabilidade do maciço.

4.3 – Supôs-se até agora que o gradiente hidráulico era paralelo ao plano das fissuras que constituem uma família. No caso geral, o gradiente hidráulico do escoamento forma um ângulo ϵ com a normal \vec{n} às fissuras, Fig. 10. A grandeza do gradiente hidráulico é $J = -\frac{d\Phi}{ds}$, e o gradiente no plano das fissuras tem a grandeza $J_f = -\frac{d\Phi}{ds} \sin \epsilon = J \sin \epsilon$. Isto é, o gradiente que determina a percolação nas fissuras é a projecção, \vec{J}_f , de \vec{J} no plano das fissuras. Portanto, subsistem as expressões (1) e (4), respectivamente para uma fissura e para uma família, sendo \vec{J}_f a projecção de \vec{J} .

Em relação a um sistema de eixos ortogonais, as componentes de $\vec{J}_f(i_f, j_f, k_f)$ podem exprimir-se em função das componentes de $\vec{J}(i, j, k)$ pelas expressões

$$\begin{aligned} i_f &= i (\cos^2 \beta + \cos^2 \gamma) - j \cos \alpha \cos \beta - k \cos \alpha \cos \gamma \\ j_f &= -i \cos \beta \cos \alpha + j (\cos^2 \alpha + \cos^2 \gamma) - k \cos \beta \cos \gamma \\ k_f &= -i \cos \gamma \cos \alpha - j \cos \gamma \cos \beta + k (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta) \end{aligned} \quad (6)$$

onde $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ são os co-senos directores do vector unitário normal às fissuras, \vec{n} ($\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$). Portanto as componentes do caudal específico que atravessa o maciço rochoso, \vec{V} (u , y , w), são dadas, de acordo com a expressão (4), por

$$\begin{aligned} u &= K i_f \\ v &= K j_f \\ w &= K k_f \end{aligned}$$

sendo K dado pela expressão (5), onde L é um segmento disposto perpendicularmente às fissuras. Como a amostragem da fissuração do maciço é feita por meio de furos de sondagem, se se designar por L o comprimento da amostra, Fig. 4, fazendo o eixo do furo o ângulo Θ com a normal às fissuras, a expressão de K passa a ser

$$K = \frac{\sum K_{fi} e_i}{L \cos \Theta}$$

Portanto,

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_i + \dots$$

sendo

$$K_i = \frac{K_{fi} e_i}{L \cos \Theta} \quad (7)$$

onde L é o comprimento de amostragem, e, conforme (2),

$$K_{fi} = C_i e_i^2$$

no caso de fissura sem enchimento, sendo no caso contrário K_{fi} o coeficiente de permeabilidade do material de enchimento.

Portanto, em linguagem tensorial, os vectores \vec{V} e \vec{J} estão relacionados por um tensor simétrico $\|K\|$, que designamos por tensor permeabilidade do maciço rochoso

$$\vec{V} = \|K\| \vec{J} \quad (8)$$

sendo

$$\|K\| = \|K_1\| + \|K_2\| + \dots + \|K_i\| + \dots$$

onde $\|K_1\|$, $\|K_2\|$, \dots , $\|K_i\|$ \dots designam os tensores correspondentes à contribuição de cada fissura. É

$$\|K_i\| = \begin{vmatrix} K_{xxi} & K_{xyi} & K_{xzi} \\ K_{yxi} & K_{yyi} & K_{yzi} \\ K_{zxi} & K_{zyi} & K_{zzi} \end{vmatrix} \quad (9)$$

onde as componentes têm as expressões

$$\begin{aligned} K_{xxi} &= K_i (\cos^2 \beta + \cos^2 \gamma) & K_{xyi} &= K_{yxi} = -K_i \cos \alpha \cos \beta \\ K_{yyi} &= K_i (\cos^2 \alpha + \cos^2 \gamma) & K_{yzi} &= K_{zyi} = -K_i \cos \beta \cos \gamma \\ K_{zzi} &= K_i (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta) & K_{zxi} &= K_{xzi} = -K_i \cos \alpha \cos \gamma \end{aligned}$$

sendo K_i dado pela expressão (7).

Nota-se que o tensor $\|K_i\|$ respeitante a uma fissura pode ser considerado como o tensor permeabilidade respeitante a uma família de fissuras com as mesmas características (K_{fi}, e_i) que se repetissem com um espaçamento médio $L \cos \Theta$, tal como para o caso do gradiente hidráulico paralelo às fissuras.

Na prática é conveniente considerar o eixo Oz dirigido segundo o eixo de sondagem e descendente, e o eixo Ox no plano vertical passando pelo eixo do furô, Fig. 11a. Além disso, interessa definir o vector unitário \vec{n} a partir do ângulo $\Theta = \gamma$ e do ângulo λ formado pelo eixo Ox com a projecção de \vec{n} no plano Oxy . Como

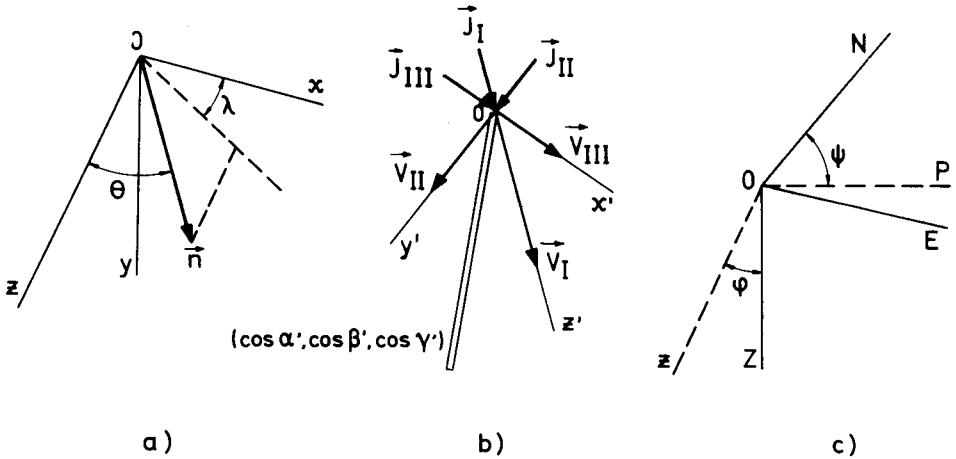


Fig. 11 – Sistema de eixos coordenados

$$\cos \alpha = \sin \Theta \cos \lambda$$

$$\cos \beta = \sin \Theta \sin \lambda$$

$$\cos \gamma = \cos \Theta$$

as componentes do tensor respeitante à contribuição de cada fissura passam a ter as expressões

$$\begin{aligned} K_{xxi} &= K_i(\sin^2 \lambda + \cos^2 \Theta \cos^2 \lambda) & K_{xyi} &= K_{yxi} = -K_i \sin^2 \Theta \cos \lambda \sin \lambda \\ K_{yyi} &= K_i(\sin^2 \Theta \cos^2 \lambda + \cos^2 \Theta) & K_{yzi} &= K_{zyi} = -K_i \sin \Theta \cos \Theta \sin \lambda \\ K_{zzi} &= K_i \sin^2 \Theta & K_{zxi} &= K_{xzi} = -K_i \sin \Theta \cos \Theta \cos \lambda \end{aligned} \quad (10)$$

onde K_i é função de Θ , conforme (7).

Observe-se que qualquer das componentes do tensor relativo a cada fissura tem a forma

$$\frac{K_i e_i}{L \cos \Theta} f(\lambda, \Theta)$$

onde $f(\lambda, \Theta)$ designa uma função dos ângulos definidores da orientação das fissuras, variando esta função com a componente.

4.4 – Consideremos agora o caso de um maciço cortado por várias famílias de fissuras, Fig. 12. Aceita-se a hipótese de que, sob um dado gradiente hidráulico \vec{J} , o caudal específico \vec{V} respeitante à percolação pelo maciço rochoso é dado por

$$\vec{V} = \vec{V}' + \vec{V}'' + \dots$$

sendo $\vec{V}', \vec{V}'', \dots$ os caudais específicos correspondentes a cada família, isto é, desprezam-se as perdas de carga que se produzem nas linhas de cruzamento das fissuras pertencentes a famílias diferentes. É importante notar que, dentro da hipótese de continuidade e de abertura constante de cada fissura, se o potencial hidráulico Φ é constante ao longo dum plano AB, Fig. 12, o potencial num ponto de cruzamento S é o mesmo independentemente da fissura que conduz ao ponto, por exemplo, quer o percurso do líquido seja PS, QS ou RS; isto é, há compatibilidade entre os valores do potencial nos pontos de encontro de fissuras, mesmo que se considere distribuição tridimensional de famílias de fissuras. A correcção que será considerada no art. 5.1 contribuirá para que as referidas perdas de carga sejam tidas em consideração.

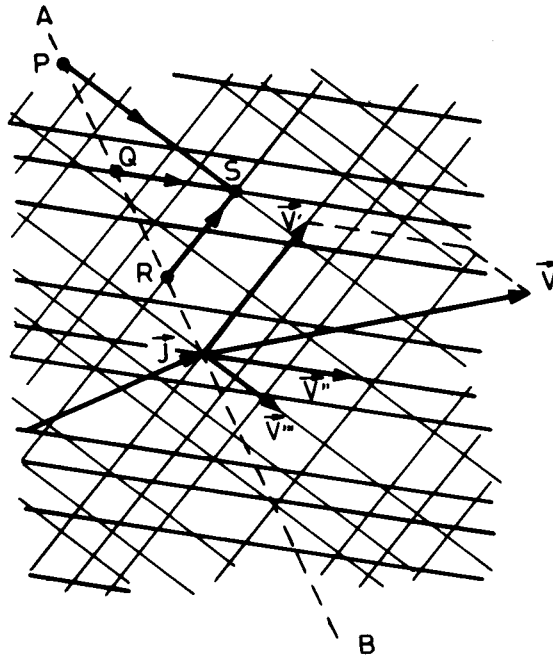


Fig. 12 – Percolação através diversas famílias de fissuras

Uma vez que se admita a hipótese mencionada, atendendo a (8), vem

$$\vec{V} = \|\mathbf{K}'\| \vec{J} + \|\mathbf{K}''\| \vec{J} + \dots = \|\mathbf{K}\| \vec{J} \quad (11)$$

isto é, existe um tensor permeabilidade do maciço, $\|\mathbf{K}\|$, que é um tensor simétrico dado por

$$\|\mathbf{K}\| = \|\mathbf{K}'\| + \|\mathbf{K}''\| + \dots$$

sendo $\|\mathbf{K}'\|$, $\|\mathbf{K}''\|$, ... os tensores correspondentes às diversas famílias.

Como cada um destes tensores se pode decompor em tensores correspondentes a cada fissura da família, conclui-se que

$$\|\mathbf{K}\| = \|\mathbf{K}_1\| + \|\mathbf{K}_2\| + \dots \|\mathbf{K}_i\| + \dots \quad (12)$$

sendo $\|\mathbf{K}_1\|$, $\|\mathbf{K}_2\|$... $\|\mathbf{K}_i\|$... os tensores correspondentes a cada uma das fissuras interceptadas por um mesmo comprimento de amostragem L . Por tanto, atendendo a (10) é

$$\|K_i\| = \left\| \begin{array}{ccc} K_i(\sin^2\lambda_i + \cos^2\Theta_i \cos^2\lambda_i) & -K_i \sin^2\Theta_i \cos\lambda_i \sin\lambda_i & -K_i \sin\Theta_i \cos\Theta_i \cos\lambda_i \\ -K_i \sin^2\Theta_i \cos\lambda_i \sin\lambda_i & K_i(\sin^2\Theta_i \cos^2\lambda_i + \cos^2\Theta_i) & -K_i \sin\Theta_i \cos\Theta_i \sin\lambda_i \\ -K_i \sin\Theta_i \cos\Theta_i \cos\lambda_i & -K_i \sin\Theta_i \cos\Theta_i \sin\lambda_i & K_i \sin^2\Theta_i \end{array} \right\| \quad (13)$$

onde

$$K_i = \frac{K_{fi} e_i}{L \cos \Theta_i} \quad (14)$$

sendo

$$K_{fi} = C e_i^2$$

no caso de fissuras abertas.

Em resumo, uma vez que o segmento L conduza a uma amostragem representativa, o tensor $\|K\|$ caracterizará a permeabilidade do maciço rochoso considerado como meio contínuo.

4.5 – No caso geral de as fissuras do maciço rochoso terem orientações com uma distribuição espacial qualquer, elas podem ser agrupadas em famílias tais que cada família inclui as fissuras cuja normal está contida num dado ângulo sólido elementar, conforme foi considerado no artigo 3; a amostragem feita pelo comprimento L será representativa se contiver número adequado de fissuras pertencentes a cada uma das famílias. Deste modo, o caso geral em consideração converte-se no caso de várias famílias de fissuras, anteriormente tratado, no qual se conclui que o tensor permeabilidade do maciço rochoso $\|K\|$ se obtém sobrepondo contribuições de cada fissura amostrada, considerada isoladamente, conforme a expressão (12).

Outra via que permite chegar a esta mesma conclusão consiste em supor cada uma das fissuras interceptadas por L como fazendo parte de uma família de fissuras com a mesma orientação e características (K_{fi}, e_i) e com espaçamento médio $L \cos \Theta_i$. Para que tal suposição seja legítima basta que a amostragem feita pelo comprimento L seja representativa.

4.6 – Até agora só foi considerada a percolação num maciço rochoso através das fissuras, isto é, foi desprezado o caudal através da própria rocha, como é em regra legítimo na prática.

No caso especial de assim não ser, se o coeficiente de permeabilidade da rocha for K_r , o caudal específico que passará através da rocha será

$$\vec{V} = K_r \vec{J}$$

Portanto, a expressão (11) passará a

$$\vec{V} = \|\mathbf{K}\| \vec{J} + K_r \vec{J}$$

uma vez que se admita a sobreposição dos caudais, donde

$$\vec{V} = (\|\mathbf{K}\| + K_r) \vec{J}$$

Admitiu-se no art. 4.1 que o escoamento no plano das fissuras era isótropo. No caso de se verificar anisotropia, uma vez que a permeabilidade anisotrópica seja definida, por exemplo pelos coeficientes de permeabilidade principais e pelas direcções principais, a permeabilidade do sistema de fissuras pode ser estabelecida por via análoga à anteriormente seguida. No entanto, na prática não se verificam condições que justifiquem a consideração de tal anisotropia.

Aceitou-se ainda no art. 4.1 que o escoamento era laminar. Para os gradientes hidráulicos que se verificam nas obras, as velocidades de escoamento são em regra suficientemente pequenas para se verificar o regime lamina, mesmo para fissuras com aberturas importantes, para o que muito contribui a não continuidade das fissuras (Franciss, 1970). Acresce que a consideração da não linearidade torna os cálculos da permeabilidade do sistema de fissuras muito mais complexos. Na verdade admita-se, como é habitual, uma lei de escoamento numa fissura do tipo

$$V = K'_f J_f^\alpha$$

onde J_f é o gradiente hidráulico no plano da fissura, K'_f a condutividade hidráulica turbulenta e α um expoente variando entre 1 e 0,5. A relação (1) toma a forma

$$\vec{V} = K'_f J_f^\alpha \frac{\vec{J}_f}{J_f}$$

onde $\frac{\vec{J}_f}{J_f}$ representa um vector unitário com a direcção e sentido de \vec{J}_f . É portanto

$$\vec{V} = K'_f J_f^{\alpha-1} \vec{J}_f \quad (15)$$

Como $J_f^{\alpha-1} = \sqrt{(i_f^2 + j_f^2 + k_f^2)^{\alpha-1}}$ e atendendo às expressões (6), conclui-se que não existe relação linear entre as componentes de \vec{V} e de \vec{J} . Para

calcular o caudal específico dum sistema de fissuras haverá pois que calcular, a partir da expressão (15), para cada fissura e para cada valor de $\vec{J}(i, j, k)$, o correspondente valor de $\vec{V}(u, v, w)$, e adicionar as contribuições das fissuras do sistema para u, v e w . Trata-se pois de caminho muito árduo.

4.7 – Como o tensor de permeabilidade $\|K\|$ é simétrico, existem vectores próprios, isto é, existem três direcções ortogonais entre si, Ox', Oy', Oz' , Fig. 11b, tais que se o gradiente hidráulico \vec{J} actuar segundo qualquer delas o caudal específico \vec{V} tem a mesma direcção

$$\begin{aligned}\vec{V}_I &= K_I \vec{J}_I \\ \vec{V}_{II} &= K_{II} \vec{J}_{II} \\ \vec{V}_{III} &= K_{III} \vec{J}_{III}\end{aligned}\tag{16}$$

As direcções de \vec{J}_I, \vec{J}_{II} e \vec{J}_{III} são as direcções principais de permeabilidade e K_I, K_{II} e K_{III} são os coeficientes de permeabilidade principais. Como se sabe, entre os coeficientes de permeabilidade principais se encontram os coeficientes de permeabilidade máximo e mínimo.

A determinação dos coeficientes de permeabilidade principais e das suas direcções faz-se, como é habitual, a partir da equação que constitui a sua própria definição

$$K_{I,II,III} \vec{J} = \|K\| \vec{J}\tag{17}$$

esta equação tem as três soluções (16).

5 – CORRECÇÃO EXPERIMENTAL DO TENSOR PERMEABILIDADE

5.1 – No método que se está apresentando para caracterização da permeabilidade dum maciço rochoso, tem grande importância a introdução de factores de correcção a partir do confronto entre resultados de ensaios de permeabilidade conduzidos em furos de sondagem e os valores que deveriam ter esses resultados, de acordo com os cálculos que se acabam de apresentar.

A necessidade da introdução de correcção resulta sobretudo da hipótese admitida de as fissuras serem contínuas. A correcção permitirá ainda compensar desvios resultantes de outras hipóteses, em particular de a rugosidade ser diferente do valor adoptado, $r = 0,33$, e de se terem considerado desprezíveis as perdas de carga nas intercepções das fissuras.

Quando ocorrem várias famílias, bem diferenciadas, de fissuras as características de cada família podem ser diferentes, em especial o desenvolvimento das fissuras no seu plano, isto é, a continuidade, e a rugosidade. É então aconselhável a introdução de um factor de correcção por cada família bem diferenciada.

Tratemos em primeiro lugar o caso mais simples de ser considerada legítima a introdução de um só factor de correcção, ρ , no coeficiente K_{fi} atribuído às fissuras abertas ou com enchimento. Portanto os coeficientes K_i , dados pelas expressões (14), passam a ser dados por

$$K_i = \rho \frac{K_{fi} e_i}{L \cos \Theta_i}$$

concluindo-se de (13) e (17) que resultam também multiplicadas por ρ as componentes do tensor $\|K\|$ assim como as permeabilidades principais, que passam a $\rho K_I, \rho K_{II}, \rho K_{III}$, não sofrendo modificação as direcções principais.

Suponhamos que num furo de sondagem com uma direcção qualquer definida pelos co-senos directores $\cos \alpha', \cos \beta', \cos \gamma'$, Fig. 11b, se realiza um ensaio de pressão, do tipo habitual. Seja d o diâmetro do furo, L o comprimento da câmara ensaiada, e Q o caudal, isto é, o volume da água infiltrado na unidade de tempo, sob uma pressão H , expressa em altura de água. O factor de correcção ρ vai ser determinado de modo que o caudal Q iguale o que corresponde às permeabilidades principais $\rho K_I, \rho K_{II}, \rho K_{III}$, e à direcção do furo do ensaio.

Para relacionar Q com as permeabilidades principais vai-se recorrer à bem conhecida transformação afim do meio anisotrópico, suposto referido ao sistema de eixos $Ox' y' z'$, Fig. 12b,

$$\begin{aligned} \xi &= \sqrt{\frac{K}{K_I}} x' \\ \eta &= \sqrt{\frac{K}{K_{II}}} y' \\ \zeta &= \sqrt{\frac{K}{K_{III}}} z' \end{aligned} \quad (18)$$

com $K = \sqrt[3]{K_I K_{II} K_{III}}$. Como se sabe, esta transformação conduz a um meio isotrópico, com a permeabilidade K , no qual, uma vez aplicadas em pontos homólogos do seu contorno as mesmas condições aos limites do meio inicial, são iguais os caudais totais através de superfícies homólogas dos dois meios (Schneebeli, 1966).

Se esta transformação for aplicada ao ensaio de pressão, o comprimento da câmara de ensaio passa a ter um valor \bar{L} dado pela expressão

$$\bar{L} = L \sqrt[3]{K_I K_{II} K_{III}} \left(\frac{\cos^2 \alpha'}{K_I} + \frac{\cos^2 \beta'}{K_{II}} + \frac{\cos^2 \gamma'}{K_{III}} \right)$$

que se obtém considerando as expressões (18).

Ao ser aplicada a referida transformação, a secção transversal do furo passa a elíptica, e o plano da secção deixa de ser normal ao eixo do furo, a não ser que o furo de sondagem seja paralelo a um dos eixos principais de permeabilidade, por exemplo Oz' . Admitamos que esta hipótese se verifica, pelo menos aproximadamente, o que na prática não é em regra difícil de assegurar. Quanto ao escoamento por furo com secção elíptica, de eixos d_1 e d_2 , em meio isotrópico, ensaios electroanalógicos que realizámos, segundo a técnica desenvolvida por Franciss, 1970, mostraram que o caudal não sofre alteração apreciável quando se substitui a secção elíptica por uma secção circular de diâmetro

$$\bar{d} = \sqrt{d_1 d_2}$$

Assim, quando $\frac{d_1}{d_2}$ atinge o valor 10^3 , o erro cometido é somente de 17%. Portanto, atendendo às expressões (18), a secção elíptica do meio transformado pode ser substituída por secção circular de diâmetro

$$\bar{d} = \sqrt[3]{\frac{K_I K_{II} K_{III}}{K_I K_{II}}} \cdot d$$

A transformação considerada permite afirmar que se no meio transformado, que é isotrópico com o coeficiente de permeabilidade

$$K = \rho \sqrt[3]{K_I K_{II} K_{III}}$$

for aplicada a pressão H o caudal deve manter-se igual a Q . Atendendo a que o coeficiente de permeabilidade de um meio suposto contínuo e isotrópico pode ser calculado a partir da expressão (Bogomolov *et al.*, 1959)

$$K = \frac{Q}{2 \pi H \bar{L}} \log_n 1,32 \frac{\bar{L}}{\bar{d}} \quad (19)$$

vem

$$\rho = \frac{1}{\sqrt[3]{K_I K_{II} K_{III}}} \frac{Q}{2 \pi H \bar{L}} \log_n 1,32 \frac{\bar{L}}{\bar{d}} \quad (20)$$

Assim se pode pois calcular o factor de correcção ρ a partir de um ensaio de pressão, o qual deve ser conduzido no mesmo trecho de comprimento L do furo em que foi extraída a amostra integral que serviu para a determinação das componentes do tensor permeabilidade.

Considere-se agora o caso de as fissuras do maciço se repartirem por dois grupos no respeitante ao factor de correcção a introduzir no valor do coeficiente K_{fi} . Portanto haverá coeficientes K_i com as expressões

$$\rho_1 \frac{K_{fi} e_i}{L \cos \Theta_i} \quad \text{e} \quad \rho_2 \frac{K_{fi} e_i}{L \cos \Theta_i}$$

designando por ρ_1 e ρ_2 os dois factores de correcção. O caso que se está considerando é comum, por exemplo em maciços sedimentares com uma família de fissuras paralelas à estratificação com características diferentes das restantes fissuras.

Pretende-se determinar os valores de ρ_1 e ρ_2 a partir de ensaios de pressão em dois furos com direcções diferentes. Se se dispusesse das expressões de K_I , K_{II} e K_{III} em função dos factores ρ_1 e ρ_2 , era possível a determinação do valor destes a partir da aplicação directa de (19) aos resultados dos ensaios nos dois furos. Como essas expressões são demasiado complexas, é preferível: i) arbitrar sucessivos pares de valores ρ_1 , ρ_2 e para cada par determinar o tensor permeabilidade $\|K\|$; ii) calcular os coeficientes de permeabilidade principais K_I , K_{II} , K_{III} , e suas direcções; e iii) seguindo a via anteriormente indicada, calcular a partir de (20) os factores ρ_1^* e ρ_2^* correspondentes a cada um dos dois ensaios. Os valores procurados de ρ_1 e ρ_2 são aqueles para os quais $\rho_1^* = \rho_2^* = 1$. Conhecidos ρ_1 e ρ_2 , determinam-se as direcções principais e os coeficientes de permeabilidade principais. Como os ensaios de permeabilidade são conduzidos nos mesmos furos onde é feita a amostragem integral, melhorar-se-á a precisão de ρ_1 e ρ_2 se o tensor permeabilidade, referido a um dado sistema de eixos, for calculado considerando as contribuições das fissuras das duas amostras integrais extraídas dos dois trechos submetidos aos dois ensaios de permeabilidade.

O caminho que acaba de ser indicado pode ser generalizado a mais de dois factores de correcção, mas aumenta substancialmente o volume de trabalho de cálculo. A consideração de dois factores será suficiente na maior parte dos casos.

Para um maciço, após a realização de certo número de ensaios de pressão que conduzam a valores dos factores de correcção considerados representativos, pode dispensar-se a realização de tais ensaios passando a permeabilidade a ser determinada somente a partir das características das fissuras.

5.2 – As componentes do tensor permeabilidade assim como as suas direcções principais estão referidas ao sistema de eixos Oxyz, Fig. 11a, vinculando à direcção do furo de sondagem. Para apresentação final dos resultados é conveniente usar o sistema ligado aos pontos cardeais indicado na Fig. 11c, no qual um dos eixos é vertical, OZ, e os outros são dirigidos para norte, ON, e para leste, OE. Como o eixo Ox existe no plano vertical que passa pelo eixo do furo de sondagem, a posição do novo sistema de eixos em relação ao sistema da Fig. 11a pode definir-se a partir do ângulo φ entre o eixo do furo e a vertical, e do ângulo ψ entre a direcção norte, ON, e a linha horizontal OP contida no plano vertical que passa pelo eixo do furo de sondagem. Se forem $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ as componentes de \bar{J} no sistema ONEZ, vem

$$\begin{Bmatrix} i \\ j \\ k \end{Bmatrix} = \|A\| \begin{Bmatrix} \bar{i} \\ \bar{j} \\ \bar{k} \end{Bmatrix}$$

sendo

$$\|A\| = \begin{vmatrix} \cos\psi \cos\varphi & \sin\psi \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ -\cos\psi \sin\varphi & -\sin\psi \sin\varphi & \cos\varphi \end{vmatrix}$$

Portanto, atendendo a (11) o tensor permeabilidade do maciço referido ao sistema ONEZ tem a expressão

$$\|\bar{K}\| = \|K\| \|A\|$$

sendo $\|K\|$ o tensor referido ao sistema Oxyz.

Também convém referir ao sistema ONEZ as direcções principais de permeabilidade.

6 – DETERMINAÇÃO DO TENSOR PERMEABILIDADE A PARTIR DE AMOSTRAS INTEGRAIS

Uma vez que se disponha de amostras integrais dum maciço rochoso e se admita que as fissuras são planas, contínuas, de abertura constante e enchimento

uniforme, quando exista, é possível determinar o tensor permeabilidade $\|K\|$ do maciço rochoso a partir da soma da contribuição $\|K_i\|$ de cada fissura, de acordo com as expressões (13) e (14).

Para isso, é necessário, para cada fissura, determinar o valor do coeficiente K_{fi} , abertura e_i , e ângulos λ_i e Θ_i , definidores da orientação da fissura, Fig. 11a.

Quanto a K_{fi} , no caso de fissuras abertas será calculado pela expressão (2), na qual se poderá tomar $C = 3 \times 10^5 \text{ (ms)}^{-1}$ quando não se disponha de evidência que justifique outro valor. No caso de fissuras preenchidas, cuja contribuição tenha interesse considerar (art. 4.2 e Fig. 9), haverá que atribuir valor ao coeficiente de permeabilidade do material de enchimento.

A determinação da abertura e deve ser feita com especial cuidado quando as aberturas são pequenas, digamos da ordem dos décimos de milímetro, sobretudo no caso de fissuras abertas para as quais o coeficiente K_i varia com o cubo de e_i . A abertura e_i tem sido determinada com ocular micrométrica ou por confronto com traços com espessuras variáveis, desde 0,05 mm, dispostos numa régua.

A fim de verificar a justeza do valor de K_{fi} , quer haja ou não preenchimento, podem ser realizados ensaios de permeabilidade das próprias fissuras, mantidas nas amostras integrais. Tais ensaios terão especial interesse para a definição da técnica adequada à medição de e , no caso de fissuras abertas, e para avaliação do coeficiente de permeabilidade dos enchimentos.

A determinação de λ_i e Θ_i tem sido feita por duas vias. Uma consiste em calcular λ_i e Θ_i a partir das cotas z_1, z_2, \dots, z_6 das intercepções da fissura com as seis geratrizes igualmente espaçadas, G_1 a G_6 , traçadas sobre a superfície da amostra integral, Fig. 13; é feita regressão linear, para determinação do plano mais provável. A abertura da fissura é medida na intercepção com as referidas geratrizes, o que permite calcular um valor médio. Outra via consiste na determinação experimental de λ_i e Θ_i por meio de dispositivo constituído por um anel, que se ajusta à superfície da amostra, e por uma régua perpendicular ao plano do anel, Fig. 14. O ângulo Θ_i é dado por $\text{tg } \Theta_i = \frac{a_i}{d}$, onde d é o diâmetro da amostra e a_i é medido com a régua, e o ângulo λ_i é lido directamente no anel, em relação à geratriz de referência G_1 traçada sobre a amostra integral.

Concretizando, o roteiro a seguir na determinação do tensor permeabilidade é o seguinte:

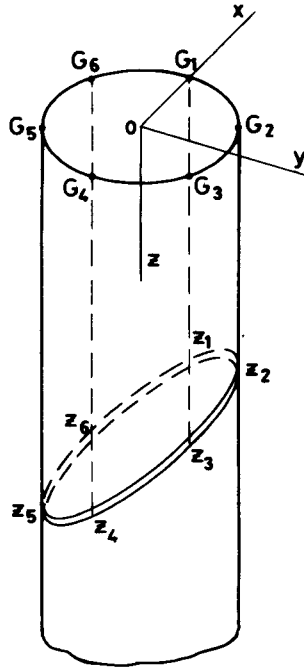


Fig. 13 – Determinação da atitude das fissuras, a partir da medição de z_1, z_2, \dots, z_6

- Traçar na amostra as geratrizes de referência G_1 a G_6 , Fig. 13, ou G_1 , Fig. 14, sendo a posição de G_1 determinada pelo eixo Ox (Fig. 11a);
- Determinar os ângulos λ_i e Θ_i , para cada fissura (Fig. 13 e 14);
- Determinar a abertura e_i de cada fissura;
- Calcular o coeficiente K_{fi} das fissuras abertas e atribuir um valor de K_{fi} às fissuras preenchidas;
- Calcular as componentes do tensor $\|K_i\|$ relativo a cada fissura;
- Adicionar os tensores correspondentes às diversas fissuras da amostra, obtendo-se o tensor permeabilidade $\|K\|$, referido ao sistema $Oxyz$;
- Determinar as direcções principais de permeabilidade, Ox' , oy' , Oz' , e os coeficientes de permeabilidade principais, K_I, K_{II}, K_{III} , (art. 4.7);
- Calcular os factores de correcção ρ (art. 5.1);
- Determinar as componentes do tensor permeabilidade bem como as suas direcções principais no sistema $ONEZ$ (art. 5.2).

Foram desenvolvidos programas de cálculo automático para os cálculos envolvidos neste roteiro.

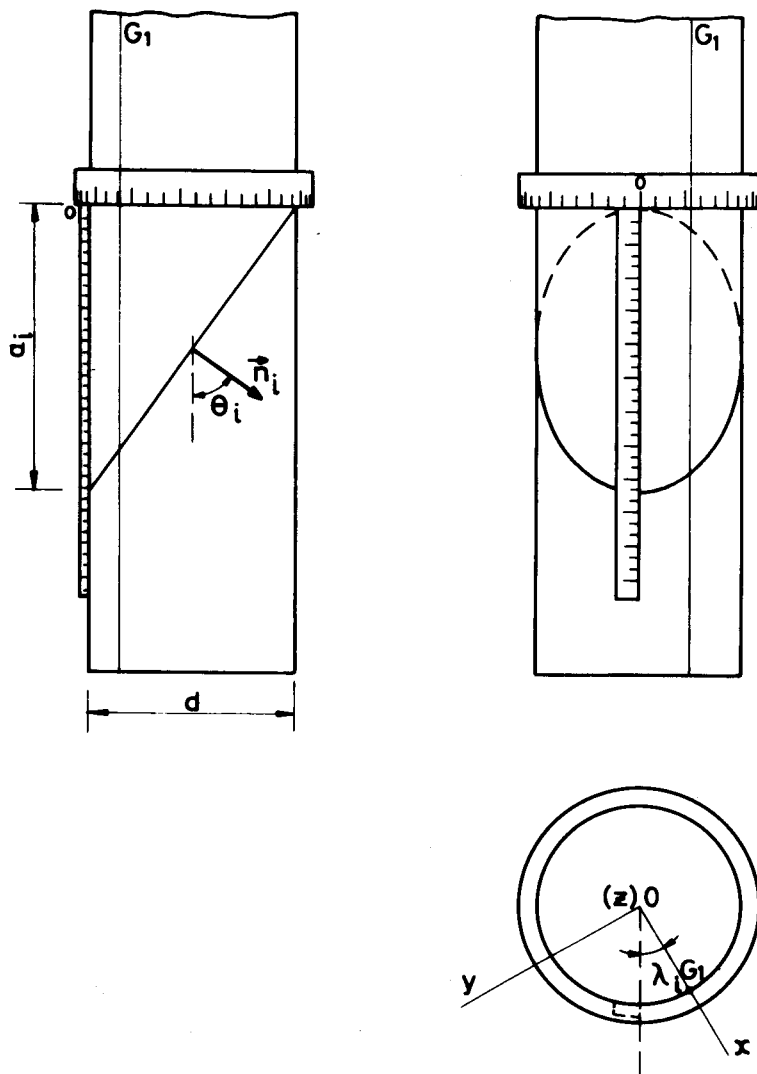


Fig. 14 – Determinação da atitude das fissuras, a partir da medição de a_i e λ_i

7 - APLICAÇÕES

Na Fig. 15 apresentam-se resultados obtidos na determinação do tensor permeabilidade dum basalto vesicular, a partir das fissuras observadas numa amostra integral com o comprimento $L = 2$ m, extraída dum furo com o diâmetro de 86 mm. Estão indicadas as atitudes das fissuras e as suas aberturas – repar-tidas pelos intervalos indicados, com indicação da ocorrência ou não de enchi-mento – bem como as direcções principais de permeabilidade e as respectivas permeabilidades principais. Os valores destas permeabilidades foram obtidos introduzindo um factor de correcção $\rho = 0,8$, determinado a partir de ensaio de permeabilidade do trecho do furo donde foi extraída a amostra integral. Verifi-ca-se pois a existência duma direcção principal subvertical, à qual corresponde o valor mínimo da permeabilidade, $K_{III} = 0,18 \times 10^{-6}$ m/s, sendo quase isotrópa

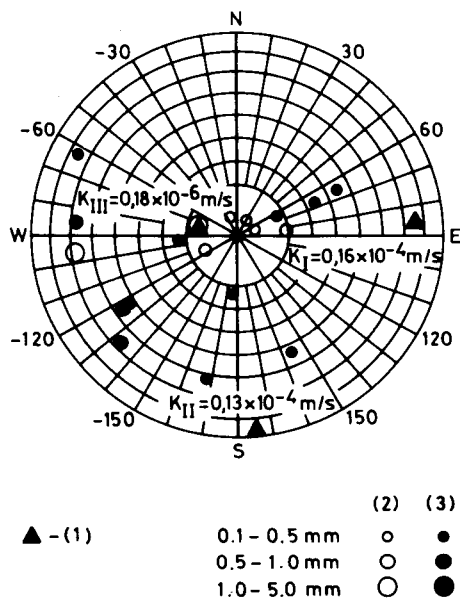


Fig. 15 – Tensor permeabilidade dum basalto vesicular
(1) Direcções principais
(2) Fissuras sem enchimento
(3) Fissuras com enchimento

a permeabilidade no plano sub-horizontal perpendicular àquela direcção, com os valores $K_I = 0,16 \times 10^{-4}$ m/s e $K_{II} = 0,13 \times 10^{-4}$ m/s. O coeficiente de anisotropia $\frac{K_I}{K_{II}}$ tem pois o elevado valor de cerca de 100.

Apresentaremos a seguir resultados obtidos num vasto programa de caracterização da permeabilidade de uma formação basáltica de fundação duma barragem de betão. Foram extraídos cerca de 400 m de amostras integrais, de furos com o diâmetro de 76 mm, sendo o comprimento das amostras $L = 3$ m, em regra. Para a determinação do coeficiente de correcção ρ foram executados 128 ensaios de permeabilidade. A formação basáltica era constituída por camadas de basalto compacto, de basalto vesículo-amigdaloidal e de brecha basáltica. A observação das feições das amostras aconselhou a repartição das amostras por grupos com características afins, dentro de cada um dos três tipos litológicos, o que foi feito seguindo técnica matemática preconizada por um dos autores (Franciss e Puccini, 1974). A fim de obter uma ideia sobre a dispersão da permeabilidade, foram calculadas as direcções e grandezas das permeabilidades principais para cada amostra e depois, dentro de cada grupo, foram calculados os valores médios de K_I , K_{II} , K_{III} e respectivos desvios padrões, admitindo uma distribuição lognormal para as grandezas das permeabilidades principais. No Quadro I estão apresentados os valores das permeabilidades principais assim como dos coeficientes de anisotropia. A título de exemplo, apresentam-se na Fig. 16 os ângulos sólidos correspondentes à dispersão das direcções principais de permeabilidade, para um dos grupos de cada tipo litológico.

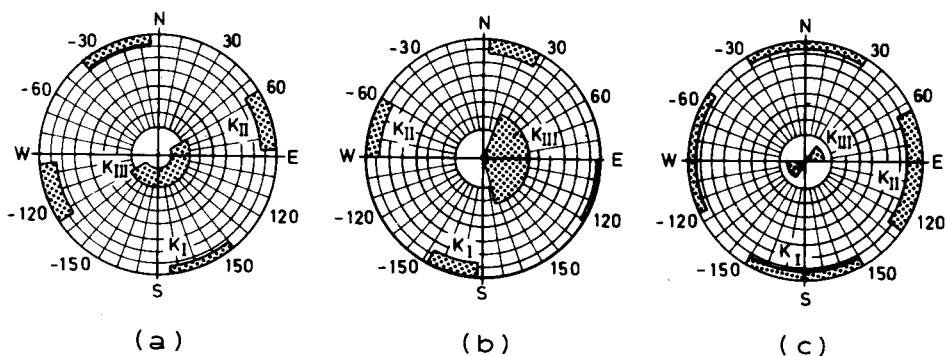


Fig. 16 – Dispersão das direcções principais de permeabilidade
 (a) Basalto compacto, grupo 1
 (b) Basalto vesículo-amigdaloidal, grupo 2
 (c) Brecha basáltica, grupo 3

QUADRO I

BASALTO COMPACTO			BASALTO VESÍCULO- -AMIGDALOIDAL			BRECHA BASÁLTICA		
Grupo	K _I , K _{II} , K _{III} (m/s)	$\frac{K_I}{K_{III}}$	Grupo	K _I , K _{II} , K _{III} (m/s)	$\frac{K_I}{K_{III}}$	Grupo	K _I , K _{II} , K _{III} (m/s)	$\frac{K_I}{K_{III}}$
1	$0,295 \times 10^{-4}$	16	1	$0,389 \times 10^{-5}$	6	1	$0,331 \times 10^{-5}$	12
	$0,281 \times 10^{-4}$			$0,331 \times 10^{-5}$			$0,316 \times 10^{-5}$	
	$0,181 \times 10^{-5}$			$0,603 \times 10^{-6}$			$0,269 \times 10^{-6}$	
2	$0,851 \times 10^{-6}$	7	2	$0,660 \times 10^{-5}$	55	2	$0,100 \times 10^{-5}$	19
	$0,776 \times 10^{-6}$			$0,562 \times 10^{-5}$			$0,525 \times 10^{-6}$	
	$0,128 \times 10^{-6}$			$0,120 \times 10^{-6}$			$0,525 \times 10^{-7}$	
3	$0,478 \times 10^{-6}$	6	3	$0,169 \times 10^{-5}$	1050	3	$0,213 \times 10^{-6}$	18
	$0,426 \times 10^{-6}$			$0,169 \times 10^{-5}$			$0,204 \times 10^{-6}$	
	$0,741 \times 10^{-7}$			$0,158 \times 10^{-8}$			$0,120 \times 10^{-7}$	
4	$0,316 \times 10^{-6}$	27	4	$0,478 \times 10^{-6}$	25	4	praticamente impermeável	—
	$0,301 \times 10^{-6}$			$0,457 \times 10^{-6}$				
	$0,119 \times 10^{-7}$			$0,197 \times 10^{-7}$				
5	$0,630 \times 10^{-5}$	6700	5	praticamente impermeável	—			
	$0,616 \times 10^{-5}$							
	$0,933 \times 10^{-9}$							
6	praticamente impermeável	—						

Os resultados obtidos estão perfeitamente de acordo, com as atitudes da fracturação do maciço basáltico em consideração. Assim, verifica-se a ocorrência sistemática da permeabilidade principal mínima, K_{III} , com direcção subvertical, e uma permeabilidade horizontal, em geral aproximadamente isotrópica e de grandeza, em média, bastante mais elevada do que K_{III} . O coeficiente de anisotropia $\frac{K_I}{K_{III}}$ encontra-se em regra no intervalo 5 a 50, tendo-se contudo obtido dois valores superiores a 1000. Não é de estranhar, dada a quase isotropia no plano horizontal que as direcções de K_I e K_{II} apresentem dispersões importantes, Fig. 16; observou-se contudo tendência para K_I ter direcção vizinha da NS.

Quanto ao coeficiente de correcção ρ foram obtidos valores desde cerca de 0,01 a cerca de 50, supondo-se que os valores superiores à unidade resultam de ter sido adoptada nos cálculos uma rugosidade elevada e de as aberturas e das fissuras terem sido medidas por defeito.

Verifica-se que dentro de cada tipo litológico a permeabilidade varia muito de grupo para grupo, enquanto dentro de cada grupo a dispersão não é elevada, o que evidencia a possibilidade de um adequado equipamento prévio de amostras antes de se proceder ao cálculo do tensor permeabilidade.

8 – CONCLUSÃO

O problema da percolação através dos maciços rochosos só nos últimos quinze anos foi objecto de investigação sistemática, cujos resultados começam a ter efectiva influência no projecto. Por um lado, observações de campo permitiram concluir de maneira firme que os fenómenos do escoamento se processam em regra de maneira contínua – o que evidencia a interligação da fissuração dos maciços rochosos – e, por outro lado, há a acentuar a contribuição das investigações de laboratório sobre a percolação em fissuras e as largas possibilidades de tratamento numérico dos problemas concretos pelo método dos elementos finitos.

Uma das dificuldades com que se tem lutado é a da indispensável caracterização da permeabilidade como grandeza anisotrópica. Na verdade, a caracterização experimental mediante ensaios *in situ* exige a realização de vários ensaios por cada ponto a caracterizar (art. 1), o que tem constituído grande obstáculo ao tratamento adequado dos problemas da percolação. Acresce a bem conhecida

dificuldade de interpretação de resultados de ensaios de pressão em pontos acima do nível freático.

Por isso, têm vários autores considerado o interesse em ser determinada a permeabilidade a partir da caracterização da fissuração do maciço rochoso, mas até hoje não se tem disposto de técnica adequada a essa caracterização. O presente trabalho apoia-se numa caracterização inferida da observação de amostras integrais, admitindo a hipótese, muito simplificadora, de a cada fissura interceptada por uma amostra corresponder uma fissura contínua, plana e com características uniformes. O grau de legitimidade deste modelo variará de caso para caso, havendo certamente casos em que não será aceitável. Impõe-se pois prosseguir a tarefa de confronto entre os valores da permeabilidade calculados e medidos, através da determinação dos factores de correcção ρ (art. 5.1), a fim de acumular resultados que permitam ampla apreciação desse modelo e a detecção dos tipos de fissuração que imponham a adopção de modelos mais refinados, os quais se considera possível estabelecer a partir de amostras integrais.

No referido confronto é necessário ter em atenção que os resultados dos ensaios de pressão *in situ* apresentam, com bastante frequência, erros muito elevados, devidos a deficiências não só da montagem usada nos ensaios mas também na condução destes. Tais erros podem ser evidenciados pelo próprio confronto com os valores calculados.

Os resultados obtidos até agora na determinação do tensor permeabilidade de maciços rochosos são muito encorajadores, quer no respeitante à determinação das direcções principais, quer das grandezas das permeabilidades principais. Estas grandezas apresentam em regra elevada dispersão de ponto para ponto ensaiado, levantando-se pois a dificuldade – bem conhecida quando se considera a permeabilidade isotropa – de caracterização da permeabilidade do maciço rochoso a partir de valores locais com grande dispersão. Trata-se de problema que merece ser objecto de estudo aprofundado, dado que a solução de problemas concretos de percolação depende do seu esclarecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOGOMOLOV, G. V.; SILIN-BEKTCHOURINE, A. I. – *Hydrologie Spécialisée*, “Annales du Service d'Information Géologique” n.º 37, Paris 1959.
- FRANCISS, F. O. – *Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés*, Thèse Doctorat, Faculté des Sciences, Université de Grenoble, 1970.

- FRANCISS, F. O., PUCCINI, A. L. – *Técnica de identificação de grupamentos modais e sua aplicação na mecânica das rochas*, Rio de Janeiro, 1974.
- LOUIS, C. – *A Study of Ground Water Flow in Jointed Rock and its Influence on the Stability of Rock Masses*, Imperial College, Rock Mechanics Report No. 10, Sept. 1969.
- LOUIS, C. – *Rock Hydraulics*, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 1974.
- ROCHA, M. – *A Method of Integral Sampling of Rock Masses*, "Rock Mechanics", vol. 3/1, 1971.
- ROCHA, M. and BARROSO, M. – *Some Applications of the New Integral Sampling Method in Rock Masses*, Rock Fracture Symp., Int. Soc. for Rock Mech., Nancy, 1971.
- SCHNEEBELI, G. – *Hydraulique Souterraine*, Eyrolles, 1966.
- SNOWD. T. – *Three-Hole Pressure Test for Anisotropic Foundations Permeability*, "Rock Mech. and Engg. Geology", vol. IV/4, 1966.