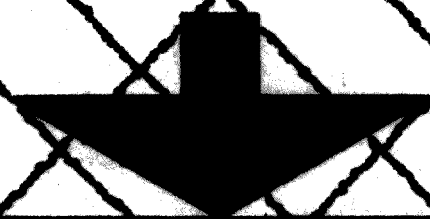


**NO DOMÍNIO DA HIDRÁULICA**



**DAS ROCHAS**

**J. M. FERREIRA LEMOS**

Engenheiro Civil (U.P.)

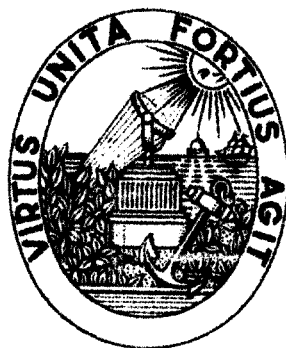
Assistente do Quadro da F.E.U.P.

**NO DOMÍNIO  
DA  
HIDRÁULICA DAS ROCHAS**

---

DISSERTAÇÃO PARA DOUTORAMENTO EM MECÂNICA DOS FLUIDOS  
NA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

---



626 (043)EM/1130

BIblioteca  
49771

21, 03, 2000

**Porto, 1976**

# CAPÍTULO 6

## O POTENCIAL HIDRÁULICO

### 6.1. DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL HIDRÁULICO NUM DOMÍNIO PERCOLANTE

A distribuição do potencial hidráulico em determinado domínio rochoso fissurado constitui a finalidade primeira de qualquer estudo de Hidráulica das Rochas.

Recorde-se que o potencial hidráulico é uma função escalar definida em cada um dos pontos pertencentes ao domínio do problema em análise.

Esse escalar é definido pela igualdade

$$\phi(x_1, x_2, x_3) = z(x_1, x_2, x_3) + \frac{p(x_1, x_2, x_3)}{\gamma}$$

Recorde-se o que foi referido quando da apresentação desta grandeza no quarto capítulo (ponto 4.2.3.).

O fâcies do escoamento (expressão tão largamente empregada no decorrer da presente Dissertação) constitui a distribuição espacial (no domínio da análise em questão) do potencial hidráulico.

O estudo da distribuição do potencial pode ser encarada a duas ou a três dimensões.

O problema bidimensional (problema-plano) ocorre em grande número de casos concretos, pelo que o seu estudo será pormenorizadamente apresentado no presente capítulo. Ilustrar-se-á esta forma de determinação do fâcies do escoamento por meio de problemas práticos.

Quanto ao problema tridimensional, mostrar-se-á o modo de o resol-

ver correctamente. Acentue-se desde já, a grande dificuldade inerente a este tipo de definição da distribuição espacial do potencial hidráulico.

Sistematiza-se assim, a determinação da mais importante grandeza no âmbito da Hidráulica dos Maciços Rochosos Fissurados.

Realmente, uma vez na posse dos diversos valores do potencial hidráulico nos vários pontos da região a estudar, facilmente se quantificam as restantes grandezas intervenientes no escoamento.

## 6.2. ESTUDO A DUAS DIMENSÕES

### 6.2.1. Generalidades

Grande número de problemas práticos podem ser estudados a duas dimensões.

Realmente, se as fissuras rochosas se intersectarem segundo rectas horizontais e se o modelo percolante for o mesmo em todos os planos verticais perpendiculares às fissuras, a distribuição do potencial hidráulico no meio pode ser analisada bidimensionalmente.

Casos de taludes rochosos fissurados, zonas envolventes de galerias, maciços de fundação de barragens, são, em grande número de casos, susceptíveis de um tratamento de índole da que se está a referir.

As condições iniciais necessárias a um perfeito desenvolvimento do processo de cálculo são as seguintes:

- Conhecimento dos elementos hidrogeológicos respeitantes aos sistemas de fissuração (\*).
- Conhecimento da distribuição do potencial hidráulico ao longo de duas linhas fronteiras do domínio considerado.

Existem duas formas de realizar um estudo plano

PROCESSO ANALÍTICO

PROCESSO GRÁFICO

O primeiro método é muito mais geral que o processo gráfico, dadas as restrições referentes à posição relativa dos dois sistemas de fissuração, inerentes a este último.

---

(\*) Ainda neste capítulo mostrar-se-á a necessidade do conhecimento, de uma forma global, das características percolantes de cada família de fissuras, através da determinação da permeabilidade direccionada correspondente.



## 6.2.2. Processo Analítico

### 6.2.2.1. Bases teóricas

Como esta forma de definição do potencial hidráulico é caracterizada por uma enorme generalidade na sua aplicação, desenvolver-se-á de uma forma bastante completa a sua apresentação.

Como se irá constatar, permite ainda este método a utilização do cálculo automático, o que facilita enormemente a tarefa da determinação dos valores do potencial hidráulico.

Não há restrições quanto às características dos sistemas de fissuração, isto é, aplica-se este processo a vários sistemas de fissuras quaisquer que sejam as suas características geométricas.

As condições fronteira, ao longo das quais se conhece a distribuição do potencial hidráulico, podem também ser variáveis.

Evidentemente que as características inerentes à essência do problema plano deverão manter-se.

Na figura 60 estão esquematizadas as condições que permitem iniciar este processo de determinação da distribuição do potencial  $\phi$ .

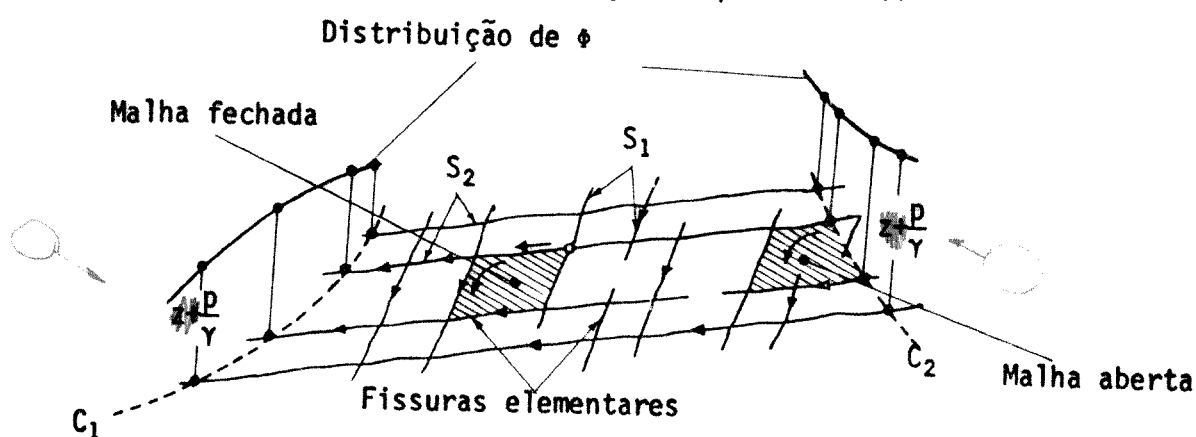


Fig. 60 - Processo Analítico de determinação da distribuição bidimensional de  $\phi$ .

O domínio da presente análise é constituído pela região do maciço rochoso fissurado situada entre as duas linhas limite, que será estudada por unidade de comprimento (paralelamente ao plano das fissuras).

Os dois sistemas de fissuração ( $S_1$  e  $S_2$ ) definem uma malha quadrilátera de fissuras elementares.

Chamam-se fissuras elementares aos troços de fissura compreendidos

entre dois "nós" consecutivos.

Os "nós" correspondem aos pontos de cruzamento de mais de duas fissuras elementares.

Feita a apresentação do problema, passa-se a descrever o encadeamento do processo operatório.

A base teórica empregada é em tudo análoga à utilizada no cálculo de redes de distribuição em movimento uniforme.

- Assim, em primeiro lugar numeram-se todas as fissuras elementares.
- Fixa-se depois um sentido de circulação convencionalmente considerado como positivo.
- Define-se, com o auxílio das condições fronteira, o valor do potencial hidráulico em determinado número de nós.
- Estabelece-se determinado número de equações.

Este número de equações iguala o número de incógnitas, que são constituídas pelos valores dos gradientes hidráulicos activos nas diversas fissuras elementares.

As equações a considerar são de índole diversa:

- equações dos nós
- equações referentes às malhas
- equações de ligação das condições fronteira.

- As equações dos nós são relações de continuidade resultantes da aplicação do princípio da conservação da massa a essas secções singulares do escoamento.

Os caudais não entram explicitamente, mas sim como funções dos valores dos respectivos gradientes do potencial hidráulico activos nas fissuras (recordem-se os pontos 4.5.I. e 4.5.II.).

Serão considerados positivos os caudais que se dirigirem para o nó, e negativos no caso contrário.

As equações dos nós são então as somas algébricas dos caudais que concorrem em determinado nó.

Apresentam a forma

$$\sum_{i=1}^n q_i = 0 \quad \text{ou seja} \quad \sum_{i=1}^n k_i j_i^\alpha = 0$$

Nestas expressões o significado dos símbolos é o seguinte:

- $q_i$  - caudal escoado por unidade de comprimento e afluente ou efluente do nó, através duma fissura elementar
- $k_i$  - condutibilidade hidráulica da fissura elementar
- $j_i$  - gradiente do potencial hidráulico activo na fissura elementar
- $\alpha$  - expoente numérico
- $i$  - índice referente à fissura elementar
- $n$  - número de fissuras elementares concorrentes no nó.

Se ao todo houver  $N$  nós, as equações dos nós são em igual número.

- As equações das malhas são análogas às utilizadas em qualquer problema de movimento uniforme em tubos.

Podem considerar-se dois tipos de malhas: as malhas fechadas e as malhas abertas.

As primeiras são formadas por contornos fechados de fissuras elementares.

Quando esses contornos são intersectados por qualquer condição frontal, há lugar à consideração duma malha aberta.

As malhas fechadas situam-se no coração do domínio rochoso fissurado, conquanto que as malhas abertas definem-se nas zonas adjacentes às condições limites.

As equações das malhas dizem respeito à soma algébrica das perdas de carga que se verificam nas diversas fissuras elementares constituintes de uma dada malha.

No caso de se tratar de malhas fechadas a forma das relações correspondentes é a seguinte:

$$\sum_{i=1}^m j_i l_i = 0$$

sendo

$j_i$  - gradiente do potencial hidráulico activo numa fissura elementar pertencente à malha em estudo

$l_i$  - comprimento dessa fissura elementar

$i$  - índice referente à fissura elementar

$m$  - número de fissuras constituintes da malha.

Se a malha considerada for aberta, a equação correspondente é do tipo que se segue

$$\sum_{i=1}^m j_i l_i = \Delta \phi = \phi_A - \phi_B$$

Para melhor se compreender esta relação deverá atentar-se nas figuras 60 e 61.

Nelas está evidenciada uma malha aberta. Realmente dois dos lados da malha são intersectados por uma das condições fronteira *do mesmo* (no caso a linha C).

Assim, o somatório algébrico das perdas de carga nas fissuras elementares deixa de ser zero, como acontecia no caso anterior, para igualar a diferença entre os potenciais hidráulicos instalados nos pontos de intersecção da malha com a condição limite.

Se puderem ser consideradas  $M_f$  malhas fechadas e  $M_a$  malhas abertas, consegue estabelecer-se um conjunto de relações nas malhas em número total de  $M_f + M_a$ .

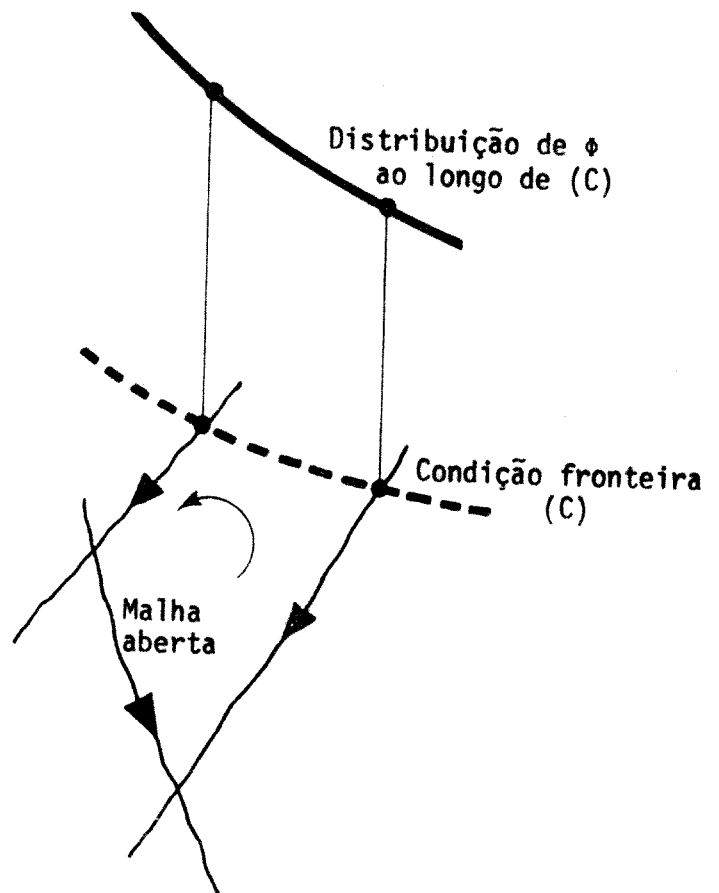


Fig. 61 - Esquema de uma malha aberta.

- As equações de ligação das condições fronteira correspondem a relações de compatibilidade entre os valores do potencial hidráulico nelas referentes.

A sua forma é

$$\sum_{i=1}^{\ell} j_i \ell_i = \phi_0 - \phi_L$$

O significado dos símbolos é o seguinte

- $j_i$  - gradiente do potencial hidráulico activo na fissura elementar situada no caminho de percolação entre as condições fronteira a relacionar
- $\ell_i$  - comprimento dessa fissura elementar
- $\phi_0$  - valor do potencial hidráulico na condição fronteira inicial
- $\phi_L$  - valor do potencial hidráulico na condição fronteira final
- $i$  - Índice referente à fissura elementar
- $\ell$  - número de fissuras elementares constituintes do caminho de percolação entre as condições fronteira a relacionar.

Seja  $F$  o número de relações de ligação entre as condições fronteira. No caso do modelo percolante representado na figura 60, como somente se consideram duas condições limite do escoamento, apenas poderia ser estabelecida uma única equação de ligação.

O número total de equações é então igual a

$$N + M_f + M_a + F$$

As incógnitas, constituídas pelos diversos valores do gradiente hidráulico activo nas diversas fissuras elementares, aparecem em igual número.

Como é fácil imaginar, dadas as características geométricas dos maciços rochosos fissurados, o número de relações é elevado.

A resolução de um tal sistema de equações é apenas possível utilizando o cálculo automático.

Nos problemas planares resolvidos pelo autor no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P., recorreu-se novamente ao Centro de Cálculo Automático, onde foi elaborado o programa SELESCAL, que será apresentado mais adiante, quando da ilustração deste método com exemplos de aplicação.

O computador utilizado foi o NCR-ELLIOT 4 100 da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, por dispor de capacidade superior ao existente na F.E.U.P..

Embora hoje em dia não haja grandes problemas com a capacidade da memória, convém, ao estudar determinado problema, confinar a análise a uma zona restrita do maciço fissurado, envolvendo o domínio do problema em si.

Poder-se-á perguntar se não será por demais simplificada esta forma de funcionamento do escoamento no seio do maciço fissurado.

A hipótese do movimento ser considerado uniforme, acarreta a constância da energia cinética por unidade de peso ( $\frac{U_i^2}{2g}$ ) ao longo de uma fissura elementar de abertura constante.

Uma outra consequência daquela hipótese, é a igualdade entre o valor da perda de carga unitária e o valor do gradiente hidráulico activo na fissura elementar (veja-se o ponto <sup>4.3.2.1.A.</sup>4.3.2.1.A.).

Deste modo, as únicas perdas de carga que são desprezadas, são as perdas de carga do tipo acidental ocorrendo principalmente nos nós.

Evidentemente que existe todo um conjunto de perdas energéticas devidas à irregularidade da definição geométrica das paredes da fissura.

Quanto às perdas nos nós, motivadas por modificações importantes nas condições cinéticas, às mudanças na direcção do escoamento e às variações da grandeza da velocidade em si, poderão ser desprezadas, ou pelo menos não consideradas, dados os baixos valores que ocorrem para a velocidade de percolação.

Como já foi referido (atente-se no ponto 4.3.2.2.3.), as perdas de carga do tipo acidental são quantificadas por expressões da forma

$$\Delta H_a^- = C \frac{U_i^2}{2g}$$

sendo

C - constante da perda de carga localizada

$U_i$  - velocidade média numa fissura elementar qualquer.

Os valores da velocidade média  $U_i$  são muito baixos ( $U_i < 1 \text{ m.s}^{-1}$ ). O valor da constante  $C$  está incluído numa gama de valores em regra nunca superiores a 1,2 [43].

Assim, a perda de carga  $\Delta H_a^-$  poderá quando muito atingir 0,06 m. Este valor é muito baixo, podendo ser desprezável face à ordem de grandeza dos potenciais hidráulicos em jogo nos problemas concretos.

O resultado desta simplificação é a consideração de gradientes hidráulicos activos ligeiramente superiores aos reais.

Este facto acarreta erros e imprecisões que pesam muito menos desfavoravelmente numa exacta definição do facies do escoamento, do que o desconhecimento da geometria da fissuração.

Dentro das equações em jogo no problema da definição da distribuição do potencial hidráulico, as referentes aos nós são, como já se viu, da forma

$$\sum_{i=1}^n k_i j_i^\alpha$$

O valor do expoente  $\alpha$  depende não só das características das fissuras, como também do tipo de escoamento. Recordem-se as expressões do QUADRO 7 apresentado no ponto 4.5.II. do capítulo 4. O expoente somente vale a unidade no caso do movimento laminar em fissuras sem enchimento e na hipótese das fissuras com enchimento.

Surge então uma dúvida para um correcto equacionamento do problema em questão.

Qual o tipo de movimento que se verifica? Como o conhecer de antemão?

Sobre este assunto, grande número de autores entre eles LOUIS [43], advogam que, no caso de fissuras sem enchimento, se efectue uma primeira determinação do conjunto das incógnitas na hipótese do escoamento ser laminar.

Uma vez na posse do conjunto das soluções do sistema de equações, e, com base nas relações entre o caudal escoado e o valor do gradiente hidráulico activo, podem avaliar-se os caudais instalados (caudais por unidade de compri-

mento; análise de um troço unitário do domínio rochoso fissurado).

Por meio destes caudais é então simples, conhecendo-se a geometria da fissuração, detectar qual o tipo do escoamento, e, conseqüentemente, corrigir as expressões dos caudais escoados por unidade de comprimento.

Tratando-se de fissuras com enchimento, de acordo com o que foi referido no capítulo 3 dedicado a problemas de Hidráulica dos Solos, o movimento tem predominantemente características laminares.

Nesse caso a solução encontrada seria a definitiva.

Definitiva seria ainda a solução anterior, se, feita a detecção do tipo de movimento, fosse concluído que era laminar.

Se o escoamento tivesse características turbulentas, num segundo equacionamento do problema ter-se-ia de entrar em linha de conta com a ocorrência de fenômenos de turbulência.

As relações entre o caudal escoado e o valor do gradiente hidráulico activo na fissura seriam do tipo

$$q_f = k_f j_f^\alpha \quad (\text{com } \alpha < 1)$$

O sistema das  $N + M_F + M_a + F$  equações deixaria de ser constituído exclusivamente por relações lineares.

Poderia então seguir-se uma forma iterativa para a resolução do sistema, sendo a sua solução base constituída pelo conjunto de valores dos gradientes  $j_f$ , encontrados na fase anterior (hipótese do movimento laminar).

Com os valores finais dos gradientes consegue definir-se a distribuição do potencial  $\phi$  em toda a região do problema. Para isso, parte-se do conhecimento dos valores daquele escalar em alguns pontos do domínio, isto é, ao longo das condições fronteira espaciais. Recorde-se que a relação entre  $\phi$  e  $\vec{j}_f$  é a seguinte

$$\vec{j}_f = - \text{grad } \phi$$

Pela análise de resultados de casos concretos tratados em vários elementos bibliográficos, é opinião generalizada que os fenômenos de turbulên



cia hidráulica pouco afectam o fâcies do escoamento.

Sendo assim, e, dado o grau de incorrecção inerente ao levantamento hidrogeológico do domínio rochoso fissurado, acha-se como correcta a hipótese do escoamento ser considerado laminar [43].

O conjunto de soluções obtido por essa via não é completamente diferente do conseguido através da consideração da ocorrência de turbulência.

Sentindo bem a complexidade que caracteriza a correcta definição da geometria da fissuração, e, tomando como viável a hipótese da consideração do movimento uniforme, facilmente se aceita esta forma de proceder.

O facto de se considerar o maciço dividido por sistemas de fissuração, constituídos por fissuras geológicas planas e contínuas, não corresponde totalmente à realidade pois há sempre modificações geométricas localizadas ou gradualmente distribuídas no seu seio.

Pesando todas estas incorrecções, e, dado que da análise de qualquer caso prático se passa às tarefas de detalhamento executivo apoiando-se num certo coeficiente de segurança, decidiu-se considerar o escoamento como laminar, conforme foi citado.

Com o fim de dar uma melhor percepção da aplicação do PROCESSO ANALÍTICO, são apresentados no número seguinte alguns problemas concretos susceptíveis de serem resolvidos por esta via.

Antes porém, refira-se o facto de muitas das vezes aparecerem valores negativos para as soluções do sistema de equações.

Na grande maioria dos casos, estes resultados apenas significam que houve desacordo entre o sentido imaginado para o escoamento em determinada fissura, e o sentido do movimento na realidade.

No entanto, há situações das fissuras elementares, para as quais a ocorrência de valores negativos para o gradiente hidráulico activo, leva à conclusão da impossibilidade da efectivação do escoamento.

Tal é o caso, por exemplo, das fissuras que desembocam na zona de jusante do maciço de fundação de uma barragem e das que partem da zona exterior de um talude rochoso fissurado.

Este facto será convenientemente ilustrado na apresentação dos casos práticos que se seguem.

### 6.2.2.2. Estudo de casos práticos

Após uma primeira fase em que se tentou apreender o substrato teórico do fenômeno do escoamento nas fissuras, quer pela análise teórica, quer por exhaustiva pesquisa bibliográfica, quer ainda por trabalhos laboratoriais em fissuras simuladas, foram levados a cabo pelo autor no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P., determinados estudos visando a aplicação das leis do escoamento a problemas concretos [ 35 ] [ 37 ].

Entre os casos estudados apresentam-se neste número duas análises referentes a outras tantas situações construtivas que, pela sua importância, foram escolhidas para ilustrar na presente Dissertação o método analítico.

Trata-se de dois esquemas planares de percolação em maciços rochosos fissurados.

- Modelo percolante através do maciço de fundação de uma barragem em cúpula.
- Modelo percolante através de um talude rochoso fissurado.

Começar-se-á pela definição do primeiro modelo de escoamento, seguindo-se a análise da distribuição do potencial hidráulico no segundo caso.

A - Escoamento através do maciço rochoso fissurado constituente da zona de fundação de uma barragem em cúpula

#### I. Considerações prévias

Para ilustrar as considerações que se vão seguir escolheu-se a zona de fundação da barragem em cúpula esquematizada na figura 62 [ 37 ].

A cota da água na albufeira é de 137 m em relação à cota do nível de jusante (cota zero).

O maciço rochoso da fundação encontra-se dividido por dois sistemas de fissuras contínuas, planas e paralelas, de igual espessura, fazendo entre si um ângulo de  $90^{\circ}$ .

Desde já se supõem conhecidos os elementos hidrogeológicos referentes ao meio rochoso. Recorde-se o ponto 1.3.3..

Nesse reconhecimento geológico e geotécnico está incluída uma análise detalhada da estrutura rochosa, ficando-se pois em condições de saber o seguinte:

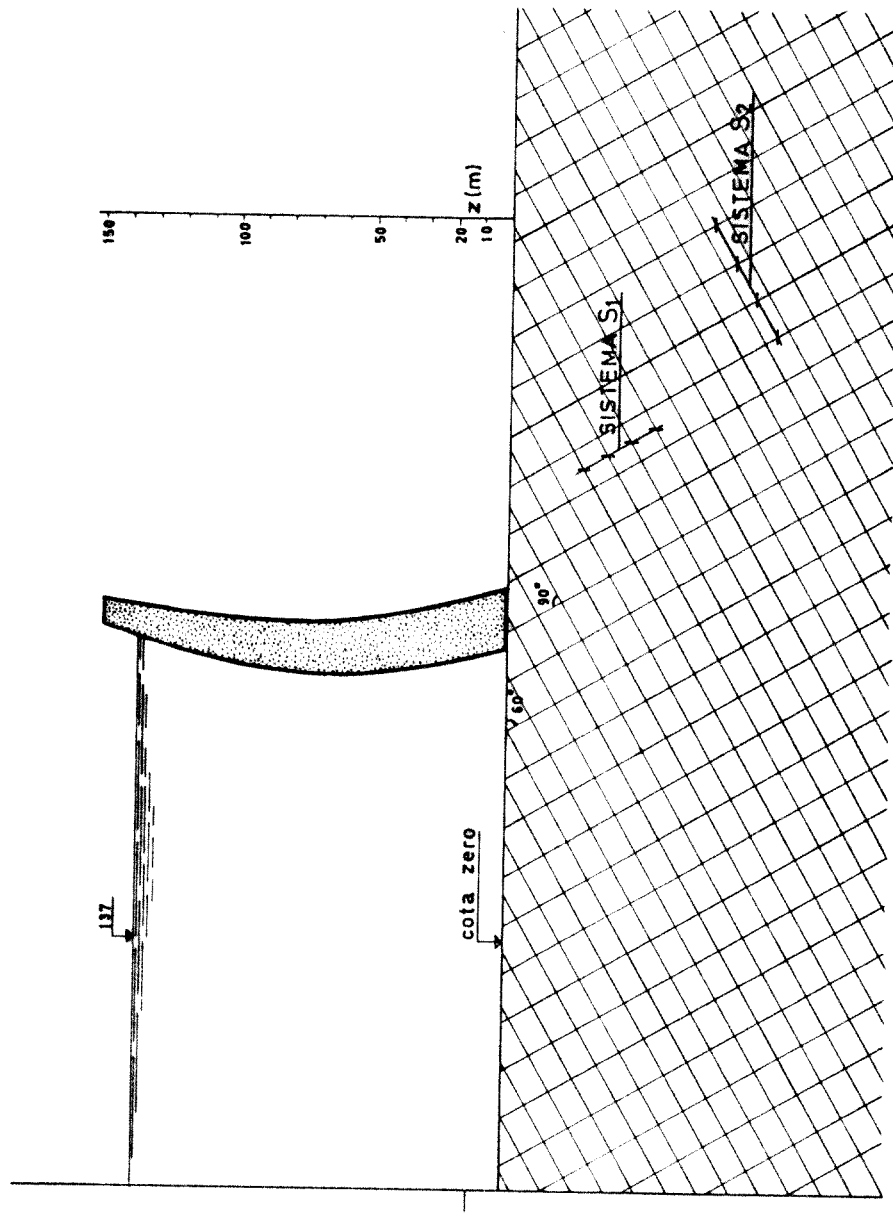


Fig. 62 - Maciço rochoso fissurado da zona de fundação de uma barragem em cupula.

- a) Se o meio poderá ser considerado "contínuo" ou "descontínuo".
- b) Qual a definição dos sistemas de fissuração, distintos entre si, em que o maciço rochoso se encontra dividido, isto é <sup>e continuidade</sup>
- a orientação e posição das fissuras
  - a distância mútua entre fissuras
  - a abertura das fissuras
  - o valor aproximado do grau de separação
  - as características das paredes das fissuras
  - o seu eventual enchimento por material poroso.
- c) As propriedades da matriz rochosa sob o ponto de vista da quantificação da sua permeabilidade e comparação com a do maciço rochoso fissurado em si.

É boa norma incluir no reconhecimento acima referido algumas medições "in situ" do potencial hidráulico, de modo a haver a possibilidade de contornar a eventual falta de condições no equacionamento do problema e a conseguir confirmar alguns resultados do cálculo.

## II. Problema proposto

A finalidade deste estudo consistiu em verificar qual seria uma boa concepção dum sistema drenante que juntamente com uma cortina de injeção (cut-off), tornasse possível, dentro dum certo critério, aliviar das pressões devidas ao escoamento a zona de jusante do maciço de fundação.

O valor da abertura ( $2a_f$ ) das fissuras que dividem o maciço rochoso é 0,002 m (2 mm).

A rugosidade relativa das paredes ( $\frac{e}{D_h}$ ) é igual a 0,05.

O grau de separação (s) será considerado 1.

## III. Critério de drenagem

O critério de drenagem da zona de fundação da barragem consistiu em a considerar suficientemente aliviada se <sup>foram redigidos</sup> ~~se anularem~~ os valores da <sup>pressão</sup> ~~pressão~~ instalados na zona triangular definida pela direcção da cortina de injeção e pelo plano paralelo à direcção de fissuração característica do sistema  $S_1$  que passa pelo ponto de cota zero da zona de jusante que dista do plano médio da barragem de 137 m (note-se que o valor da altura piezométrica ao ní-

vel do fundo da albufeira é precisamente 137 m).

IV. Distribuição do potencial hidráulico no domínio do problema  
- Anisotropia no comportamento hidráulico -

O critério de drenagem empregado é discutível. No entanto, o que neste momento interessa exemplificar é a aplicação do método analítico à determinação da distribuição do potencial hidráulico numa certa região do maciço de fundação.

Assim, o referido critério permite objectivar uma certa finalidade nas considerações que se seguem.

Em primeiro lugar é necessário conhecer o fâcies do escoamento na zona da fundação na ausência de qualquer sistema drenante.

São desse modo se poderá constatar da grande ou pequena eficiência do conjunto concebido para a minoração das pressões inerentes ao escoamento.

São condições fronteira do problema o fundo da albufeira onde está instalado o potencial hidráulico  $\phi = 137$  m ( $z = 0$  m;  $p/\gamma = 137$  m) e a zona de jusante situada à cota zero. Aí reina um potencial hidráulico  $\phi = 0$  ( $z = 0$  m;  $p/\gamma = 0$ ).

Com o fim de limitar o número de incógnitas, confinou-se o estudo à zona do maciço fissurado envolvendo o conjunto cortina de injeção-dreno.

Uma vez determinados os valores dos gradientes do potencial hidráulico activos nas diferentes fissuras, e, partindo do conhecimento do valor desse potencial em certos pontos, consegue-se definir a distribuição de  $\phi$  em toda a zona a estudar, na ausência do sistema drenante.

Dadas as características geométricas da fissuração, conclui-se facilmente o elevado número de fissuras elementares a tomar em conta neste estudo.

Daí resulta a consideração de grande número de incógnitas. Apesar de se ter utilizado o cálculo automático, a resolução do sistema de equações lineares por essa via, implica mesmo assim, um número limitado de incógnitas.

Vai pois simplificar-se a aplicação do método analítico, substituindo grupos de fissuras pertencentes a cada um dos sistemas por uma fissura fictícia, equivalente sob o ponto de vista de condutividade hidráulica.

### V. Consideração da fissura equivalente

Apresentar-se-á um raciocínio genérico que de seguida será convenientemente aplicado ao caso em questão.

Considere-se um conjunto de  $n$  fissuras pertencentes ao sistema de fissuração  $S_i$ .

Este grupo de fissuras será substituído, sob o ponto de vista hidráulico, por uma fissura fictícia ( $f$ ).

Recorde-se o que foi dito sobre as relações entre o caudal escoado por unidade de comprimento e os valores do gradiente hidráulico activo nas fissuras. (relembre-se o ponto 4.5.II.).

Pelo valor da rugosidade relativa (veja-se 6.2.2.2.II.) apresentado, as fissuras serão consideradas de alta rugosidade.

Não será suposta a ocorrência de fenómenos de turbulência hidráulica.

Nestas condições, o valor da condutividade hidráulica de cada fissura isolada é (recorde-se o QUADRO 8 inserto em 4.5.II.)

$$k_i = \frac{sg}{12\nu \left[ 1 + 8,8 \left( \frac{e}{D_h} \right)^{1,5} \right]} (2a_i)^3$$

Esta relação resultou dos trabalhos de LOUIS [43]. Será aqui utilizada, visto que se trata de uma expressão devidamente testada ao longo de inúmeras aplicações.

Além disso, nela aparecem diferenciados todos os parâmetros intervenientes no escoamento.

Com o fim de simplificar o tratamento da igualdade anterior, pode desprezar-se o valor da expressão

$$\left[ 8,8 \left( \frac{e}{D_h} \right)^{1,5} \right]$$

A abertura da fissura equivalente é determinada com base na conservação do caudal total que se escoa nas  $n$  fissuras. Esta conservação é traduzida do modo seguinte:

$$q_f = \sum_{i=1}^n q_i$$

sendo

$q_f$  - caudal na fissura fictícia

$q_i$  - caudal numa das  $n$  fissuras

Dado que

$$q_i = \frac{s_g}{12v} (2a_i)^3 j_i$$

resultará

$$q_f = \frac{s_g}{12v} \sum_{i=1}^n (2a_i)^3 j_i$$

Para melhor se compreender a noção de fissura equivalente atente-se na figura 63.

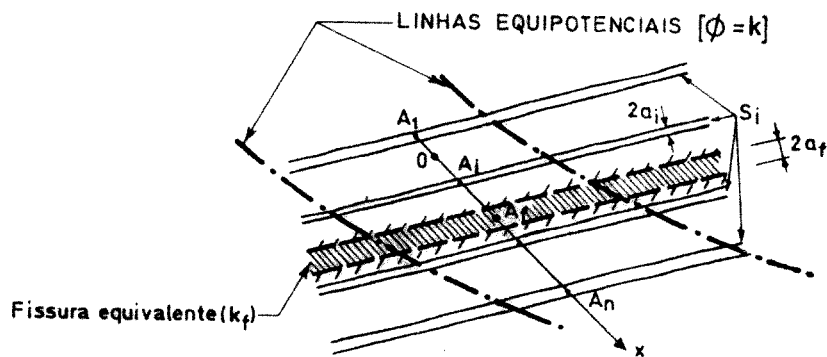


Fig. 63 - Consideração da fissura equivalente.

Por seu lado

$$q_f = \frac{s_f g}{12v} (2a_f)^3 j_f$$

Admitindo a hipótese de conservação do gradiente do potencial hidráulico (isto é  $j_f = j_i = j = \text{constante}$ ), virá

$$\frac{s_f g}{12v} (2a_f)^3 = \frac{s_g}{12v} \sum_{i=1}^n (2a_i)^3$$

No caso presente, sendo  $s_f = s = 1$  (as fissuras são totalmente abertas), ter-se-á

$$(2a_f)^3 = \sum_{i=1}^n (2a_i)^3$$

Por um processo de definição análogo ao de centro de gravidade, facilmente se determina a posição da fissura equivalente. Com efeito, servindo-se de um eixo qualquer ( $\overline{Ox}$ ) que corte as fissuras nos diversos pontos  $A_i$ , resultará a seguinte relação de posicionamento da fissura equivalente

$$|\overrightarrow{OA_f}| \cdot \sum_{i=1}^n (2a_i)^3 = \sum_{i=1}^n \left[ |\overrightarrow{OA_i}| (2a_i)^3 \right]$$

No caso concreto do problema que se pretende tratar substituiu-se o conjunto de cada duas fissuras, pertencentes ao mesmo sistema de fissuração, por uma fissura equivalente. Este raciocínio efectuou-se para ambos os sistemas de fissuração ( $S_1$  e  $S_2$ ).

Como a abertura das fissuras é a mesma em ambos os sistemas de fissuração, resulta para a condutividade hidráulica das fissuras equivalentes o seguinte valor

$$\begin{aligned} k_f &= \frac{s \cdot g}{12\nu} (2a_f)^3 = \frac{s \cdot g}{12\nu} 2 (2a_i)^3 = \frac{1 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot (0,002)^3}{12 \cdot 1,35 \cdot 10^{-6}} = \\ &= 0,009679 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{m} \end{aligned}$$

Considerou-se a temperatura de  $9^\circ \text{C}$  para definição do coeficiente de viscosidade cinemática.

## VI. Caso da cortina de injeção vertical

Retome-se o que se vinha a referir no ponto IV., na altura em que se desviou a presente memória para a consideração da fissura equivalente.

Face ao exposto, e, de acordo com a simplificação citada, tem-se possibilidade de aplicar o método analítico à determinação do fâcies do escoamento através do maciço de fundação, entrando em linha de conta com a existência de uma cortina de injeção vertical, e, conseqüentemente, na ausência de



qualquer sistema drenante.

Atente-se na figura 64.

A zona a aliviar das pressões está sombreada. O comprimento da cortina de injeção é de 80 m.

Limitando-se o escoamento à zona envolvente da cortina de injeção, o número de incógnitas considerado nesta fase do estudo foi de 104.

Evidentemente que não foi tida em conta a ocorrência de escoamento nas fissuras assinaladas por ( —●— ).

O número total de nós utilizados nesta análise foi de 53.

Quanto às malhas (abertas e fechadas), definiram-se 50.

Conseguiram-se pois, ao todo, determinar 103 equações dos nós e das malhas.

Entrando em linha de conta com a equação de ligação entre as duas condições fronteira (linhas equipotenciais  $\phi = 137$  m e  $\phi = 0$  m), obtiveram-se 104 equações lineares, independentes e resolúveis em relação às 104 incógnitas.

Em páginas seguintes são apresentadas todas as equações já na forma conveniente para serem tratadas no computador pelo programa SELESCAL.

Este programa pode também ser apreciado no final do conjunto das 104 equações.

Quanto a estas, aparecem em primeiro lugar as equações dos nós; segue-se a equação de ligação; finalmente podem ver-se as equações referentes às malhas.

No quadro geral das diversas equações aparece em primeiro lugar uma coluna representativa do número de termos (referentes às diferentes incógnitas); na última coluna vê-se o conjunto dos termos independentes.

As equações dos nós, da forma indicada em 6.2.2.1., evidenciam o coeficiente único das incógnitas, isto é, o valor da condutividade hidráulica das fissuras equivalentes ( $0,009679 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{m}$ ). Relembre-se o ponto 6.2.2.2.V..

Antecedendo o valor desta constante aparece a indicação numérica do troço da fissura elementar de acordo com a numeração patente na figura 64.

Quanto às equações das malhas, atendendo à sua forma indicada em

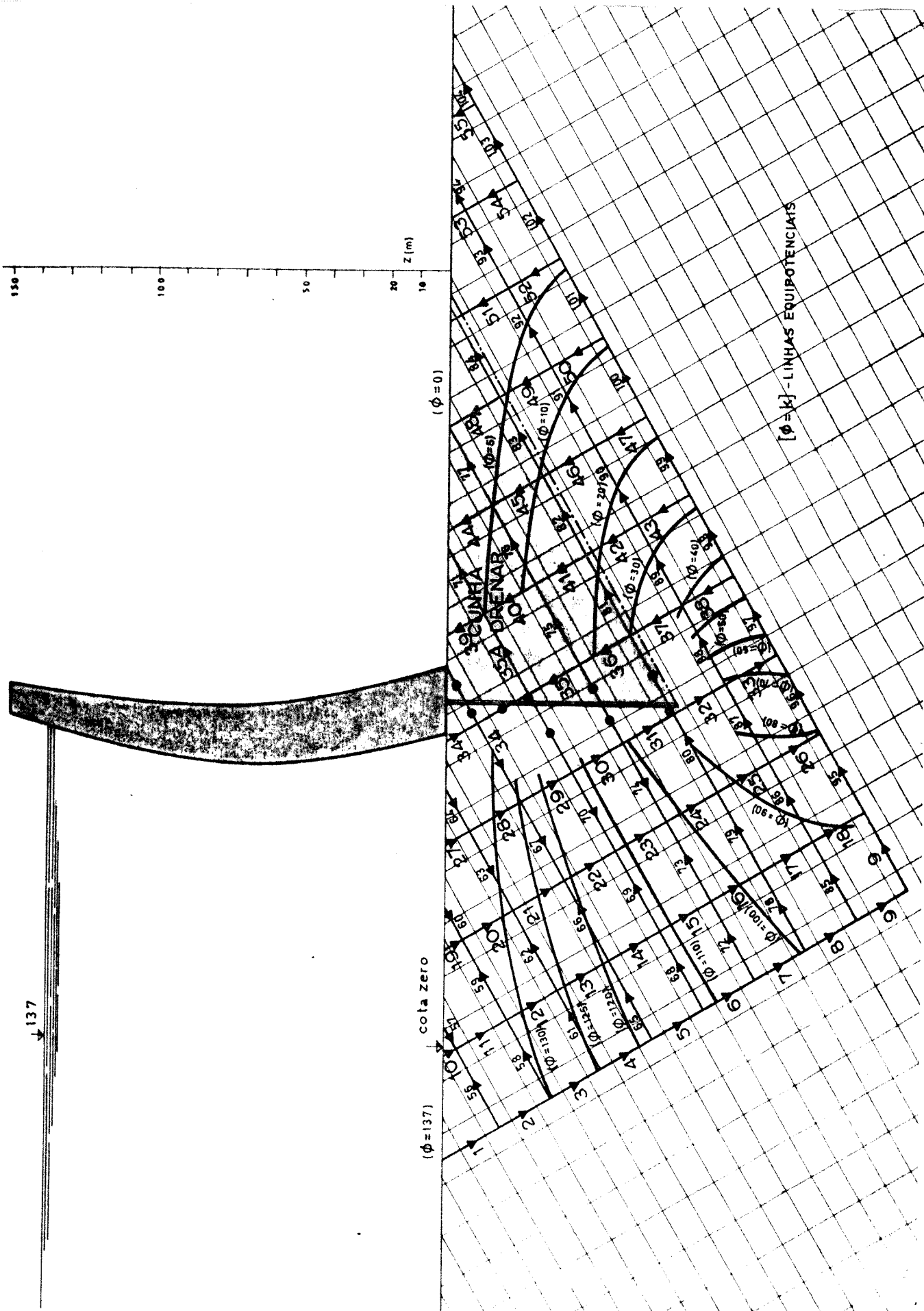


Fig. 64 - Cortina de injeção vertical.



3	1	-22.5	10	5	56	-30	0		
2	10	-5	57	8	0				
4	2	-20	11	20	56	30	58	-30	0
4	11	-20	19	8	57	-8	59	-30	0
2	19	-8	60	13	0				
4	3	-20	12	20	58	30	61	-30	0
4	12	-20	20	20	59	30	62	-30	0
4	20	-20	27	10	60	-13	63	30	0
2	27	-10	64	15	0				
4	4	-20	13	20	61	30	65	-30	0
4	13	-20	21	20	62	30	66	-30	0
4	21	-20	28	20	63	-30	67	30	0
3	28	-20	34	43	64	-15	0		
4	5	-20	14	20	65	30	68	-30	0
4	14	-20	22	20	66	30	69	-30	0
4	22	-20	29	20	67	-30	70	30	0
2	39	14	71	-25	0				
4	6	-20	15	20	68	30	72	-30	0
4	15	-20	23	20	69	30	73	-30	0
4	23	-20	30	20	70	-30	74	30	0
3	35	50	40	-20	75	-30	0		
4	40	20	44	-17.5	71	25	76	-30	0
2	44	17.5	77	-29	0				
4	7	-20	16	20	72	30	78	-30	0
4	16	-20	24	20	73	30	79	-30	0
4	24	-20	31	20	74	-30	80	-30	0
4	36	20	41	-20	75	30	81	-30	0
4	41	20	45	-20	76	30	82	-30	0
4	45	20	48	-19	77	29	83	-30	0
2	48	19	84	-30	0				
4	8	-20	17	20	78	30	85	-30	0
4	17	-20	25	20	79	30	86	-30	0
4	25	-20	32	20	80	30	87	-30	0
4	37	20	42	-20	81	30	89	-30	0
4	42	20	46	-20	82	30	90	-30	0
4	46	20	49	-20	83	30	91	-30	0
4	49	20	51	-20	84	30	92	-30	0
3	51	20	53	-5	93	-30	0		
2	53	5	94	-9	0				
3	9	-50	18	20	85	30	0		
4	18	-20	26	20	86	30	95	-30	0
4	26	-20	33	20	87	30	96	-30	0
4	33	-20	38	-20	88	30	97	-30	0
4	38	20	43	-20	89	30	98	-30	0
4	43	20	47	-20	90	30	99	-30	0
4	47	20	50	-20	91	30	100	-30	0
4	50	20	52	-20	92	30	101	-30	0
4	52	20	54	-20	93	30	102	-30	0
4	54	20	55	-9	94	9	103	-30	0
2	55	9	104	-15	0				

PROGRAMA

```

SELESCAL;
"BEGIN"
"INTEGER" I,N1,N2,J,M,K;
"INTEGER" "ARRAY" A1[1:40];
PUNCH(4);
I:=1; INSTRING(A1,I);
I:=1; OUTSTRING(A1,I);
"READ" N1,N2;
"BEGIN"
"REAL" B,S,C;
"ARRAY" A[1:N1,1:N1+N2];
"FOR" I:=1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO"
"FOR" J:=1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO" A[I,J]:=G;
"FOR" I:=1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO"
"BEGIN"
"READ" M;
"FOR" J:=1 "STEP" 1 "UNTIL" M "DO"
"BEGIN"
"READ" K,B;
A[I,K]:=B
"END";
"FOR" J:=1 "STEP" 1 "UNTIL" N2 "DO" "READ" A[I,N1+J];
"END";
"FOR" I:=1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO"
"BEGIN"
M:=I;
B:=ABS(A[I,I]);
"FOR" J:=I+1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO"
"IF" ABS(A[J,I])>B "THEN"
"BEGIN"
R:=ABS(A[J,I]);
M:=J
"END";
"IF" M>I "THEN"
"FOR" J:=1 "STEP" 1 "UNTIL" N1+N2 "DO"
"BEGIN"
C:=A[M,J];
A[M,J]:=A[I,J];
A[I,J]:=C
"END";
M:=CHECKI(M);
B:=CHECKR(A[I,I]);
"FOR" J:=I+1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO"
"IF" ABS(A[J,I])>B-10 "THEN"
"BEGIN"
S:=A[J,I]/B;
"FOR" K:=I+1 "STEP" 1 "UNTIL" N1+N2 "DO"
A[J,K]:=A[J,K]-S*A[I,K]
"END"
"END";
"FOR" I:=N1 "STEP" -1 "UNTIL" 1 "DO"
"FOR" J:=N1+1 "STEP" 1 "UNTIL" N1+N2 "DO"
"BEGIN"
S:=0;
"FOR" K:=I+1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO"
S:=S+A[I,K]*A[K,J];
A[I,J]:=(A[I,J]-S)/A[I,I]
"END";
"FOR" I:=1 "STEP" 1 "UNTIL" N1 "DO"
"BEGIN"
"PRINT" DIGITS(3),I;
"FOR" J:=N1+1 "STEP" 1 "UNTIL" N1+N2 "DO"
"PRINT" SAMELINE, 'S3', SCALED(7),A[I,J]
"END"
"END"
"END";

```

6.2.2.1., mostram para além das primeira e última colunas (cujo significado já foi referido), grupos de dois algarismos que dizem respeito ao seguinte:

Em primeiro lugar aparece a indicação da fissura elementar; segue-se o respectivo comprimento em metros (valores de  $\lambda_j$ . Veja-se 6.2.2.1.).

Os resultados deste sistema de equações são apresentados na página seguinte.

Trata-se pois, do conjunto dos valores dos gradientes do potencial hidráulico activos nas 104 fissuras elementares que foram consideradas.

Com estes resultados conseguiu-se determinar a distribuição do potencial hidráulico no domínio rochoso fissurado.

Consequentemente, pôde-se obter o conjunto das linhas equipotenciais (linhas que unem pontos de igual potencial hidráulico).

Ainda na figura 64, podem observar-se algumas das linhas equipotenciais, bem como os sentidos do escoamento obtidos com as hipóteses de cálculo que foram admitidas.

#### VII. Hipótese da cortina de injeção inclinada

Neste segundo estudo considerou-se a cortina de injeção inclinada de  $30^\circ$  em relação à vertical.

O comprimento inicial da cortina (80 m) foi diminuído para 70 m, na medida em que não teria grande interesse levá-la a uma profundidade maior pois não se conseguiria a intersecção de mais nenhuma fissura equivalente.

Atente-se na figura 65. Nela se poderá ver o comprimento inicial da cortina e o comprimento para ela adoptado na presente solução. A sombrea do observa-se a zona a drenar.

Note-se que em qualquer dos estudos se definiu a área a drenar em termos de fissuras equivalentes.

Para equacionar convenientemente este caso consideraram-se 107 equações nas 107 incógnitas (valores de  $j_j$ ).

Estabeleceram-se 55 equações dos nós e 51 equações das malhas. Relacionaram-se as condições fronteira por uma equação de ligação.

Em páginas seguintes pode ver-se o conjunto das referidas relações

1	1.358219 <sub>10-01</sub>	53	8.850865 <sub>10-02</sub>
2	2.069343 <sub>10-01</sub>	54	5.382065 <sub>10-02</sub>
3	2.635096 <sub>10-01</sub>	55	2.664836 <sub>10-02</sub>
4	3.059544 <sub>10-01</sub>	56	-7.111237 <sub>10-02</sub>
5	3.296460 <sub>10-01</sub>	57	1.153278 <sub>10-01</sub>
6	3.275176 <sub>10-01</sub>	58	-5.657527 <sub>10-02</sub>
7	2.945508 <sub>10-01</sub>	59	-1.125405 <sub>10-01</sub>
8	2.260098 <sub>10-01</sub>	60	1.631697 <sub>10-01</sub>
9	1.221303 <sub>10-01</sub>	61	-4.244485 <sub>10-02</sub>
10	1.845245 <sub>10-01</sub>	62	-9.182393 <sub>10-02</sub>
11	2.287400 <sub>10-01</sub>	63	1.608888 <sub>10-01</sub>
12	2.847052 <sub>10-01</sub>	64	2.406762 <sub>10-01</sub>
13	3.340843 <sub>10-01</sub>	65	-2.369161 <sub>10-02</sub>
14	3.683761 <sub>10-01</sub>	66	-5.798348 <sub>10-02</sub>
15	3.737750 <sub>10-01</sub>	67	1.235843 <sub>10-01</sub>
16	3.479122 <sub>10-01</sub>	68	2.128470 <sub>10-03</sub>
17	2.790176 <sub>10-01</sub>	69	-3.270372 <sub>10-03</sub>
18	1.495063 <sub>10-01</sub>	70	1.974944 <sub>10-02</sub>
19	2.651508 <sub>10-01</sub>	71	2.049270 <sub>10-01</sub>
20	3.157801 <sub>10-01</sub>	72	3.296676 <sub>10-02</sub>
21	3.848449 <sub>10-01</sub>	73	5.882956 <sub>10-02</sub>
22	4.504458 <sub>10-01</sub>	74	-5.993312 <sub>10-02</sub>
23	4.669249 <sub>10-01</sub>	75	1.959127 <sub>10-01</sub>
24	4.658213 <sub>10-01</sub>	76	2.120326 <sub>10-01</sub>
25	4.229502 <sub>10-01</sub>	77	1.806277 <sub>10-01</sub>
26	2.068752 <sub>10-01</sub>	78	6.854101 <sub>10-02</sub>
27	3.610143 <sub>10-01</sub>	79	1.374356 <sub>10-01</sub>
28	4.408017 <sub>10-01</sub>	80	1.803068 <sub>10-01</sub>
29	6.061982 <sub>10-01</sub>	81	2.646195 <sub>10-01</sub>
30	5.864487 <sub>10-01</sub>	82	2.600323 <sub>10-01</sub>
31	6.463818 <sub>10-01</sub>	83	2.075757 <sub>10-01</sub>
32	8.266886 <sub>10-01</sub>	84	1.456450 <sub>10-01</sub>
33	2.504442 <sub>10-01</sub>	85	1.038795 <sub>10-01</sub>
34	2.889808 <sub>10-01</sub>	86	2.333907 <sub>10-01</sub>
35	2.470678 <sub>10-01</sub>	87	4.494658 <sub>10-01</sub>
36	4.429805 <sub>10-01</sub>	88	1.025710 <sub>10+00</sub>
37	7.076000 <sub>10-01</sub>	89	5.127975 <sub>10-01</sub>
38	1.946872 <sub>10-01</sub>	90	3.399447 <sub>10-01</sub>
39	3.659411 <sub>10-01</sub>	91	2.391952 <sub>10-01</sub>
40	3.238003 <sub>10-01</sub>	92	1.590574 <sub>10-01</sub>
41	3.399203 <sub>10-01</sub>	93	8.385947 <sub>10-02</sub>
42	3.353330 <sub>10-01</sub>	94	4.917147 <sub>10-02</sub>
43	1.624803 <sub>10-01</sub>	95	2.716366 <sub>10-01</sub>
44	2.993258 <sub>10-01</sub>	96	4.785118 <sub>10-01</sub>
45	2.679209 <sub>10-01</sub>	97	7.289559 <sub>10-01</sub>
46	2.154643 <sub>10-01</sub>	98	5.342687 <sub>10-01</sub>
47	1.147148 <sub>10-01</sub>	99	3.717884 <sub>10-01</sub>
48	2.299657 <sub>10-01</sub>	100	2.570736 <sub>10-01</sub>
49	1.680350 <sub>10-01</sub>	101	1.691765 <sub>10-01</sub>
50	8.789715 <sub>10-02</sub>	102	9.645802 <sub>10-02</sub>
51	1.479164 <sub>10-01</sub>	103	4.263737 <sub>10-02</sub>
52	7.271847 <sub>10-02</sub>	104	1.598901 <sub>10-02</sub>

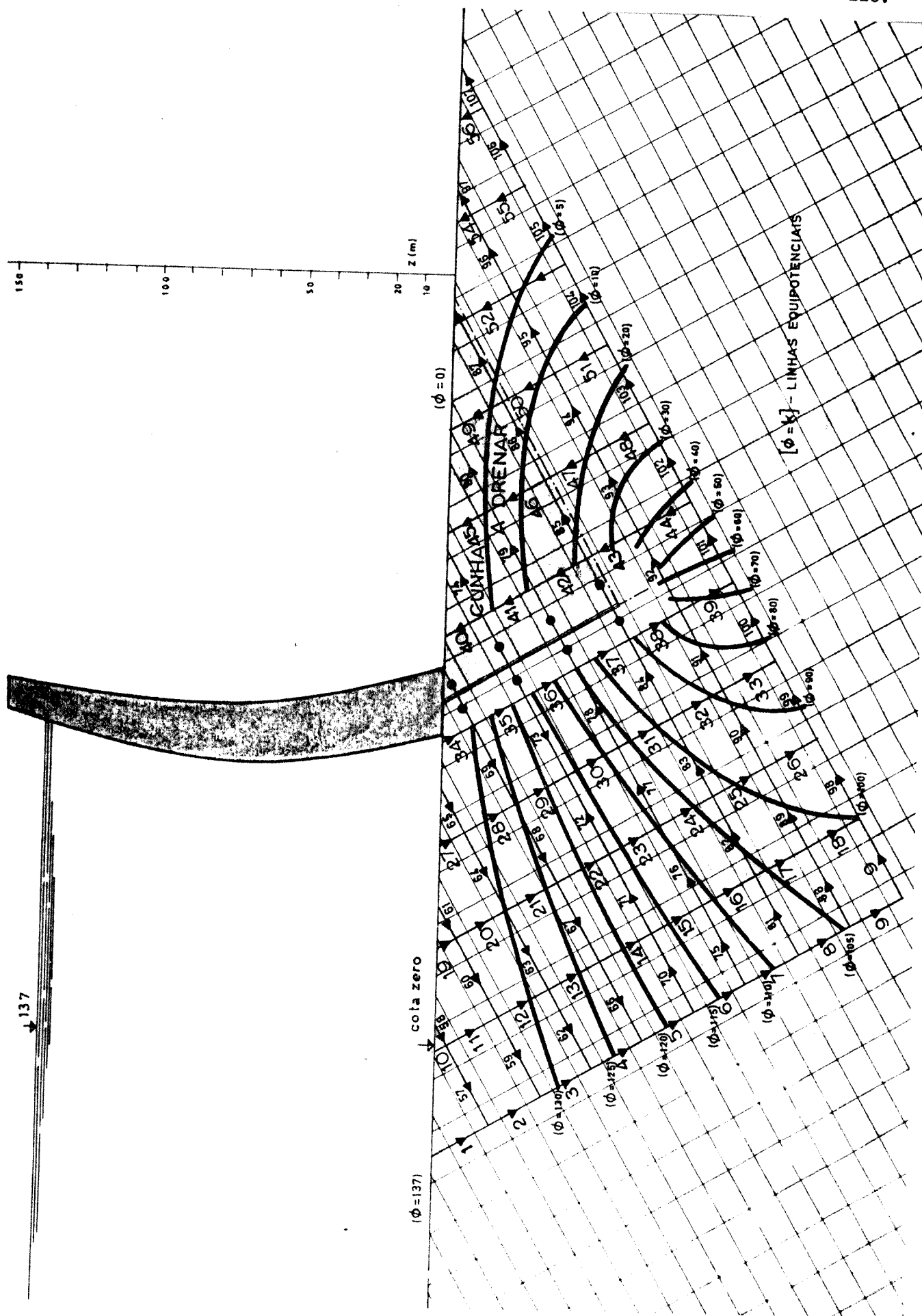


Fig. 65 - Hipótese da cortina de injeção inclinada.



já na forma conveniente para serem analisadas pelo computador. São também apresentados os valores obtidos para as incógnitas.

Com o conjunto dos resultados (valores dos gradientes do potencial hidráulico activos nas diversas fissuras elementares), determinou-se a distribuição do referido potencial no meio rochoso. Traçaram-se assim algumas linhas equipotenciais (linhas  $\phi = \text{constante}$ ).

Na figura 65 pode observar-se o conjunto das linhas equipotenciais bem como os sentidos do escoamento nas fissuras elementares.

Tal qual aconteceu na hipótese tratada anteriormente, também neste estudo ~~foi~~ foi conseguido <sup>um certo</sup> qualquer <sup>dadas as condições</sup> alívio das pressões ~~hidrostáticas~~ na zona a drenar.

Se for analisada a distribuição das linhas equipotenciais e se for comparada com a correspondente ao caso anterior, facilmente se concluirá que o valor das pressões instaladas é superior ao que se verificava com a solução da cortina de drenagem vertical.

Realmente, dada a inclinação para jusante da cortina de injeção bem como o respectivo desenvolvimento, o resultado obtido seria de esperar, na medida em que na primeira hipótese encarada a referida cortina obstava de uma forma mais eficiente a efectivação do escoamento no maciço de fundação, criando assim perdas energéticas superiores.

Serviu esta análise para se concluir da aplicação do método analítico a determinação da distribuição do potencial hidráulico. Os resultados obtidos estão assim de acordo com o sentimento real do escoamento.

#### VIII. Processo de drenagem utilizando uma cortina de injeção vertical e um sistema drenante inclinado

##### a) Estudo preliminar

Dadas as conclusões inerentes ao funcionamento das duas cortinas anteriormente pensadas, procurou-se atingir o objectivo referido considerando um sistema ~~constituído~~ constituído por uma cortina de injeção e por uma cortina drenante dispostas como mostra a figura 66.

É este um dos processos mais utilizado nas realizações práticas.

No fundo, foi-se confirmar a sua eficiência e detectar a sua melhor orientação tomando por base esta nova tese teórica de interpretação dos fenó-



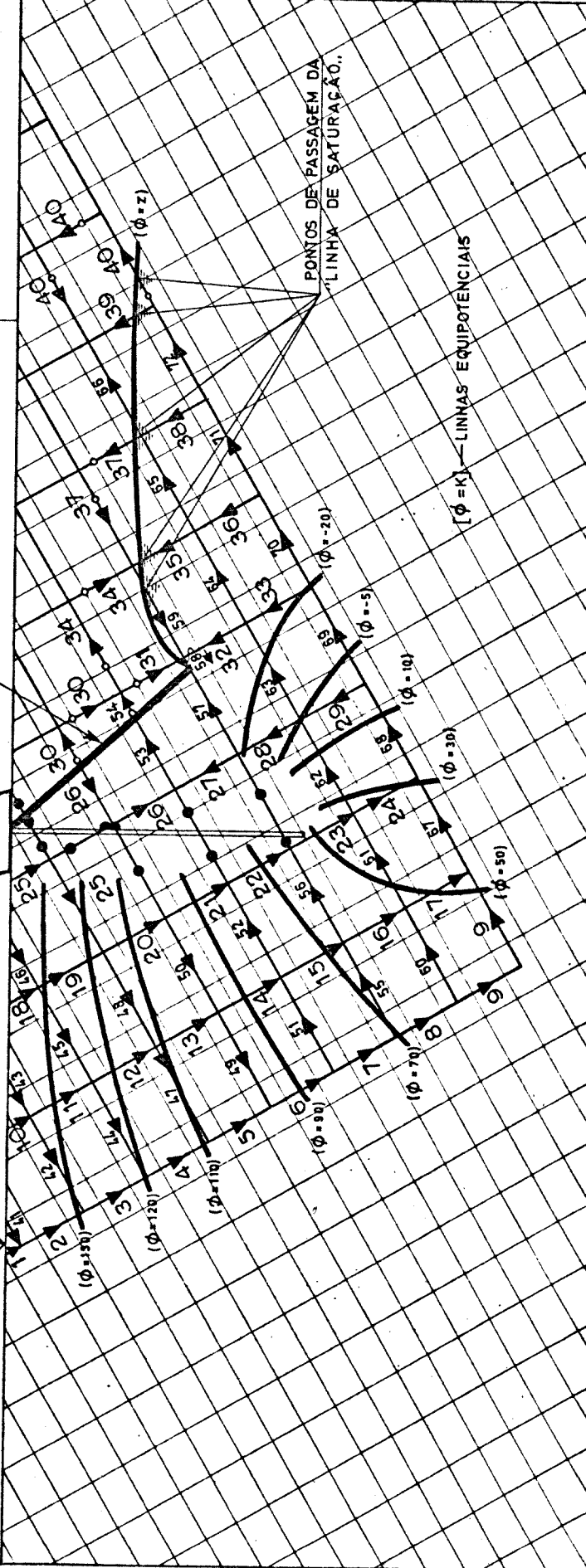
3	1	-20	10	4	57	30	0		
2	58	7	10	-4	0				
4	2	-20	11	20	57	-30	59	30	0
4	11	-20	19	7	58	-7	60	30	0
2	19	-7	61	13	0				
4	3	-20	12	20	59	-30	62	-30	0
4	12	-20	20	20	60	-30	63	-30	0
4	20	-20	27	10	61	-13	64	30	0
2	27	-10	65	17	0				
4	4	-20	13	20	62	30	66	-30	0
4	13	-20	21	20	63	30	67	-30	0
4	21	-20	28	20	64	-30	68	30	0
4	28	-20	34	12	65	-17	69	30	0
4	5	-20	14	20	66	30	70	-30	0
4	14	-20	22	20	67	30	71	-30	0
4	22	-20	29	20	68	-30	72	20	0
4	29	-20	35	20	69	-30	73	30	0
2	40	14	74	-25	0				
4	6	-20	15	20	70	30	75	-30	0
4	15	-20	23	20	71	30	76	-30	0
4	23	-20	30	20	72	-30	77	30	0
4	30	-20	36	20	73	-30	78	30	0
4	41	-20	45	-17	74	25	79	-30	0
2	45	17	80	-30	0				
4	7	-20	16	20	75	30	81	-30	0
4	16	-20	24	20	76	30	82	-30	0
4	24	-20	31	20	77	-30	83	-30	0
4	31	-20	37	20	78	-30	84	-30	0
4	42	-20	46	-20	79	30	85	-30	0
4	46	20	49	-20	80	30	86	-30	0
2	49	20	87	-30	0				
4	8	-20	17	20	81	30	88	-30	0
4	17	-20	25	20	82	30	89	-30	0
4	25	-20	32	20	83	30	90	-30	0
4	32	-20	38	-20	84	30	91	-30	0
4	43	-20	47	-20	85	30	93	-30	0
4	47	20	50	-20	86	30	94	-30	0
4	50	20	52	-20	87	30	95	-30	0
3	52	20	54	-6	96	-30	0		
2	54	6	97	-10	0				
3	9	-50	18	20	88	30	0		
4	18	-20	26	20	89	30	98	-30	0
4	26	-20	33	20	90	30	99	-30	0
4	33	-20	39	20	91	30	100	-30	0
4	39	-20	44	20	92	30	101	-30	0
4	44	-20	48	-20	93	30	102	-30	0
4	48	20	51	-20	94	30	103	-30	0
4	51	20	53	-20	95	30	104	-30	0
4	53	20	55	-20	96	30	105	-30	0
4	55	20	56	-9	97	10	106	-30	0
2	56	9	107	-16	0				

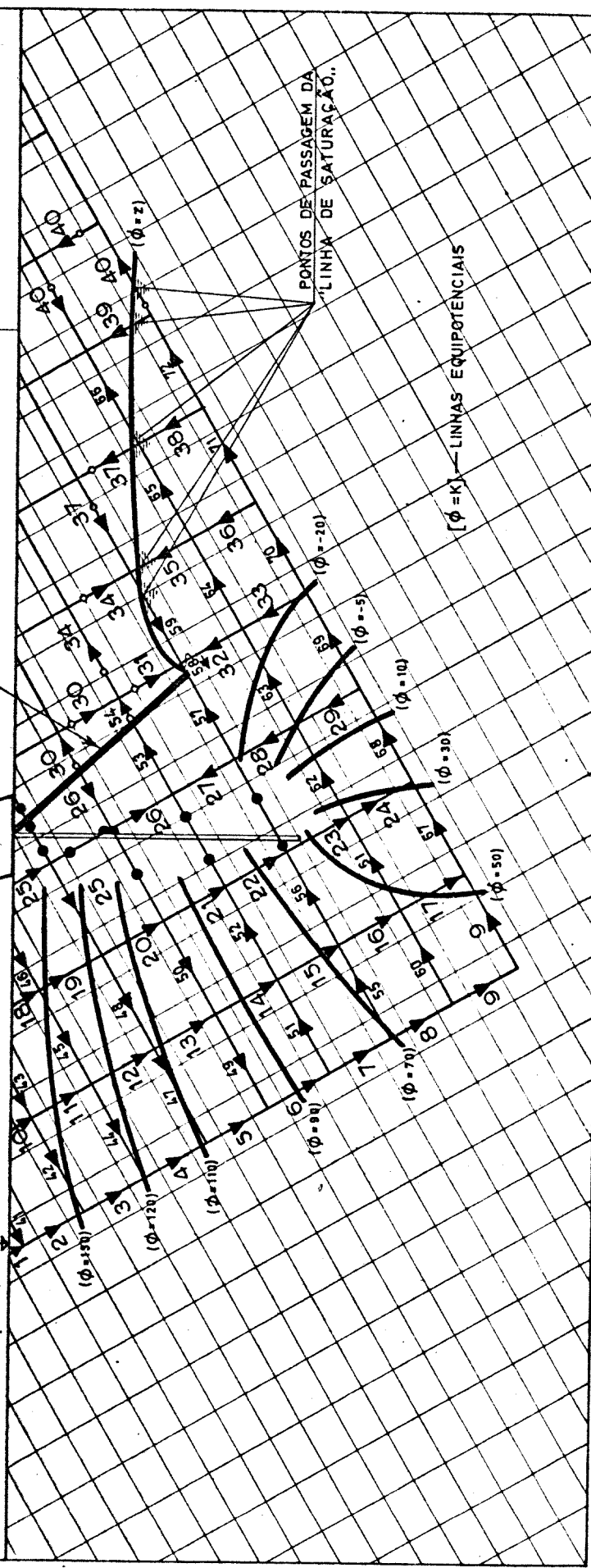
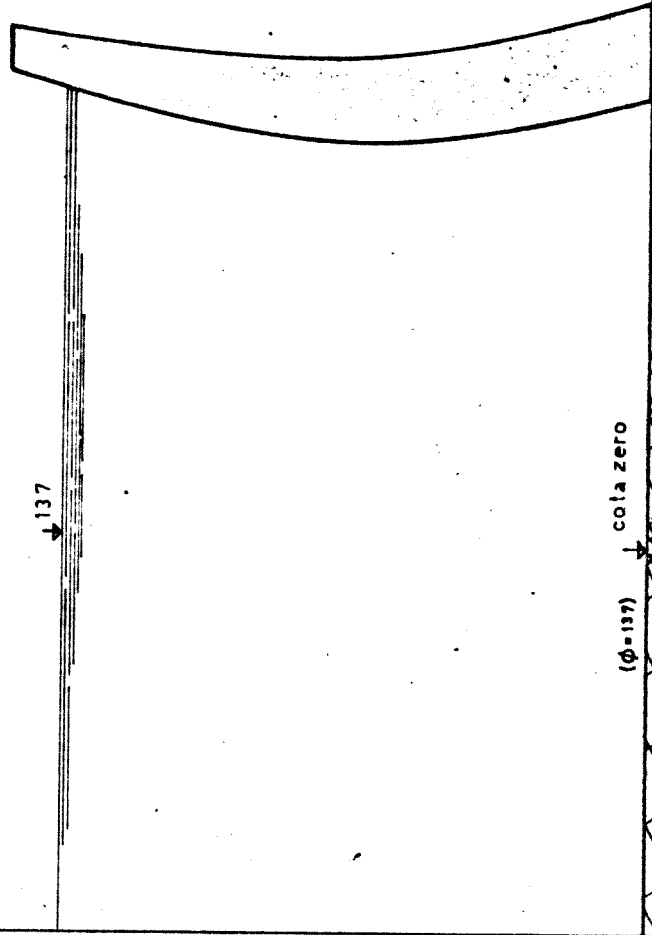
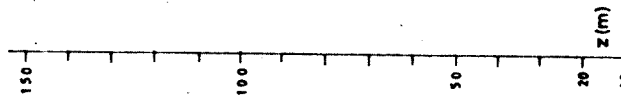
1	1.140273 <sub>10-01</sub>	55	7.811619 <sub>10-02</sub>
2	1.694880 <sub>10-01</sub>	56	4.139172 <sub>10-02</sub>
3	2.133915 <sub>10-01</sub>	57	5.546071 <sub>10-02</sub>
4	2.438841 <sub>10-01</sub>	58	8.810346 <sub>10-02</sub>
5	2.569518 <sub>10-01</sub>	59	4.390348 <sub>10-02</sub>
6	2.490898 <sub>10-01</sub>	60	9.058748 <sub>10-02</sub>
7	2.180121 <sub>10-01</sub>	61	1.258136 <sub>10-01</sub>
8	1.630476 <sub>10-01</sub>	62	-3.049258 <sub>10-02</sub>
9	8.730822 <sub>10-02</sub>	63	-6.700613 <sub>10-02</sub>
10	1.541811 <sub>10-01</sub>	64	1.215681 <sub>10-01</sub>
11	1.868238 <sub>10-01</sub>	65	1.980077 <sub>10-01</sub>
12	2.335078 <sub>10-01</sub>	66	-1.306771 <sub>10-02</sub>
13	2.700214 <sub>10-01</sub>	67	-3.139253 <sub>10-02</sub>
14	2.883462 <sub>10-01</sub>	68	6.182738 <sub>10-02</sub>
15	2.839137 <sub>10-01</sub>	69	1.043672 <sub>10-01</sub>
16	2.538421 <sub>10-01</sub>	70	7.861910 <sub>10-03</sub>
17	1.942098 <sub>10-01</sub>	71	1.229442 <sub>10-02</sub>
18	1.046615 <sub>10-01</sub>	72	-8.974943 <sub>10-03</sub>
19	2.336538 <sub>10-01</sub>	73	5.664335 <sub>10-03</sub>
20	2.688798 <sub>10-01</sub>	74	1.383516 <sub>10-01</sub>
21	3.234418 <sub>10-01</sub>	75	3.107780 <sub>10-02</sub>
22	3.538766 <sub>10-01</sub>	76	6.114936 <sub>10-02</sub>
23	3.571961 <sub>10-01</sub>	77	-8.433215 <sub>10-02</sub>
24	3.340133 <sub>10-01</sub>	78	-7.950281 <sub>10-02</sub>
25	2.702460 <sub>10-01</sub>	79	1.672162 <sub>10-01</sub>
26	1.446848 <sub>10-01</sub>	80	2.050156 <sub>10-01</sub>
27	3.366131 <sub>10-01</sub>	81	5.496450 <sub>10-02</sub>
28	4.130528 <sub>10-01</sub>	82	1.145968 <sub>10-01</sub>
29	4.555926 <sub>10-01</sub>	83	1.783641 <sub>10-01</sub>
30	4.702319 <sub>10-01</sub>	84	2.144523 <sub>10-01</sub>
31	4.750612 <sub>10-01</sub>	85	2.692381 <sub>10-01</sub>
32	4.389731 <sub>10-01</sub>	86	2.630565 <sub>10-01</sub>
33	2.133932 <sub>10-01</sub>	87	2.083534 <sub>10-01</sub>
34	7.080142 <sub>10-01</sub>	88	7.573934 <sub>10-02</sub>
35	6.036470 <sub>10-01</sub>	89	1.652876 <sub>10-01</sub>
36	5.979826 <sub>10-01</sub>	90	2.908488 <sub>10-01</sub>
37	6.774854 <sub>10-01</sub>	91	5.164287 <sub>10-01</sub>
38	-8.919377 <sub>10-01</sub>	92	1.144545 <sub>10+00</sub>
39	2.638218 <sub>10-01</sub>	93	5.548730 <sub>10-01</sub>
40	2.470565 <sub>10-01</sub>	94	3.534451 <sub>10-01</sub>
41	-3.854081 <sub>10-01</sub>	95	2.332228 <sub>10-01</sub>
42	-5.526243 <sub>10-01</sub>	96	1.220008 <sub>10-01</sub>
43	-8.218624 <sub>10-01</sub>	97	7.504386 <sub>10-02</sub>
44	-2.321908 <sub>10-01</sub>	98	1.919697 <sub>10-01</sub>
45	3.617922 <sub>10-01</sub>	99	3.366545 <sub>10-01</sub>
46	3.995916 <sub>10-01</sub>	100	5.500477 <sub>10-01</sub>
47	3.934100 <sub>10-01</sub>	101	8.138695 <sub>10-01</sub>
48	1.919821 <sub>10-01</sub>	102	5.816788 <sub>10-01</sub>
49	3.125302 <sub>10-01</sub>	103	3.896967 <sub>10-01</sub>
50	2.578271 <sub>10-01</sub>	104	2.520919 <sub>10-01</sub>
51	1.376048 <sub>10-01</sub>	105	1.427907 <sub>10-01</sub>
52	2.205231 <sub>10-01</sub>	106	6.467456 <sub>10-02</sub>
53	1.093011 <sub>10-01</sub>	107	2.328284 <sub>10-02</sub>
54	1.250731 <sub>10-01</sub>		

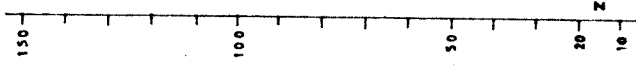


DRENO (p=0)

( $\phi=137$ ) cota zero



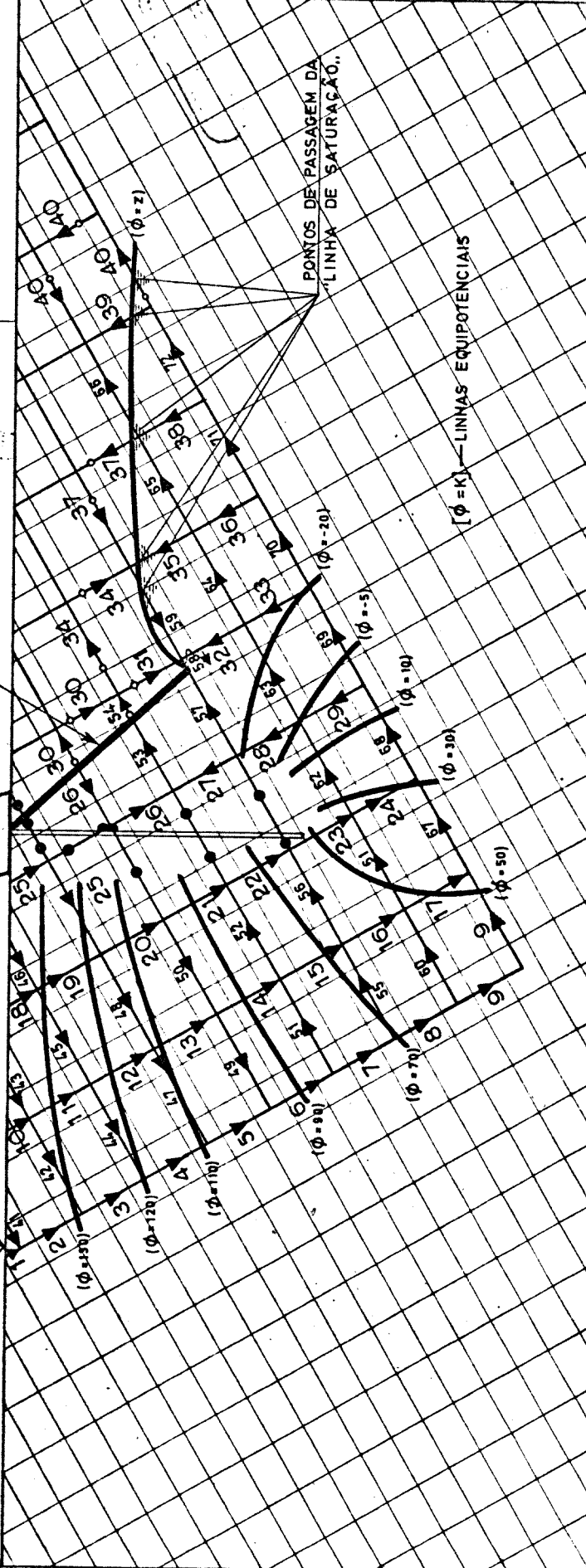




137

DRENO (p=0)

( $\phi=137$ ) cota zero



[ $\phi = K$ ] — LINHAS EQUIPOTENCIAIS

menos do escoamento em maciços rochosos fissurados.

Depois de determinadas tentativas, que evidentemente estão fora do âmbito desta breve memória, concluiu-se que a orientação do sistema drenante indicada na figura 66 conduzia a um certo rebaixamento da superfície livre da água escoada através do maciço de fundação, na região de jusante.

Esta solução, pareceu pois, dar bons resultados práticos.

~~O comprimento da cortina de injeção foi diminuído para 60 m, conservando-se no entanto, na posição vertical.~~ O comprimento considerado para os drenos foi de 70 m.

~~A redução verificada na extensão da cortina torna a sua execução bastante mais simplificada.~~

A área a drenar é apresentada a sombreado na mesma figura 66.

O equacionamento <sup>geral</sup> deste caso consistiu na consideração de 108 equações nas 108 incógnitas.

Estabeleceram-se 53 equações dos nós e 54 equações das malhas. Relacionaram-se as condições fronteira ( $\phi = 137$  m e  $\phi = 0$  m) por uma equação de ligação.

O sistema drenante constitui também uma condição limite, pois à priori se admite que em toda a sua extensão reina a pressão atmosférica (pressão nula em termos de pressão efectiva). Assim, ao longo dos drenos verifica-se a condição ( $\phi = z$ ). *Essa hipótese corresponde ao funcionamento inicial do dreno*

Relacionou-se esta condição fronteira com as restantes pela consideração de malhas abertas, isto é, de malhas que intersectam uma condição fronteira (no caso, o sistema drenante).

~~Estas equações estão assinaladas no conjunto de todas as equações respeitantes ao presente estudo.~~

Note-se que têm vindo a ser consideradas outras malhas abertas: são intersectadas pela linha de cota zero.

~~Em páginas seguintes pode ver-se o conjunto das 108 equações, bem como os resultados que advieram da resolução do sistema.~~

Como se pretende refinar a solução exposta, não foi feita a determinação da distribuição do potencial hidráulico. Por esse motivo não se apre-



sentam as linhas equipotenciais. *tal como nos casos anteriores da zona de 108*

Na realidade, <sup>dados</sup> ~~observando~~ os sentidos do escoamento nas fissuras elementares obtidos com a hipótese de cálculo admitida, facilmente se verifica que, na zona de jusante do maciço de fundação (zona a drenar), é impossível existir escoamento em algumas fissuras elementares. ~~Essas fissuras estão assinaladas na figura 66 (—○—).~~

230.

Atente-se no que foi dito sobre este facto na parte final do ponto 6.2.2.1.. Não deverá considerar-se escoamento nas fissuras situadas na superfície do maciço rochoso.

Nessa ordem de ideias, refinou-se o resultado deste estudo, equacionando novamente o movimento da água nas fissuras do maciço de fundação, sem considerar a possibilidade de escoamento nas fissuras assinaladas.

b) Melhoramento da solução anterior

Para além de não ter sido tomada em conta a ocorrência de escoamento nas fissuras superficiais da zona de jusante do maciço de fundação da barragem, também não foram tidos em conta quaisquer movimentos de água nas fissuras elementares <sup>actuadas na zona crítica de montante do domínio percolante</sup> ~~numeradas de 1 a 9, nem nas fissuras elementares com os números 56, 58, 61, 65, 68, 73, 80, 88,~~ devido ao facto dos gradientes hidráulicos activos na maior parte delas ~~(58, 61, 65, 68 e 73)~~ serem caracterizados por valores baixos.

O facto de se terem excluído do domínio do problema em questão as fissuras numeradas de 1 a 9, <sup>mas análises anteriores</sup> teve em vista uma redução no número de incógnitas.

Os resultados obtidos deveriam contudo ser influenciados pela ocorrência de escoamento numa maior zona do maciço de fundação envolvendo o sistema drenante e a cortina. No entanto, para uma razoável percepção do mecanismo do movimento da água nessa região, poderão considerar-se aceitáveis os conseguidos com as hipóteses admitidas.

Na figura 67<sup>6</sup>, pode observar-se o sentido dos caudais considerados neste refinamento da solução anterior. ~~A sombreado aparece mais uma vez a cunha a drenar.~~

No equacionamento do problema da distribuição do potencial hidráulico recorreu-se a um sistema de <sup>2</sup>73 equações.

O conjunto destas equações e a solução do sistema são apresentados <sup>nas páginas seguintes.</sup>



2	1	-5	41	8	0						
4	2	-20	10	7	41	-8	42	30	0		
2	10	-7	43	12	0						
4	3	-20	11	20	42	-30	44	30	0		
4	11	-20	18	10	43	-12	45	30	0		
2	18	-10	46	17	0						
4	4	-20	12	20	44	-30	47	30	0		
4	12	-20	19	20	45	-30	48	30	0		
3	19	-20	25	42	46	-17	0				
4	5	-20	13	20	47	-30	49	30	0		
4	13	-20	20	20	48	-30	50	30	0		
4	6	-20	14	20	49	-30	51	30	0		
4	14	-20	21	20	50	-30	52	30	0		
4	7	-20	15	20	51	-30	55	-30	0		
4	15	-20	22	20	52	-30	56	-30	0		
3	31	20	34	-50	60	30	0				
4	8	-20	16	20	55	30	61	-30	0		
4	16	-20	23	20	56	30	62	-30	0		
4	23	-20	28	-20	57	30	63	-30	0		
4	32	20	35	-20	60	-30	65	-30	0		
3	35	20	37	-50	66	-30	0				
3	9	-50	17	-20	61	30	0				
4	17	20	24	-20	62	30	68	-30	0		
4	24	20	29	-20	63	30	69	-30	0		
4	29	20	33	-20	64	30	70	-30	0		
4	33	20	36	-20	65	30	71	-30	0		
4	36	20	38	-20	66	30	72	-30	0		
4	38	20	39	-20	67	30	73	-30	0		
2	39	20	40	80	0						

1	1.917760 <sub>10</sub> -01
2	3.116360 <sub>10</sub> -01
3	4.561245 <sub>10</sub> -01
4	5.72232 <sub>10</sub> -01
5	6.467960 <sub>10</sub> -01
6	6.680813 <sub>10</sub> -01
7	6.245077 <sub>10</sub> -01
8	4.995351 <sub>10</sub> -01
9	2.613050 <sub>10</sub> -01
10	4.071345 <sub>10</sub> -01
11	5.017244 <sub>10</sub> -01
12	6.234712 <sub>10</sub> -01
13	7.377438 <sub>10</sub> -01
14	7.623707 <sub>10</sub> -01
15	7.415153 <sub>10</sub> -01
16	6.515171 <sub>10</sub> -01
17	3.239294 <sub>10</sub> -01
18	5.816366 <sub>10</sub> -01
19	6.879403 <sub>10</sub> -01
20	9.611599 <sub>10</sub> -01
21	0.172472 <sub>10</sub> -01
22	9.715071 <sub>10</sub> -01
23	1.179243 <sub>10</sub> -01
24	3.629633 <sub>10</sub> -01
25	4.660755 <sub>10</sub> -01
26	2.025123 <sub>10</sub> -01
27	1.118453 <sub>10</sub> -01
28	2.711769 <sub>10</sub> -01
29	2.989852 <sub>10</sub> -01
30	4.849217 <sub>10</sub> -01
31	5.442237 <sub>10</sub> -01
32	9.368884 <sub>10</sub> -01
33	3.711707 <sub>10</sub> -01
34	2.494724 <sub>10</sub> -01
35	2.372255 <sub>10</sub> -01
36	1.572659 <sub>10</sub> -01

37	5.373100 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
38	5.947060 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
39	5.947060 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
40	1.226765 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
41	1.196630 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
42	1.444886 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
43	2.380785 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
44	1.140887 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
45	2.415355 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
46	3.491397 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
47	7.255336 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
48	1.928560 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
49	1.928518 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
50	4.391201 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
51	4.387400 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
52	5.863940 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
53	3.439540 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
54	-8.624918 <sub>10</sub> <sup>-02</sup>
55	1.249725 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
56	2.126608 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
57	4.532354 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
58	1.799140 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>
59	3.179137 <sub>10</sub> <sup>-01</sup>

60	2.312271 <sub>10</sub> -01
61	5.662148 <sub>10</sub> -01
62	1.392500 <sub>10</sub> +00
63	7.143159 <sub>10</sub> -01
64	1.485382 <sub>10</sub> -01
65	6.859865 <sub>10</sub> -02
66	7.433825 <sub>10</sub> -02
67	5.922374 <sub>10</sub> -01
68	9.552007 <sub>10</sub> -01
69	6.622155 <sub>10</sub> -01
70	2.615648 <sub>10</sub> -01
71	1.538085 <sub>10</sub> -01
72	7.433825 <sub>10</sub> -02

1	2.448513 <sub>10-01</sub>	38	5.968977 <sub>10-02</sub>
2	3.978833 <sub>10-01</sub>	39	1.256627 <sub>10-02</sub>
3	5.818259 <sub>10-01</sub>	40	-3.141567 <sub>10-03</sub>
4	7.238258 <sub>10-01</sub>	41	1.530321 <sub>10-01</sub>
5	8.132626 <sub>10-01</sub>	42	1.839425 <sub>10-01</sub>
6	8.130710 <sub>10-01</sub>	43	3.053040 <sub>10-01</sub>
7	7.123150 <sub>10-01</sub>	44	1.419999 <sub>10-01</sub>
8	4.972797 <sub>10-01</sub>	45	2.999306 <sub>10-01</sub>
9	2.492401 <sub>10-01</sub>	46	4.447369 <sub>10-01</sub>
10	5.233783 <sub>10-01</sub>	47	8.943681 <sub>10-02</sub>
11	6.447398 <sub>10-01</sub>	48	2.344715 <sub>10-01</sub>
12	8.026704 <sub>10-01</sub>	49	-1.915294 <sub>10-04</sub>
13	9.477051 <sub>10-01</sub>	50	1.602118 <sub>10-02</sub>
14	9.639178 <sub>10-01</sub>	51	-1.007560 <sub>10-01</sub>
15	8.837340 <sub>10-01</sub>	52	-1.809399 <sub>10-01</sub>
16	5.467860 <sub>10-01</sub>	53	5.135368 <sub>10-01</sub>
17	-2.510410 <sub>10-01</sub>	54	-1.108338 <sub>10-01</sub>
18	7.560527 <sub>10-01</sub>	55	2.150353 <sub>10-01</sub>
19	9.008590 <sub>10-01</sub>	56	5.519833 <sub>10-01</sub>
20	1.275381 <sub>10+00</sub>	57	1.457795 <sub>10+00</sub>
21	1.259359 <sub>10+00</sub>	58	1.328131 <sub>10+00</sub>
22	1.440299 <sub>10+00</sub>	59	1.865443 <sub>10+00</sub>
23	5.344877 <sub>10-01</sub>	60	3.532044 <sub>10-01</sub>
24	-1.857860 <sub>10-01</sub>	61	2.480395 <sub>10-01</sub>
25	6.089930 <sub>10-01</sub>	62	5.437845 <sub>10-01</sub>
26	-7.039778 <sub>10-02</sub>	63	8.924862 <sub>10-01</sub>
27	4.431391 <sub>10-01</sub>	64	7.028538 <sub>10-01</sub>
28	3.134752 <sub>10-01</sub>	65	1.056069 <sub>10-01</sub>
29	1.238427 <sub>10-01</sub>	66	1.383063 <sub>10-02</sub>
30	-4.895313 <sub>10-01</sub>	67	-1.570783 <sub>10-02</sub>
31	-5.802055 <sub>10-01</sub>	68	5.002812 <sub>10-01</sub>
32	9.320335 <sub>10-01</sub>	69	6.860671 <sub>10-01</sub>
33	3.347866 <sub>10-01</sub>	70	5.622245 <sub>10-01</sub>
34	-2.015959 <sub>10-02</sub>	71	2.274378 <sub>10-01</sub>
35	2.438165 <sub>10-01</sub>	72	7.539761 <sub>10-02</sub>
36	1.520402 <sub>10-01</sub>	73	1.570783 <sub>10-02</sub>
37	8.922824 <sub>10-02</sub>		

~~em páginas seguintes.~~

Facilmente se destacam 38 primeiras equações dos nós. Seguem-se <sup>25</sup> ~~6~~ equações. ~~de ligação.~~ Nestas, é de destacar em primeiro lugar uma relação (com <sup>12</sup> 9 termos) entre a condição fronteira  $\phi = 137$  m e o sistema drenante ( $\phi = z$ ), seguindo-se um conjunto de mais 5 equações das malhas abertas. Finalmente aparecem as restantes <sup>28</sup> 29 equações das malhas.

<sup>234</sup> ~~Com base nos valores dos gradientes do potencial hidráulico activos nos diversos troços das fissuras, determinou-se a distribuição do potencial  $\phi$  no domínio rochoso fissurado.~~

Na mesma figura <sup>6</sup> 67 podem ver-se algumas linhas equipotenciais.

Com o conhecimento do valor do potencial hidráulico nos nós, e, partindo da expressão de definição

$$\phi = z + \frac{p}{\gamma}$$

podem determinar-se os valores das alturas piezométricas nesses mesmos nós.

É então fácil detectar os pontos em que a pressão vale zero (em termos de pressão efectiva).

Obtêm-se assim o conjunto dos pontos de passagem da linha de saturação, cujo aspecto se poderá observar na figura <sup>6</sup> 67.

No domínio dos escoamentos através de maciços rochosos fissurados, dado que o movimento apenas se verifica nas fissuras, a noção de linha de saturação é bastante fictícia, pois corresponde não a uma linha no significado geométrico desta entidade, mas à sucessão de pontos isolados definidos pelo nível da água em cada fissura elementar.

~~Como nota, chama-se a atenção para o facto de, num novo refinamento da solução, ser considerado o sentido contrário para o escoamento na fissura 26, ou até mesmo não ser tomado em linha de conta qualquer escoamento.~~

Quanto ao movimento da água nas fissuras assinaladas (—○—), não seria de o considerar numa melhoria da determinação do fâcies do escoamento.

A cunha a drenar está praticamente aliviada das pressões inerentes ao escoamento. Considerando a zona entre a cortina e o dreno, facilmente se verifica que a água circulando nas fissuras se dirige para o dreno.



→ ⊛ Ora, nos problemas práticos o dreno não está totalmente vazio de água de infiltração, mas constituindo assim uma condição fronteira ( $\Phi = z$ ).

Vai-se então admitir, numa nova hipótese, que o dreno acaba por ficar completamente cheio de água de infiltração, constituindo a condição fronteira ( $\Phi = 0 ; z = -P/\gamma$ ).

Na figura 64, ~~Na figura 64, pode observar-se~~ <sup>em cima</sup> pode observar-se o sentido dos caudais considerados.

No equacionamento do problema da determinação da distribuição de  $\Phi$  estabeleceram-se 89 equações.

O conjunto destas equações bem como a solução do sistema está apresentada em páginas seguintes.

Destacou-se 44 equações dos nós e 43 equações das malhas separadas por 2 equações de ligação.

Na mesma figura 64 podem ver-se algumas linhas equipotenciais. A zona de cunha a drenar está bastante aliviada das pressões

sendas os aumentos já que os valores de potencial instalados são reduzidos.

Quanto à zona entre o sistema drenante e a linha de cota zero, vê-se, pela posição da linha de saturação, que está praticamente aliviada das pressões devidas ao escoamento.



#### IX. Referência ao processo construtivo do sistema de drenagem

Embora a finalidade da referência ao estudo prático ora apresentado seja a ilustração de um método de determinação da distribuição do potencial hidráulico num domínio rochoso fissurado, faz-se de seguida uma brevíssima referência ao processo construtivo do sistema drenante.

É opinião de grande parte dos especialistas em problemas de drenagem, considerar as cortinas drenantes constituídas por furos paralelos de diâmetro valendo aproximadamente 10 cm.

Depende muito da geometria da fissuração a decisão de um comprimento óptimo para a distância entre os furos. Um valor médio dessa distância poderia ser à volta de 4 m.

As características do modelo percolante real correspondente à drenagem de um maciço rochoso fissurado, aconselham um estudo a três dimensões.

A análise feita ~~(a duas dimensões)~~ apenas permite prever uma solução aproximada.

Assim, é aconselhável tomar para comprimento dos drenos o valor teórico multiplicado por um dado coeficiente, determinado mais ou menos segundo dados práticos, cujo valor varia com a distância entre os drenos. Um valor ~~acietável~~ <sup>adotável</sup> para aquele coeficiente poderá ser 1,5.

Se fosse levado a cabo um estudo do escoamento no plano dos drenos, determinar-se-ia o valor correcto desse coeficiente.

#### X. Considerações finais

Analisando o modo como se processou a resolução do problema, pode-se concluir que com uma análise aturada se conseguiu obter uma solução bastante aproximada e razoavelmente funcional para o conjunto da cortina de injeção e do sistema drenante.

É pois possível, actualmente, elaborar um estudo de drenagem com base numa certa tese teórica, em substituição dos processos empíricos por demais utilizados.

1	1.471717 <sub>10</sub> -01
2	2.391540 <sub>10</sub> -01
3	3.500366 <sub>10</sub> -01
4	4.375894 <sub>10</sub> -01
5	4.978938 <sub>10</sub> -01
6	5.126895 <sub>10</sub> -01
7	4.792423 <sub>10</sub> -01
8	3.833235 <sub>10</sub> -01
9	2.058648 <sub>10</sub> -01
10	3.132088 <sub>10</sub> -01
11	3.850313 <sub>10</sub> -01
12	4.784620 <sub>10</sub> -01
13	5.661566 <sub>10</sub> -01
14	5.850544 <sub>10</sub> -01
15	5.729495 <sub>10</sub> -01
16	5.056335 <sub>10</sub> -01
17	2.484740 <sub>10</sub> -01
18	4.463585 <sub>10</sub> -01
19	5.279388 <sub>10</sub> -01
20	7.376151 <sub>10</sub> -01
21	7.039219 <sub>10</sub> -01
22	7.494738 <sub>10</sub> -01
23	9.127085 <sub>10</sub> -01
24	2.780551 <sub>10</sub> -01
25	3.576753 <sub>10</sub> -01
26	-1.354805 <sub>10</sub> -01
27	3.499912 <sub>10</sub> -01
28	7.838513 <sub>10</sub> -01
29	2.272612 <sub>10</sub> -01
30	4.418019 <sub>10</sub> -03
31	1.204646 <sub>10</sub> -02
32	4.276294 <sub>10</sub> -02
33	5.643313 <sub>10</sub> -01
34	2.385643 <sub>10</sub> -01
35	4.973306 <sub>10</sub> -02
36	9.932002 <sub>10</sub> -02
37	1.977518 <sub>10</sub> -01
38	1.191632 <sub>10</sub> -01
39	3.260982 <sub>10</sub> -02
40	9.670306 <sub>10</sub> -02
41	6.060398 <sub>10</sub> -02
42	7.094279 <sub>10</sub> -02
43	3.880212 <sub>10</sub> -02
44	4.313476 <sub>10</sub> -02
45	2.699244 <sub>10</sub> -02



46	1.2592204	10	02
47	9.1298232	10	02
48	1.188826	10	01
49	1.827051	10	11
50	6.755277	10	32
51	1.809835	10	11
52	2.625638	10	01
53	6.030435	10	02
54	1.479989	10	11
55	1.479572	10	11
56	3.369327	10	02
57	5.154355	10	13
58	2.474691	10	03
59	3.344727	10	02



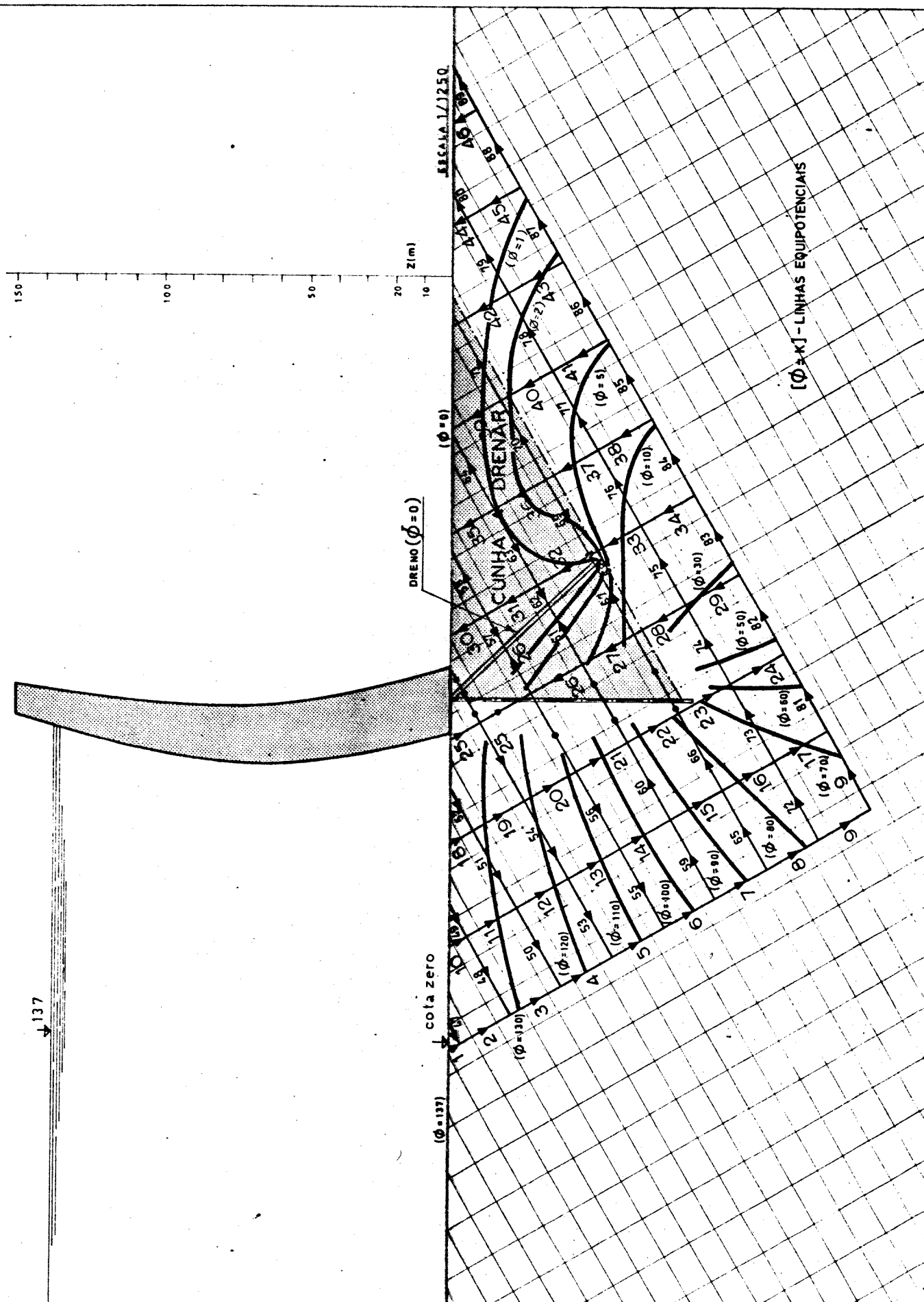
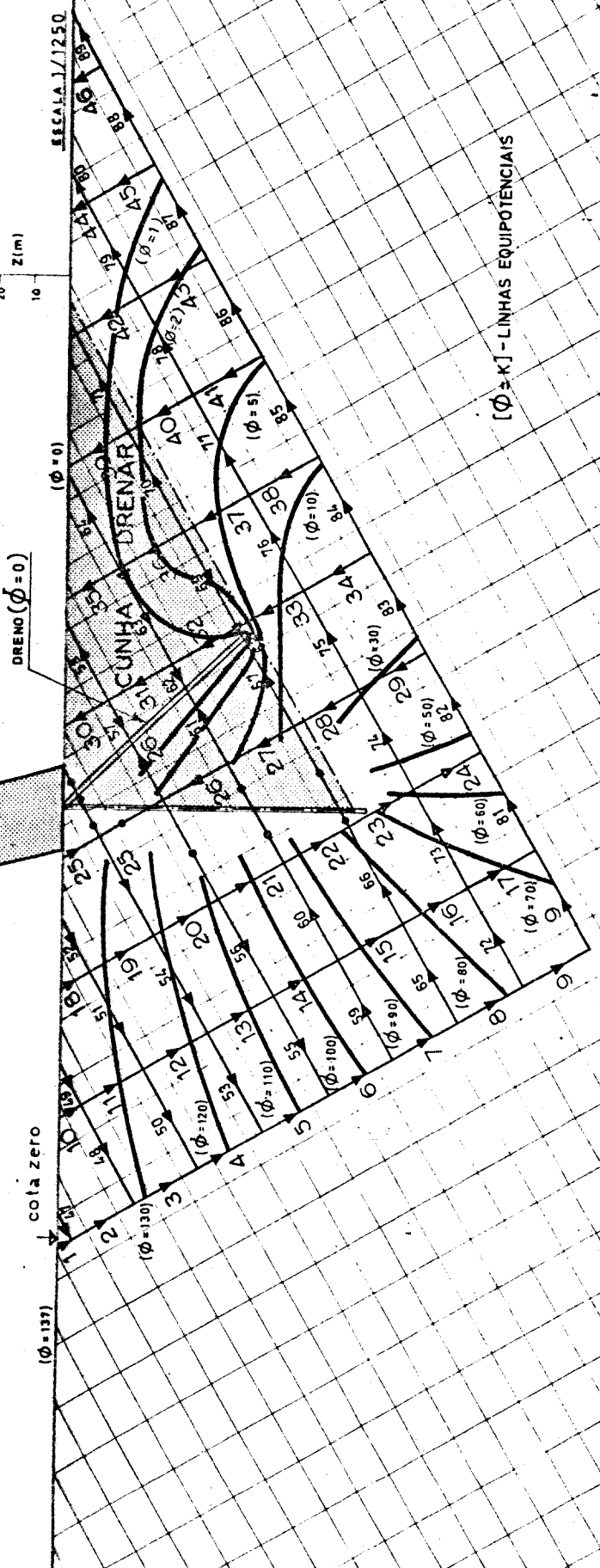
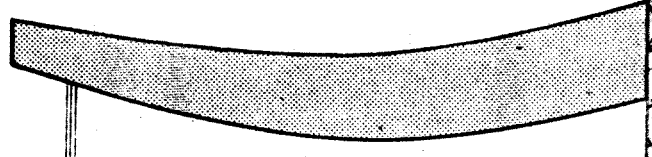
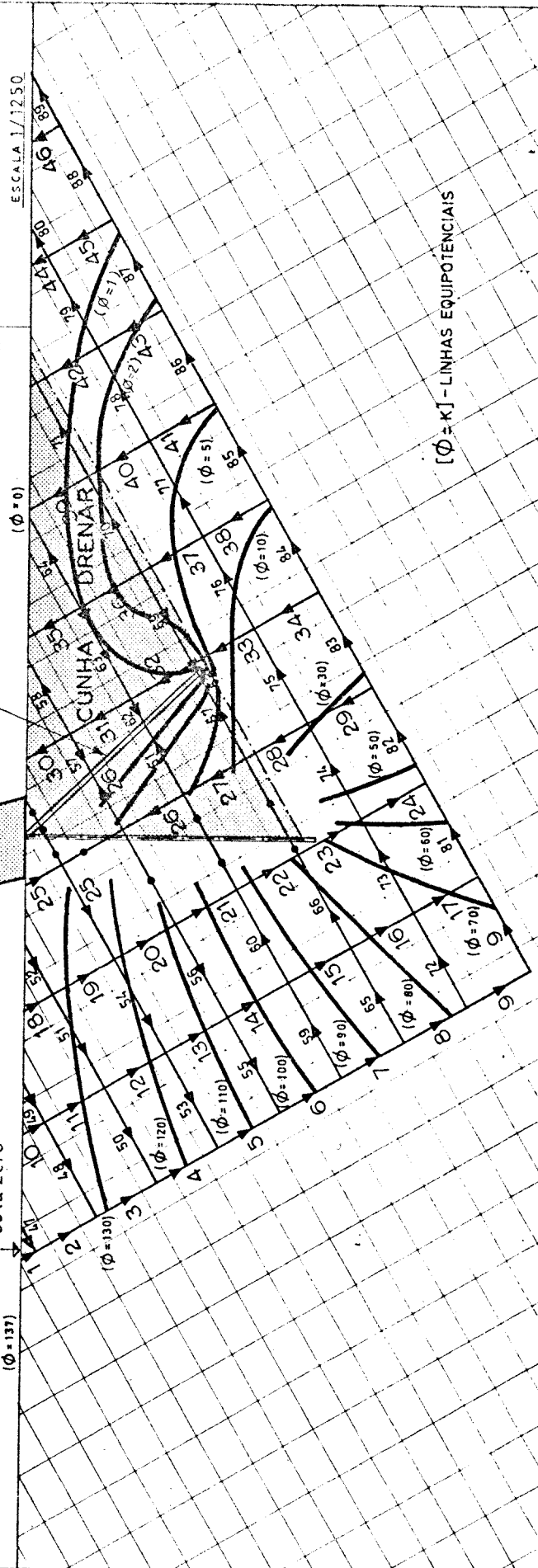
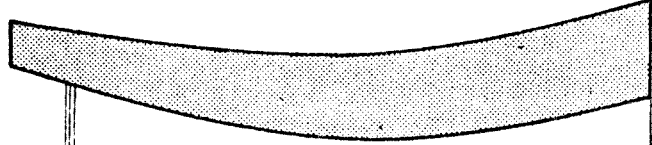


Fig. 67 - Esboço preliminar



137







## B - Escoamento através de um talude rochoso fissurado

### I. Considerações prévias

O problema agora apresentado corresponde à drenagem de um talude rochoso fissurado de grande envergadura esquematizado na figura 68 [35].

O maciço rochoso encontra-se dividido por dois sistemas de fissuras contínuas, planas e paralelas, de igual abertura, fazendo entre si um ângulo de  $90^{\circ}$ .

A orientação de um dos sistemas de fissuração é normal à direcção do talude rochoso.

A distância entre fissuras consecutivas é de 10 m.

O outro sistema de fissuração é caracterizado por uma equidistância entre fissuras de 25 m.

Distando 125 m do pé do talude, existe um acidente geológico onde está instalado um potencial constante ( $\phi = 70$  m).

Supõem-se conhecidos os elementos hidrogeológicos referentes ao meio rochoso.

O presente estudo será apresentado de uma forma bastante mais condensada do que a anterior análise referente à percolação através do maciço de fundação da barragem em cúpula.

A aplicação do método analítico é semelhante à levada a cabo no exemplo anterior

### II. Problema proposto

Este estudo teve como finalidade encontrar uma boa solução para o sistema drenante a utilizar no caso do talude rochoso apresentado.

O valor da abertura das fissuras é 0,0015 m (1,5 mm)

A rugosidade relativa das paredes é igual a 0,05.

O grau de separação foi considerado igual a 0,95.

### III. Distribuição do potencial hidráulico no talude rochoso fissurado

- Anisotropia no comportamento hidráulico -

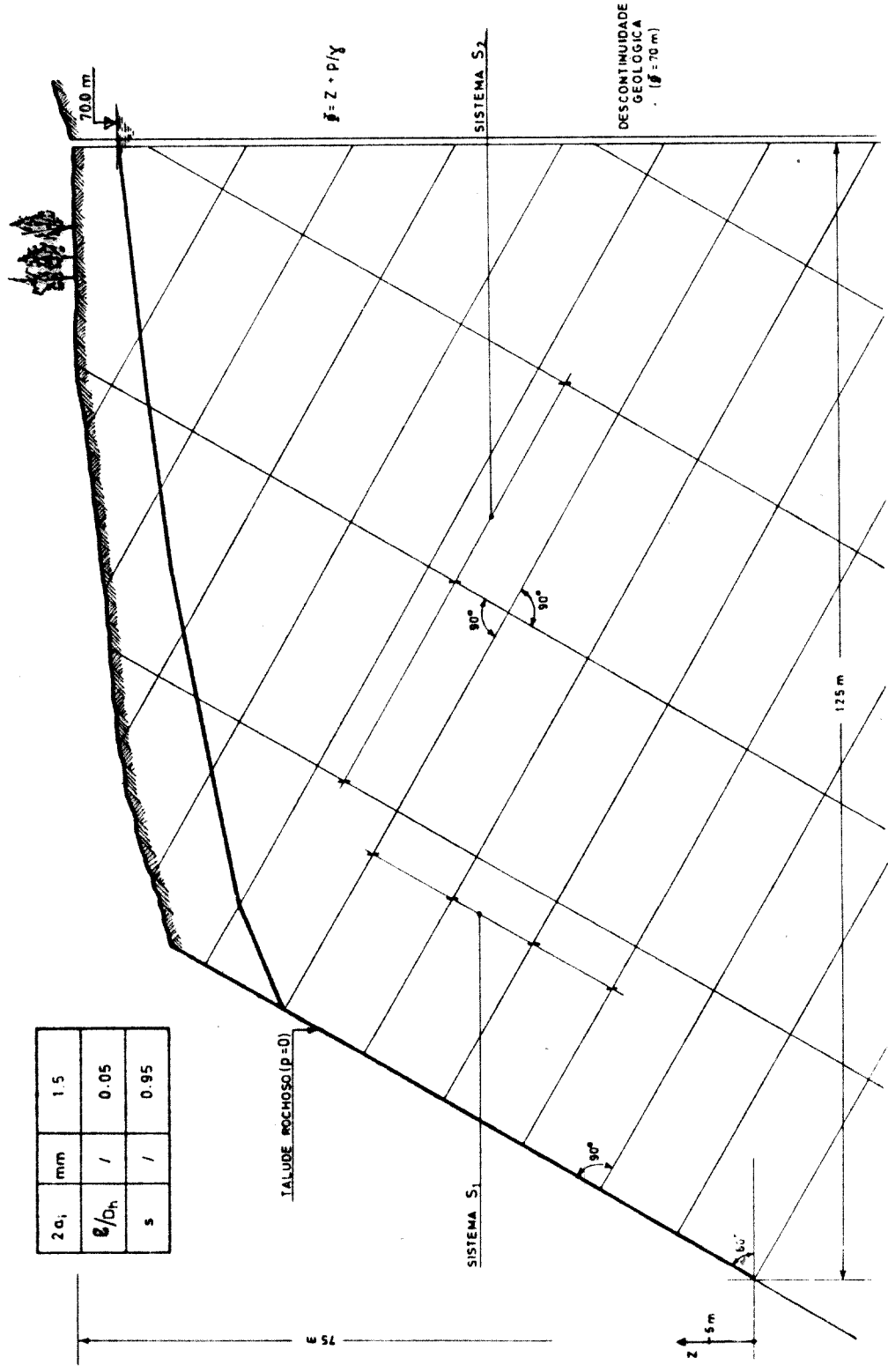


Fig. 68 - Esquema de um talude rochoso fissurado.

Utilizar-se-á nesta análise bidimensional do fâcies do escoamento o método analítico.

São condições fronteira a pendente do talude rochoso ( $\phi = z$ ), a descontinuidade geológica já anteriormente citada aquando da apresentação do problema (veja-se ponto I.), e uma provável linha de saturação.

O traçado desta linha fictícia poderia ser conseguido por meio de informações recolhidas através de uma campanha de sondagens.

Estabeleceram-se as equações dos nós, as equações das malhas e as equações de ligação entre as condições fronteira.

Não se tomou em linha de conta a ocorrência de fenómenos de turbulência.

Obteve-se um sistema linear de 104 equações. Para o resolver recorreu-se novamente ao cálculo automático, tendo sido usado o programa SELESCAL.

Utilizou-se o computador NCR-ELLIOT 4 100 da F.C.U.P..

Para limitar o número de incógnitas achou-se por bem admitir o fecho das fissuras elementares situadas nas zonas mais profundas do maciço rochoso.

Esta hipótese está bastante de acordo com a realidade pois, uma vez executada a escavação, verifica-se a tendência para aumentar o valor da abertura das fissuras situadas na zona da pendente, como resultado de fenómenos de descompressão.

Com os valores dos gradientes do potencial hidráulico activos nas diversas fissuras elementares, e, partindo do conhecimento do valor desse mesmo potencial em certos pontos, conseguiu-se definir a distribuição de  $\phi$  em toda a zona a estudar.

Na figura 69, pode observar-se o conjunto das linhas equipotenciais bem como os sentidos do escoamento obtidos com as hipóteses de cálculo que foram admitidas.

Note-se que não figuram todos os sentidos do escoamento referentes ao conjunto das fissuras consideradas no cálculo (em número total de 104).

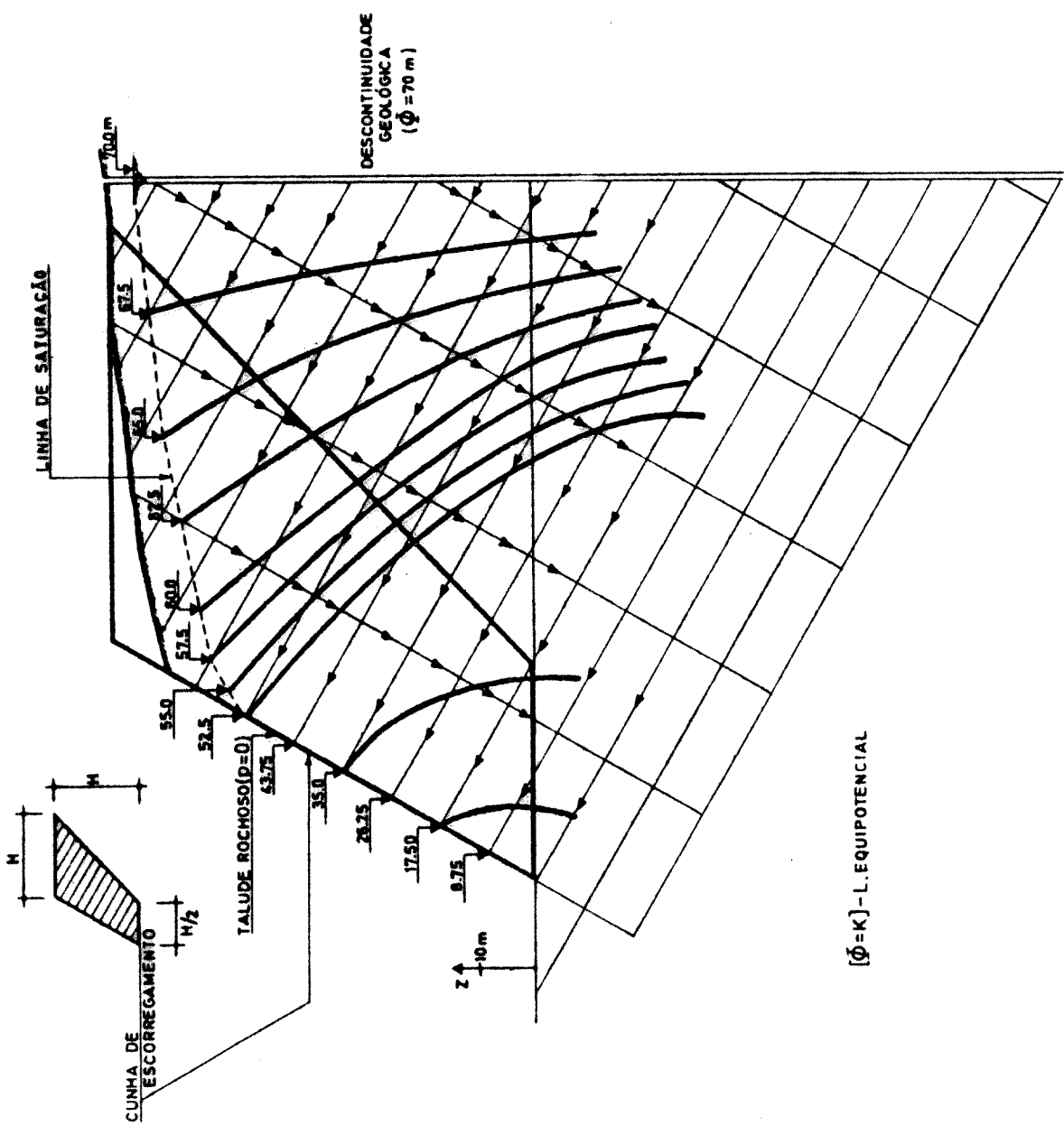


Fig. 69 - Fâcies do escoamento através do talude rochoso fissurado.

Na mesma figura está demarcada a zona trapezoidal que constitui a cunha de escorregamento do maciço, envolvente dos círculos possíveis de escorregamento.

O interesse na definição de tal zona será devidamente justificado em considerações posteriores.

#### IV. Critério de drenagem

Uma vez definida a distribuição do potencial hidráulico no talude, houve necessidade de decidir qual o critério de drenagem a empregar. Esse critério permitirá avaliar os méritos das várias soluções de forma a melhorar o processo drenante.

A área a ser drenada corresponde à cunha de escorregamento, que é normalmente desconhecida desde que não tenha havido um estudo prévio de estabilidade do maciço.

Para simplificar o problema, considera-se a zona trapezoidal assinalada na figura 69.

Normalmente, dentro das linhas da referida zona estão contidas as curvas de escorregamento obtidas pelos métodos clássicos da Mecânica dos Solos e das Rochas.

Qualquer que seja o ângulo que o talude faça com a horizontal, a área de drenagem será constante e valerá  $\frac{3}{4} H^2$ .

Como orientação deste estudo, considerar-se-á determinado sistema drenante como eficiente se, por seu intermédio, for conseguido um rebaixamento do nível freático que tenha como consequência aliviar a cunha de escorregamento das pressões inerentes ao escoamento.

#### V. Sistema de drenagem constituído por uma galeria paralela à superfície da encosta

Justifica-se a utilização deste processo de drenagem em face da envergadura do talude.

Embora a solução seja dispendiosa, ela é no entanto muito eficiente, devido ao facto da galeria ser paralela à superfície da encosta. Trata-se de um processo de drenagem natural.

No equacionamento do problema apenas se modificou o aspecto referente às condições fronteira. Há agora a considerar uma nova condição limite constituída pelo contorno da galeria, onde reina a pressão atmosférica (pressão zero em termos de pressão efectiva).

Estabeleceram-se ao todo 103 equações.

A localização da galeria foi objecto de várias tentativas no sentido de se encontrar uma melhor solução. Primeiramente foi situada abaixo da linha do pé do talude e bastante próxima deste. A eficiência da drenagem não satisfez. Situou-se em seguida numa zona mais afastada do referido ponto, agravando-se naturalmente o custo da solução. Simultaneamente, a cota do eixo da galeria foi aumentada. Como consequência desta nova localização, verificou-se um maior rebaixamento do nível freático.

Para não alongar demasiado a referência ao problema proposto, não se darão mais pormenores das tentativas citadas no que respeita à determinação dos diversos fâcies do escoamento.

O diâmetro da galeria foi de cerca de 2,5 m. Ora, o processo de abertura (a fogo) faz fissurar o maciço rochoso na zona envolvente da galeria num raio de cerca de dois diâmetros. Devido a isso, para efeitos de cálculo, tomou-se como diâmetro da galeria o valor 5 m.

A solução adoptada, utilizando apenas a galeria como processo de drenagem está exposta na figura 70.

Nem todas as fissuras elementares consideradas no cálculo estão assinaladas pelos correspondentes sentidos do escoamento.

Repare-se no aspecto que tomam as linhas equipotenciais e atente-se na possibilidade de melhoramento desta solução pela não consideração de escoamento, num segundo cálculo, ao longo das fissuras elementares assinaladas na figura (—●—).

Quanto às duas fissuras assinaladas (—◆—) poderão considerar-se, num novo equacionamento do problema, sentidos opostos.

Recorde-se o que foi dito sobre este assunto na parte final de 6.2.2.1..

A correcção referida não foi levada a efeito. Realmente nenhum outro equacionamento do problema foi efectuado devido ao facto de, com a solução da drenagem do talude por meio da galeria, não se ter conseguido sequer

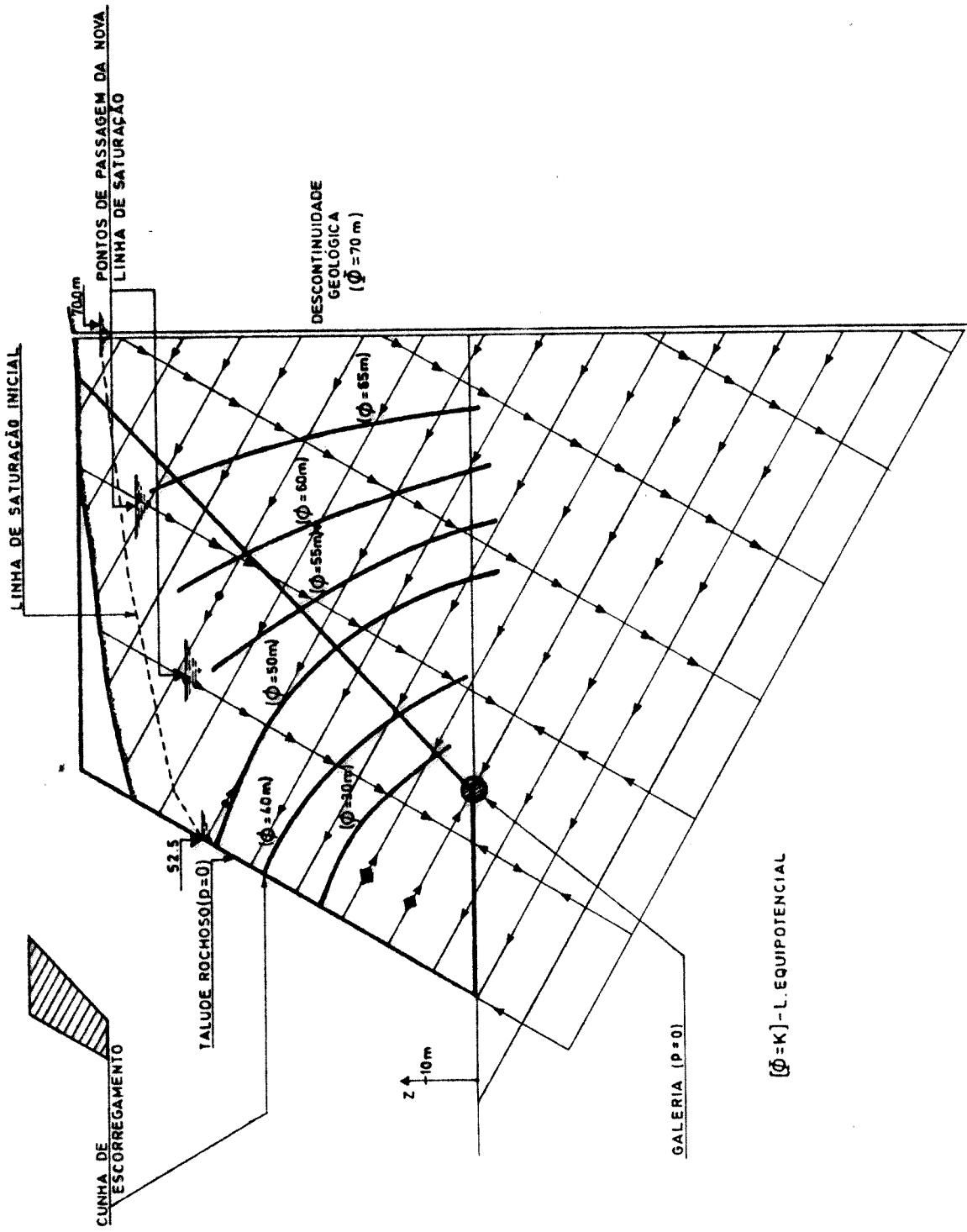


Fig. 70 - Drenagem do talude rochoso utilizando uma galeria paralela à superfície da encosta. Fácies do escoamento.



um razoável alívio da cunha de escorregamento.

Para além disso, a situação da galeria atravessada por uma fissura, não seria muito feliz do ponto de vista construtivo.

A presente solução representou apenas uma fase intermédia no trabalho de pesquisa do conveniente processo de drenagem. Aproveitou-se o programa já elaborado e a comodidade de operar pelo cálculo automático para se constatar da validade do processo de análise empregado na determinação do fâcies do escoamento.

#### VI. Processo de drenagem utilizando uma galeria e furos

Com vista a obter uma maior eficiência no sistema drenante, utilizou-se além da galeria um conjunto de furos dispostos em leque.

A galeria continuou a ser disposta paralelamente à encosta. Quanto aos furos, situaram-se radialmente na parte superior daquela, por forma a permitir que uma grande área drenante, envolvendo-a, abrangesse uma maior zona da cunha de escorregamento.

Como novas condições fronteira aparecem os furos ao longo dos quais reina a pressão atmosférica. Estabeleceram-se 87 equações ao todo.

Os furos são executados com o material rotativo utilizado na prospecção. Com vista a uma maior economia nos processos de furação, admite-se a sua execução com supermartelo.

A solução apresentada é consequente das conclusões obtidas até aqui. Localizou-se a galeria um pouco mais dentro na encosta (aproximadamente mais 10 m). A cota do eixo manteve-se (cota do pé do talude). O diâmetro utilizado foi ainda o mesmo.

Quanto ao comprimento dos furos procurou-se que não excedesse os 40 metros, sendo no entanto atingidos importantes "nós" do escoamento situados já bem no coração do maciço.

Na figura 71 pode observar-se a rede de escoamento correspondente ao caso que se tem vindo a referir.

Nem todas as fissuras elementares consideradas no cálculo estão assinaladas pelos correspondentes sentidos do escoamento.

Note-se o envolvimento do sistema drenante pelo conjunto das linhas

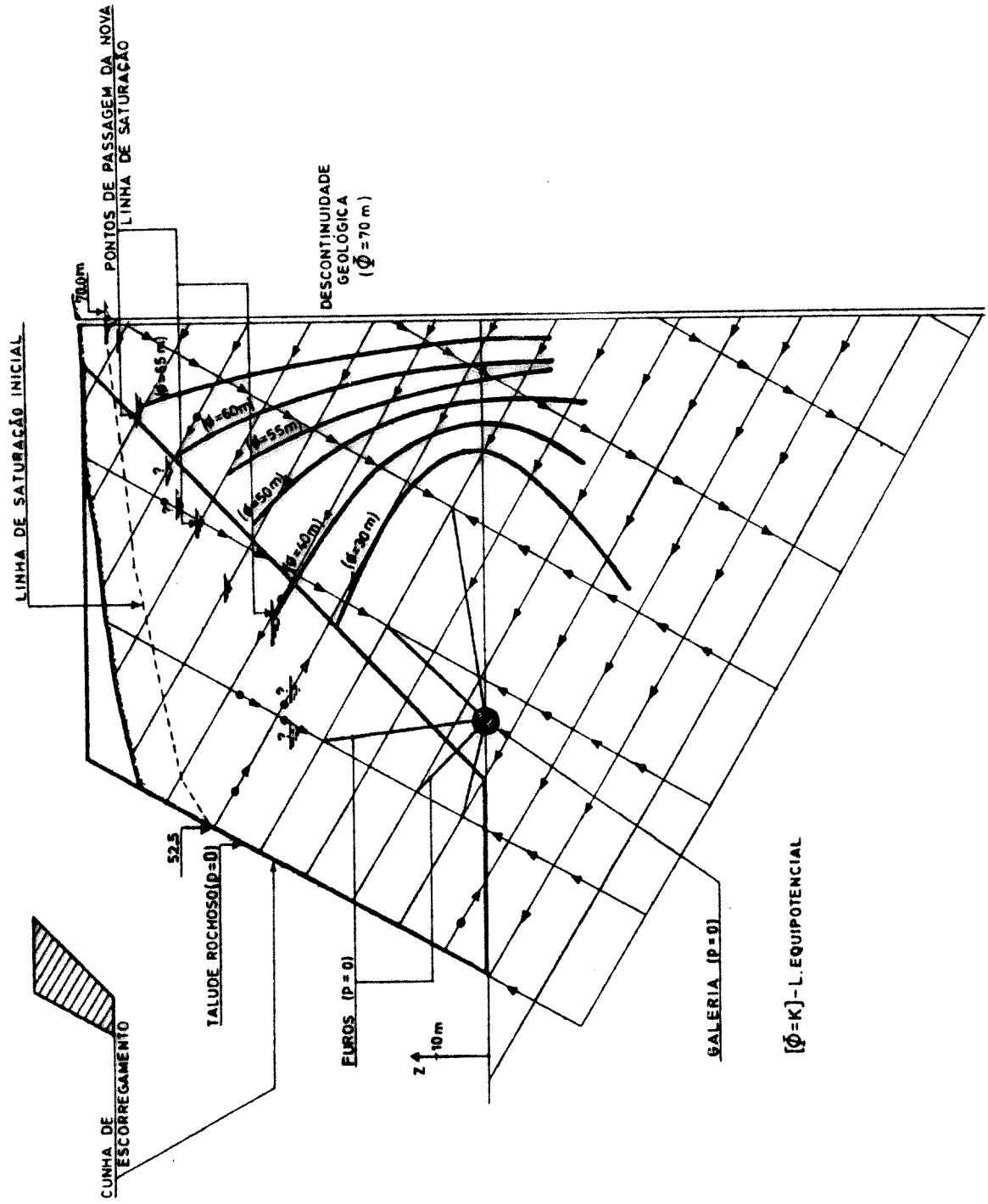


Fig. 71 - Drenagem do talude rochoso fissurado utilizando uma galeria e furos. Fácies do escoamento.

equipotenciais. O rebaixamento freático foi notável. A zona central do maço está completamente drenada. A zona superior está já bastante aliviada das pressões inerentes ao escoamento.

Verifica-se que nas fissuras assinaladas (—●—) não pode haver movimento de água. Tomando este facto em consideração, estabeleceu-se uma nova matriz correspondente a este novo modelo percolante. O número de equações estabelecidas foi de 80.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 72. Confirma-se a eficiência do sistema drenante. Mais uma vez não estão representados os escoamentos em todas as fissuras elementares consideradas no equacionamento do problema.

Pela hipotética nova linha de saturação pode ver-se que a cunha de escorregamento está quase completamente aliviada.

#### VII. Aperfeiçoamento da solução anterior

Tentando melhorar a eficiência do processo drenante, fez-se variar a direcção e o comprimento do dreno assinalado (—■—) na figura 73.

A intenção foi atingir uma zona importante do escoamento. Resultou um alívio no valor das pressões instaladas nos nós localizados na zona superior da cunha de escorregamento.

O aspecto da distribuição do potencial hidráulico é apresentado naquela figura.

No equacionamento do problema consideraram-se 79 equações, embora não estejam representados todos os sentidos dos escoamentos.

Constata-se um novo abaixamento sofrido pela hipotética linha de saturação. A percentagem da área por drenar é de valor reduzido.

Quanto à forma da linha de saturação deve frisar-se que é definida por uma sucessão de pontos muito ordenada, quer no respeito às intersecções com as diferentes linhas equipotenciais (admitindo-se um andamento uniforme destas), quer no respeitante aos nós realmente definidores da citada linha.

#### VII. Considerações finais

Face ao exposto, pode concluir-se que através de um estudo de

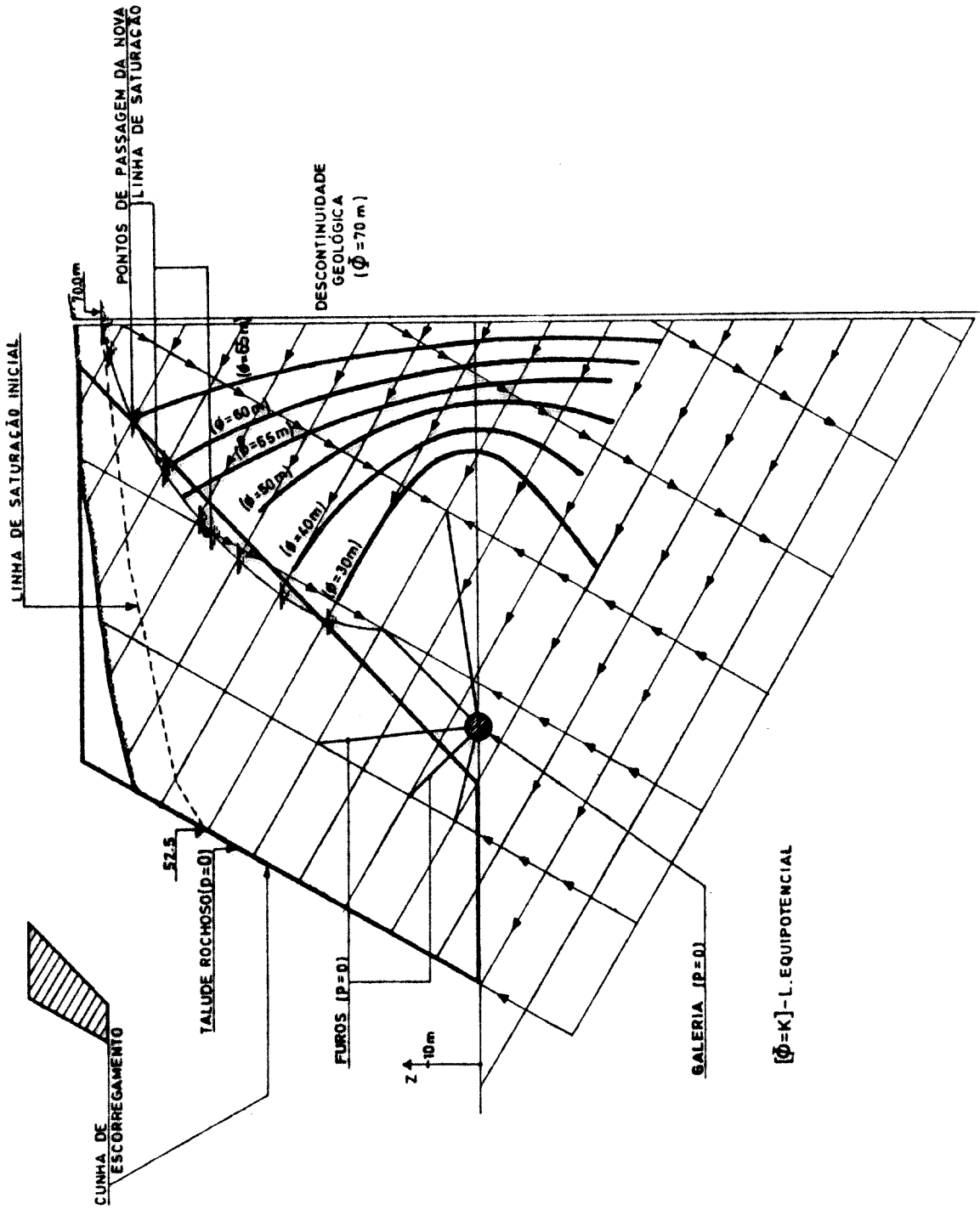


Fig. 72 - Drenagem do talude rochoso fissurado utilizando uma galeria e furos. Fácies do escoamento.

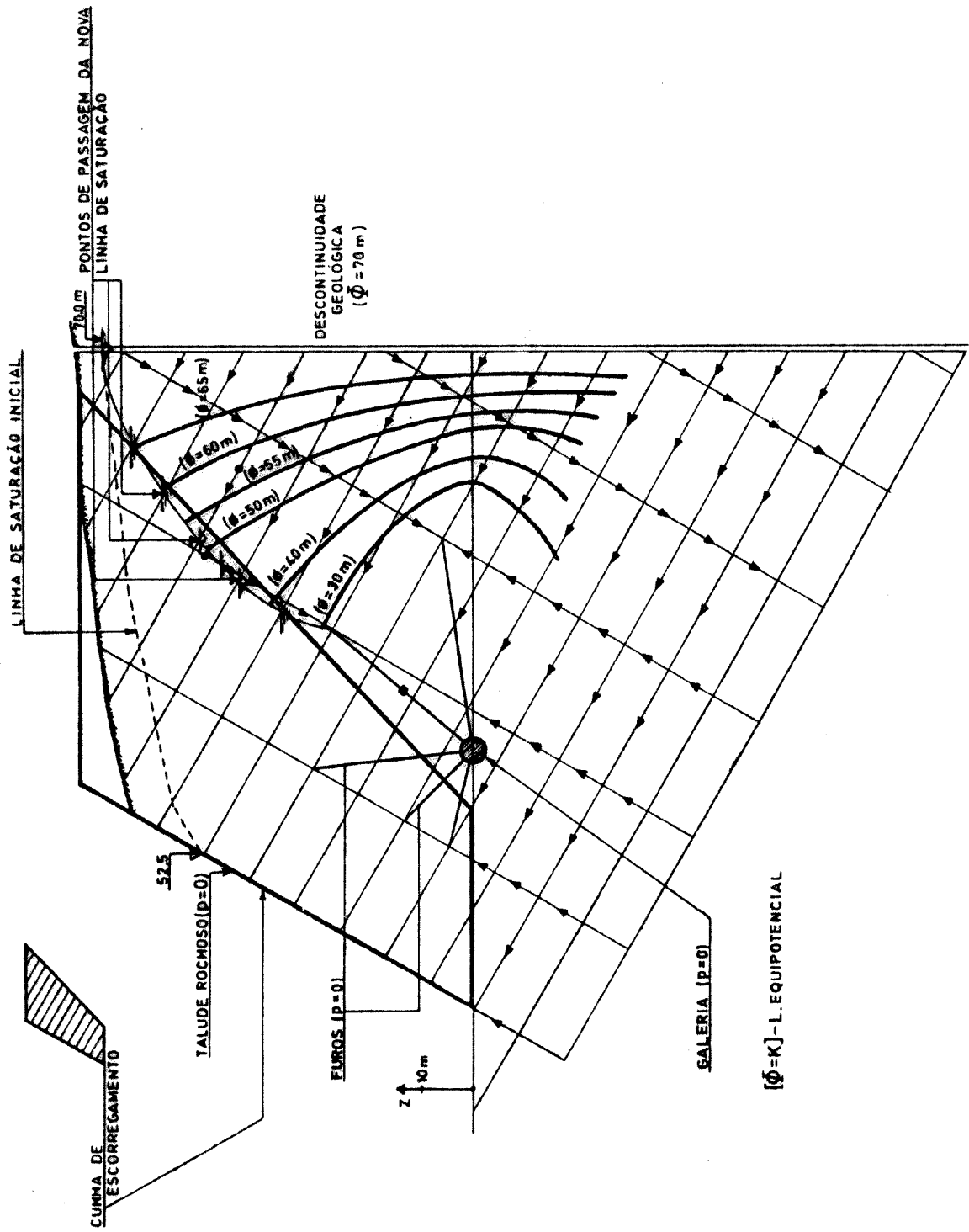


Fig. 73 - Drenagem do talude rochoso fissurado utilizando uma galeria e furos. Fácies do escoamento.

aproximações, se conseguiram ajustar convenientemente as características do leque dos furos, isto é, o seu comprimento e orientação.

É assim possível elaborar um estudo de drenagem a partir de um esquema teórico, em vez de se incorrer em processos nitidamente orientados por uma base de conhecimentos empíricos.

### 6.2.3. Processo Gráfico

Como foi citado em 6.2.1., o processo gráfico tem restrições à sua aplicação na resolução de casos concretos.

Não será pois um método geral, pelo que se apresenta apenas uma breve referência.

Constitui no entanto um processo simples e rápido de determinação do fâcies do escoamento.

Dois problemas planos podem ser analisados por intermédio do método gráfico, *de uma forma pouco habitual.*

- O maciço rochoso é caracterizado por um único sistema de fissuras principais.
- O maciço rochoso encontra-se dividido por dois sistemas de fissuras principais, ocupando zonas diversas do domínio do problema e intersectando-se numa região pouco extensa.

No âmbito do programa de trabalhos realizados pelo autor no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P., não foi levada a cabo nenhuma análise bidimensional por via gráfica, devido ao facto de se tratar de um método com restrições ao seu emprego.

Procurou-se antes desenvolver a aplicação do processo analítico a modelos planares de percolação.

O método gráfico aplica-se quer a escoamentos laminares, quer a escoamentos turbulentos.

As condições iniciais necessárias para um perfeito desenvolvimento do processo, são as mesmas que foram referidas na apresentação do estudo a duas dimensões (recorde-se o ponto 6.2.1.).

A - Determinação da distribuição do potencial hidráulico

num maciço rochoso dividido por um único sistema de fissuras contínuas, planas, paralelas e de abertura constante.

O valor da velocidade média em cada fissura é constante. Por consequência, verifica-se também a constância do valor do gradiente hidráulico activo.

Atente-se na figura 74. Em cada uma das fissuras a linha piezométrica é uma recta cuja equação é perfeitamente definida pelos valores do potencial hidráulico nas condições fronteira.

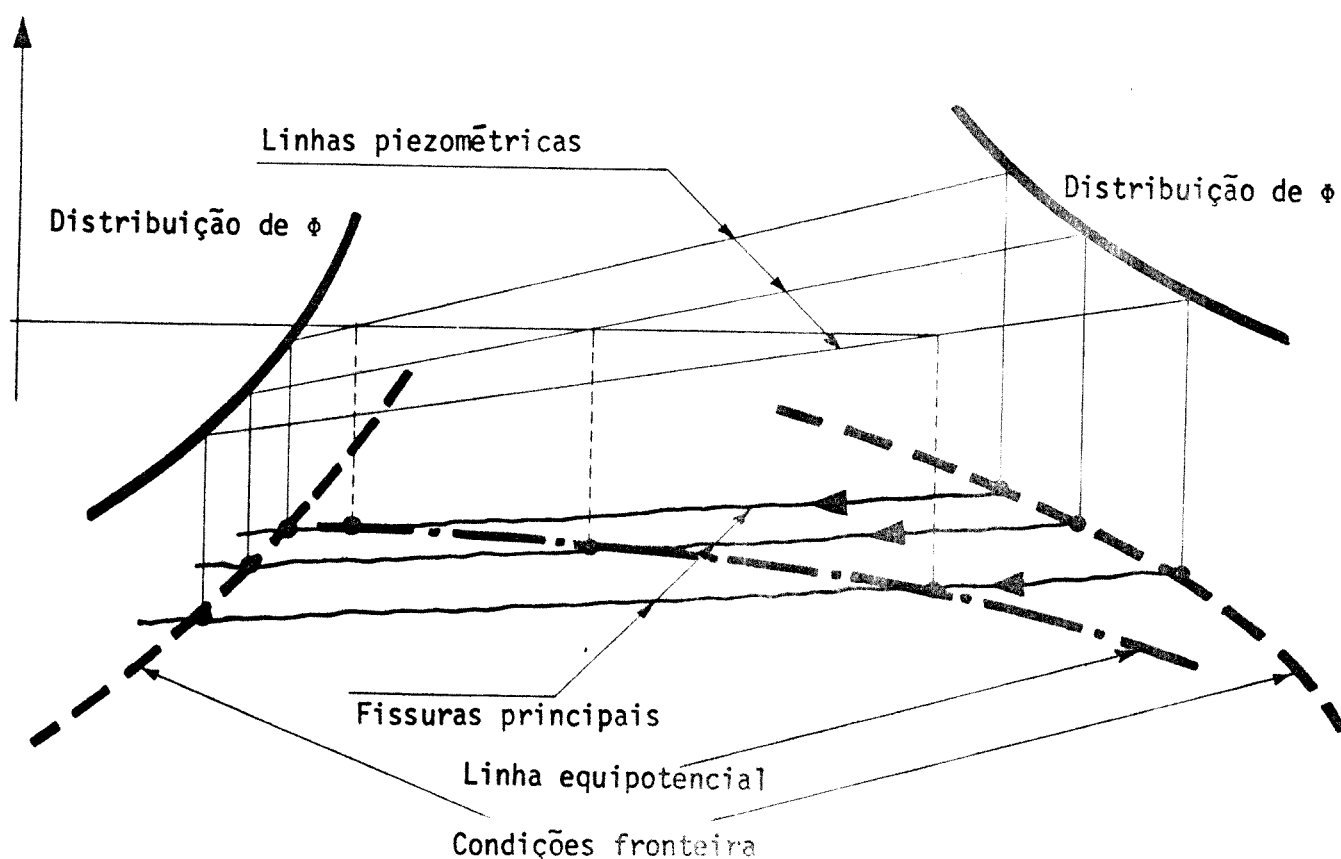


Fig. 74 - Processo Gráfico de definição do fâcies do escoamento através de um maciço rochoso caracterizado por um único sistema de fissuras principais.

Cada linha piezométrica <sup>corresponde</sup> (corresponde a cada uma das fissuras) pode então ser graduada nos sucessivos valores do potencial hidráulico.

Sendo assim, é fácil detectar ao longo do desenvolvimento de cada fissura os diversos valores do potencial  $\phi$  instalado. Realmente, por meio

de linhas de referência verticais, é possível marcar os diferentes pontos caracterizados pelos vários valores daquela grandeza.

Uma vez graduadas as várias linhas piezométricas nos diversos valores de  $\phi$ , pode ser traçado o conjunto das linhas equipotenciais.

B - Determinação da distribuição do potencial hidráulico num maciço rochoso dividido por dois sistemas de fissuração principais, ocupando zonas diversas do domínio do problema e intersectando-se numa região pouco extensa

Considere-se o esquema de fissuração característico do maciço de fundação da barragem representado na figura 75. [48]

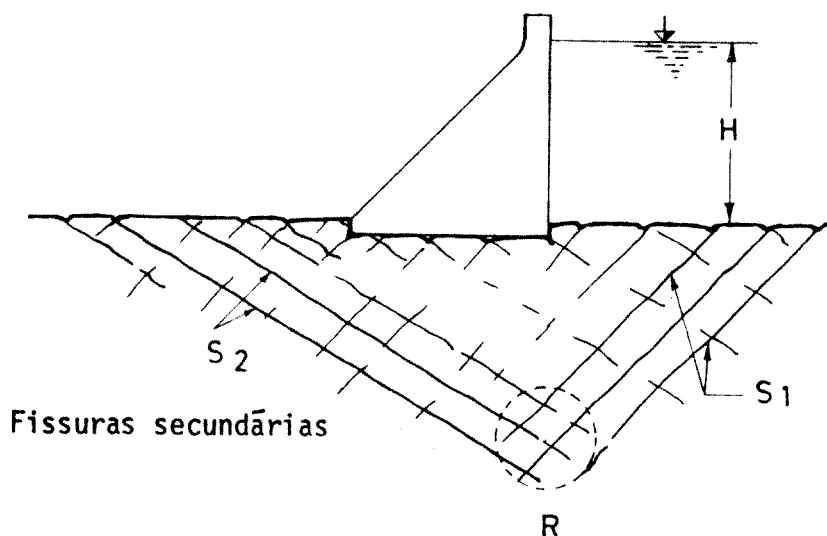


Fig. 75 - Processo Gráfico de definição do fâcies do escoamento no maciço rochoso de fundação de uma barragem, dividido por dois sistemas de fissuras principais  $S_1$  e  $S_2$ .

Trata-se de dois sistemas de fissuras contínuas, planas, paralelas, de abertura constante, de orientação diferente e intersectando-se numa zona do maciço de fundação de pequena extensão.

Essa zona está assinalada na mesma figura (região R).

O processo de determinação gráfica da distribuição do potencial hidráulico no domínio do problema é análogo ao exemplificado anteriormente.

Admite-se a independência dos pares de fissuras, pertencendo cada uma delas a um dos sistemas de fissuração.

Necessita-se em primeiro lugar de conhecer a variação do potencial hidráulico ao longo das fissuras de ambas as famílias.



Realmente, dadas as características geométricas das famílias das fissuras, e, dado o diverso comprimento dos troços correspondentes aos dois tipos de fissuração, a variação de  $\phi$  apresenta diferentes valores.

Observe-se a figura 76. A diferença entre os potenciais hidráulicos instalados nas duas condições limite é igual à perda de energia potencial (por unidade de peso de fluido escoado) verificada ao longo de duas fissuras (respectivamente pertencentes a cada um dos dois sistemas de fissuração), acrescida da perda de energia localizada no ponto de cruzamento dessas fissuras.

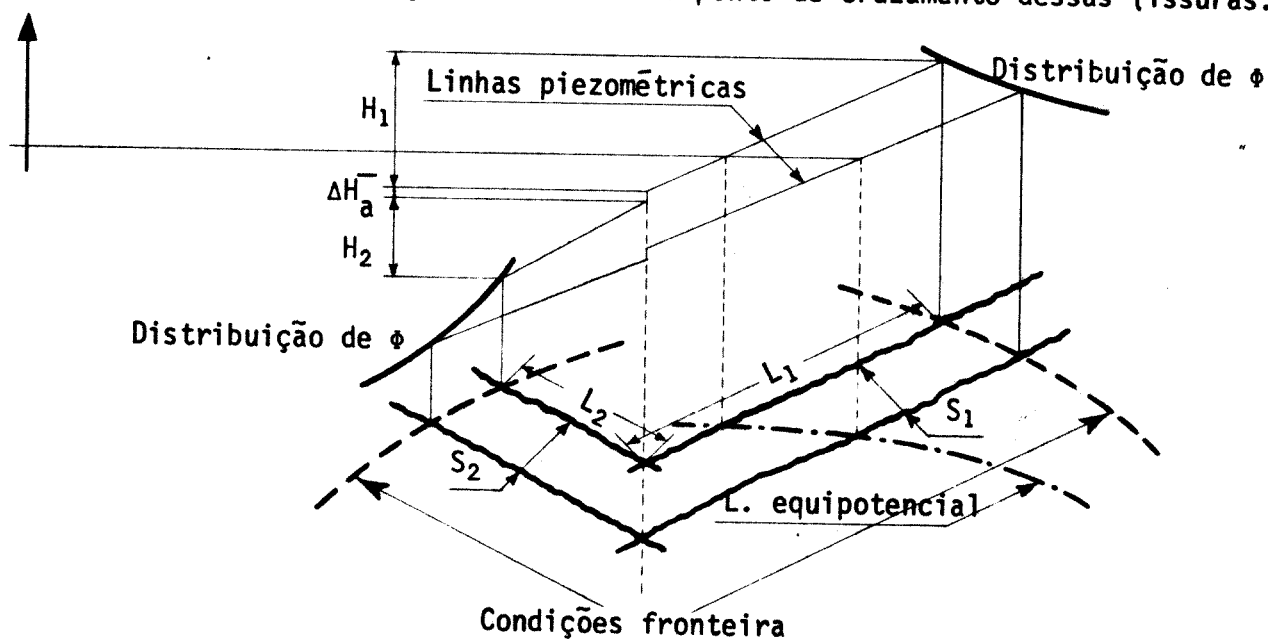


Fig. 76 - Definição do fâcies do escoamento através de um maciço dividido por dois sistemas de fissuras principais.

Recordando as noções de perda de energia por unidade de comprimento e de gradiente hidráulico activo nas fissuras (vejam-se os pontos 2.3.7.2. e 4.3.2.1.2.A.), conclui-se o conjunto seguinte de igualdades:

$$H_1 \propto L_1 \quad \therefore \quad H_1 = C_1 L_1$$

$$H_2 \propto L_2 \quad \therefore \quad H_2 = C_2 L_2$$

(6 - I)

Os coeficientes de proporcionalidade  $C_1$  e  $C_2$ , dependem do tipo de escoamento e das características das fissuras.

Quantificando o decréscimo da energia potencial total por unidade de peso do fluido que se escoar ( $z + \frac{p}{\gamma}$ ), virá

$$H = H_1 + H_2 + \Delta H_a^-$$

ou 
$$H = C_1 L_1 + C_2 L_2 + \Delta H_a^-$$

sendo  $\Delta H_a^-$  a perda localizada no ponto de cruzamento das duas fissuras condutoras.

Do conjunto de igualdades (6 - I) podem concluir-se as relações seguintes por transformações elementares das proporções estabelecidas

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{C_1 L_1}{C_2 L_2} \text{ ou } \frac{H_1}{C_1 L_1} = \frac{H_2}{C_2 L_2} = \frac{H_1 + H_2}{C_1 L_1 + C_2 L_2} =$$

$$= \frac{H - \Delta H_a^-}{C_1 L_1 + C_2 L_2}$$

Resolvendo o conjunto das últimas expressões, conseguem determinar-se as perdas de energia potencial por unidade de peso, verificadas nos dois troços do percurso referido.

Assim virá

$$H_1 = \frac{1}{1 + \frac{C_2 L_2}{C_1 L_1}} (H - \Delta H_a^-)$$

$$H_2 = \frac{1}{1 + \frac{C_1 L_1}{C_2 L_2}} (H - \Delta H_a^-)$$

Se as características geométricas das fissuras, pertencentes a cada um dos dois sistemas de fissuração, forem as mesmas, resultará a igualdade entre os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$ , tomando as relações anteriores a forma seguinte

$$H_1 = \frac{H - \Delta H_a^-}{1 + \frac{L_2}{L_1}} \quad H_2 = \frac{H - \Delta H_a^-}{1 + \frac{L_1}{L_2}}$$

De acordo com o exposto no ponto 6.2.2.1., pode o valor de  $\Delta H_a^-$  ser desprezado face à grandeza das variações do potencial hidráulico em jogo.

Devido a este facto, as expressões anteriores ainda se simplificam mais.

Uma vez na posse dos valores de  $H_1$  e de  $H_2$ , empregando um processo semelhante ao segundo no tratamento do problema anterior, podem traçar-se as linhas equipotenciais referentes ao domínio percolante em estudo.

A presente aplicação do processo gráfico da determinação do fâcies do escoamento não poderia ser utilizada se a região de intersecção das diferentes fissuras tivesse uma certa dimensão, pois, nesse caso, não seria verdadeira a independência do escoamento nas várias fissuras que agora foi admitida.

### 6.3. ESTUDO A TRÊS DIMENSÕES DA DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL HIDRÁULICO

#### 6.3.1. Generalidades

O modelo percolante real, caracterizado por importante anisotropia no comportamento hidráulico, requer sempre um estudo tridimensional.

Casos há contudo, em que a resolução de esquemas planares de percolação pode levar a conclusões muito aproximadas das reais.

Embora possa parecer que no domínio da Hidráulica das Rochas, a teoria do potencial de velocidades não tem a mesma importância que a caracteriza no equacionamento do escoamento através dos meios porosos, isso não é verdadeiro.

Efectivamente, constatou-se a dado passo desta Dissertação, que o escoamento no plano da fissura é caracterizado pela existência de um potencial de velocidades.

Logo no início do capítulo 4, aquando da apresentação das bases teóricas do escoamento laminar em fissuras pouco rugosas, concluiu-se a existência de um potencial de velocidades cuja expressão é

$$\phi = - \frac{g (2a_i)^2}{12\nu} \left( z + \frac{p}{\gamma} \right)$$

Trata-se de uma grandeza escalar definida no domínio do escoamento e igual ao produto da permeabilidade da fissura (qualquer que seja o tipo desta) pelo valor do potencial hidráulico ( $\phi$ ).

Recorde-se (veja-se o ponto 6.2.2.1.) que a ocorrência de fenómenos de turbulência pouco afecta a distribuição do potencial  $\phi$ .

Se em vez de raciocinar ao nível da fissura, se considerar o efeito

global de um sistema de fissuração (atente-se no ponto 4.6.), poderá proceder-se da mesma forma.

Encara-se assim a resolução do problema a três dimensões tomando por base estudos bidimensionais.

### 6.3.2. Métodos Empregados para a Análise Tridimensional

Todos os métodos de estudo tridimensional do fâcies do escoamento, têm por base a verificação da equação de LAPLACE, isto é  $\nabla^2 \phi = 0$ , *mas fissuras elementares.*

Na realidade, por definição de potencial cinético tem-se

$$\vec{U} = \text{grad } \phi$$

Escoando-se um fluido incompressível ( $\text{div } \vec{U} = 0$ ), conclui-se

$$\text{div grad } \phi = \nabla^2 \phi = 0$$

Os métodos da análise da equação  $\nabla^2 \phi = 0$  são numerosos.

Assim, podem considerar-se métodos matemáticos, métodos numéricos, métodos gráficos e métodos analógicos.

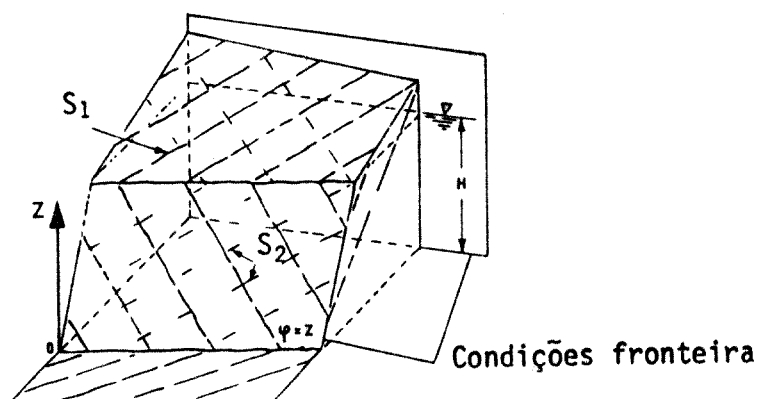
Na sua aplicação esbarra-se muitas vezes com a dificuldade da determinação das condições limite em cada escoamento parcelar.

### 6.3.3. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por um sō Sistema de Fissuração

Se o maciço rochoso estiver dividido por um sō sistema de fissuras contínuas, planas, paralelas e de abertura constante, a análise da distribuição do potencial hidráulico resume-se à resolução de sucessivos esquemas planares de percolação respeitantes às diversas fissuras.

Note-se que a orientação das fissuras é suposta qualquer. Atente-se na figura 77 [48].

Fig. 77 - Modelo Percolante Tridimensional. Caso de um Maciço dividido por um Sistema de Fissuração.



$S_1$  - Sistema de fissuras principais  
 $S_2$  - Sistema de fissuras secundárias

O escoamento é bidimensional, podendo pois ser estudado no plano da fissura conforme se referiu. No entanto, a distribuição do potencial hidráulico não é susceptível de ser analisada a duas dimensões. Realmente, o movimento no plano das fissuras não se desenvolve ao longo da sua linha de maior declive e, desse modo, não tem as mesmas características em cada plano vertical perpendicular às fissuras. (Compare-se esta situação com a que foi citada em 6.2.1.).

Verifica-se assim uma independência entre os vários esquemas percolantes referentes às diferentes fissuras.

Dispondo dos diversos valores do potencial hidráulico nos planos das fissuras, pode construir-se a distribuição espacial daquele escalar no meio percolante.

#### 6.3.4. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por dois Sistemas de Fissuração

##### 6.3.4.1. Hipótese das duas famílias de fissuras serem aproximadamente verticais

No presente esquema de percolação os dois sistemas de fissuração são verticais, intersectando-se assim as fissuras correspondentes segundo rectas verticais.

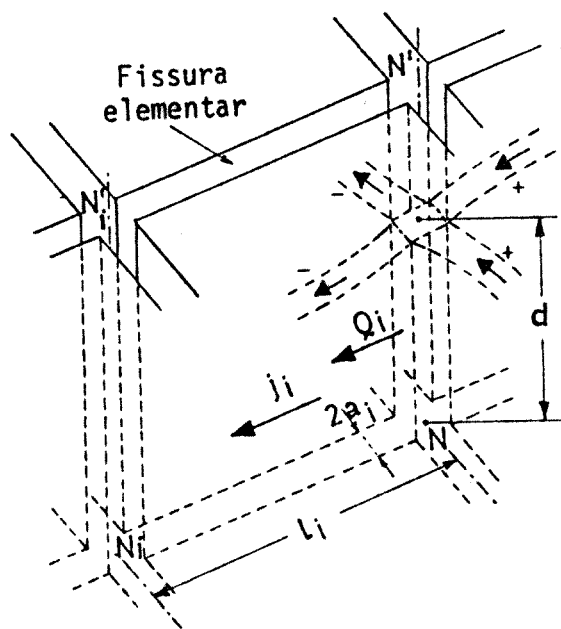
O problema da distribuição do potencial hidráulico no domínio percolante reveste características tridimensionais.

Compare-se este caso com o apresentado em 6.2.1., no qual o meio rochoso se encontrava dividido por dois sistemas de fissuras que se intersecta-

vam segundo rectas horizontais.

Observe-se a figura 78. Nela estão esquematizadas as características geométricas do meio rochoso fissurado.

Fig. 78 - Modelo Percolante Tridimensional. Caso de um Maciço dividido por dois Sistemas de Fissuração aproximadamente verticais.



Notam-se perfeitamente as intersecções verticais das fissuras respeitantes a ambos os sistemas de fissuração principais.

LOUIS [45] afirma que esta forma de fissuração aparece frequentemente em vários problemas concretos.

Na realidade, no caso dos maciços sedimentares, estes aparecem por vezes divididos por duas famílias de fissuras verticais, ocorrendo ainda juntas de estratificação horizontais que correspondem a um terceiro sistema, normal aos dois anteriores, mas de características percolantes secundárias.

Dado que o domínio de intersecção das fissuras pertencentes a ambos os sistemas de fissuração é contínuo (portanto muito extenso), ter-se-á de entrar em linha de conta na definição do fâcies do escoamento, com a respectiva interacção hidráulica.

Considerações de continuidade estabelecidas na intersecção das diversas fissuras constituem a base teórica do processo de determinação da distribuição do potencial hidráulico.

Se forem analisadas atentamente as características geométricas do domínio em estudo, facilmente se constatará que, sendo a sua dimensão verti-

cal pequena quando comparada com a sua extensão horizontal, o problema da distribuição do potencial  $\phi$  pode ser tratado a duas dimensões, embora, como é evidente, seja de índole puramente tridimensional.

A distribuição do potencial hidráulico nas intersecções das várias fissuras elementares constitui o conjunto de incógnitas do problema em questão.

Quanto ao tipo de escoamento, poderá verificar-se quer em pressão, quer em superfície livre. As duas situações estão apresentadas na figura 79.

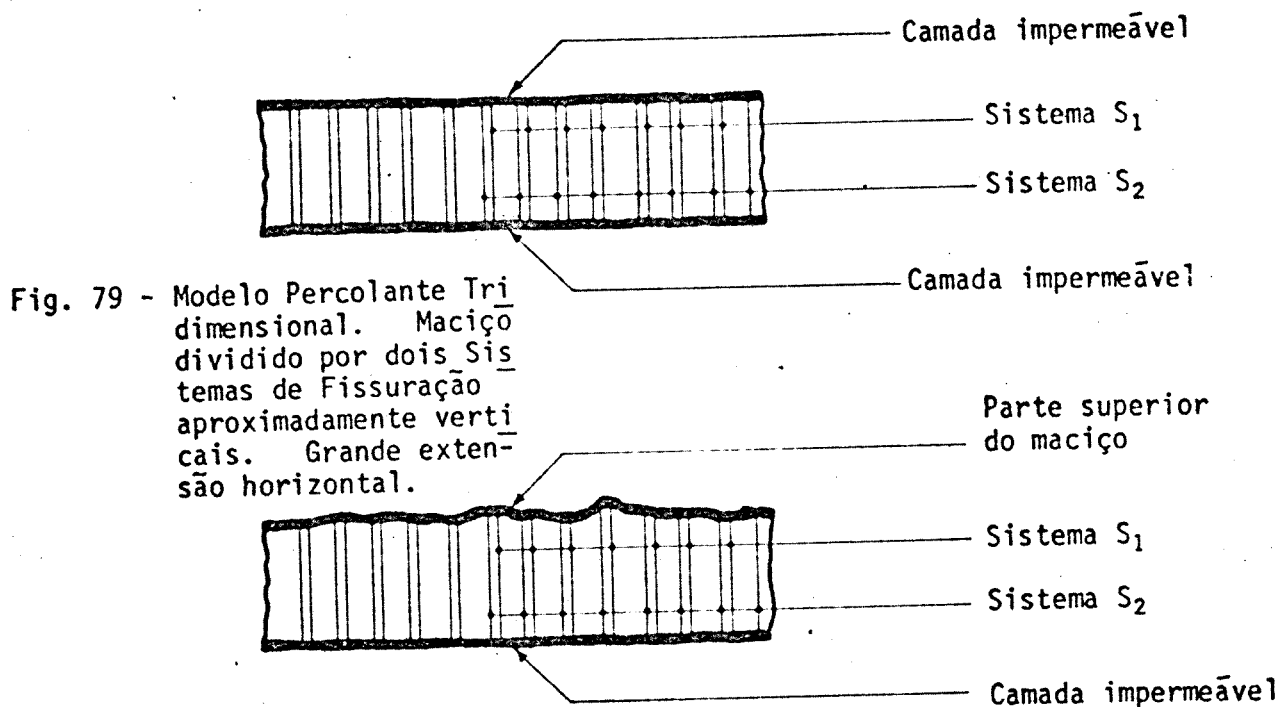


Fig. 79 - Modelo Percolante Tri dimensional. Maciço dividido por dois Sistemas de Fissuração aproximadamente verticais. Grande extensão horizontal.

No equacionamento do problema estabeleceram-se, como se referiu, equações de continuidade em todos os nós do domínio do problema. Designar-se-ão por "nós" as intersecções de fissuras elementares.

As equações nos nós são análogas às referidas quando da apresentação do processo analítico de determinação do fâcies do escoamento para esquemas planares (reveja-se o ponto 6.2.2.1.).

Evidentemente que os caudais escoados nas fissuras já não se referem à unidade de comprimento, mas sim à totalidade da altura das fissuras.

São relações da forma seguinte, estabelecidas em cada nó considerado

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0$$

sendo

$Q_i$  - caudal escoado numa fissura elementar, afluente ou efluente ao n $\bar{o}$

$i$  - índice referente à fissura

$n$  - número de fissuras elementares concorrentes no n $\bar{o}$ .

O somatório que aparece nestas equações é um somatório algébrico, pois a priori deverá ser convencionado um sentido positivo para o escoamento. Admitem-se como positivos os caudais que se dirigem para o n $\bar{o}$ .

Como o número de incógnitas (valores do potencial  $\phi$  instalado em cada n $\bar{o}$ ) é igual ao número de equações (equações nos n $\bar{o}$ s), o problema é em princípio resolúvel desta forma.

No entanto, apenas aparentemente o problema está resolvido pois na realidade somente está equacionado.

Efectivamente, se forem examinadas as condições do escoamento ao longo das fissuras elementares, de imediato se constata características do escoamento bastante diferentes das que foram consideradas no estabelecimento das leis apresentadas no capítulo 4.

Assim, e como atrás se disse, o movimento no plano das fissuras não se verifica ao longo da linha de maior declive desse plano.

Evidentemente que se poderia desenvolver uma ampla análise com vista à determinação das leis do movimento em tais condições, e, estabelecer de seguida, as equações nas intersecções das fissuras elementares por condições de continuidade.

Não é contudo este procedimento que é adoptado na resolução de casos concretos da determinação do fâcies do escoamento.

Recorde-se o que foi citado na parte final do capítulo 4, referente a sistemas de fissuração.

Nessa altura considerou-se, pela primeira vez no decorrer da presente Tese, o efeito global de uma família de fissuras contínuas, planas e paralelas. Foi definida a permeabilidade hidráulica do sistema de fissuração. Foi ainda referido o facto de, hoje em dia, com os progressos das técnicas de prospecção, ser possível determinar directamente o efeito global de todos os elementos hidrogeológicos de um dado maciço fissurado, sem necessidade de um perfeito conhecimento da geometria do domínio considerado.



O valor da permeabilidade hidráulica do sistema de fissuração é definido por medições "in situ", e não por meio de relações entre a citada permeabilidade e as características hidráulicas das fissuras em si.

Como complemento ao presente capítulo, será apresentado no seu final um número dedicado à determinação deste parâmetro hidráulico do maciço rochoso.

Voltando ao problema da determinação dos valores do potencial hidráulico instalados nas intersecções das fissuras elementares, é então possível escrever as equações de continuidade nessas zonas. Essas relações são da forma seguinte

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n K_i \frac{\phi_i - \phi}{\ell_i} d b_i = 0 \quad \therefore \quad \sum_{i=1}^n K_i \frac{\phi_i - \phi}{\ell_i} b_i = 0$$

em que o significado dos símbolos é o que se segue

- $K_i$  - permeabilidade do sistema de fissuração a que pertence a fissura elementar de comprimento  $\ell_i$ , considerada na presente análise
- $\ell_i$  - comprimento da fissura elementar (genérica) que concorre em determinada intersecção (ou não) (\*)
- $\phi_i$  - valor do potencial hidráulico instalado em determinada intersecção que dista da considerada de um comprimento igual a  $\ell_i$
- $\phi$  - valor do potencial hidráulico instalado na intersecção considerada (valor médio)
- $d$  - altura <sup>de água</sup> piezométrica no nó considerado
- $b_i$  - dimensão da malha correspondente ao modelo percolante concebido para o tratamento do problema - distância entre fissuras consecutivas pertencentes ao sistema de fissuração (\*).

Atente-se de novo na figura 78 para uma melhor compreensão do significado deste conjunto de grandezas.

A forma de resolver o problema aplica-se quer a escoamentos nas fissuras efectuados com superfície livre, quer a escoamentos em pressão.

Dada a índole das equações estabelecidas nas intersecções (ou nós),

---

(\*) Adiante (ponto 6.3.5.1.) será generalizada a concepção do modelo percolante imaginado para a definição do fácies do escoamento.

facilmente se imagina a simplicidade no tratamento da questão por meio do cálculo automático.

Suponha-se agora uma nova situação nas condições do problema: a dimensão vertical do domínio percolante não é desprezável face à extensão em planta, tal como o havia sido no caso anteriormente equacionado.

O valor do potencial hidráulico não mais poderá ser considerado constante ao longo das várias intersecções.

A questão da distribuição do potencial hidráulico no domínio considerado passa a necessitar de um análise mais detalhada visto que se trata de uma distribuição espacial mais complexa.

O número de incógnitas aumenta imenso pois é igual ao número referente à situação anterior multiplicado pela quantidade de camadas horizontais consideradas.

No caso do modelo percolante admitir superfície de saturação, a determinação desta será levada a cabo por meio de aproximações sucessivas.

#### 6.3.4.2. Hipótese das duas famílias de fissuras desenvolvendo-se em regiões diversas, se intersectarem numa zona pouco extensa

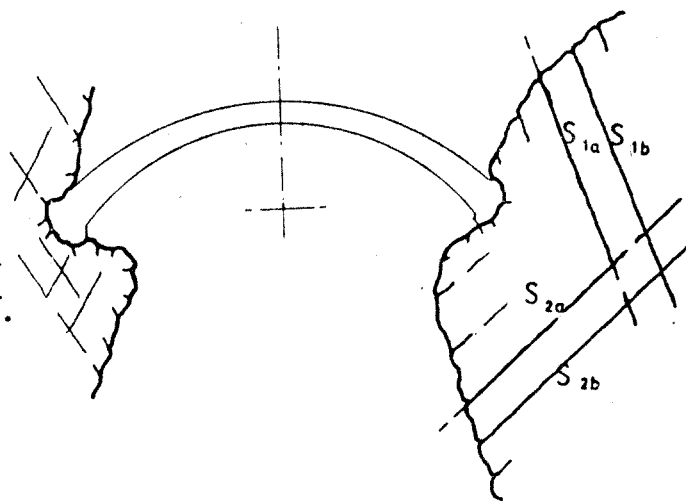
Trata-se de um modelo percolante semelhante ao estudado no ponto 6.2.3.B.. No entanto, no presente caso, a distribuição do potencial hidráulico é tridimensional.

Admite-se também a independência de pares de fissuras (formados por uma fissura de cada sistema), não se entrando em linha de conta com a influência (sob o ponto de vista hidráulico) das várias fissuras entre si.

Esta situação muito particular foi tratada por LOUIS [43] que a ilustrou com o estudo do fâcies do escoamento na região dos apoios da barragem esquematizada na figura 80. Nela se podem observar as orientações dos dois sistemas de fissuras.

Atendendo ao escoamento efectuado ao longo de cada par de fissuras, e, admitindo que aquelas vão apresentando em profundidade um valor da abertura cada vez menor, efectua-se o rebatimento de uma delas sobre o plano da outra. Este rebatimento é levado a cabo rodando um dos planos em torno da recta de intersecção dos dois planos das fissuras.

Fig. 80 - Modelo Percolante Tridimensional. Caso de um Maciço dividido por dois Sistemas de Fissuração aproximadamente verticais, intersectando-se numa zona pouco extensa.



Podem ocorrer duas situações distintas, conforme a intersecção dos pares de fissuras seja ou não uma recta vertical.

No caso em que os dois sistemas de fissuração são verticais, o problema resume-se a determinar o conjunto de linhas de corrente e equipotenciais referentes ao escoamento que se verifica no plano das fissuras.

Não são consideradas as perdas de energia devidas à mudança de sentido do escoamento.

Na hipótese das famílias de fissuras não se intersectarem segundo rectas verticais, o raciocínio é semelhante, devendo no entanto fazer-se um pequeno artifício que consiste em admitir, para a determinação do valor do potencial hidráulico ao longo da intersecção das duas fissuras, que a perda de carga se reparte proporcionalmente aos percursos do escoamento, conservando-se constante a abertura das fissuras.

O que se acabou de referir resume-se ao seguinte

$$\bar{H} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} H$$

sendo

H - valor da carga hidráulica a montante (potencial de montante).

$\bar{H}$  - valor de carga hidráulica na intersecção do par de fissuras

- $L_1$  - comprimento de percolação no plano da fissura de montante, do par em questão
- $L_2$  - comprimento de percolação no plano da fissuras de jusante, do par em questão.

Se eventualmente o valor da abertura das fissuras de ambas as famílias não fosse o mesmo, poder-se-ia raciocinar analogamente ao que foi feito quando da análise de 6.2.3.B., no que diz respeito à quantificação do valor do potencial na intersecção das duas fissuras.

Referiu-se no início desta exposição que cada conjunto de duas fissuras era estudado isoladamente sob o ponto de vista hidráulico.

Pois bem, para se obter a distribuição do potencial hidráulico no domínio rochoso em questão (distribuição tridimensional), dispor-se-ão no espaço todos os valores de  $\phi$  referentes aos pares de fissuras independentes considerados. Esses valores são resultantes do traçado das diversas redes de escoamento nos planos obtidos pelo rebatimento exposto.

Evidentemente que o processo que acaba de ser indicado somente estará correcto na hipótese do movimento ser laminar.

Ocorrendo fenómenos de turbulência hidráulica, os resultados obtidos podem ainda ser tomados como válidos na medida em que, conforme já foi citado, o desconhecimento da geometria da fissuração pesa muito mais desfavoravelmente numa análise perfeita do modelo percolante do que a não consideração de fenómenos de turbulência.

### 6.3.5. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por três Sistemas de Fissuração

#### 6.3.5.1. Hipótese das três famílias de fissuras serem aproximadamente perpendiculares entre si

Trata-se de uma situação relativamente frequente nos casos concretos. Na realidade, na natureza ocorrem muitas vezes três sistemas de fissuras principais mutuamente ortogonais.

O processo de determinação do potencial hidráulico num domínio percolante com tais características foi estudado por vários autores, o que prova a importância e a índole desta questão.

Como métodos de análise do problema em causa podem citar-se os se-

guintes:

PROCESSO MATEMÁTICO  
PROCESSO ANALÓGICO

Ambas as formas de detectar a distribuição do potencial hidráulico num certo domínio têm como base a idealização de um modelo representativo do esquema percolante.

Pode assim ser considerado um modelo puramente matemático ou um modelo analógico que tanto pode ser eléctrico como hidráulico (modelo físico).

A - PROCESSO MATEMÁTICO

O modelo percolante corresponde a este método (também chamado MÉTODO NUMÉRICO) é constituído por um conjunto de blocos paralelepípedicos justapostos formando uma malha.

Supõe-se assim o maciço rochoso fissurado constituído por vários elementos semelhantes aos representados na figura 81.

Cada bloco rochoso tem seis nós. Considerando um nó qualquer como central (na figura este nó está representado por  $N_{ijk}$ ), dispõem-se à sua volta 6 outros nós (na mesma figura estão referidos pelas letras A, B, C, D, E e F).

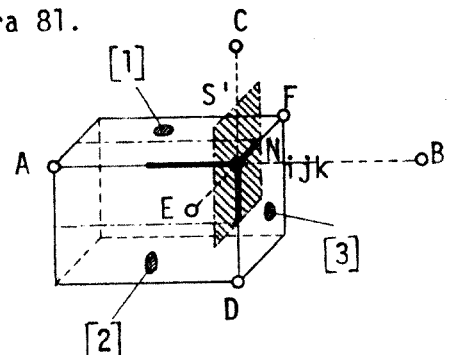


Fig. 81 - Bloco-base em que o Maciço se encontra dividido.

Supõem-se conhecidos os valores das permeabilidades hidráulicas referentes aos três sistemas de fissuras.

O equacionamento do problema é feito, uma vez mais, por meio de condições de continuidade nos nós.

O número de equações iguala assim o número de incógnitas constituídas pelos diversos valores do potencial hidráulico instalado em cada nó.

O tratamento do problema é feito por meio do cálculo automático.

Aplicando ao nó  $N_{ijk}$  um raciocínio de conservação dos caudais (afluentes e efluentes do nó), resultam equações da forma que se segue

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad \text{ou seja} \quad Q_e + \sum_{A\dots} (K_1 + K_2) C_{AN} (\phi_A - \phi_N) = 0 \quad (6 - II)$$

O significado dos símbolos presentes nestas expressões é

- $Q_i$  - caudal concorrente no nó em questão  
 $n$  - número de caudais elementares concorrentes no nó  
 $Q_e$  - caudal exterior (efluente ou afluente) concorrente no nó  
 $\Sigma$  - somatório estendido a todas as intersecções de fissuras elementares concorrentes no nó. No caso particular da equação anterior, o somatório apenas considerou o efeito de intersecção  $\overline{AN}$ . Deverá ser pois
- $$\sum_{ABCDEF}$$
- $K_i$  - valor da permeabilidade de cada um dos sistemas de fissuras ( $i = 1, 2$  e  $3$ )  
 $C$  - coeficiente que depende das dimensões da malha definida  
 $\phi$  - potencial hidráulico instalado num nó.

Analise-se a estrutura do coeficiente  $C$ . Tome-se como exemplo elucido o caso de  $C_{\overline{AN}}$ .

Por definição,  $C_{\overline{AN}}$  é igual à razão entre a área  $S'$  (assinalada na figura 81) e o comprimento da intersecção  $\overline{AN}$ . Tem pois as dimensões de um comprimento.

Virá então

$$C_{\overline{AN}} = \frac{S'}{\overline{AN}} = \frac{1}{\overline{AN}} \left[ \left( \frac{FN}{2} + \frac{EN}{2} \right) \left( \frac{CN}{2} + \frac{DN}{2} \right) \right] =$$

$$= \frac{(FN + EN)(CN + DN)}{4 \overline{AN}}$$

No caso de se considerar uma malha cúbica, o valor do coeficiente é o seguinte (comprimento da aresta =  $a$ )

$$C = \frac{(2a)^2}{4a} = a$$

Faça-se a análise dimensional da relação (6 - II).

As dimensões das diversas grandezas nela intervenientes são

$$K_i \alpha [L T^{-1}] ; C \alpha [L] ; \phi \alpha [L]$$

Deste modo, as dimensões da expressão inserta no primeiro membro da equação (6 - II) são efectivamente as de um caudal  $[L^3 T^{-1}]$ .

Explorando ainda mais a índole da mesma relação, e, atendendo à definição de permeabilidade hidráulica de um sistema de fissuras, facilmente se compreende o significado de alguns dos seus termos.

Na realidade, pela equação da continuidade (aspecto global) aplicada ao movimento permanente de um fluido incompressível (atente-se no ponto 2.3.2.2.), conclui-se que o caudal escoado através de uma secção é igual ao produto da área dessa secção pelo valor da velocidade média nela definida.

Tem-se então

$$Q = U S$$

A velocidade média está relacionada (na hipótese do escoamento laminar) com o valor da permeabilidade hidráulica de um sistema de fissuras, da seguinte forma (recorde-se o ponto 4.6.)

$$\bar{U} = K j$$

Substituindo esta relação na anterior resultará

$$Q = K j S$$

Pelas características do modelo percolante em análise, a secção transversal do escoamento na zona adjacente a um nó genérico (no caso representado por  $N_{ijk}$ ) corresponde à área  $S'$ .

Resultará então um novo aspecto da igualdade anterior, isto é

$$Q = K j S' \quad (6 - III)$$

Por definição de gradiente hidráulico activo ao longo de uma fissura elementar conclui-se a seguinte relação

$$j = | \vec{j} | = |\text{grad } \phi| \text{ ou seja } j = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

Admitindo a generalização desta noção básica para o caso do gradiente activo ao longo da intersecção de duas fissuras elementares, e, considerando do acréscimos finitos para a função potencial ~~e para o desenvolvimento dessa intersecção, pode escrever-se~~  
*pode escrever-se*

$$j = \frac{\Delta \phi}{\Delta x} = \frac{\phi' - \phi}{L}$$

sendo  $\phi'$  o potencial instalado num nó da malha que dista do nó em questão de um comprimento  $L$ .

O desenvolvimento da intersecção das duas fissuras elementares consideradas é assim  $L$ .

Substituindo a expressão do gradiente do potencial hidráulico na equação (6 - III), conclui-se

$$Q = K S' \frac{\phi' - \phi}{L}$$

Particularizando as considerações que têm vindo a ser feitas para o caso do caudal escoado através das fissuras elementares que se intersectam segundo  $\overline{AN}$ , resulta

$$\begin{aligned} Q_{\overline{AN}} &= K_1 S' \frac{\phi_A - \phi_N}{L} + K_2 S' \frac{\phi_A - \phi_N}{L} = \\ &= (K_1 + K_2) S' \frac{\phi_A - \phi_N}{\overline{AN}} \end{aligned}$$

Relembrando o modo como foi definido o coeficiente  $C$ , a relação anterior coincide com a apresentada atrás, ou seja

$$Q_{\overline{AN}} = (K_1 + K_2) C_{\overline{AN}} (\phi_A - \phi_N)$$

Note-se que  $K_1$  e  $K_2$  são os valores das permeabilidades dos sistemas de fissuração  $S_1$  e  $S_2$ .



Não se julgue que o bloco rochoso que serve de célula à construção do modelo de percolação tenha exactamente como dimensões das respectivas arestas, as distâncias mútuas entre fissuras consecutivas das três famílias que seccionam o meio rochoso em estudo.

Pode convir (na prática é este o processo habitual de conduzir uma completa análise da distribuição do potencial hidráulico) considerar uma fissuração muito concentrada no estudo de determinadas fâcies do escoamento, ou, pelo contrário, se a zona em causa não for tão melindrosa sob o ponto de vista do seu comportamento face às acções devidas ao escoamento, poder-se-á dividir o maciço rochoso em blocos de maiores dimensões.

Na realidade, a divisão do domínio fissurado com vista a um conhecimento do modelo percolante é baseada no senso de quem se dedica a este tipo de estudos.

Poder-se-á perguntar se o facto de haver uma certa liberdade na escolha da malha do modelo, não será contrariado por um menos correcto conhecimento do conjunto dos parâmetros hidrogeológicos do domínio em análise.

Evidentemente que não. Se for recordada a noção de permeabilidade hidráulica de uma dada família de fissuras (relembre-se o ponto 4.6.), facilmente se reconhece a independência desta característica hidráulica global do maciço em relação à geometria da fissuração.

LOUIS [45] apelida a permeabilidade de um dado sistema de fissuras (orientadas paralelamente a uma dada direcção) como sendo uma permeabilidade direccionada.

A permeabilidade direccionada é assim um parâmetro intimamente ligado à anisotropia hidráulica do maciço considerado no seu todo, e, susceptível de determinação *in situ*.

Como foi referido, no final deste capítulo será perfeitamente exposta esta noção de permeabilidade direccionada por meio da apresentação das bases teórico-práticas da sua técnica de determinação.

O que se acabou de dizer poderia também ser considerado no enquadramento do problema proposto em 6.3.4.1..

O modelo percolante seria então imaginado pela partição do meio percolante através de dois sistemas de fissuras contínuas, planas, paralelas e

dispostas verticalmente.

O módulo que serviria de célula-base à análise, poderia não ter como dimensões em planta as correspondentes à distância entre descontinuidades consecutivas.

As características hidráulicas do modelo imaginado corresponderiam às permeabilidades direccionais das duas famílias de fissuras.

## B - PROCESSO ANALÓGICO

Este processo de determinação da distribuição do potencial  $\phi$  em determinado domínio percolante baseia-se na construção de um modelo do escoamento por analogia deste com outros fenómenos físicos. Por essa razão, ao conjunto dos métodos integrados na denominação genérica em epígrafe, é muitas vezes dada a designação de modelos físicos do escoamento.

Os modelos físicos mais utilizados são os modelos eléctricos e os modelos hidráulicos.

E porquê a utilização, já muito difundida, de modelos eléctricos e hidráulicos?

Recordando a índole dos escoamentos nas fissuras, imediatamente se constata que a sua definição passa pela consideração de um potencial cinético. Convirá recordar o que foi dito sobre este assunto nos pontos 4.3.2.1. e 6.3.2..

Então, dado que quer o fenómeno da transmissão da corrente eléctrica ( $\nabla^2 V = 0$ , sendo  $V$  potencial eléctrico), quer o fenómeno do escoamento irrotacional de um fluido incompressível ( $\nabla^2 H = 0$ , sendo  $H$  a carga hidráulica), são caracterizados pela existência de um escalar harmónico, é fácil conseguir um processo analógico para estudo da percolação através das fissuras de um maciço rochoso.

No substrato teórico do processo analógico a grandeza potencial hidráulico  $\phi$  é associada ao potencial eléctrico ou à energia mecânica por unidade de peso (carga hidráulica (\*)), respectivamente nos modelos eléctricos e hidráulicos.

---

(\*) Recorde-se que em movimento uniforme a variação da carga hidráulica corresponde à variação da cota piezométrica.

Consegue-se uma analogia entre a relação linear (6 - II) (a linearidade diz respeito ao escalar  $\phi$ ) e equações homólogas respeitantes às variações do potencial eléctrico num circuito ou referentes às perdas de carga ao longo de uma conduta circular em movimento laminar e uniforme.

Exemplificando melhor o artifício analógico utilizado, são apresentadas de seguida as características mais importantes dos três fenómenos em jogo.

<u>Escoamento na intersecção de duas fissuras elementares</u>	<u>Transmissão de corrente eléctrica através de um circuito</u>	<u>Escoamento laminar de um fluido incompressível num tubo circular de diâmetro D, em movimento uniforme</u>
caudal $Q_i$	intensidade de corrente $i$	caudal $Q$
lei do escoamento	lei de OHM	lei do escoamento de POISEUILLE
$Q_i = \Sigma (K_i + K_j) C_{IN} (\phi_I - \phi_N)$	$V = R i$ ou $i = \frac{V}{R}$ <i>estava bem (V)</i>	$j = \frac{\Delta H}{L} = \frac{32}{\gamma} \frac{\mu U}{D^2}$ ou $Q = \frac{\pi g D^4 \Delta H}{128 \nu L}$
coeficiente de perda de carga do meio fissurado (ao longo da intersecção de fissuras elementares)	inverso da resistência do circuito eléctrico	razão entre o caudal escoado e a perda de carga
$(K_i + K_j) C_{IN}$	$\frac{1}{R}$	$\frac{\pi g D^4}{128 \nu S'} (*) C_{IN}$

SHARP [45] [66] desenvolveu muito o método analógico eléctrico construindo um modelo percolante com 594 resistências. Estes trabalhos realizaram-se no Imperial College de Londres e integraram-se na Tese apresentada

(\*) Atente-se na seguinte transformação  $Q = \frac{\pi g D^4 \Delta H}{128 \nu L} = \frac{\pi g D^4}{128 \nu S'} \frac{S'}{L} \Delta H < > (K_i + K_j) C_{IN} (\phi_I - \phi_N)$ . Admite-se que o caudal  $Q$  é escoado através da secção  $S'$ , atrás definida.

em 1970 naquela Escola Superior.

No que diz respeito aos modelos baseados numa analogia hidráulica, deve ter-se sempre o cuidado de manter os mesmos valores relativos da permeabilidade direccional correspondente aos medidos nos ensaios *in situ*.

Na análise de todos os modelos percolantes referidos ao longo desta Dissertação, o problema da determinação da superfície de saturação surgiu sempre como uma questão delicada.

Numa distribuição tridimensional do potencial hidráulico a complexidade na definição da citada superfície de saturação é ainda maior.

De todos os processos de interpretação do modelo percolante, aquele que piores condições oferece à localização da superfície livre do escoamento é sem dúvida o método de analogia eléctrica.

No que diz respeito às possibilidades do método matemático, a determinação do lugar geométrico citado aumenta bastante o tempo de cálculo.

Finalmente, no que diz respeito à definição da superfície de saturação empregando o modelo de analogia hidráulica, ela torna-se evidentemente muito mais fácil, dado que aquela superfície aparece directa e imediatamente em cada situação testada.

Não é somente este problema cuja resolução fica extremamente facilitada com a utilização do modelo de analogia hidráulica.

Outras determinações de interesse encontram no emprego deste modelo soluções rápidas e precisas.

Uma análise bidimensional semelhante à exposta em 6.2.2.2. seria comodamente levada a cabo pelo emprego de um modelo hidráulico.

No que diz respeito à captação e transmissão dos resultados, poder-se-iam incorporar nos diversos nós, células de pressão instaladas em pequenos prismas de perspex.

Dado o conhecimento perfeito das características dos vários tipos de células de pressão por parte de quem trabalha no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P. no sector das flutuações de pressão, tem-se a esperança de, num futuro muito próximo, levar a cabo interessantes constatações no domínio do conhecimento da repartição tridimensional do fâcies do escoamento.

Este facto foi já referido nas primeiras considerações desta Disser

tação.

Falou-se em leitura e transmissão de resultados, e, nesse aspecto, deve realçar-se a enorme comodidade no emprego de modelos eléctricos.

#### 6.3.5.2. Hipótese das três famílias de fissuras terem uma orientação qualquer

Apesar de na essência ser simples, a metodologia inerente à resolução deste problema é bastante trabalhosa.

O raciocínio empregado baseia-se ainda em condições de continuidade definidas em determinados elementos, embora de forma diferente da citada no estudo da situação anterior.

Ocorre uma diferença de fundamental importância: os elementos geométricos que servem de célula ao modelo tridimensional a ser utilizado não são caracterizados pela ortogonalidade mútua das respectivas faces.

Sobre estas faces podem ser considerados elementos triangulares ou elementos com a forma de paralelogramos ou losangos. Analisada uma fissura elementar (correspondente a uma das faces da célula do modelo do escoamento), pode esta supor-se então dividida em um ou mais elementos. Basta assim estabelecer a condição de continuidade respeitante aos caudais escoados ao longo de uma aresta ou no interior de um elemento.

São aplicáveis quer a técnica do método dos elementos finitos quer a técnica dos processos de diferenças finitas.

Na parte operatória emprega-se o cálculo automático.

#### 6.3.6. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por mais de três Sistemas de Fissuração

Na resolução do modelo de percolação num meio com as características referidas poder-se-ia aplicar o processo dos elementos finitos.

Estes seriam considerados sobre cada uma das fissuras elementares.

No entanto, esta forma de proceder apresenta duas grandes dificuldades:

- Por um lado, a necessidade de um conhecimento perfeito da geometria da fissuração, o que evidentemente é muitíssimo difícil.

- Por outro lado, o enorme número de incógnitas em jogo.

De acordo com o que foi referido no ponto 1.3.2., poderá o meio percolante apresentar determinadas características que permitam que seja analisado como um domínio contínuo.

O problema em estudo teria então um processo de resolução mais simples, baseado que o era na teoria dos escoamentos em meios porosos.

Recorde-se, no entanto, o que foi exposto em 6.3.5.1.A..

Pois bem, poder-se-á substituir na concepção do novo modelo percolante referente ao caso em estudo, a soma das permeabilidades direccionais ( $K_i + K_j$ ) por uma das permeabilidades principais do meio contínuo.

Estas permeabilidades principais serão calculadas com base em considerações sobre o tensor das permeabilidades. Determinar-se-iam as suas direcções principais.

Nas publicações [45] [47] [48] podem ver-se considerações sobre este assunto.

Aplicando os métodos referidos para o caso da existência de três sistemas de fissuração aproximadamente perpendiculares entre si, consegue-se definir a distribuição do potencial hidráulico num meio rochoso no qual estão presentes mais de três famílias de fissuras.

Apenas é necessário, como se viu, determinar os valores das três direcções principais do tensor das permeabilidades.

Esta determinação implica o conhecimento do tensor das permeabilidades. A forma de o definir passa pelo conhecimento correcto da geometria da fissuração, por forma a serem considerados (na definição do citado tensor) apenas os sistemas de fissuras principais.

Por sair do âmbito da presente Dissertação, não se apresenta neste número, o processo de definição do tensor das permeabilidades, nem tão pouco a determinação das suas direcções principais.

Frize-se, no entanto, que este método apenas é válido se o meio puder ser considerado como um domínio contínuo.

## 6.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DIRECCIONAL

### 6.4.1. Considerações Prévias

Conforme foi referido no decorrer do ponto 6.3. o valor da permeabilidade hidráulica é susceptível de ser determinado por medições "in situ".

A obtenção daquela grandeza é muitíssimo importante para o desenvolvimento de qualquer método da determinação da distribuição tridimensional do potencial hidráulico.

Efectivamente, em qualquer das expressões apresentadas em 6.3.4.1., 6.3.5. e 6.3.6., aparece como condicionante da resolução do problema, o conhecimento das diversas permeabilidades direccionais.

MAINI e LOUIS [46] consideram mesmo como a mais importante restrição ao desenvolvimento de novas técnicas para a solução de problemas em meios fissurados, a determinação "in situ", dos parâmetros citados.

### 6.4.2. Bases Teóricas

#### 6.4.2.1. Estudo do escoamento radial

Para uma melhor compreensão das técnicas de determinação do valor da permeabilidade direccionial de um maciço rochoso fissurado, são apresentados os elementos teóricos referentes ao escoamento radial a partir de um furo cilíndrico praticado num domínio com tais características.

Considere-se a figura 82. Nela se pode observar uma cavidade ci-

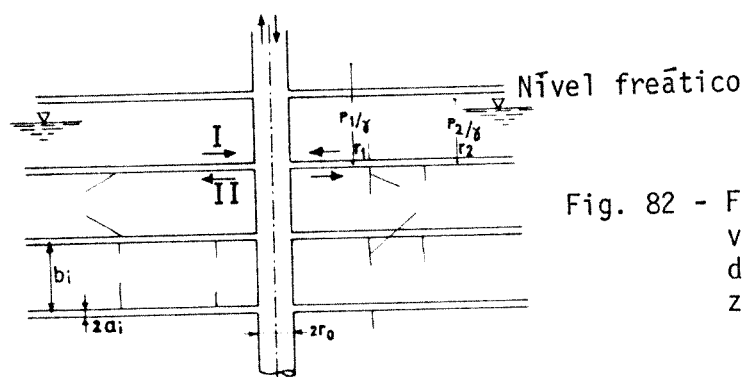


Fig. 82 - Fluxo radial através de uma família de fissuras horizontais.

lindrica, de diâmetro  $2r_0$ , executada normalmente a um sistema de fissuração horizontal. Pode ver-se ainda a localização do nível freático. A distância

entre fissuras consecutivas  $\bar{e} b_j$ . A abertura das fissuras vale  $2a_j$ .

Conforme se trate de um escoamento dirigido para o furo ou partindo deste (caso das injeções), a correspondente situação  $\bar{e}$  assinalada pelos algarismos I ou II.

Dada a simetria cilíndrica do escoamento, o estudo pode ser efectuada a duas dimensões.

No interior do furo reina uma determinada pressão. A cavidade cilíndrica constitui assim uma condição limite do escoamento.

Por condições evidentes de continuidade, dado o crescimento da zona de influência do escoamento radial com o aumento da distância ao eixo do furo, o valor da velocidade diminui com o afastamento a essa linha.

No decorrer desta referência empregar-se-á indistintamente o termo "furo" ou "cavidade cilíndrica".

Na figura 83 pode ver-se um aspecto ampliado de uma fissura. Constata-se ainda as características do escoamento ao nível dessa descontinuidade geológica.

Como atrás foi dito, o escoamento  $\bar{e}$  marcado por uma simetria do tipo cilíndrico. Sendo assim, utilizar-se-á na análise do fenómeno do escoamento o sistema de coordenadas cilíndricas. Atente-se na figura 84 onde essas coordenadas vêm esquematizadas. A coordenada angular  $\theta$  e a coordenada radial  $r$  situam-se no plano da fissura (plano médio).

Admite-se que o escoamento  $\bar{e}$  laminar. Quanto às características das paredes das fissuras, são de molde a poderem ser consideradas pouco rugosas (escoamento rectilíneo e paralelo;  $\frac{e}{D_h} \leq 0,033$ ).

Recordem-se as equações de NAVIER-STOKES referentes ao movimento de um fluido pesado, incompressível e de coeficiente de viscosidade dinâmica constante. Atente-se no ponto 2.3.3.8..

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{G} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{v}$$

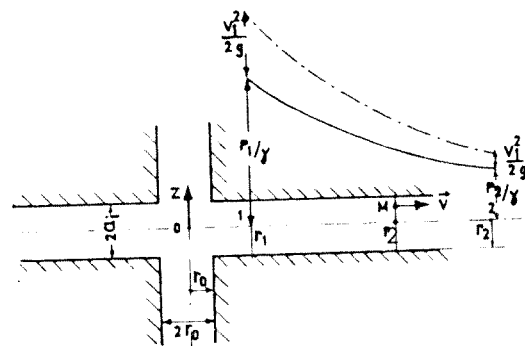


Fig. 83 - Escoamento radial numa fissura.



Como o sistema de coordenadas não é o cartesiano, haverá que fazer algumas modificações nos termos da relação anterior.

Note-se que o vector velocidade  $\vec{v}$  apenas tem componente na direcção radial, isto é,

$$v_z = 0 ; \quad v_\theta = 0 ;$$

$$v_r = v_r(z, r) = v$$

Quanto ao vector aceleração, é também radial e o seu módulo vale, supondo o movimento permanente

$$a_r = v \frac{\partial v}{\partial r}$$

Assim as três equações de NAVIER-STOKES tomam, no caso presente,

$$v \frac{\partial v}{\partial r} = 0 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (G_r = 0)$$

$$0 = 0 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + 0 \quad (G_\theta = 0 ; \quad \nabla^2 v_\theta = 0)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 0 \quad (G_z = -g ; \quad \nabla^2 v_z = 0)$$

Da 2<sup>a</sup> equação (por integração) conclui-se

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \quad \therefore \quad p = p(r, z)$$

Por semelhante tratamento da última igualdade tem-se

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\gamma \quad \therefore \quad p = -\gamma z + C(r)$$

Desejando determinar a forma do perfil de velocidades, deverá considerar-se o estudo da função num plano vertical radial (Orz).

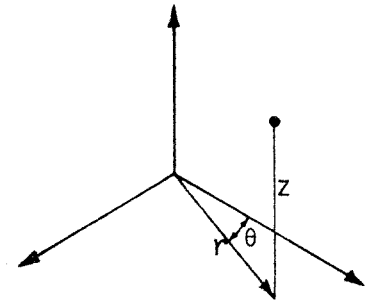


Fig. 84 - Sistema de coordenadas cilíndricas.

Atente-se na 1ª equação. Pode tomar a forma seguinte, desde que se desprezem as segundas derivadas da velocidade paralelamente ao plano da fissura

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{v^2}{vr} \quad (*) = \frac{g}{v} \frac{\partial (p/\gamma)}{\partial r} = 0$$

Ora,  $\frac{\partial (p/\gamma)}{\partial r}$  é independente da cota  $z$ . Assim, a relação anterior pode ainda aparecer com um aspecto mais simplificado

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + b v^2 = c$$

Sendo  $b$  e  $c$  constantes.

Para se integrar esta equação diferencial pode-se seguir o caminho proposto por KAMKE e transcrito na memória [44], fazendo-se a substituição  $\frac{\partial v}{\partial z} = w(v)$  e atendendo às condições fronteira  $\frac{\partial v}{\partial z} = 0$  e  $v = v_0$  para  $z = 0$ .

Obtêm-se a equação diferencial do 1º grau

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \pm \sqrt{2} \sqrt{\frac{b}{3} (v_0^3 - v^3) - c (v_0 - v)}$$

Introduzindo uma nova mudança de variáveis

$$x = \frac{z}{a_i} + 1 \quad \text{e} \quad t = \frac{v}{v_0} \quad (v_0 - \text{velocidade no plano médio da fissura})$$

obtêm-se a distribuição exacta das velocidades do escoamento por meio das relações seguintes

$$E(x - 1) = I\left(\frac{v}{v_0}\right)$$

$$I\left(\frac{v}{v_0}\right) = \int_1^{\frac{v}{v_0}} \frac{dt}{[(1 - t^3) - F(1 - t)]^{1/2}}$$

---

(\*) No decorrer desta memória mostrar-se-á que  $\frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{v}{r}$ .

Os coeficientes E e F, podem ser expressos pelas igualdades que se seguem

$$E = a_i \sqrt{\frac{2v_0}{3vr}} \quad ; \quad F = \frac{3gr}{v_0^2} \frac{\partial (p/\gamma)}{\partial r}$$

Por resolução do integral elíptico de primeira espécie é possível obter-se o perfil de velocidades no plano vertical e radial que, está provado, não se afasta muito do correspondente à distribuição parabólica.

Conforme o gradiente radial das energias potenciais de pressão por unidade de peso seja negativo ou positivo (casos das injeções ou caso de furos drenantes), também o valor do coeficiente F será consequentemente negativo ou positivo.

Quanto à distribuição radial da pressão, é possível, com base em considerações semelhantes às anteriores, fazer a sua análise. No entanto, esse estudo é bastante trabalhoso, pelo que se apresenta de seguida um processo simplificado.

O gradiente energético total j, vale no caso presente do escoamento radial através de uma fissura horizontal

$$j = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{p}{\gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

Ora, a variação radial da energia cinética vale

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial r}$$

Por condições de continuidade conclui-se a igualdade (já anteriormente referida)

$$\frac{\partial v}{\partial r} = - \frac{v}{r} \quad (6 - IV)$$

Então a expressão anterior transforma-se do modo que se segue

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = - \frac{v^2}{gr}$$

A igualdade (6 - IV) demonstra-se facilmente por condições de conservação do caudal escoado radialmente.

Considere-se uma fonte radial de fluido numa dada fissura horizontal e quantifiquem-se os valores dos caudais instalados a duas distâncias da fonte diferindo entre si de uma quantidade elementar. Sejam essas distâncias  $r$  e  $r + \Delta r$ , respectivamente. Recorde-se que a espessura da fissura na qual se estabeleceu o escoamento vale  $2a_j$ .

O caudal que atravessa a fissura em pontos desigualmente distanciados da fonte central, mantém-se constante.

Assim poderá escrever-se

$$2 \pi r \cdot 2a_j \cdot v = 2 \pi (r + \Delta r) \cdot 2a_j \cdot (v + \Delta v)$$

Admitiu-se a variação radial da velocidade, o que está de acordo com a realidade do escoamento. Desenvolvendo a expressão anterior resulta

$$r v = r v + r \Delta v + v \Delta r + \Delta r \Delta v$$

Desprezando o produto de grandezas infinitesimais ( $\Delta r \cdot \Delta v$ ), conclui-se

$$r \Delta v = - \Delta r v$$

ou ainda

$$\frac{\Delta v}{\Delta r} = - \frac{v}{r}$$

Passando a relação anterior ao limite, tem-se

$$\frac{\partial v}{\partial r} = - \frac{v}{r}$$

Retomem-se as considerações sobre a variação da energia mecânica total por unidade de peso na direcção radial.

Com base na igualdade (6 - IV) passa-se a quantificar o valor médio

da variação da altura cinética na mesma direcção. Assim, virá

$$\left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \right]_{\text{méd.}} = - \frac{1}{2a_i} \int_{-a_i}^{+a_i} \frac{v^2(r,z)}{gr} dz \quad (6 - V)$$

Realmente pretende-se um valor médio do quadrado da velocidade, variando esta com a cota topográfica  $z$ , e com o raio  $r$ .

Para simplificar o problema pode tomar-se como verdadeira a distribuição parabólica de velocidades numa dada secção, ou seja

$$v(z) = \frac{3}{2} U \left( 1 - \frac{z^2}{a_i^2} \right) \quad (*) \quad (6 - VI)$$

Nesta expressão,  $U$  é a velocidade média que se verifica na secção, isto é

$$U = \frac{Q}{2 \pi r 2a_i} \quad (6 - VII)$$

representando  $Q$ , o caudal escoado (injectado ou bombado através da fissura).

A partir das relações (6 - V) e (6 - VI) obtêm-se, por integração

$$\left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \right]_{\text{méd.}} = \left( - \frac{v^2}{gr} \right)_{\text{méd.}} = - \frac{6}{5} \frac{U^2}{gr}$$

Substituindo este valor na expressão do gradiente energético,  $j$ , conclui-se

$$j = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{p}{\gamma} \right) - \frac{6}{5} \frac{U^2}{gr}$$

Generalizando para o caso do escoamento radial em fissuras pouco rugosas, a relação genérica de resistência correspondente ao escoamento rectilíneo e paralelo em fissuras (atente-se no ponto 4.3.2.1.2.), tem-se

$$j = \frac{\lambda}{D_h} \frac{U^2}{2g} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{p}{\gamma} \right) - \frac{6}{5} \frac{U^2}{gr} \quad (6 - VIII)$$

---

(\*) Compare-se esta expressão com as relações insertas no final de 4.3.2.1.1..

Se, por hipótese, o movimento for laminar, o valor do coeficiente de resistência vale  $\frac{96}{Re}$ , isto é

$$\lambda = \frac{96 \nu}{U D_h}$$

Recorde-se o ponto 4.3.2.1.2.A..

A igualdade (6 - VIII) aparece assim com o aspecto que se segue

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{p}{\gamma} \right) - \frac{6}{5} \frac{U^2}{gr} = \frac{12 U \nu}{g (2a_i)^2}$$

Substituindo o valor da velocidade média  $U$  dado pela razão (6 - VII), obtêm-se por integração a distribuição de pressões na fissura.

A diferença entre os valores dessa grandeza instalados a distâncias diversas do eixo do furo de sonda vale

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} &= \frac{6 \nu Q}{g \pi (2a_i)^3} \log \frac{r_2}{r_1} + \\ &+ \frac{3 Q^2}{20 g \pi^2 (2a_i)^2} \left[ \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right] \end{aligned}$$

Se o escoamento se efectuasse em fissuras de alta rugosidade, poder-se-ia aplicar a relação de resistência devida a LOUIS [43]. Leia-se o ponto 4.4.1.2.. Resultaria então

$$\lambda = \frac{96}{Re} \left[ 1 + 8,8 \left( \frac{e}{D_h} \right)^{1,5} \right]$$

Seguindo um processo análogo ao considerado no caso do escoamento laminar em fissuras pouco rugosas, concluir-se-ia a forma da equação respeitante à diferença de pressões em dois pontos nas condições anteriores, isto é

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} &= \frac{6 \nu Q}{g \pi (2a_i)^3} \left[ 1 + 8,8 \left( \frac{e}{D_h} \right)^{1,5} \right] \log \frac{r_2}{r_1} + \\ &+ \frac{3 Q^2}{20 g \pi^2 (2a_i)^2} \left[ \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right] \end{aligned}$$

Se o escoamento for caracterizado pela ocorrência de fenômenos de turbulência, é ainda possível determinar a distribuição de pressões em tais condições. Recorde-se que todas as considerações que vêm sendo feitas, partindo da noção do gradiente energético total  $j$ , não restringem a análise da distribuição de pressões ao caso do movimento laminar. O anterior processo de definir a distribuição das pressões no domínio percolante estava intimamente relacionado com o tipo de escoamento (laminar) e com as características da fissura (plana).

Seja então o escoamento turbulento ocorrendo radialmente numa fissura. Viu-se em 4.3.2.1.2.B. qual o valor do coeficiente de resistência em tais condições. O escoamento será considerado retilíneo, paralelo, ocorrendo numa fissura pouco rugosa e caracterizado por uma grande intensidade de turbulência.

A relação de resistência correspondente é

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{e}{3,7 D_h}$$

Entrando em linha de conta com esta igualdade e com a expressão geral de resistência

$$j = \frac{\lambda}{D_h} \frac{U^2}{2g}$$

conclui-se o valor do gradiente energético

$$j = \frac{U^2}{16 g (2a_i) \log^2 \frac{3,7}{\frac{e}{D_h}}} \quad (6 - IX)$$

O valor da velocidade média  $U$  é calculado a partir da relação (6 - VII). Substituindo-o na expressão anterior (6 - IX), e, atendendo à igualdade (6 - VIII), resulta

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{Q^2}{64 g \pi^2 (2a_i)^3 \log^2 \frac{3,7}{e} \frac{D_h}{r_1}} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) +$$

$$+ \frac{Q}{8 g \pi^2 (2a_i)^2} \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right)$$

Conhecendo-se a distribuição de pressões nos três casos abordados, é agora fácil definir o fâcies do escoamento nas várias fissuras.

Na realidade, de posse dos valores das pressões (o que equivale a conhecer as várias alturas piezométricas) e das cotas topográficas nos diversos pontos do escoamento, conseguem-se determinar os diferentes potenciais  $h_i$  dráulicos ( $\phi = z + \frac{p}{\gamma}$ ) neles reinantes.

São dados necessários para o arranque da determinação das pressões nos vários pontos do domínio percolante, os valores do caudal escoado, o raio da cavidade cilíndrica e a pressão ao longo da periferia dessa cavidade. Esta constitui uma condição fronteira do escoamento.

A questão presentemente em estudo pode analisar-se de um modo diferente, isto é, sendo conhecidas as pressões em dois pontos do meio (um dos quais situado na periferia da cavidade), é possível calcular-se o caudal injectado ou bombado.

Falou-se em escoamento turbulento e em escoamento laminar. Se forem tidas em consideração as expressões da velocidade média (6 - VII) e do número de REYNOLDS característico de um dado escoamento (atente-se no ponto 4.2.2.), conclui-se facilmente qual a distância máxima para a qual se verifica ainda movimento turbulento.

Assim

$$Re'_{e'} = \frac{U D_h}{\nu} \therefore U = \frac{\nu Re'_{e'}}{D_h} = \frac{\nu Re'_{e'}}{4a_i}$$

Como

$$U = \frac{Q}{2 \pi r (2a_i)}$$

então, igualando as duas expressões da velocidade média, é possível detectar os limites espaciais do escoamento turbulento no plano da fissura, ou seja



$$r_l = \frac{Q}{\pi v R_{eH}}$$

Note-se que o raio limite não depende da abertura da fissura, mas sim de caudal escoado.

Nos problemas concretos das injeções, dado o valor do caudal injetado, a turbulência ocorre em zonas muito próximas das paredes do furo, devido ao enorme gradiente hidráulico instalado.

Como atrás foi referido, a consideração de fenómenos de turbulência hidráulica na definição do fâcies do escoamento, poucas modificações acarreta em relação à situação de movimento laminar. Recorde-se o ponto 6.2.2.1..

WITKE [44] é de opinião que as relações que definem a variação das pressões instaladas ao longo da fissura podem ser simplificadas pela não consideração dos termos onde figuram os quadrados dos raios. Desprezam-se assim as variações da energia cinética.

#### 6.4.2.2. Estudo do escoamento no plano de uma fissura inclinada em relação à direcção horizontal. Escoamento não radial. Caso das injeções

Na presente situação a distribuição do potencial hidráulico é também de índole tridimensional, conquanto que no número anterior dedicado ao estudo do escoamento radial, aquela repartição fosse susceptível de uma análise bidimensional.

Relembre-se o que está inserto no início do capítulo 4 (ponto 4.3.2.1.1.) respeitante ao escoamento laminar numa fissura de orientação qualquer.

Aplicar-se-á a teoria dos escoamentos com potencial de velocidades, isto é, resolver-se-á em cada plano da fissura a equação de LAPLACE.

Obtidas as sucessivas distribuições do potencial  $\phi$  nas diversas fissuras, dispor-se-ão convenientemente esses resultados planares com vista à definição do fâcies do escoamento.

Ter-se-á de considerar o movimento laminar, o que de resto tem sido a simplificação habitual.

Não será tomada em conta a influência das forças de inércia. Também assim se procedeu na análise do caso anterior.

Prova-se que a influência no rigor da definição do modelo percolante pelo facto de se considerarem as duas simplificações anteriores é menor no presente do que o era na análise do escoamento radial.

Considere-se a figura 85. Nela se apresenta o plano de uma fissura inclinada em relação à direcção do furo que é vertical. A intersecção da fissura com o furo situa-se acima do nível freático. Seja o caso da injeção.

Evidentemente que nestas condições o fluido está sujeito à acção de dois campos escalares em presença [44]

- O campo dos potenciais inerentes ao escoamento do tipo fonte.
- O campo dos potenciais inerentes a um escoamento plano e paralelo sujeito à acção da gravidade.

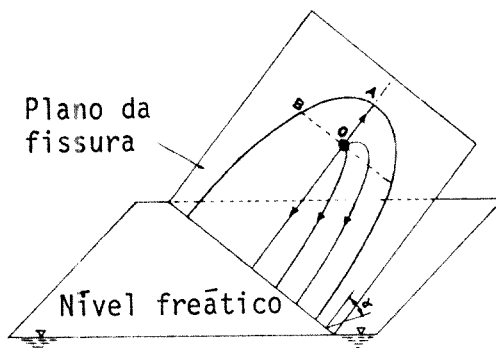


Fig. 85 - Injeção numa fissura inclinada.

Com base no que anteriormente foi referido (ponto 4.3.2.1.1.) é fácil definir o potencial cinético inerente ao escoamento plano e paralelo ao longo de uma fissura inclinada do ângulo  $\alpha$  relativamente a uma superfície horizontal. Seja  $\phi_2$  esse escalar.

$$\phi_2 = - \frac{g (2a_i)^2}{12 \nu} z$$

em que  $z$  representa a cota topográfica genérica de um ponto do escoamento.

Através da tese teórica dos movimentos planos e irrotacionais definem-se as componentes do vector velocidade.

No que respeita à componente segundo a direcção  $Ox_1$  (única que existe), vale

$$v_0 = \frac{\partial \phi_2}{\partial x_1} = - \frac{g (2a_i)^2}{12 \nu} \sin \alpha \quad (*) = - \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2}$$

Note-se que o movimento em análise é caracterizado pelas linhas de corrente constituírem um feixe de rectas paralelas à direcção  $Ox_1$  (direcção de maior declive do plano da fissura).

Então, as funções potencial de velocidades e corrente podem escrever-se de uma forma mais simplificada, isto é

$$\phi_2 = v_0 x_1 \quad ; \quad \psi_2 = - v_0 x_2$$

ou ainda

$$\phi_2 = - k' \sin \alpha x_1 \quad ; \quad \psi_2 = + k' \sin \alpha x_2$$

Quanto à fonte, as correspondentes funções potencial de velocidades e corrente são as seguintes

$$\phi_1 = B \log r \quad ; \quad \psi_1 = B \theta$$

Atente-se na figura 86. Nela está indicado o ângulo  $\theta$ , bem como o sistema de eixos  $Ox_1x_2$ .

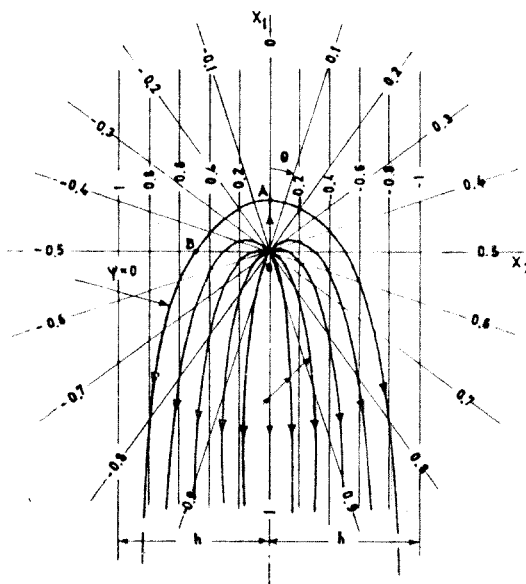


Fig. 86 - Características do escoamento referente à injeção numa fissura inclinada [44].

(\*) Note-se que  $\sin \alpha = \frac{\partial z}{\partial x_1} = - j$ .

Tratando-se de uma fonte, o escoamento é caracterizado por uma perfeita simetria em relação à origem (fonte pontual), sendo as linhas de corrente convergentes nesse ponto.

Como as linhas equipotenciais cinéticas constituem as trajetórias ortogonais das linhas de corrente, sendo estas radiais, aquelas serão circunferências centradas na origem.

O potencial  $\phi_1$  apenas dependerá do raio polar  $r$ , verificando a equação de LAPLACE.

Estudando este escoamento com base no método do potencial complexo, conseguem-se confirmar as funções potencial cinético e corrente atrás apresentadas.

Considere-se então a função potencial cinético  $\phi_1$ , que, como foi citado, depende apenas de  $r$ .

$$\phi_1 = B \log r \quad \text{ou} \quad \phi_1 = \frac{B}{2} \log r^2$$

Ora, como a distância polar  $r$  vale  $\sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ , conclui-se que as componentes do vector velocidade no plano do escoamento são

$$v_{x_1} = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} = \frac{B}{r^2} x_1 \quad ; \quad v_{x_2} = \frac{\partial \phi}{\partial x_2} = \frac{B}{r^2} x_2$$

Da teoria do potencial cinético conclui-se que [ 1 ] [ 3 ]

$$\frac{df(z)}{dz} = f'(z) = v_{x_1} - i v_{x_2} = \frac{B}{r^2} (x_1 - i x_2) = \frac{B}{z}$$

sendo

$f(z)$  - função potencial complexo característica do escoamento

$f'(z)$  - velocidade complexa

$z$  - variável complexa ( $z = x_1 + i x_2$ )

$i$  - entidade complexa ( $i^2 = -1$ ).

Por integração da expressão da velocidade complexa em ordem a  $z$ , conclui-se o valor da função potencial complexo correspondente à fonte

$$f(z) = B \log z$$

A variável complexa pode escrever-se na forma exponencial

$$z = r e^{i\theta}$$

Resulta então para  $f(z)$  a expressão que se segue

$$f(z) = B \log r + i B \theta$$

Identificando a parte real da combinação complexa com a função potencial de velocidades e a parte imaginária com a função corrente, conclui-se

$$\phi_1 = B \log r \quad ; \quad \psi_1 = B \theta$$

Atendendo a uma propriedade da função corrente calcula-se o valor de  $B$ . Efectivamente, como [ 3 ]

$$\int_A^B dq = \int_A^B d\psi = \psi_B - \psi_A$$

resulta por integração da função  $\psi$  ao longo de uma equipotencial

$$q = \int_{\theta}^{\theta+2\pi} B d\theta = 2\pi B \quad \therefore \quad B = \frac{q}{2\pi}$$

sendo  $q$  o caudal escoado por unidade de comprimento.

As expressões finais das funções  $\phi_1$  e  $\psi_1$  são

$$\phi_1 = \frac{q}{2\pi} \log r \quad ; \quad \psi_1 = \frac{q}{2\pi} \theta$$

Claro que no presente caso o valor do caudal por unidade de comprimento é considerado ~~positivo~~.

*negativo*



outro escoamento-tipo análogo (caso do poço), o tratamento teórico era o mesmo, devendo no entanto considerar-se negativo o valor do caudal por unidade de comprimento.

Regressando às condições do problema do escoamento numa fissura plana e contínua, verifica-se que o valor do caudal por unidade de comprimento na direcção normal ao plano do movimento ( $q$ ) é numericamente igual à seguinte razão

$$q = \frac{Q}{2a_j}$$

sendo  $Q$ , o caudal escoado no furo cilíndrico.

Compondo os dois movimentos planos e irrotacionais, o movimento resultante é caracterizado pela existência de um potencial cinético,  $\phi$ , igual à soma dos potenciais parcelares.

Quanto à função corrente do movimento resultante, também é igual à soma das duas funções correntes, correspondentes a cada um dos movimentos [ 1 ]

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

Atente-se na função corrente do movimento resultante. O seu valor é

$$\psi = \frac{q}{2} \frac{\theta}{\pi} - v_0 x_2 \quad (6 - X)$$

Em zonas suficientemente afastadas da fonte, a velocidade do movimento composto corresponde à velocidade do escoamento paralelo e rectilíneo, isto é,  $v_0$ .

Sendo  $2h$  (veja-se a figura 26) a largura máxima do escoamento, facilmente se conclui uma nova expressão para o caudal por unidade de comprimento

$$q = \frac{Q}{2a_j} = 2 h v_0 \quad (6 - XI)$$

Substituindo este valor na relação (6 - X) resulta

$$\psi = \left( \frac{h}{\pi} \theta - x_2 \right) v_0 \quad ; \quad v_0 = -k' \sin \alpha = k' j$$

Ainda na figura 86 pode ver-se o aspecto de um conjunto de linhas de corrente.

Ora (veja-se o ponto 4.3.2.1.1.), em determinadas condições do escoamento, o potencial cinético  $\bar{e}$  igual ao simétrico do produto do potencial hidráulico pela permeabilidade hidráulica da fissura rochosa, a qual, para um dado valor da abertura ( $2a_i$ ),  $\bar{e}$  um valor constante.

Quanto à grandeza  $2h$ , largura máxima do escoamento, poderá ser determinada a partir da igualdade (6 - XI).

$$2h = \frac{Q}{2a_i v_0}$$

Atendendo ao valor absoluto da velocidade  $v_0$  já quantificado anteriormente

$$|v_0| = \frac{g (2a_i)^2}{12 \nu} \sin \alpha$$

a relação que define  $2h$  é então a seguinte

$$2h = \frac{12 \nu Q}{g (2a_i)^3 \sin \alpha} \quad (6 - XII)$$

Interessa também, para verificar o alcance do escoamento (caso das injeções), determinar o valor do segmento  $\overline{OB}$ , definido pela intersecção da linha de corrente  $\psi = 0$  com a recta  $x_1 = 0$ .

A direcção  $\overline{OB}$  corresponde ao valor  $\theta = \frac{\pi}{2}$ .

Pela condição  $\psi = 0$  conclui-se

$$h \frac{\theta}{\pi} = [x_2] = r \sin \theta$$

ou ainda

$$h = r \frac{\sin \theta}{\theta} \pi$$

Para  $\theta = \frac{\pi}{2}$  ( $\sin \theta = 1$ ) a expressão anterior transforma-se no seguinte

$$h = \overline{OB} \frac{1}{\frac{\pi}{2}} \pi = 2 \cdot \overline{OB}$$

De forma idêntica se determinaria o valor do segmento  $\overline{OA}$ , resultante da intersecção da linha de corrente  $\psi = 0$  e da recta  $x_2 = 0$ . A direcção  $\overline{OA}$  corresponde o valor  $\theta = 0$ .

Entrando em linha de conta com a mesma relação tem-se

$$h = \overline{OA} \pi \quad (\text{note-se que } \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\sin \theta}{\theta} = 1)$$

Substituindo o valor de  $h$ , calculado a partir da equação (6 - XII), nas expressões de definição dos segmentos  $\overline{OA}$  e  $\overline{OB}$ , resulta

$$\overline{OA} = \frac{2h}{2\pi} = \frac{6 \nu Q}{\pi g (2a_1)^3 \sin \alpha}$$

$$\overline{OB} = \frac{2h}{4} = \frac{3 \nu Q}{g (2a_1)^3 \sin \alpha}$$

O problema da determinação do fâcies do escoamento laminar através de uma fissura inclinada atravessada por um furo no qual se injecta ou bomba determinado caudal, está assim perfeitamente resolvido.

Conhecem-se também os limites do domínio percolante sobre o plano da fissura.

Realmente, como atrás foi referido, foi definida a distribuição do potencial cinético  $\phi$ , bem como se determinaram as "dimensões" do escoamento.

Partindo do conhecimento da distribuição do potencial de velocidades é agora muito simples definir o valor do potencial hidráulico  $\phi$  nos diversos pontos da fissura plana.

Note-se que a relação entre os dois potenciais é

$$\phi = - \frac{g (2a_1)^2}{12 \nu} \Phi$$



Como se conhecem as cotas topográficas de todos os pontos do escoamento, é simples definir a distribuição de pressões no domínio em estudo.

Relacionam-se assim as principais características do escoamento: pressão nos diversos pontos, caudal escoado e características geométricas do meio fissurado.

#### 6.4.3. Determinação da Permeabilidade Hidráulica de um Maciço Rochoso Fissurado. Ensaio "in situ"

Trata-se da quantificação do mais importante parâmetro referente ao maciço fissurado. Já foi bem frizada a importância desta característica hidráulica direccional. Também já foram expostos os elementos teóricos que permitem compreender melhor a correspondente técnica operatória.

Como é fácil de constatar, um maciço rochoso aparece na grande maioria das vezes dividido por um, dois ou três sistemas de fissuras principais, planas e paralelas.

Pretendendo-se avaliar a permeabilidade hidráulica de um sistema de fissuras por meio de ensaios no local, a direcção do furo de sonda deverá ter uma orientação normal ao plano de fissuração correspondente.

Esta avaliação deverá ser feita separadamente com respeito a cada família de fissuras.

Havendo por exemplo três sistemas de fissuras principais (em regra são perpendiculares entre si, ou pelo menos aproximadamente), a direcção do furo deverá ser paralela à intersecção das fissuras pertencentes aos outros dois sistemas. Atente-se na figura 87.

Os ensaios consistem em traços gerais, na injeção ou na bombagem de determinados caudais durante um certo intervalo de tempo, efectuando-se o escoamento sob determinado gradiente de pressão.

Considere-se então um determinado sistema de fissuração cuja permeabilidade hidráulica direccional se pretende quantificar. As fissuras são inclinadas de um ângulo  $\alpha$  em relação ao plano horizontal. Estão assim orientadas de uma forma semelhante à referida em 6.4.2.2.. Recorde-se a figura 85.

Por hipótese, o nível freático está situado abaixo da cota referente à zona do ensaio.

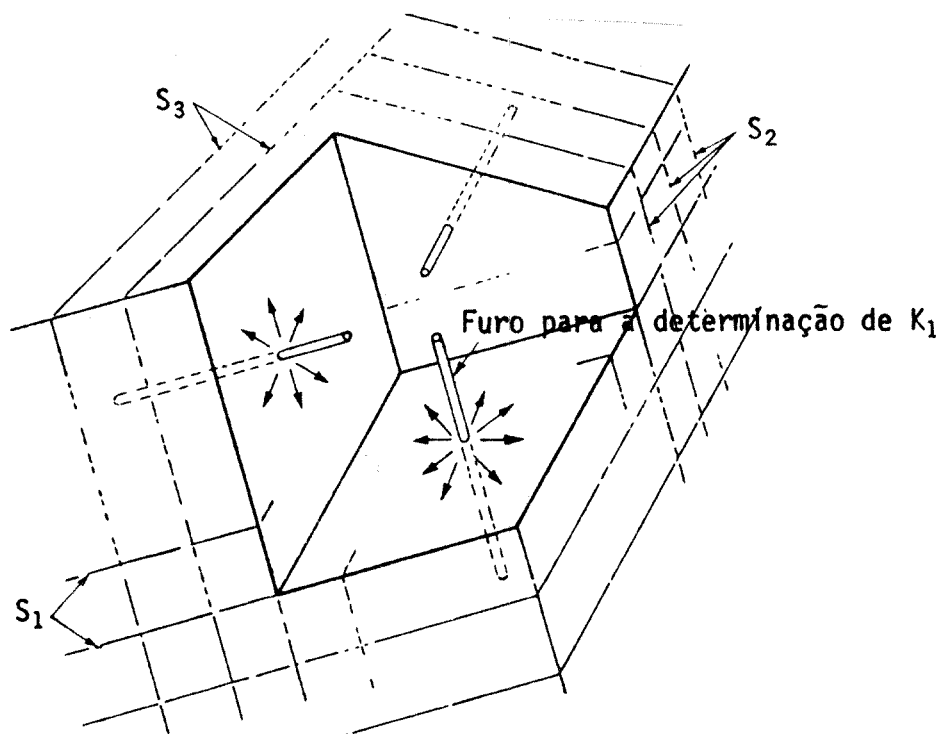


Fig. 87 - Orientação do furo de sonda inerente à determinação do valor da permeabilidade hidráulica de uma dada família de fissuras.

Admite-se que não há influência alguma no desenrolar do escoamento através da família de fissuras em estudo, por parte dos outros sistemas de fissuração. O movimento considerar-se-á laminar.

O modelo percolante pode ser suposto gerado pela sobreposição de um escoamento radial (veja-se o ponto 6.4.2.1.) e de um escoamento uniforme que se efectua ao longo do plano das fissuras (relembre-se o ponto 6.4.2.2.).

As funções potencial cinético e corrente características dos movimentos referidos são:

Escoamento radial

$$\bar{\phi}_R = \frac{q}{2\pi} \log r \quad ; \quad \bar{\psi}_R = \frac{q}{2\pi} \theta$$

Escoamento uniforme, plano e paralelo, através do sistema de fissuras considerado

$$\bar{\phi}_U = -K \sin \alpha x_1 \quad ; \quad \bar{\psi}_U = +K \sin \alpha x_2$$

Nestas expressões o significado de alguns símbolos é o que se segue

$q$  - caudal bombado ou injectado por unidade de comprimento  
 $K$  - permeabilidade hidráulica do sistema de fissuras

Note-se que, intersectando a cavidade cilíndrica mais do que uma fissura, interessa definir globalmente as características hidráulicas do meio.

Assim, a velocidade média através do maciço fissurado (no seu todo, e não apenas sendo consideradas as fissuras) está relacionada com o gradiente hidráulico activo, da forma que se segue

$$\vec{U} = \text{grad } \bar{\phi} = \text{grad } (\bar{\phi}_R + \bar{\phi}_U) = K \vec{j} \quad (6 - XIII)$$

sendo  $\bar{\phi}$ , o potencial cinético instalado no maciço rochoso.

Como já foi citado várias vezes, a relação entre os potenciais de velocidade e hidráulico é (recorde-se o ponto 6.4.2.2.)

$$\phi = - \frac{g (2a_i)^2}{12 \nu} ; \phi = - k' \bar{\phi} \quad (6 - XIV)$$

A grandeza  $k'$  foi definida como sendo a permeabilidade hidráulica da fissura (atente-se nos pontos 4.5.I. e 4.6.). Evidentemente que esta permeabilidade diz respeito ao movimento que se efectua no plano da fissura, e, além disso, corresponde à hipótese de escoamento laminar em descontinuidades geológicas pouco rugosas.

Ambas as hipóteses já foram suficientemente justificadas.

No caso presente, em que se pretende detectar o valor da permeabilidade direccional do maciço rochoso fissurado, não será de considerar como meio percolante a fissura isolada, mas sim o meio rochoso na sua totalidade.

Como a permeabilidade hidráulica do sistema de fissuras é proporcional ao valor da permeabilidade de uma fissura isolada, a estrutura da relação anterior (6 - XIV) ainda é válida para a família de fissuras, isto é

$$\bar{\phi} = - K \phi$$

sendo  $K$ , o valor da permeabilidade direccional, já apresentada na relação (6 - XIII).

Poderão recordar-se as relações entre os dois tipos de permeabilida

de hidráulica,  $k'$  e  $K$  (relembre-se o ponto 4.6.).

Passando à consideração do escoamento através do maciço (na sua totalidade), e, atendendo à relação entre os escalares  $\phi$  e  $\Phi$ , a sobreposição dos dois movimentos conduz às seguintes funções características do escoamento

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_R + \phi_U = \frac{q}{2\pi K} \log r + \sin \alpha x_1 \\ \psi &= \psi_R + \psi_U = \frac{q}{2\pi K} \theta - \sin \alpha x_2\end{aligned}\tag{6 - XV}$$

Analogamente ao que foi feito para o caso do escoamento numa sô fissura (atente-se no ponto 6.4.2.2.), também no presente estudo se irão definir os limites (ou o alcance) do movimento.

Define-se assim a área de influência do ensaio que quantifica o valor da permeabilidade direccional.

Quanto à largura máxima do escoamento (no caso anterior representada por  $2h$ ), o seu valor é

$$l = \frac{q}{K \sin \alpha}$$

Quanto às distâncias homólogas de  $\overline{OA}$  e  $\overline{OB}$  (definidas também no caso anterior), valem

$$(\overline{OA})' = \frac{l}{2\pi} = \frac{q}{2\pi K \sin \alpha}$$

$$(\overline{OB})' = \frac{l}{4} = \frac{q}{4 K \sin \alpha}$$

No caso do sistema de fissuras ser horizontal ( $\alpha = 0$ ), o efeito no escoamento por parte da acção da gravidade desaparece. Resultarão nulas as funções  $\phi_U$  e  $\psi_U$ .

Sob o ponto de vista da aplicação prática destas considerações, a primeira das igualdades (6 - XV) deverá ser estendida a dois pontos do meio rochoso em estudo. ~~Resulta então a expressão seguinte~~

*considerados sobre a direcção radial*

$$\Delta \phi = \phi_A - \phi_B = \frac{q}{2\pi K} \log \frac{r_A}{r_B} + \sin \alpha (x_{1A} - x_{1B}) \quad (6 - XVI)$$

Em cada um dos dois pontos  $\bar{e}$  conhecido o respectivo valor do potencial hidráulico, isto  $\bar{e}$ , conhecem-se

$$\phi_A = z_A + \frac{p_A}{\gamma} \quad \text{e} \quad \phi_B = z_B + \frac{p_B}{\gamma}$$

Quanto ao caudal (injectado ou bombado) por unidade de comprimento de furo ( $q$ ), pode ser determinado pela razão seguinte

$$q = \frac{Q}{L}$$

sendo

$Q$  - caudal bombado ou injectado no furo (cavidade cilíndrica)

$L$  - comprimento da zona do ensaio.

Note-se que o valor do comprimento da zona do ensaio deverá corresponder, aproximadamente, à dimensão da malha do modelo concebido para a análise do escoamento.

Recorde-se o que sobre este assunto foi citado no número 6.3.5..

Na posse dos valores de  $\Delta \phi$ ,  $q$ ,  $r_A$ ,  $r_B$ ,  $\sin \alpha$ ,  $x_{1A}$  e  $x_{1B}$ , pela relação (6 - XVI) determina-se a grandeza da condutividade hidráulica do sistema de fissuras testado.

Realmente, na referida equação, a única incógnita  $\bar{e}$  o valor de  $K$ .

Os dois pontos do domínio do escoamento podem ser quaisquer. No entanto, com o fim de evitar a execução de furos em elevado número,  $\bar{e}$  costume determinar o valor do potencial hidráulico no próprio furo onde se efectua o teste, pois se conhecem a pressão de injeção (ou bombagem) e a cota topográfica da zona do ensaio.

O segundo furo deve localizar-se na vizinhança da sondagem. Numa fase seguinte, e, para refinamento do valor obtido para  $K$ , poderá proceder-se em sentido contrário, operando-se o ensaio no segundo furo e efectuando-se as

medições no primeiro.

Ora, como se sabe, a execução de sondagens é uma tarefa que não sendo exorbitantemente cara, não é, contudo, um trabalho muito barato.

Nessas condições, e, com o fim de diminuir os custos de uma campanha de determinação dos elementos hidrogeológicos de um dado maciço rochoso fissurado, tem-se substituído o segundo furo pela consideração do raio de influência do efeito do escoamento criado a partir da sondagem.

Efectivamente, conhecem-se relações que fornecem, com uma certa aproximação, o valor do raio de influência da injeção ou bombagem num furo de sondagem.

Pode referir-se a fórmula empírica devida a SICHARDT [46]

$$R_{\alpha} = 3\,000 (\phi_0 - \phi_{R_{\alpha}}) \sqrt{K}$$

Paralelamente a esta igualdade utilizada em problemas de Hidráulica das Rochas, conhecem-se algumas outras baseadas na tese teórica dos escoamentos em meios porosos.

Continuando as considerações práticas sobre os ensaios de injeção e bombagem, deverão notar-se que, no que tem vindo a ser exposto, a família de fissuras foi testada em zonas situadas superiormente em relação ao nível freático.

Ora, poderão ocorrer situações em que seja importante conhecer as características hidráulicas do meio rochoso em regiões sob o nível freático.

Suponha-se, em primeiro lugar, que já existe escoamento no plano das fissuras.

De imediato se vê que o efeito das acções gravíticas não aparecerá de uma forma directa nas relações que permitem equacionar o escoamento.

Assim, as funções potencial de velocidades e corrente correspondentes ao escoamento no plano da fissura são da forma seguinte

$$\bar{\phi}_F = K j_1 x_1 + K j_2 x_2 \quad ; \quad \bar{\psi}_F = K j_1 x_2 + K j_2 x_1$$

em que

K - permeabilidade hidráulica do maciço rochoso definida

paralelamente ao plano das fissuras  
 $j_i$  - componente na direcção  $Ox_i$  do gradiente do potencial  
 hidráulico activo no plano das fissuras.

A sobreposição dos dois escoamentos em presença é caracterizada pelas funções seguintes. O referencial  $Ox_1, x_2$  é que se encontra alinhado com o eixo

$$\phi = \phi_R + \phi_F = \frac{q}{2\pi K} \log r - j_1 x_1 - j_2 x_2$$

$$\psi = \psi_R + \psi_F = \frac{q}{2\pi K} \theta + j_1 x_2 - j_2 x_1 \quad (*)$$

Estude-se agora a hipótese de não existir escoamento algum no plano das fissuras.

Não há lugar à sobreposição dos dois movimentos considerados anteriormente, restando apenas como funções inerentes ao escoamento as correspondentes ao movimento radial, isto é

$$\phi = \frac{q}{2\pi K} \log r \quad ; \quad \psi = \frac{q}{2\pi K} \theta$$

Aparentemente de simples definição, o fâcies do escoamento nas condições agora apresentadas é influenciado por modificações na forma da superfície livre.

LOUIS e MAINI [46] levaram a efeito uma série de investigações laboratoriais e "in situ", concluindo que o efeito desta distorção pode ser desprezado em zonas junto do furo.

Ora, a teoria exposta sofre na sua exploração prática algumas limitações.

Não sendo intenção desenvolver neste capítulo da Dissertação considerações exaustivas sobre ensaios de bombagem ou de injeção, parece contudo bastante interessante destacarem-se os principais desvios do comportamento do escoamento em relação à teoria do potencial de velocidades, observados nos vários ensaios.

Assim, focar-se-ão os seguintes problemas inerentes à natureza do

---

(\*) Note-se que nos movimentos planos e irrotacionais  $\frac{\partial \phi}{\partial x_1} = -\frac{\partial \psi}{\partial x_2}$  e  $\frac{\partial \phi}{\partial x_2} = \frac{\partial \psi}{\partial x_1}$ .

movimento:

- Ocorrência de fenômenos de turbulência hidráulica durante o ensaio.
- Deformabilidade do meio rochoso fissurado devida às forças do escoamento.
- Influência da existência de outros sistemas de fissuras nos valores obtidos para os parâmetros hidráulicos respeitantes a um dado sistema.

São estas as principais dificuldades na técnica dos ensaios de injeção ou bombagem. Aparecem citadas em quase todos os elementos bibliográficos que versam testes deste tipo: ensaio LUGEON [60] [64] [70]; ensaio com a sonda tripla [45] [48]; ensaio de HARPER [25], etc..

Certos autores como LOUIS [46] consideram ainda importantes (numa verdadeira interpretação do ensaio) dois outros factores que se passam a referir:

- Variação da velocidade (radial) ao longo do escoamento.
- Perda de energia localizada junto ao furo.

No que diz respeito à ocorrência de fenômenos de turbulência hidráulica, viu-se anteriormente no caso do escoamento radial (relembre-se o ponto 6.4.2.1.), que normalmente se despreza o seu efeito, mesmo nos problemas de injeções [44].

Efectivamente, no caso das injeções, o gradiente de pressões instalado junto do furo é muito elevado, pelo que o movimento é completamente turbulento.

Este facto nota-se perfeitamente ao observarem-se os resultados do ensaio, pois neles está patente a forma da relação entre o caudal escoado e o valor da pressão instalada.

Se se pretender tomar em linha de conta a influência da ocorrência de fenômenos de turbulência nas zonas onde estes se manifestam (zonas junto do furo), foi proposta uma expressão por LOUIS e MAINI [46] em resultado de trabalhos efectuados no Centro de Estudos de Mecânica das Rochas do Imperial College. Essa expressão é apresentada de seguida, e representa uma modificação na estrutura do potencial hidráulico referente ao escoamento radial.

$$\phi = \epsilon \frac{1}{2} \left( \frac{Q}{2\pi K_t L} \right)^2 \frac{1}{r} - \frac{\bar{U}^2}{2g} + \text{constante}$$



O coeficiente  $\epsilon$  vale  $\pm 1$  conforme se trata de um ensaio de injeção ou de bombagem.

O símbolo  $K_t$  representa a permeabilidade do sistema de fissuras em saído, na hipótese do movimento turbulento.

A partir do valor de  $K_t$  é possível, por meio de uma relação simples, calcular a permeabilidade correspondente à hipótese do movimento laminar ( $K_{lam.}$ )

$$K_{lam.} = A K_t^2.$$

Na figura 88 pode ver-se o aspecto do resultado de um ensaio de injeção [46].

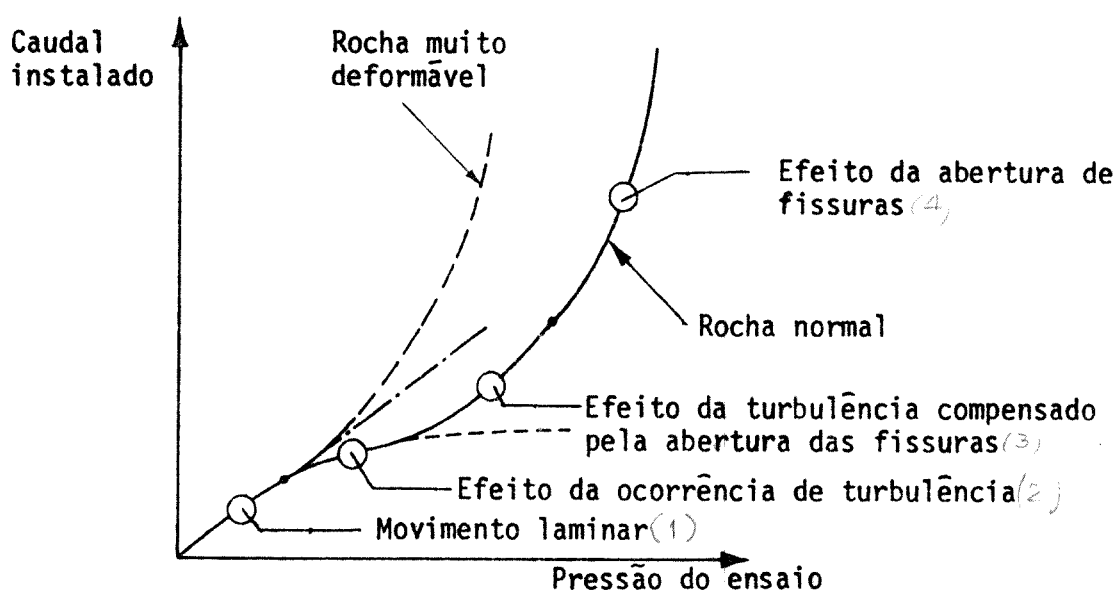
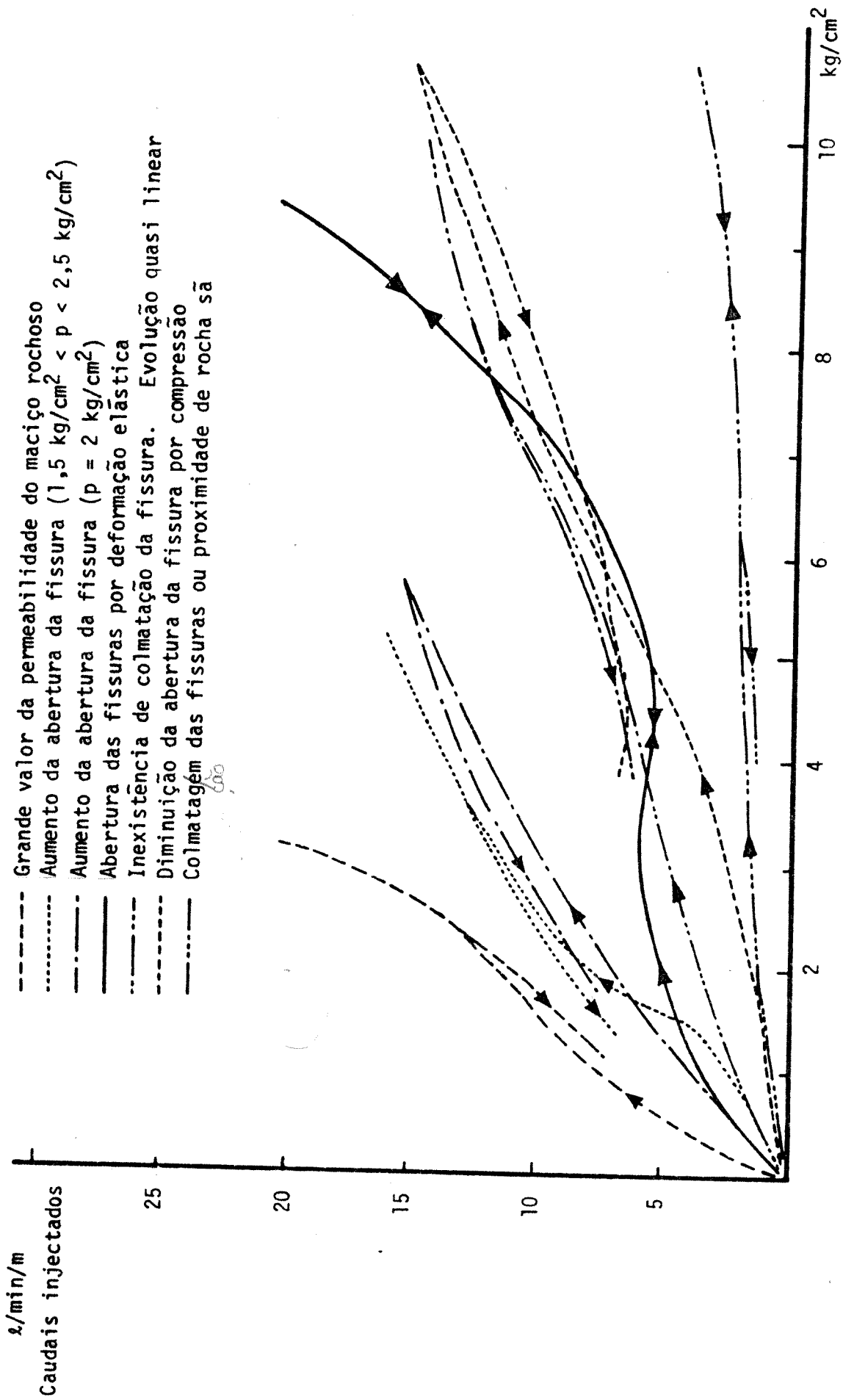


Fig. 88 - Resultados de um ensaio de injeção.

Destaca-se perfeitamente a zona em que o movimento é laminar (região da variação linear do caudal com o gradiente de pressões (1)) e aquela a que corresponde a ocorrência de fenômenos de turbulência hidráulica (2).

Na página seguinte podem observar-se alguns dos resultados obtidos por RAMPON [60] a partir de ensaios de injeção do tipo LUGEON (figura 89).

Nas curvas correspondentes aos vários ensaios está bem patente a transição entre o comportamento linear da relação caudal injectado-pressão



- Grande valor da permeabilidade do maciço rochoso
- ..... Aumento da abertura da fissura ( $1,5 \text{ kg/cm}^2 < p < 2,5 \text{ kg/cm}^2$ )
- .-.- Aumento da abertura da fissura ( $p = 2 \text{ kg/cm}^2$ )
- Abertura das fissuras por deformação elástica
- ..... Inexistência de colmatagem da fissura. Evolução quase linear
- .-.- Diminuição da abertura da fissura por compressão
- Colmatagem das fissuras ou proximidade de rocha sã

Fig. 89 - Resultados de ensaios LUGEON (valores obtidos por A. RAMPON).

instalada, correspondente à zona inicial, e o comportamento não linear daquela relação.

Já que foram referidos os dois aspectos das curvas de variação do caudal escoado com o valor das pressões instaladas, cabe dizer que não é apenas o fenómeno da turbulência que afecta a forma dessas curvas características.

Efectivamente, os enormes valores do gradiente hidráulico que muitas vezes caracterizam os ensaios de injeção (recorde-se que no ensaio LUGEON se atingem pressões superiores a  $10 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ), têm como consequência o aparecimento de um fenómeno secundário que nem por isso deixa de influenciar os resultados de uma forma notável.

Verifica-se a deformação do meio percolante que se constata de sobremaneira em regiões envolventes do furo e muito próximas deste. Nestas condições, para um certo valor da pressão instalada, o caudal injectado atinge valores muito elevados.

Na figura 88 o efeito agora referido está patente nos troços (3) e (4) da curva característica do ensaio.

Também na figura 89 se pode constatar perfeitamente a deformabilidade do meio rochoso, pela análise do desenvolvimento das curvas.

Na figura 90 apresentam-se mais alguns resultados típicos de ensaios de injeção. Por eles se pode constatar a ocorrência de turbulência hidráulica, sendo ainda possível avaliar a natureza, melhor dizendo o estado, do maciço rochoso fissurado. Esta última informação é obviamente de extrema importância na concepção das zonas de fundação dos elementos estruturais das obras de arte.

Estudos efectuados, baseados na teoria da elasticidade do material constituinte do maciço, levaram à conclusão da relação entre os valores da permeabilidade direccionada do domínio percolante no seu estado primitivo (natural),  $K_0$ , e após a deformação motivada pela pressão de injeção,  $K_p$ .

$$K_0 = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{\alpha p}{E_M \frac{2a_i}{b_i}} \right]} K_p$$

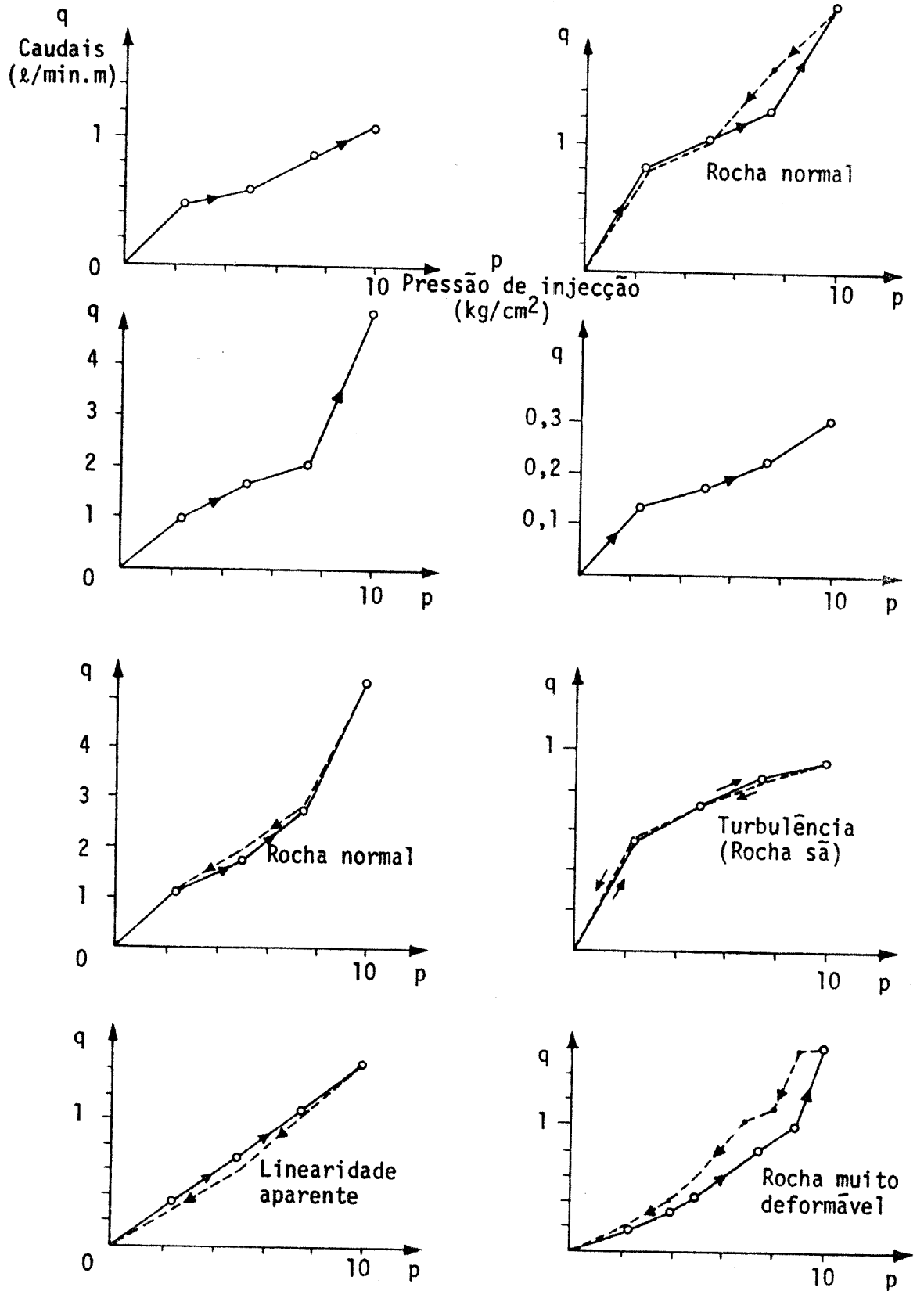


Fig. 90 - Resultados típicos de um ensaio de injeção.

em que

- $p$  - pressão média <sup>instalada no maciço ensaiado</sup> entre os dois pontos do maciço ensaiado  
 $\alpha$  - coeficiente que depende do regime de pressões instaladas  
 $E_M$  - módulo de elasticidade da matriz rochosa definido perpendicularmente à direcção de fissuração (relembre-se o ponto 5.2.).

Esta relação é válida para a grande maioria das situações práticas nas quais o comprimento da zona do ensaio é superior à distância entre fissuras consecutivas. Deste modo, são abrangidas várias fissuras pela zona efectiva do ensaio.

Evidentemente que poderá acontecer que quando da realização do ensaio seja abrangida uma única fissura pela zona do teste. Esta situação é mais rara, não se aplicando então a relação entre as permeabilidades que acabou de ser referida.

SABARLY [46] estudou este assunto em pormenor, podendo ser consultada uma sua memória na qual desenvolve o tema presente.

Efectivamente na hipótese do furo apenas intersectar uma única fissura, o regime de tensões instalado no maciço fissurado por efeito do ensaio tem características completamente diferentes.

No que diz respeito à influência relativa dos outros sistemas de fissuração nos valores da permeabilidade hidráulica obtidos para uma determinada família de fissuras, deve ter-se em conta uma correcta orientação da direcção do furo do ensaio.

Após um estudo sistemático da estrutura do maciço rochoso (\*), fica-se em condições de definir quais as orientações dos sistemas de fissuração considerados como principais.

É então possível determinar uma direcção para o furo do ensaio por forma a que este intersecte apenas um dos sistemas de fissuração principais.

Tal qual atrás foi citado, havendo três sistemas de fissuras principais, a direcção do furo de sonda deverá ser paralela à intersecção de dois

---

(\*) Atente-se num estudo-modelo desta índole, integrado nos trabalhos preliminares da barragem de Grand Maison, nos Alpes Franceses [47].

deles, quando se tem em vista a determinação da permeabilidade hidráulica da outra família de fissuras.

Foram referidos os três factores considerados normalmente como mais importantes ao desenrolar do ensaio de determinação dos valores das permeabilidades direccionais.

Passam-se a comentar dois outros factores a ter em conta neste tipo de testes.

Quanto à variação da velocidade radial ao longo das fronteiras sólidas que limitam o escoamento, é evidente que será máxima num esquema de percolação simplesmente radial. Relembrem-se as bases teóricas desse tipo de movimento insertas no ponto 6.4.2.1..

Recorde-se então a variação radial da altura cinética, isto é a variação radial da energia cinética por unidade de peso. O valor médio encontrado foi

$$\left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \right]_{\text{méd.}} = - \frac{6}{5} \frac{U^2}{gr}$$

Com base neste resultado, e, atendendo ao facto da velocidade não ser constante no esquema radial de percolação, há autores que advogam uma correcção para o valor do potencial hidráulico.

Assim, a expressão do potencial  $\phi$  corrigido será

$$\phi = \frac{Q}{2\pi K} \log r - \frac{6}{5} \frac{\bar{U}^2}{2g}$$

Esta correcção, directamente ligada às forças de inércia, pode ser desprezada na prática.

Quanto à perda de carga que ocorre junto ao furo, sendo uma perda de carga accidental, é avaliada por uma expressão da forma

$$\Delta H^- = C \frac{\bar{U}^2}{2g}$$

Apesar da velocidade junto das paredes do furo poder ser caracterizada por elevados valores, o valor de  $\Delta H^-$  também em muitos casos práticos não

é tido em consideração.

#### 6.4.4. Breve Referência às Técnicas de Ensaio da Determinação das Permeabilidades Direcçionais

##### 6.4.4.1. Ensaio LUGEON

O ensaio mais largamente utilizado durante muitos anos e ainda hoje em dia é o clássico teste de LUGEON [60] [64] [70].

Na realidade, quando em 1933 MAURICE LUGEON apresentou no seu livro "Barrages et Géologie" o ensaio hoje mundialmente conhecido, deu-se um grande avanço nas técnicas de prospecção "in situ" dos parâmetros geohidráulicos dos maciços rochosos fissurados.

Por essa altura foi também definida a unidade LUGEON (U.L.) que exprime o valor do caudal escoado em litros/minuto/metro de furo, sob uma pressão de 10 bars (\*) actuando durante 10 minutos.

A aparelhagem referente ao ensaio pode ser observada na figura 91. É constituída essencialmente por um reservatório alimentador, uma bomba, um medidor de caudais, um manómetro e um ou dois obturadores.

Os obturadores asseguram a estanqueidade entre o tubo e as paredes do furo. *da zona onde se desvenda o escoamento.*

Referiu-se o emprego de um ou dois obturadores. Realmente, conforme a localização da zona a ensaiar, pode empregar-se o conjunto de dois obturadores se se pretende testar a região média do furo, ou então pode utilizar-se apenas um obturador se a medição da grandeza permeabilidade se efectua na extremidade do furo.

Um ensaio do tipo LUGEON (ensaio clássico) é caracterizado por uma série de incertezas respeitantes quer à definição da cavidade cilíndrica (furo), quer à forma das superfícies de corrente do escoamento.

Na realidade, a simetria do escoamento pode ser esférica, cilíndrica (radial) ou ainda apresentar características mistas.

É assim bastante difícil uma correcta interpretação dos resultados obtidos, sendo essa interpretação ainda mais dificultada pelo facto dos maciços rochosos fissurados serem caracterizados por uma notável anisotropia no

---

(\*) 1 bar = 1,02 kgf.cm<sup>-2</sup>.

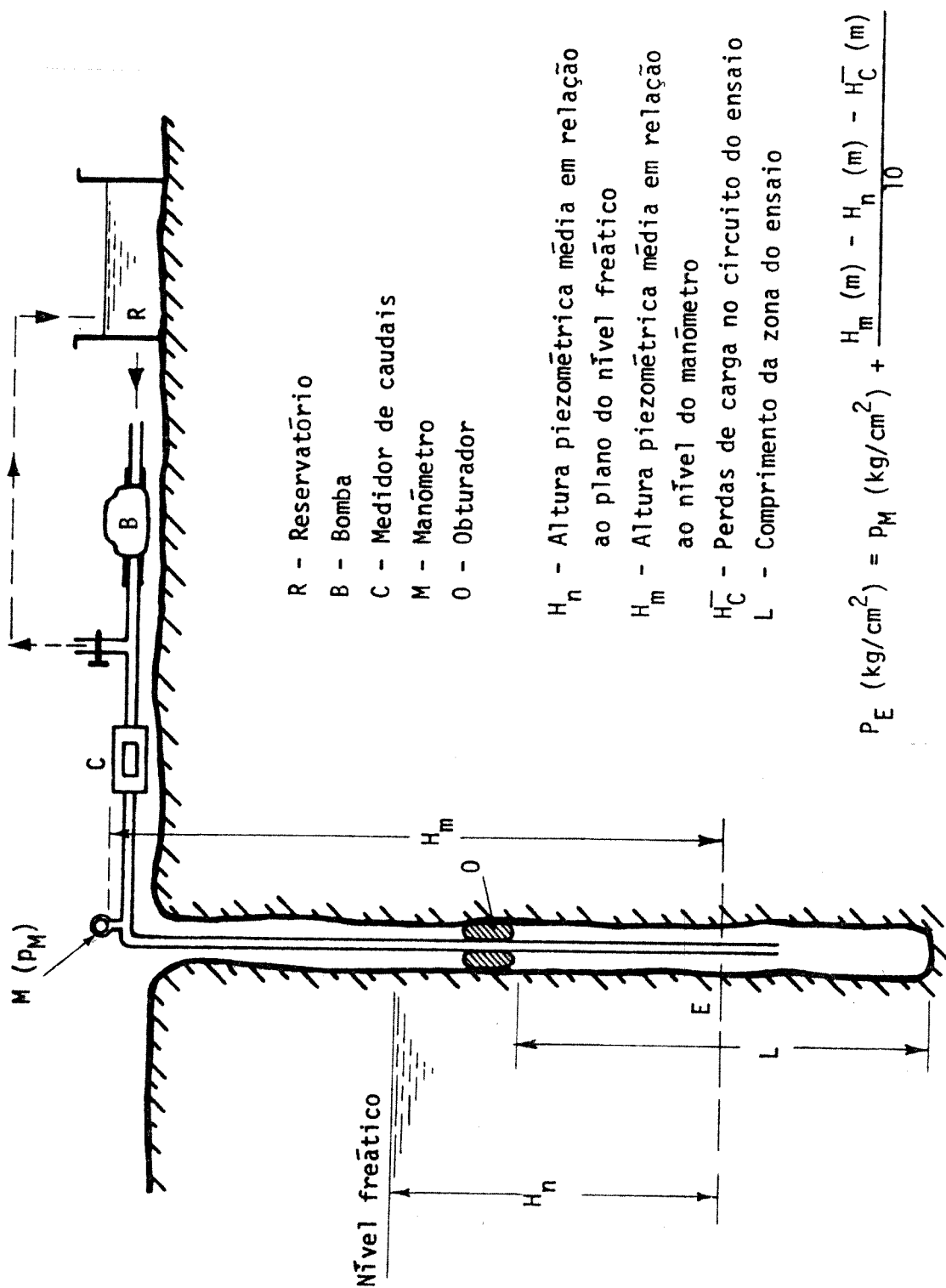


Fig. 91 - Ensaio LUGEON. Esquema da aparelhagem. Princípio base do ensaio.



respectivo comportamento hidráulico.

Tal qual foi apresentado pelo seu autor, o ensaio LUGEON nem sequer especifica a direcção de execução do furo onde se desenrola o teste.

Também a determinação da permeabilidade não é acompanhada por quaisquer medições de controle piezométrico.

#### 6.4.4.2. Sonda Tripla de CLAUDE LOUIS

Em 1972 CLAUDE LOUIS [48] patenteou em França uma sonda destinada à determinação do valor da permeabilidade de direcção de um maciço rochoso fissurado.

Esta sonda é designada por Sonda Tripla, derivando esta designação da própria forma como é constituída. Resultou de uma série de investigações levadas a cabo no Bureau de Recherches Géologiques et Minières d'Orléans.

Este instrumento de prospecção foi concebido pelo seu autor por forma a limitar os inconvenientes referidos para o ensaio tradicional de injeção de LUGEON.

Atente-se na figura 92. Nela está representado o esquema da Sonda Tripla de LOUIS.

O escoamento na zona central (entre os dois obturadores) tem características perfeitamente cilíndricas.

O ensaio pode efectuar-se em qualquer zona do furo, seja qual for o comprimento deste.

Podem empregar-se três ou quatro obturadores. Na figura 93 está representada uma sonda com quatro obturadores. Utilizam-se três obturadores quando, como no caso esquematizado na figura 92, se ensaiam zonas junto ao fundo do furo.

A pressão característica do ensaio será em princípio a mesma nas três secções do furo.

Para efeitos de quantificação do valor da permeabilidade direccional, somente é de considerar o escoamento na zona central (de características cilíndricas).

Se eventualmente forem considerados no ensaio (e isso é possível com esta sonda) valores diferentes para as pressões instaladas nas três zonas

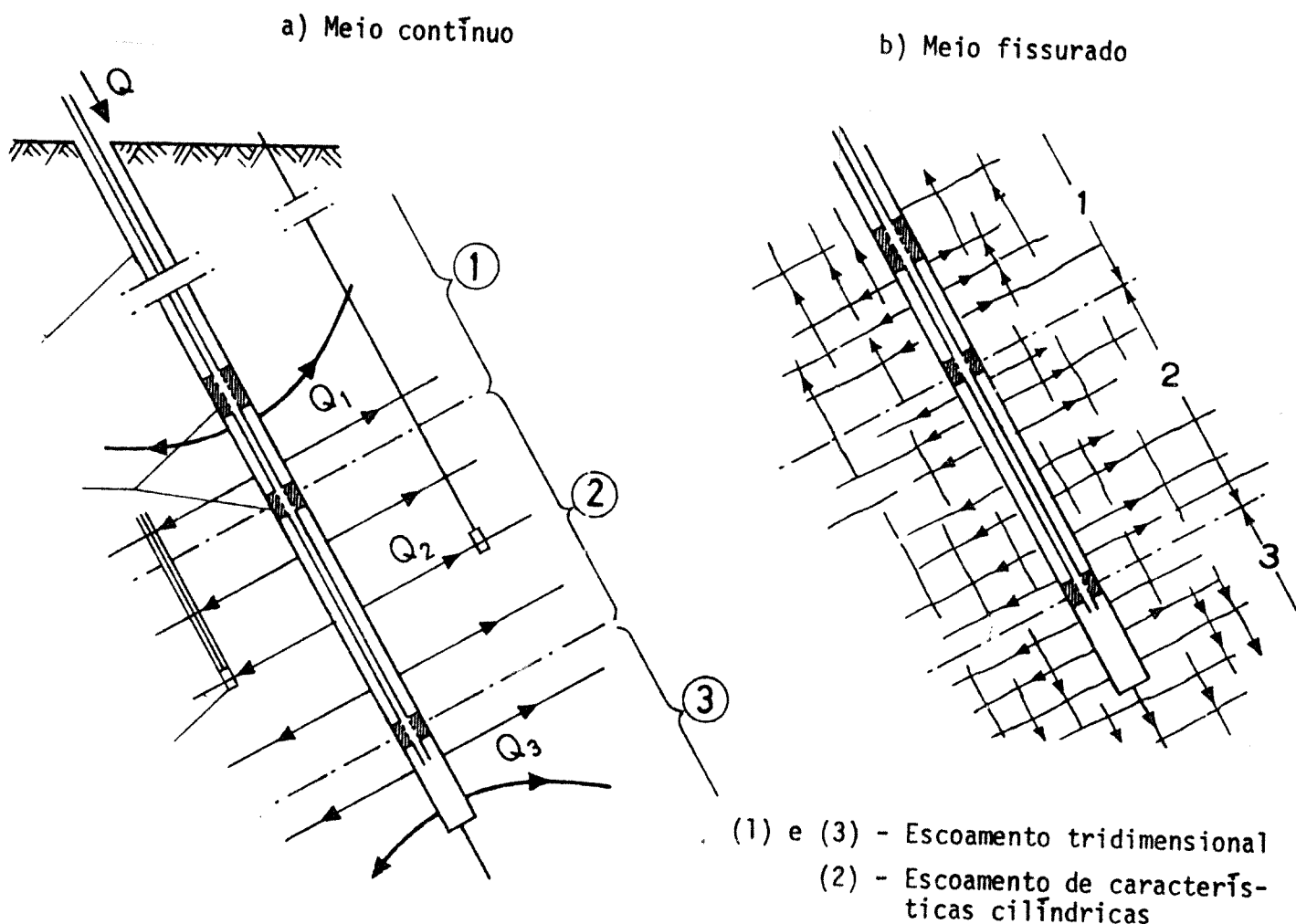


Fig. 92 - Sonda Tripla. Representação esquemática.

entre os obturadores, poder-se-á avaliar aproximadamente a permeabilidade na direcção paralela ao furo de sonda.

Esta sonda é igualmente aplicável na determinação das características hidráulicas de meios porosos (figura 92 a)).

No que diz respeito à medição dos caudais inerentes à realização do ensaio, foram projectados dois tipos de sondas:

- Sonda Tripla com medição dos caudais por processo hidráulico.
- Sonda Tripla com medição dos caudais por processo eléctrico.

Uma mais completa alusão e descrição da Sonda Tripla pode ver-se na publicação [48].

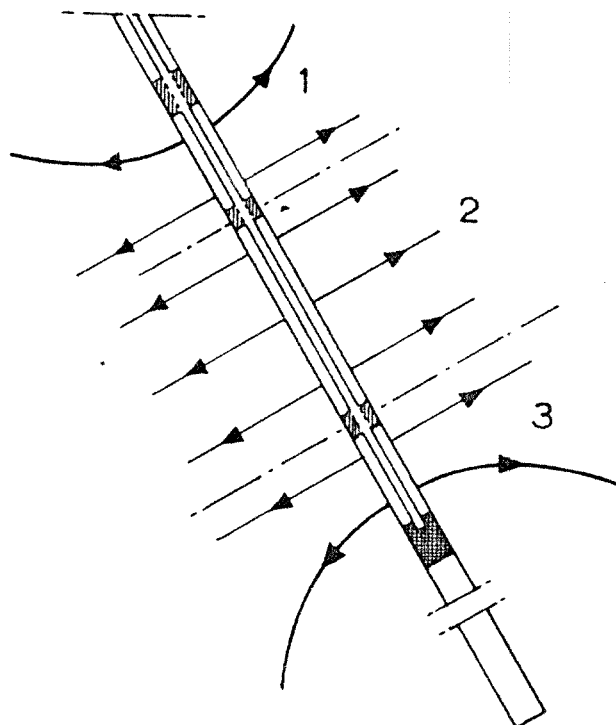


Fig. 93 - Sonda Tripla com quatro obturadores.

Atente-se no entanto que o modelo da Sonda Tripla em que a medição dos caudais é executada por processo hidráulico é o único que permite a realização de ensaios com diversos valores para as pressões instaladas nas várias secções do teste. Realmente, analisada a estrutura da sonda daquele tipo a qual é constituída por dupla tubagem de injeção, é fácil imaginar a possibilidade de ensaiar, com valores diferentes da pressão, as diversas zonas do maciço rochoso fissurado.

A Sonda Tripla não é utilizada isoladamente pois, como qualquer ensaio de determinação da permeabilidade direccional, deverá existir um controlo dos resultados no que diz respeito às condições piezométricas do domínio testado.

Emprega-se assim em conjunto com a sonda um instrumento de detecção das alturas piezométricas, designado por Piezopermeâmetro (Piezopermeameter) [48].

Claro que o Piezopermeâmetro pode ser também utilizado de uma forma isolada se se pretender apenas avaliar pontualmente o valor da altura piezométrica.

Este aparelho de sondagem evita, ou pelo menos reduz enormemente, os inconvenientes dos processos tradicionais de quantificação das condições piezométricas de uma dada região testada.

Esses inconvenientes são, como se sabe, fundamentalmente os seguintes:

- Perturbação do regime hidráulico instalado na zona a sondar.
- Dificuldade na obtenção de informações pontuais.

Efectivamente, durante todo este capítulo, tem-se vindo a evidenciar o carácter pontual da distribuição do potencial hidráulico num dado domínio. São assim possível definir perfeitamente o conjunto dos valores do gradiente hidráulico, e também somente nessas condições se pode fazer um traçado correcto das linhas equipotenciais (ou superfícies equipotenciais).

Na figura 94 pode ver-se de uma forma esquemática a constituição do Piezopermeâmetro.

Trata-se de um obturador generalizado disposto ao longo de todo o comprimento do furo, no qual está intercalada uma célula de medição das pressões instaladas no domínio sondado.

Esta célula é saturada por meio de água injectada a uma pressão próxima da que se espera esteja instalada na secção a ensaiar.

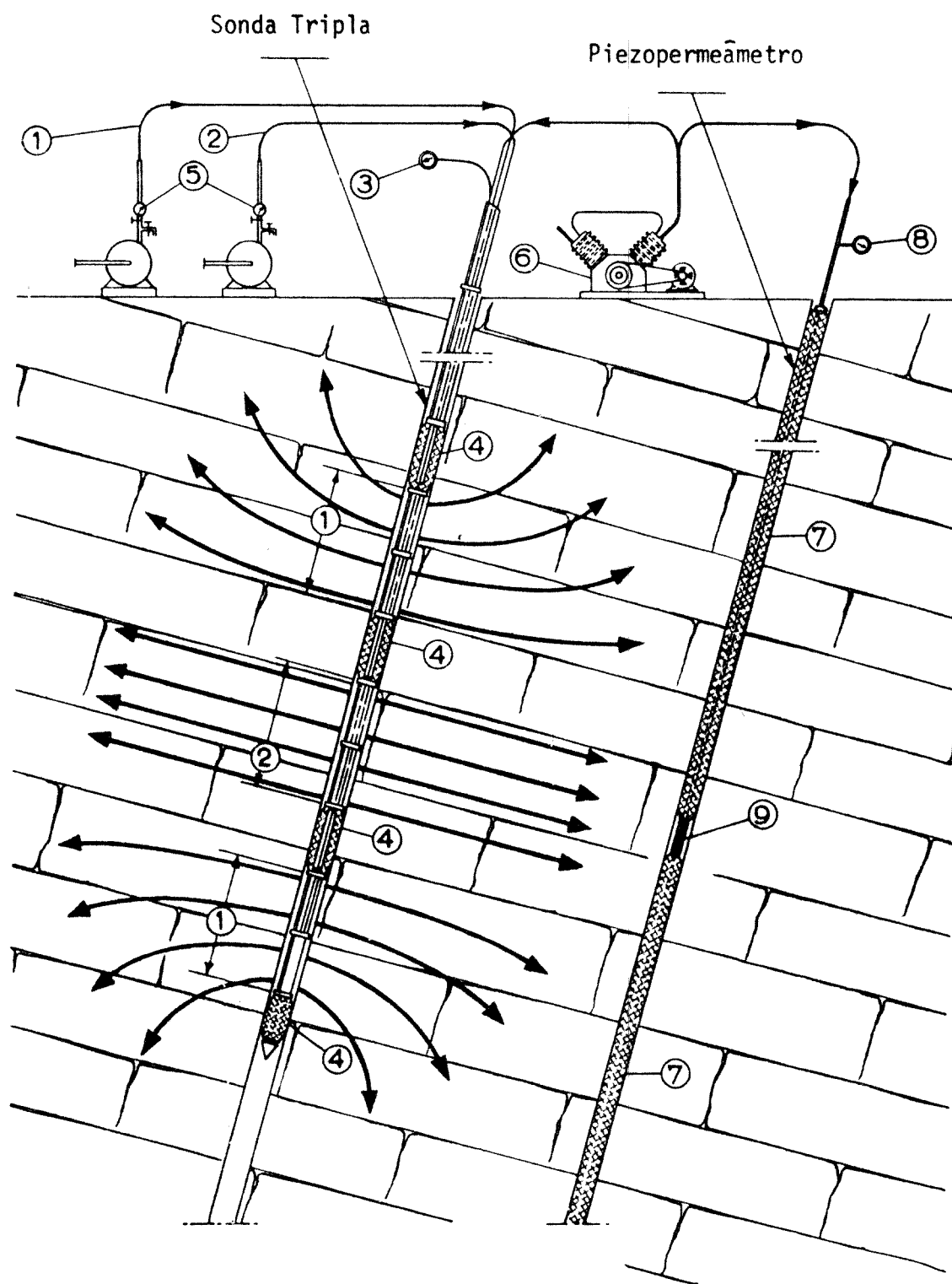
O ar que existe no seu interior é expulso por meio de uma válvula apropriada.

Claro que a igualização das pressões demora um certo tempo. O diagrama de variação das pressões registadas pela célula durante o intervalo de tempo do ensaio, pode por si só, dar uma ideia da grandeza da permeabilidade do meio percolante, na região do teste.

O Piezopermeâmetro é o instrumento indicado para efectuar a determinação da variação do potencial hidráulico em profundidade, já que, como foi exemplificado, permite uma correcta definição dos sucessivos valores pontuais da cota piezométrica ao longo do furo da sondagem.

Essa informação é extremamente importante na formulação das condições de equilíbrio de uma dada zona de um maciço no que diz respeito à quantificação das acções devidas ao escoamento da água subterrânea.

Na realidade, a formulação das condições de equilíbrio é muitíssimo



- |                                     |                                |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1 - Injecção nas cavidades extremas | 5 - Medidores de caudais       |
| 2 - Injecção na cavidade central    | 6 - Compressor                 |
| 3 - Pressão na cavidade central     | 7 - Obturador generalizado     |
| 4 - Obturadores                     | 8 - Pressão medida na célula 9 |

Fig. 94 - Ensaio utilizando a Sonda Tripla e o Piezopermeâmetro.

fundamentada na análise das características de permeabilidade do meio percolante.

#### 6.4.4.3. Ensaio de HARPER

T.R. HARPER do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Aberdeen na Escócia, desenvolveu um tipo de ensaio "in situ" com o fim de medir o valor da permeabilidade de um maciço rochoso [24] [25].

Para pormenores mais detalhados do que aqueles que se referirão de seguida, aconselha-se a consulta da Dissertação de doutoramento apresentada por este autor no Imperial College da Universidade de Londres.

Trata-se de um tipo de ensaio muito simples utilizando um único obturador suspenso de um fio metálico. O obturador percorre o furo de sonda efectuando-se o ensaio na zona situada entre ele e a parte revestida do furo. Atente-se na figura 95. Nela estão esquematicamente expostas as características do ensaio.

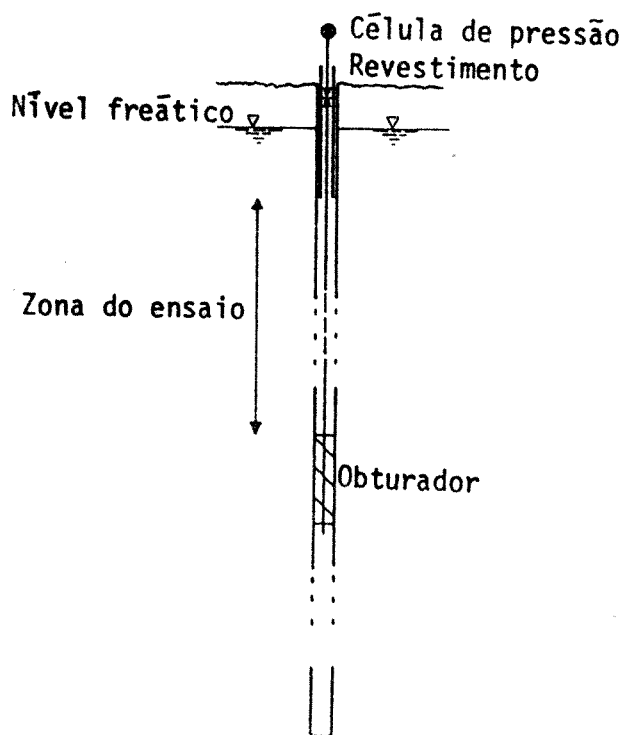


Fig. 95 - Ensaio de HARPER.

O teste consiste essencialmente em analisar convenientemente a descida da superfície livre da água no interior do furo de sonda. Essa superfí

cie livre situa-se a cota mais elevada que o nível freático da formação ensaiada.

É evidente a possibilidade de execução do ensaio a vários níveis, obtendo-se assim informações muito importantes quanto à variação da permeabilidade das formações rochosas em profundidade.

O ensaio também pode ser efectuado ao longo de um furo realizado em formações porosas pouco estáveis. Nessas condições o teste deverá efectuar-se imediatamente após a furação.

Por este pormenor facilmente se constata o facto deste tipo de ensaio apenas ser economicamente apropriado no caso de formações estáveis.

Existe um tubo (aberto na extremidade inferior) que atravessa o obturador por forma a detectar aumentos bruscos de carga correspondentes a pressões artesianas reinantes em determinadas camadas.

As alturas de água iniciais deverão ser de molde a não criarem valores importantes da carga hidráulica instalada na fissura, evitando assim a sua abertura, e, conseqüentemente, uma ideia errada do valor da permeabilidade do meio rochoso fissurado.

A maior vantagem deste tipo de ensaio reside no facto de ser muito económico pois não necessita de um grande dispêndio de material, podendo até ser efectuado em furos de sonda previamente executados (não necessariamente com a mesma finalidade).

Todos os instrumentos inerentes à execução do ensaio podem ser transportados por um único homem sem grande esforço da parte deste.

Uma grande desvantagem deste tipo de ensaio diz respeito ao facto da simetria do escoamento não ser perfeitamente cilíndrica. Há pois incerteza na definição das superfícies de corrente.

A análise teórica deste tipo de teste está perfeitamente exposta na publicação de HARPER [25] apresentada no Congresso de Denver de 1974. É evidentemente de índole muito diferente da correspondente ao ensaio de injeção.

As principais hipóteses admitidas pelo autor são:

- O escoamento é do tipo laminar
- ~~Conseqüentemente é utilizada a relação de DARCY (veja-se o ponto 3.4.)~~

→ Inicial  
tubo

- O furo de sonda é uma cavidade cilíndrica disposta normalmente à direcção da fissura
- Existe isotropia no que respeita à permeabilidade no plano da fissura
- As fissuras estão completamente saturadas
- As fissuras são infinitamente rígidas
- É desprezável a variação do raio de influência do ensaio durante o tempo em que decorre
- As condições piezométricas e cinéticas do escoamento constituem as condições fronteira em cada instante.

Com base nestas hipóteses, HARPER equacionou o fenómeno verificado no decorrer do teste, entrando em linha de conta com movimento radial nas várias fissuras e atendendo à contribuição do escoamento nas fissuras onde está instalado um valor da carga hidráulica superior ao correspondente à altura de água no furo. Um tal escoamento dá-se em sentido contrário, isto é, dirige-se para a sondagem.

Pode então concluir a relação interpretativa do fenómeno em estudo.

Considerando duas fissuras em jogo (veja-se a figura 96), a equação do escoamento é

$$-\frac{dh}{dt} = a h_t - b \quad (6 - XVII)$$

sendo o seguinte o significado dos diversos símbolos:

$h_t$  - altura de água no furo referente a um determinado instante (t)

a, b - constantes cujo valor se passa a especificar

$$a = \left[ \frac{(2a_i k')_A}{\ln \left( \frac{r_A}{r_0} \right)} + \frac{(2a_i k')_B}{\ln \left( \frac{r_B}{r_0} \right)} \right] \frac{2}{r_0^2} ;$$

$$b = \left[ \frac{(2a_i k')_A}{\ln \left( \frac{r_A}{r_0} \right)} h_{NA} + \frac{(2a_i k')_B}{\ln \left( \frac{r_B}{r_0} \right)} h_{NB} \right] \frac{2}{r_0^2}$$



Nestas expressões, para além de certas grandezas já conhecidas, o significado das restantes é

- $r_A, r_B$  - raios de influência das fissuras  
 $r_0$  - raio do furo da sondagem testada  
 $h_{NA}, h_{NB}$  - distância vertical entre o nível freático e um da do plano de referência.

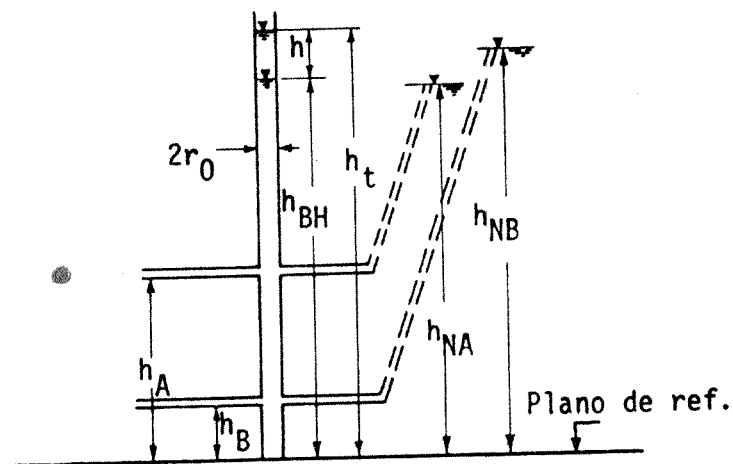


Fig. 96 - Esquema do ensaio de HARPER.  
Caso de duas fissuras.

Depois de certo intervalo de tempo o escoamento estabiliza, avaliamdo-se então facilmente o valor da altura da água no furo.

Efectivamente, como nessas condições  $\frac{dh}{dt} = 0$  e  $h_t = h_{BH}$ , resulta

$$0 = a h_{BH} - b \quad \therefore \quad b = a h_{BH}$$

Substituindo o valor desta constante na relação (6 - XVII), conclui

-se

$$-\frac{dh}{dt} = a h_t - a h_{BH} = a (h_t - h_{BH}) = a h$$

Integrando entre dois determinados limites (1) e (2), vem

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = a \int_{t_1}^{t_2} dt$$

Marcando os valores de  $\ln \frac{h_2}{h_1}$  em ordenadas e  $(t_2 - t_1)$  em abcissas obter-se-á uma recta cujo coeficiente angular vale  $-a$ .

De posse do valor de  $a$ , e, conhecendo <sup>os valores dos raios</sup> as grandezas  $r_A$ ,  $r_B$  e  $r_0$ , pode calcular-se o valor da condutividade hidráulica de toda a cavidade.

Desejando-se os valores das condutividades hidráulicas de cada uma das fissuras, dever-se-á efectuar o teste para sucessivas posições do obturador.

Assim, localizando-se o obturador entre as duas fissuras é possível avaliar-se as grandezas de  $a$  e  $h_{NA}$ .

Situando o obturador abaixo do nível da fissura B, poder-se-á determinar o valor de  $b$ , já que se conhece  $h_{BH}$  e  $a$  (mesmo valor).

Na realidade, viu-se que  $b = a h_{BH}$ .

De posse de  $a$  e  $b$  pode calcular-se o valor de  $h_{NB}$ .

Se em vez de duas fissuras em jogo forem considerados conjuntos de  $n$  fissuras, HARPER apresenta os valores dos factores  $a$  e  $b$  generalizados

$$a = \frac{2}{r_0^2} \frac{n 2a_i k'}{\ln \left( \frac{r}{r_0} \right)} ; \quad b = \frac{2}{r_0^2} \frac{n 2a_i k'}{\ln \left( \frac{r}{r_0} \right)} h_N$$

Podem então ser calculados de um modo análogo os valores de  $(n 2a_i k')$  e  $h_N$  para cada conjunto de  $n$  fissuras (agora consideradas como que equivalentes a uma única, sob o ponto de vista hidráulico).

O autor generaliza ainda as expressões anteriores a um meio poroso (domínio contínuo de percolação).

Observe-se a figura 97. Nela se representam os valores de um ensaio deste tipo realizado em formações metamórficas [24].

Ressalta imediatamente o facto dos valores experimentais obtidos "in situ" não aparecerem dispostos em linha recta, evidenciando uma diminuição do valor absoluto da tangente à curva ao longo do tempo.

Ensaio laboratoriais realizados por HARPER deram resultados semelhantes aos encontrados nos testes "in situ" [25]. Atente-se na figura 98.

O autor atribui os desvios da linearidade observados, ao facto de muitas vezes o valor da pressão instalada nas fissuras intersectadas pelo fu-

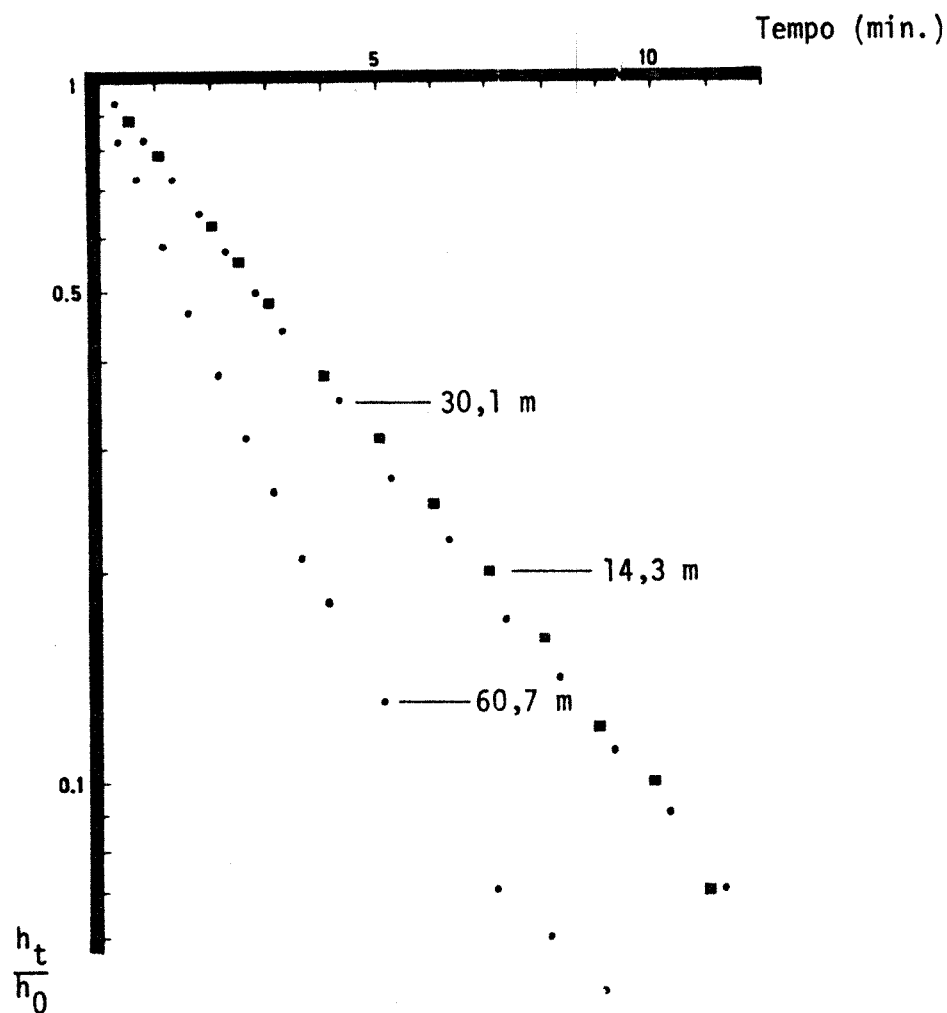


Fig. 97 - Resultados de um ensaio de HARPER efectuado em formações metamórficas, para três posições do obturador.

ro de sonda ser superior ao correspondente à altura de água no furo durante o ensaio. Nestas condições haverá escoamento na direcção do furo e não em sentido contrário.

Nos ensaios laboratoriais nota-se perfeitamente que o desvio na linearidade da função  $\ln \frac{h_t}{h_0} = f(t)$ , coincide com o estabelecimento de escoamento dirigido para o furo.

HARPER admite que a existência de perdas de energia no desenrolar do ensaio também cause o desvio da linearidade observado nas condições citadas anteriormente.

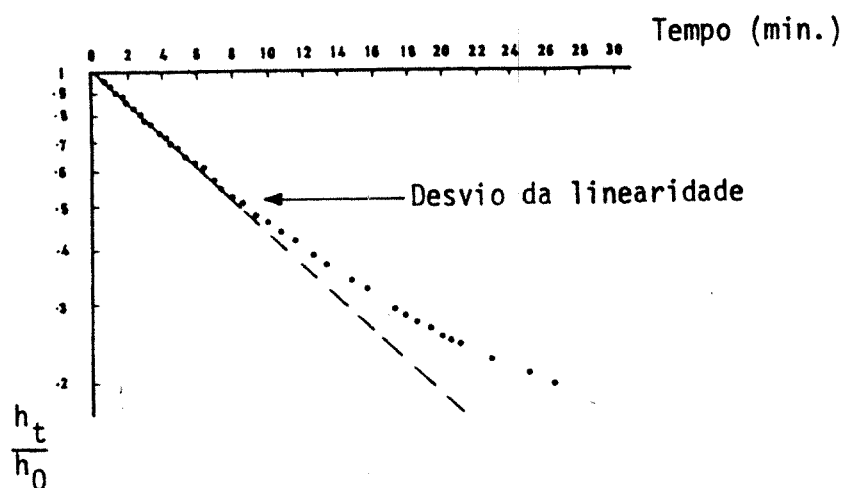


Fig. 98 - Resultados de um ensaio de HARPER do tipo laboratorial.

Uma forma de diminuir a zona de variação não linear da relação em causa, é aumentar o valor da pressão instalada no furo onde se realiza o ensaio.

Ora, como também já foi referido, não convém aumentar exageradamente o valor da pressão instalada no furo de sonda, por forma a não falsear o resultado.

Não se alongará mais este número, mas, antes de finalizar, ilustrar-se-ão estas considerações fazendo a interpretação dos resultados de um ensaio deste tipo.

Atente-se de novo na figura 97. Podem destacar-se três conjuntos de resultados, sendo um referente à localização do obturador à profundidade de 48' (14,3 m), um outro respeitante ao ensaio estando o obturador situado à profundidade de 99' (30,1 m) e um terceiro correspondente ao obturador disposto à profundidade de 199' (60,7 m).

A distribuição de pressão em profundidade não é linear, tendo sido detectada uma subida brusca de pressão entre as profundidades de 240' e 248'.

As camadas do maciço situadas entre as profundidades de 48' e 99' não evidenciam qualquer valor para a respectiva permeabilidade pois, como se pode observar, os resultados do ensaio são quase os mesmos.

#### 6.4.4.4. Considerações finais

Teve este número como finalidade sistematizar os principais tipos de ensaios tendentes a quantificar os valores

das permeabilidades direccionais de um dado maciço rochoso fissurado.

Apontaram-se também os principais inconvenientes de determinados testes.

Desenvolveu-se o ensaio de HARPER, mais como uma mera forma de ilustrar este subcapítulo do que com a preocupação de o apresentar como um teste muito utilizado na definição dos valores do parâmetro K.

# CAPÍTULO 7

---

## ACÇÕES MECÂNICAS DEVIDAS AO ESCOAMENTO

---

### 7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como finalidade principal o cálculo das acções mecânicas devidas ao escoamento.

Já no capítulo 3, quando da introdução de algumas noções de Hidráulica dos Solos, se referiram as acções devidas ao escoamento em tais meios.

Passa-se agora a apresentar um estudo análogo referente ao escoamento em maciços rochosos fissurados.

Tal qual se fez no citado capítulo 3, também aqui a avaliação das acções mecânicas inerentes ao escoamento finaliza toda uma série de considerações respeitantes ao domínio da Hidráulicas das Rochas.

As bases para a quantificação das citadas acções passam pela determinação da distribuição do potencial hidráulico ( $\phi$ ) na região que se pretende estudar. No capítulo anterior foi exemplificada a definição do fâcies do escoamento nas condições mais diversificadas.

Como é evidente, dever-se-ão conhecer também as características geométricas do domínio em análise, isto é, a definição espacial correcta dos diversos sistemas de fissuras em presença.

## 7.2. ESTADO MECÂNICO INERENTE AO ESCOAMENTO ATRAVÉS DO MACIÇO FISSURADO

### 7.2.1. Tensões Tangenciais

Considere-se o troço elementar de fissura representado na figura 99, de comprimento  $dx$ .

Admita-se, como se tem vindo a proceder, que o movimento é uniforme. Sendo então constantes os valores do caudal escoado e da velocidade média, é possível, por aplicação do Princípio da Quantidade de Movimento, estabelecer uma equação de equilíbrio das forças que se exercem sobre o fluido (considerado incompressível) contido no tubo de corrente de comprimento  $dx$  [3]. Esta

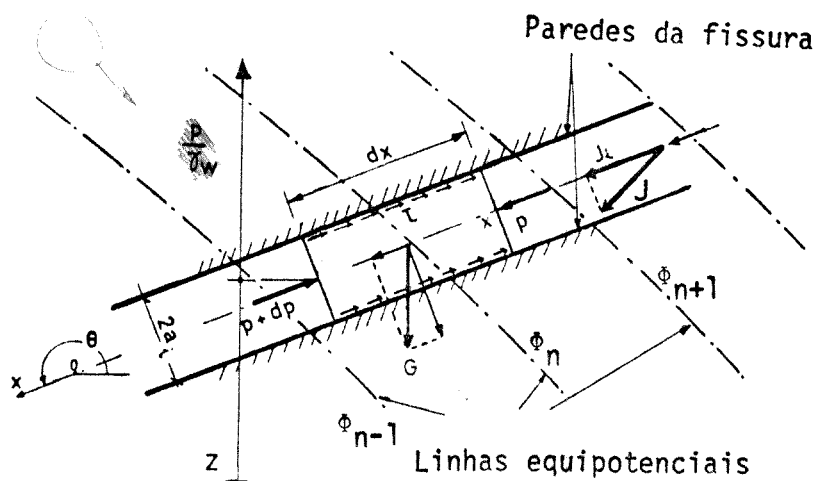


Fig. 99 - Definição do valor das tensões tangenciais inerentes ao escoamento.

equação obtém-se projectando as forças em jogo sobre a direcção da linha média da fissura. Esta linha média resulta da intersecção do plano médio da fissura com o plano do desenho. Considerou-se como positivo o sentido descendente.

Resulta então, considerando um troço de escoamento de largura unitária

$$p \cdot 2a_f - (p + \frac{\partial p}{\partial x} dx) \cdot 2a_f + G \sin \theta - \tau \cdot 2 \cdot dx = 0$$

sendo  $G$  o peso do volume de fluido contido no interior do tubo de corrente elementar, e  $\tau$  a resultante, por unidade de área das paredes da fissura, das

forças que se opõem ao movimento.

A igualdade anterior pode simplificar-se do modo seguinte

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx 2a_i + \gamma dx 2a_i \sin \theta = 2 \tau dx$$

Explicitando o valor da tensão resistente ao movimento, virá

$$\tau = a_i \left( \gamma \sin \theta - \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

ou ainda

$$\tau = a_i \gamma \left( \sin \theta - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

Atendendo ao significado energético de  $\sin \theta = \frac{\partial z}{\partial x}$ , concluir-se-á

$$\frac{\tau}{a_i \gamma} = - j_i \quad \text{ou} \quad \tau = - a_i \gamma j_i \quad (7 - I)$$

dado que a expressão entre parêntesis é igual ao simétrico do gradiente do potencial hidráulico activo na fissura pertencente ao sistema de fissuração  $S_i$ .

Na realidade, o módulo do referido gradiente hidráulico activo vale

$$|j_i| = \left| \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|$$

e

$$j_i = \left( - \sin \theta + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

Pela expressão (7 - I) avalia-se a grandeza das tensões tangenciais resistentes ao movimento do fluido no interior de uma fissura rochosa.

O valor referido é numericamente igual ao correspondente às tensões tangenciais que o fluido no seu movimento, exerce sobre as paredes rochosas.

Como uma tensão é, na sua essência, o <sup>quociente</sup> ~~coeficiente~~ entre uma força e uma área, corresponde a uma grandeza vectorial. Então, poderá escrever-se o que se segue



$$\vec{\tau}_i = \alpha_i \gamma \vec{j}_i$$

sendo  $\vec{\tau}_i$  a tensão tangencial exercida pelo fluido sobre as paredes.

Analisou-se a sollicitação tangencial inerente ao escoamento numa fissura rochosa.

### 7.2.2. Tensões Normais

Serã que as acções mecânicas devidas ao escoamento se reduzem apenas ao tipo de sollicitação que se acabou de estudar?

É evidente que terão ainda de ser consideradas as acções normais às paredes, isto é as acções de pressão. A sua determinação passa pelo conhecimento da distribuição do potencial hidráulico no domínio em estudo.

Na realidade, de posse dos valores de  $\phi = z + \frac{p}{\gamma}$  em determinado ponto (melhor dizendo secção) da fissura, como é conhecido o valor da respectiva cota topográfica em relação a um plano de referência, facilmente se calcula o valor da pressão instalada.

Assim, ter-se-ã

$$\phi = z + \frac{p}{\gamma} \quad \therefore \quad \frac{p}{\gamma} = \phi - z \quad \therefore \quad p = \gamma (\phi - z)$$

### 7.2.3. Definição do Fácies do Escoamento - Avaliação das Acções Mecânicas. Suas Implicações Mútuas

Logo no início desta Dissertação se frisou a importância de uma correcta avaliação das acções mecânicas devidas ao escoamento.

Ora, a quantificação de tais acções está intimamente relacionada com o fenómeno do escoamento em si.

A definição do fácies do escoamento, isto é, a determinação da distribuição do potencial hidráulico no domínio percolante, constitui então o ponto mais importante na análise do escoamento através de um meio com as características consideradas.

Assim, foram apresentadas de uma forma sistemática e bastante completa as diversas hipóteses de concepção do modelo do escoamento. Por esta

razão, o capítulo destinado a este assunto (capítulo 6), teve um desenvolvimento bastante maior que os outros.

Conhecidos os diversos valores do potencial hidráulico em certos nós da malha percolante, e, na posse do conjunto dos gradientes hidráulicos activos nas fissuras, pode definir-se o valor do escalar  $\phi$  em qualquer ponto da região onde se desenvolve determinado estudo.

É assim possível conhecer-se a grandeza da pressão instalada nas paredes da fissura em qualquer secção do escoamento.

Em conclusão, a correcta definição do fâcies do escoamento é indispensável numa avaliação das acções mecânicas a ele inerentes, já que do conhecimento dos diferentes valores dos potenciais hidráulicos e dos gradientes activos se inferem, respectivamente, as grandezas das acções normais e tangenciais.

Uma errônea determinação destas grandezas acarreta uma quantificação das acções mecânicas diferente da real, o que pode ter consequências eventualmente desastrosas.

### 7.3. QUANTIFICAÇÃO DAS ACÇÕES MECÂNICAS DEVIDAS AO ESCOAMENTO

#### 7.3.1. Considerações Prévias

No ponto anterior fez-se a caracterização do estado mecânico inerente ao escoamento através do maciço rochoso.

Este pode apresentar-se dividido por diferentes sistemas de fissuras principais como já foi referido várias vezes. Neste número vai analisar-se a forma de calcular a resultante das acções mecânicas que podem ocorrer numa questão desta índole.

No maciço rochoso serão consideradas três famílias de fissuras principais.

São duas as naturezas dos esforços exercidos pelo fluido sobre as paredes da fissura as quais constituem as fronteiras sólidas do escoamento: acções tangenciais e acções de pressão.

Este estudo tem como finalidade um melhor conhecimento dos efeitos mecânicos resultantes da circulação das águas subterrâneas.

### 7.3.2. Acções Tangenciais

Seja  $S_i$  um dos vários sistemas de fissuração que dividem determinado maciço rochoso.

Atente-se na figura 100. As fissuras têm a abertura  $2a_i$ , estando distanciadas entre si de  $b_i$ . Considere-se o bloco rochoso representado a tracejado. As suas dimensões são  $[\ell \times (b_i - 2a_i) \times 1]$ .

Ao longo das duas faces de comprimento  $\ell$ , desenvolvem-se acções tangenciais devidas ao escoamento nas fissuras.

Admitindo a constância do valor do gradiente hidráulico activo nas fissuras do bloco considerado, a resultante das acções tangenciais sobre as duas faces é igual a

$$2 \tau_i \ell 1 = 2 a_i \gamma j_i \ell 1 \quad (7 - II)$$

Fig. 100 - Acções tangenciais sobre o maciço fissurado.

Deste modo, o valor da resultante das acções tangenciais, por unidade de volume do maciço fissurado, é

$$T_i = \frac{2a_i}{b_i} \gamma j_i$$

Repare-se que a solicitação tangencial calculada a partir da igualdade (7 - II) diz respeito a um volume do maciço rochoso de valor  $[\ell \times b_i \times 1]$ .

A expressão desta resultante pode ser escrita na forma vectorial do modo seguinte

$$\vec{T}_i = \frac{2a_i}{b_i} \gamma \vec{j}_i$$

(\*) O índice  $i$  refere-se à fissura assim indexada, melhor dizendo, a uma fissura pertencente ao sistema  $S_i$ .

Esta relação não é rigorosa pois não entra em conta com a existência de outros sistemas de fissuração que eventualmente existam.

LOUIS [43] cita na sua Tese uma expressão mais complexa que, uma vez simplificada, se transforma na igualdade anterior.

Ora, conhecendo-se as características geométricas de um maciço rochoso fissurado, imediatamente se nota que o cociente  $\frac{2a_i}{b_i}$  toma valores muito pequenos.

Assim, o valor da resultante das acções tangenciais exercidas sobre as fissuras pertencentes a um determinado sistema  $S_i$  é também bastante pequeno.

Para já não foram ainda quantificadas as acções normais sobre as paredes das fissuras, pelo que não se pode comparar a sua resultante com a agora obtida para as acções tangenciais.

Note-se no entanto e desde já, que em grande número de casos práticos, a citada solicitação tangencial não é tomada em consideração na avaliação das acções mecânicas devidas ao escoamento.(\*).

### 7.3.3. Acções Normais

Passa-se a calcular a resultante das acções normais ou de pressão exercidas pelo fluido que se escoar, sobre as paredes das fissuras. Esta avaliação será feita por unidade de volume do maciço rochoso fissurado.

Recordem-se antes de mais as noções de fissura principal e fissura secundária (relembre-se o ponto 1.3.1.).

Embora o movimento apenas se verifique nas fissuras principais e portanto não haja dúvidas de que ao longo das suas paredes estão instaladas pressões devidas ao escoamento, cabe dizer que mesmo ao longo das fissuras secundárias se exercem pressões sobre as respectivas paredes.

Já o mesmo não poderia ser afirmado para as acções tangenciais que pressupõem a existência de movimento.

Na realidade, as tensões resistentes ao movimento apenas se manifestam no caso daquele se efectivar.

---

(\*). Exceptua-se o caso especial do maciço se encontrar dividido por uma família de fissuras, ocorrendo determinadas condições fronteira e certa geometria da fissuração.

Considere-se então o elemento de volume de maciço rochoso representado na figura 101.

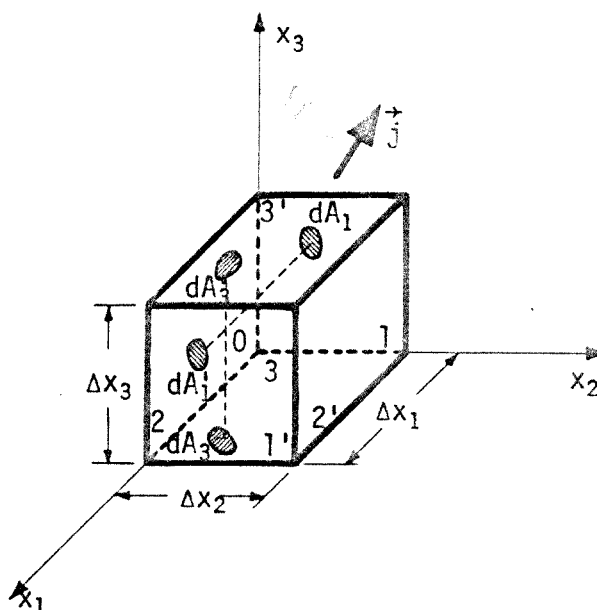


Fig. 101 - Acções normais sobre o maciço fissurado.

Este bloco foi extraído de um meio rochoso fissurado no qual se podem considerar três sistemas de fissuras principais normais entre si. Claro que a demonstração que se segue poderia ser generalizada para o caso de três sistemas de fissuração arbitrariamente orientados (\*). Não se procedeu assim, pois achou-se mais acessível o modo de exposição seguinte, tendo em vista que, uma vez feita a advertência da generalidade da questão, interessaria não enveredar por um processo longo e trabalhoso.

Mais uma vez se considera, face às dimensões do bloco rochoso, a constância do valor do ~~gradiente hidráulico activo~~ *vector gradientes hidráulicos* no volume ocupado por aquele.

As seis faces do bloco pertencem a planos de fissuração das três famílias em presença.

O sistema de eixos  $Ox_1x_2x_3$  está ligado ao bloco rochoso da forma indicada na figura.

Recorde-se o ponto 4.2.4.. Por definição do gradiente do potencial hidráulico tem-se o seguinte conjunto de componentes

$$j_1 = - \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} ; \quad j_2 = - \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} ; \quad j_3 = - \frac{\partial \Phi}{\partial x_3}$$

(\*) Consulte-se a publicação [43].

Sendo o vector  $\vec{j}$  definido do modo seguinte no referencial ortonormal do  $Ox_1x_2x_3$ .

$$\vec{j} = j_1 \hat{e}_1 + j_2 \hat{e}_2 + j_3 \hat{e}_3$$

Vai-se quantificar a resultante das tensões normais às paredes do bloco rochoso, considerando separadamente as acções sobre cada conjunto de duas faces paralelas.

Atente-se em primeiro lugar nas duas faces 1 e 1'. Sobre cada uma delas disponham-se dois elementos de superfície, situados no enfiamento um do outro, e designados, respectivamente, por  $dA_1$  e  $dA_1'$ .

Pela expressão de definição do potencial hidráulico  $\phi$ , podem calcular-se os valores das pressões nos vários pontos do bloco rochoso. Particularmente, as pressões reinantes nos elementos  $dA_1$  e  $dA_1'$  são (\*)

$$p(dA_1) = \gamma [ \phi(dA_1) - z(dA_1) ]$$

$$p(dA_1') = \gamma [ \phi(dA_1') - z(dA_1') ]$$

É evidente que a cota topográfica  $z$  coincide com o valor da coordenada  $x_3$ .

Como os elementos de superfície considerados sobre as faces 1 e 1' estão por hipótese dispostos no enfiamento um do outro, a resultante das pressões exercidas sobre o volume cilíndrico elementar do material rochoso cujas bases são constituídas por  $dA_1$  e  $dA_1'$ , vale

$$df_1 = [ p(dA_1) - p(dA_1') ] d\bar{A}_1 \quad (7 - III)$$

É fácil verificar que

$$dA_1 = dA_1' = d\bar{A}_1$$

A relação (7 - III) pode ser escrita da forma seguinte, atendendo a que o eixo do cilindro elementar está situado sobre uma recta de nível.

---

(\*) Como se consideram elementos de superfície, quis-se representar com a expressão  $\phi(dA)$  o valor do potencial hidráulico instalado no baricentro de  $dA$ .

$$\begin{aligned} df_1 &= \gamma [ \phi (dA_1) - \phi (dA'_1) ] \bar{dA}_1 = \\ &= - \gamma [ \phi (dA'_1) - \phi (dA_1) ] \bar{dA}_1 \end{aligned}$$

A variação do valor do potencial hidráulico ao longo do eixo do cilindro elementar é igual a

$$\phi (dA'_1) - \phi (dA_1) = \int_0^{\Delta x_1} \frac{\partial \phi}{\partial x_1} dx_1$$

Esta diferença de potenciais hidráulicos é, de acordo com a situação representada da figura, uma grandeza <sup>negativa</sup> positiva.

Dada a hipótese referida no início destas considerações, o valor do <sup>gradiente</sup> potencial hidráulico pode ser considerado constante em todo o bloco rochoso. Nessa ordem de ideias virá

$$\phi (dA'_1) - \phi (dA_1) = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \Delta x_1$$

Então a expressão (7 - III) pode apresentar-se da forma seguinte

$$df_1 = - \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \Delta x_1 \bar{dA}_1 \gamma$$

A resultante das acções de pressão exercidas sobre as faces 1 e 1' vale pois em valor absoluto

$$f_1 = \gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3$$

Dado que a resultante é uma entidade vectorial, a sua expressão em tal forma é

$$\vec{f}_1 = - \gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \Delta V \hat{e}_1 \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_1} < 0 \right)$$

Note-se que o produto  $\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3$  corresponde ao volume do bloco rochoso ( $\Delta V$ ).

Quanto  $\bar{a}$  resultante das forças de pressão actuantes sobre o conjunto das faces (2 e 2'), o seu valor determinar-se-ia por meio de uma análise semelhante. Resultaria então, de acordo com a situação apresentada

$$\vec{f}_2 = - \gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \Delta V \hat{e}_2 \quad \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} < 0 \right)$$

Finalmente, no que diz respeito ao valor da resultante das acções normais sobre as duas restantes faces (3 e 3'), haverá que ter em conta a variação da cota topográfica ao longo de uma recta vertical (paralela  $\bar{a}$  direcção de  $0x_3$ ).

Por meio de uma igualdade semelhante a (7 - III) pode concluir-se

$$df_3 = [ p (dA_3) - p (dA_3') ] d\bar{A}_3$$

ou seja

$$df_3 = \gamma [ \phi (dA_3) - z (dA_3) - \phi (dA_3') + z (dA_3') ] d\bar{A}_3$$

ou também

$$df_3 = \gamma \{ [ \phi (dA_3) - \phi (dA_3') ] + [ z (dA_3') - z (dA_3) ] \} d\bar{A}_3$$

Esta igualdade transforma-se ainda atendendo às expressões das variações do potencial hidráulico e da cota topográfica que se apresentam de seguida

$$\begin{aligned} [ \phi (dA_3) - \phi (dA_3') ] &= - [ \phi (dA_3') - \phi (dA_3) ] = \\ &= - \int_0^{\Delta x_3} \frac{\partial \phi}{\partial x_3} dx_3 = - \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \Delta x_3 \quad (*) \end{aligned}$$

$$[ z (dA_3') - z (dA_3) ] = \Delta x_3$$

Resulta pois

(\*) Note-se que ~~em módulo~~, o valor de  $\frac{\partial \phi}{\partial x_3}$  é negativo.



$$df_3 = \gamma \left[ -\frac{\partial \Phi}{\partial x_3} + 1 \right] \Delta x_3 d\bar{A}_3$$

A resultante das acções normais sobre o conjunto das faces (3 e 3') valerá então

$$f_3 = \gamma \left[ -\frac{\partial \Phi}{\partial x_3} + 1 \right] \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3$$

Em notação vectorial a expressão de  $f_3$  é

$$\vec{f}_3 = \gamma \left[ -\frac{\partial \Phi}{\partial x_3} + 1 \right] \Delta V \hat{e}_3 \quad \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} < 0 \right)$$

As três componentes do vector sollicitação inerente às acções normais sobre o bloco rochoso são assim as seguintes

$$\vec{f}_1 = -\gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \Delta V \hat{e}_1$$

$$\vec{f}_2 = -\gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \Delta V \hat{e}_2$$

$$\vec{f}_3 = -\gamma \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} - 1 \right) \Delta V \hat{e}_3$$

No início deste número foi referido que a avaliação das acções de pressão seria feita por unidade de volume do bloco rochoso.

Então, representando por  $\vec{F}$  o vector resultante das citadas acções, as suas componentes no sistema de eixos  $Ox_1x_2x_3$ , valerão

$$\vec{F}_1 = -\gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \hat{e}_1$$

$$\vec{F}_2 = -\gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \hat{e}_2$$

$$\vec{F}_3 = -\gamma \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} - 1 \right) \hat{e}_3$$

Tendo em atenção o valor das componentes do vector gradiente do po-

tencial hidráulico, as três igualdades anteriores transformam-se do modo seguinte

$$\vec{F}_1 = \gamma \vec{j}_1$$

$$\vec{F}_2 = \gamma \vec{j}_2$$

$$\vec{F}_3 = \gamma \vec{j}_3 + \gamma \hat{e}_3$$

Enquanto que as expressões das duas primeiras componentes são homogêneas, na relação de definição de  $\vec{F}_3$  aparece o valor do peso específico.

Atente-se no significado do peso específico como parcela da terceira componente do vector  $\vec{F}$ .

Se não ocorrer escoamento ( $\vec{j} = 0$ ), a resultante das acções de pressão tem apenas uma componente diferente de zero (a componente  $\vec{F}_3$ ), e não as considerando agora por unidade de volume, imediatamente se conclui que, nessas condições, a resultante das acções normais é numericamente igual ao peso de um volume de líquido igual ao volume do bloco, isto é

$$\vec{f} \equiv \vec{f}_3 = \gamma \Delta V \hat{e}_3$$

Corresponde esta acção à impulsão exercida pelo líquido em repouso nas fissuras do maciço rochoso.

Este tipo de solicitação pode ser melhor compreendido através das considerações que se seguem.

Observe-se a figura 102. Nela se encontra mergulhado um bloco rochoso numa massa líquida em repouso.

Considere-se o cilindro elementar de base  $dA_3$  e de altura  $\Delta x_3$ .

A <sup>força</sup> pressão exercida pelo líquido em cada uma das bases vale

Na base superior  $dF' = \gamma h dA_3$  ( $\uparrow$ )

Na base inferior  $dF'' = \gamma (h + \Delta x_3) dA_3$  ( $\uparrow$ )

Resulta imediatamente a seguinte igualdade



$$dF'' - dF' = \gamma \Delta x_3 dA_3 \quad (\dagger)$$

O segundo membro desta equação é numericamente igual ao peso do líquido contido no interior do cilindro elementar. O sentido é oposto ao do citado peso.

Assim, a componente vertical da resultante das forças de pressão vale

$$F = \int_{A_3} \gamma \Delta x_3 dA_3$$

Evidentemente que esta força vertical  $F$  é numericamente igual ao peso total do líquido contido no interior do bloco rochoso, mas de sentido ascendente.

Quantificou-se a resultante vertical das forças de pressão.

No que diz respeito à resultante horizontal dessa solicitação, facilmente se conclui que tem valor nulo. Bastaria considerar um cilindro horizontal e proceder analogamente ao que foi feito.

Concluiu-se pois, operando de outro modo, que embora as ações de pressão em jogo sejam consideráveis, a sua resultante é numericamente igual ao peso do líquido contido no volume em questão, tendo, no entanto, o sentido ascendente. Constitui a impulsão sobre o bloco em estudo.

No que diz respeito ao valor desta impulsão por unidade de volume, ela corresponde ao peso específico do líquido que envolve o bloco rochoso.

Terminando este ponto passam a expor-se as principais conclusões encontradas.

A resultante das ações de pressão exercidas sobre a unidade de volume de determinado bloco rochoso, ações essas inerentes ao escoamento atra-

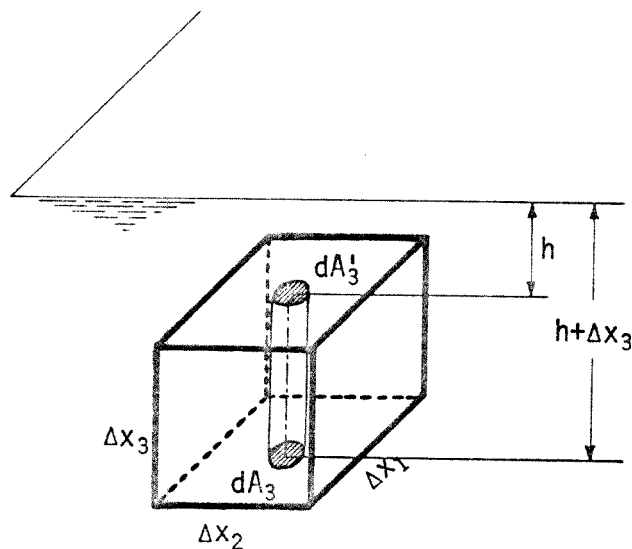


Fig. 102 - Bloco rochoso submetido ao impulso hidrostático.

vés de um meio rochoso fissurado,  $\bar{e}$  é dada por

$$\vec{F} = \gamma \vec{j} + \gamma \hat{e}_3 = \vec{F}' + \vec{H}$$

- 1) Não havendo escoamento ( $\vec{j} = 0$ ), o valor da resultante  $\bar{e}$  é igual à impulsão hidrostática do líquido (no caso mais de maior generalidade trata-se de água subterrânea)

$$\vec{F} = \vec{H} = \gamma \hat{e}_3 = -\vec{\gamma} = -\rho \vec{g}$$

sendo  $\vec{\gamma}$  o peso específico do líquido escoado (força descendente).

- 2) Verificando-se o escoamento, haverá que considerar para além da parcela correspondente à impulsão, a contribuição da força de corrente. A resultante global vale assim

$$\vec{F} = \gamma \vec{j} - \rho \vec{g} \quad (7 - IV)$$

Convirá melhorar a relação geral anterior por forma a tomar em consideração que o maciço rochoso se encontra dividido em blocos separados por fissuras.

A expressão correcta pode ser encontrada na referência bibliográfica [43].

No entanto, como foi referido em 7.3.2., dadas as características geométricas da fissuração, facilmente se conclui que a igualdade (7 - IV) pode ser tomada como verdadeira.

Confirmam este facto alguns autores como WITTKÉ [44], LOUIS [43], etc.

#### 7.3.4. Hidráulica das Rochas - Hidráulica dos Solos.

##### Síntese Comparativa Respeitante às Acções Mecânicas Devidas ao Escoamento

Recordem-se as noções apresentadas no ponto 3.10.. Resumindo o conjunto das acções mecânicas inerentes ao escoamento através de um meio poroso, pode concluir-se a existência de dois tipos de solicitações.

- Uma força dirigida segundo o escoamento cujo valor por unidade de volume  $\bar{e}$

$$\vec{F}_1^* = \gamma \vec{j}$$

- Uma força vertical descendente, correspondente ao peso do esqueleto sólido (conjuntos dos grãos do solo), cujo valor por unidade de volume  $\bar{e}$

$$\vec{F}_2^* = (1 - n) \gamma_s$$

- Uma outra força vertical ascendente devida à impulsão do líquido escoado, cujo valor por unidade de volume  $\bar{e}$

$$\vec{F}_3^* = (1 - n) \gamma$$

Estas duas forças podem ser consideradas em conjunto, sendo a resultante descendente e igual a

$$\vec{F}_{23}^* = (1 - n) (\gamma_s - \gamma)$$

Comparando esta solicitação total com a que foi desenvolvida no número anterior referente às acções homólogas sobre um maciço rochoso fissurado, deverá salientar-se o seguinte:

- A) Perfeita analogia entre as solicitações inerentes ao escoamento em meios porosos e em maciços rochosos fissurados. Claro que o mecanismo do escoamento em si  $\bar{e}$  completamente diferente no caso dos meios fissurados pelo facto das fissuras constituírem caminhos privilegiados de percolação. Como se sabe, o vector velocidade média numa dada secção da fissura não  $\bar{e}$  em geral paralelo ao vector gradiente do potencial hidráulico, tal qual acontece nos problemas de escoamentos em solos.

- B) No caso dos escoamentos em solos as acções tangenciais e normais aparecem englobadas numa mesma solicitação que foi designada por "força de corrente" (atente-se no ponto 3.10.). A sua expressão  $\bar{e}$

$$\vec{F}_1^* = \gamma \vec{j}$$

No problema dos escoamentos em maciços rochosos fissurados tal não sucede, resultando os seguintes valores para as acções mecânicas inerentes ao escoamento propriamente dito (valores por unidade de volume).

Acções Tangenciais (resultante referente a cada sistema de fissuração  $S_i$ )

$$\vec{T}_i = \gamma \frac{2a_i}{b} \vec{j}_i$$

Acções Normais (caso de um maciço com três sistemas de fissuras principais)

$$\vec{F}' = \gamma \vec{j}$$

- C) No que diz respeito à força de corrente em si, é flagrante o paralelismo das expressões correspondentes a ambos os tipos de escoamento.

Escoamento em solos  $\vec{F}_1^* = \gamma \vec{j}$

Escoamento em maciços fissurados  $\vec{F}' = \gamma \vec{j}$

### 7.3.5. Considerações Gerais

Atente-se no facto da resultante calculada para os esforços tangenciais dizer respeito apenas a um dos sistemas de fissuras que dividem o maciço rochoso fissurado.

Frise-se ainda a circunstância da determinação da resultante das acções normais ter sido feita no caso do maciço rochoso se encontrar fragmentado por três famílias de fissuras principais.

Pode pôr-se a questão do como avaliar aquela resultante se o maciço estiver dividido por mais de três sistemas de fissuras.

Seguindo o raciocínio de considerar como um meio contínuo um maciço caracterizado pela ocorrência de elevada densidade de fissuras, o problema posto não cria quaisquer dúvidas à sua solução.

No entanto, em certo número de casos concretos, o maciço rochoso encontra-se dividido por famílias de fissuras cuja concentração em determinado

domínio não é, contudo, de molde a permitir interpretar o meio percolante como contínuo, senão como mero artifício.

Como proceder então para quantificar a resultante das acções mecânicas devidas ao escoamento?

Quanto aos esforços tangenciais, estes são quantificados com respeito a cada sistema de fissuras, devendo conhecer-se o fâcies do escoamento.

No que diz respeito às acções normais de pressão dois aspectos deverão ser meditados:

- Assim, falando da solicitação impulsão, o seu cálculo é simples desde que se conheça mais ou menos correctamente a geometria da fissuração, de modo a poderem ser isolados os blocos rochosos. A geometria da fissuração não deverá ser por demais complicada.

A tarefa de avaliar a solicitação não oferece dificuldades, pois se resume a uma questão elementar do domínio da Estática dos Fluidos, ou, <sup>melhor</sup> ~~no caso~~ <sup>dizendo,</sup> ~~se da circulação das águas subterrâneas~~, do domínio da Hidrostática.

No caso da geometria de fissuração ser caracterizada por uma certa complexidade, a individualização dos blocos elementares não é tarefa tão fácil como no caso citado anteriormente, e poderá conceber-se um modelo percolante baseado em determinadas condições de permeabilidade da região rochosa em estudo. Atente-se no ponto 6.3.6..

- Analisando-se a quantificação da força de corrente em si, evidentemente que o principal problema a solucionar é o da repartição tridimensional do potencial hidráulico em tal domínio percolante. Recorde-se uma vez mais o ponto 6.3.6..

Conhecido o fâcies do escoamento, calculam-se os gradientes hidráulicos (direccionais) activos nas diversas fissuras e facilmente se determina assim a resultante das forças de pressão relativas ao escoamento propriamente dito.

Recorda-se que a expressão de tal força é

$$\vec{F}' = \gamma \vec{j}$$

Terminam-se estas considerações chamando a atenção para dois factos já sobejamente conhecidos e desenvolvidos no decorrer desta Dissertação, mas

que, pela sua importância, nunca é demais realçar dado o papel fundamental que desempenham numa correcta quantificação das acções mecânicas devidas ao escoamento através de meios fissurados.

Em primeiro lugar aponte-se a necessidade de um perfeito conhecimento da distribuição dos potenciais instalados em dado domínio percolante, sem o qual poderá verificar-se uma errada quantificação daquelas acções, com consequências inesperadas e talvez terríveis.

Em segundo lugar registre-se a importância das fissuras secundárias na transmissão de impulsos ao interior do maciço rochoso, apesar de não serem sede de escoamento algum e de não terem por esse motivo papel algum na definição dos valores dos gradientes do potencial hidráulico activos nas diversas fissuras.

Uma última referência ao papel da matriz rochosa no mecanismo da percolação em meios fissurados.

Na grande maioria dos problemas reais de percolação, o meio rochoso aparece dividido por vários sistemas de fissuras que constituem os percursos percolantes por excelência.

A matriz rochosa tem uma permeabilidade de valor desprezável em confronto com a das fissuras.

O maciço rochoso passa a ser considerado como um domínio percolante na sua essência de meio fissurado.

Pode acontecer no entanto que o maciço rochoso seja dividido por apenas uma família de fissuras.

Este problema vem estudado na Tese de LOUIS [43], e, dado o interesse das suas conclusões, aconselha-se a sua análise.

Em tais condições, o papel da matriz rochosa, como única possibilidade de transmissão das acções normais <sup>ao interior do maciço</sup> ~~às paredes da fissura~~, é bastante importante e deverá ser seriamente meditado. Verifica-se uma correspondência de funções entre a matriz rochosa (meio poroso pouco permeável) e as fissuras consideradas como secundárias.

Do maior ou menor valor da permeabilidade matricial, resulta ou não a possibilidade de poderem ser atingidas zonas no interior do maciço pelas acções inerentes ao escoamento.



Esta forma de geometria de fissuração ocorre raramente nos problemas concretos, pois, se por um lado é comum encontrarem-se estratos rochosos planos e paralelos entre si, por outro lado é frequente que essas formações estejam fissuradas, aplicando-se os resultados referidos nos pontos 7.3.2. e 7.3.3. à análise do seu estado mecânico.

#### 7.4. APLICAÇÃO DESTA ANÁLISE A CASOS PRÁTICOS

##### 7.4.1. Generalidades

A caracterização do estado mecânico inerente ao escoamento através de um maciço rochoso fissurado, tem como aplicação imediata a análise da estabilidade de determinado domínio com as características referidas.

Efectivamente, uma vez conhecida a distribuição do potencial  $\phi$  na região que se pretende estudar, e, com base nos resultados que permitiram avaliar as acções mecânicas inerentes ao escoamento, é agora fácil desenvolver um estudo da estabilidade desse domínio.

É este, de resto, o problema que mais preocupa o Engenheiro Civil, na medida em que, como já muitas vezes foi frisado, uma errônea quantificação das solicitações a ter em conta nessa análise pode ter consequências importantes e até funestas.

Os processos de cálculo que se desenvolverão são muito simples e resultam naturalmente de toda a série de considerações que têm vindo a ser feitas.

Atente-se na figura 103. Nela está representado um talude rochoso dividido por dois sistemas de fissuras, perpendiculares entre si, fazendo ângulos de  $45^\circ$  com o plano horizontal.

Pretende-se fazer um estudo da estabilidade de determinado domínio da encosta rochosa. A cunha de escorregamento está representada na figura 103, a tracejado. No que diz respeito à estabilidade do maciço rochoso face às acções mecânicas devidas ao escoamento, dever-se-á considerar um conjunto de blocos rochosos separados por fissuras, pelo que a zona a analisar será a assinalada na mesma figura, envolvendo a cunha de escorregamento.

Efectivamente, são assim se poderão transmitir ao maciço rochoso as



O bloco rochoso elementar ( $dV$ ) está submetido a dois tipos de acções, quantificáveis da forma seguinte (recorem-se os pontos 7.3.2. e 7.3.3.).

$$\text{Acções Tangenciais} \quad \vec{T}_i = \frac{2a_i}{b_i} \gamma \vec{j}_i$$

$$\text{Acções Normais} \quad \vec{F} = \gamma \vec{j} - \rho \vec{g}$$

Como o maciço rochoso se encontra dividido por mais de um sistema de fissuras principais, é lícito considerar desprezáveis as acções tangenciais calculadas para cada sistema de fissuração (\*).

Quanto às acções normais ir-se-ão quantificar separadamente a impulsão hidrostática e a força de corrente.

Quanto à primeira, o seu valor é dado pelo peso de um volume de líquido igual ao volume da zona a analisar.

Como o esquema de percolação pode ser estudado a duas dimensões, far-se-á o cálculo daquela impulsão por fatias do talude rochoso com 1 metro de desenvolvimento.

Resultará então

$$d\vec{h} = -\rho \vec{g} (dA.1)$$

sendo  $dA$  um elemento de área da projecção da zona em estudo no plano da figura.

O valor da acção total de impulsão será igual a

$$\vec{h} = -\rho \vec{g} A = -\gamma A$$

representando  $A$  o valor da área da projecção da citada zona.

Esta solicitação é vertical e dirigida ascendentemente.

No que diz respeito à força de corrente, considerando também uma fatia com um metro de comprimento, o seu valor será

$$\vec{f}' = \int_A \vec{df}' = \int_A \gamma \vec{j} (dA.1) = \gamma \int_A \vec{j} dA$$

(\*) Atente-se na nota do fundo da página 330.

O valor do gradiente  $\vec{j}$  aparece englobado na expressão do integral pois, embora a escala do bloco rochoso possa ser considerado constante, já tal não sucede no interior do domínio referente a fatia de comprimento unitário empregada no cálculo.

Esta solicitação, definida em cada ponto do maciço rochoso fissurado, é paralela ao vector gradiente do potencial hidráulico correspondente a esse ponto.

#### 7.4.3. Ilustração do Processo de Cálculo das Acções Mecânicas Devidas ao Escoamento Através da Definição do Regime de Pressões Instaladas nas Fronteiras do Domínio

Supõe-se ainda conhecido o fâcies do escoamento na zona do maciço rochoso fissurado em estudo.

De posse dos diversos valores do potencial hidráulico  $\phi$  nos vários pontos do domínio, é fácil definir o conjunto de pressões instaladas nesses mesmos pontos.

Efectivamente, da relação de definição de  $\phi$ , conclui-se

$$\phi = z + \frac{p}{\gamma} \quad \therefore \quad p = \gamma (\phi - z)$$

Conseguem-se assim determinar os diagramas de pressões devidas ao escoamento e instaladas ao longo das superfícies limites da zona a estudar.

Uma vez definidos esses diagramas, é fácil quantificar a resultante das acções normais devidas ao escoamento, isto é, de imediato se determina a grandeza da acção

$$\vec{f} = \int_V \vec{F} dV$$

Mais uma vez se desprezaram as acções tangenciais devidas ao fenômeno do escoamento.

#### 7.4.4. Resolução de um Problema Concreto

O caso apresentado diz respeito a um problema de percolação de características planas.

Aproveitar-se-ão os resultados obtidos numa anterior análise da definição bidimensional do fãcies do escoamento. Relembre-se o problema referido no ponto 6.2.2.2.A..

Pretende-se avaliar a resultante das acções normais exercidas ao longo das superfícies que limitam uma certa região da cunha a drenar, situada na zona de jusante da fundação de uma barragem em cúpula. Atente-se na figura 105, inserta na página seguinte, onde se recorda a questão já apresentada.

Note-se que as condições fronteira do escoamento são constituídas pelo fundo da albufeira onde está instalado o potencial hidráulico  $\phi = 137$  m ( $z = 0$  m ;  $p/\gamma = 137$  m), e pela zona de jusante situada a cota zero. Aí reina um potencial hidráulico  $\phi = 0$  ( $z = 0$  ;  $p/\gamma = 0$ ).

A região da cunha a drenar onde se deseja avaliar a resultante das acções normais devidas ao escoamento das águas no maciço de fundação da barragem, está evidenciada na figura 104.

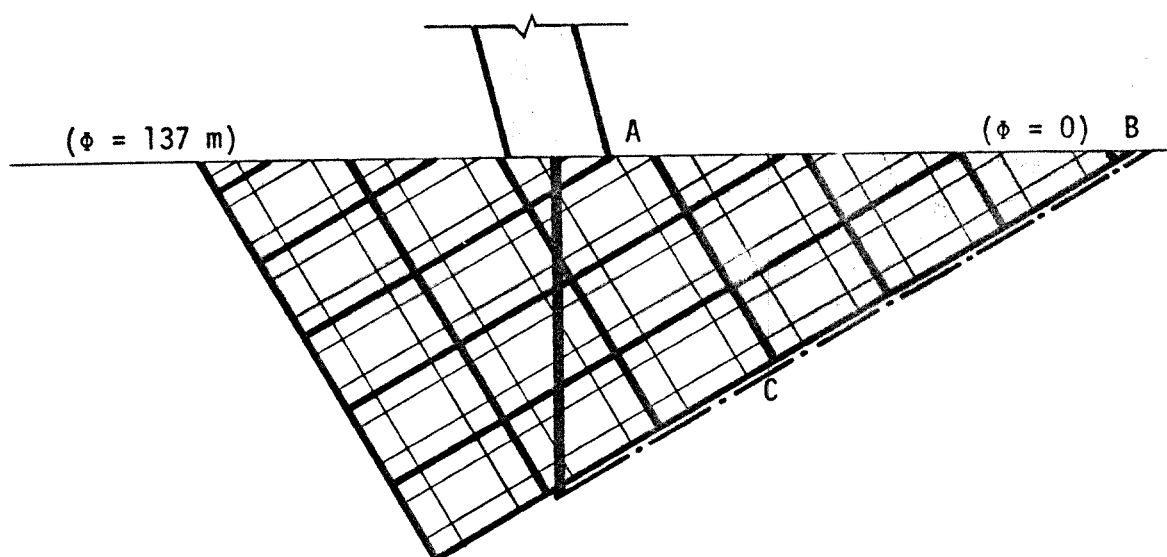


Fig. 104 - Zona de jusante da fundação de uma barragem em cúpula.

Trata-se da zona triangular ABC.

Ao longo da superfície  $\overline{AB}$  reina a pressão zero, em termos de pressão efectiva.

Através dos valores dos gradientes do potencial hidráulico activos nas fissuras elementares, e, partindo do conhecimento do potencial  $\phi$  ao longo da superfície fronteira  $\overline{AB}$ , é fácil definir a distribuição do potencial hidráulico na zona em estudo.

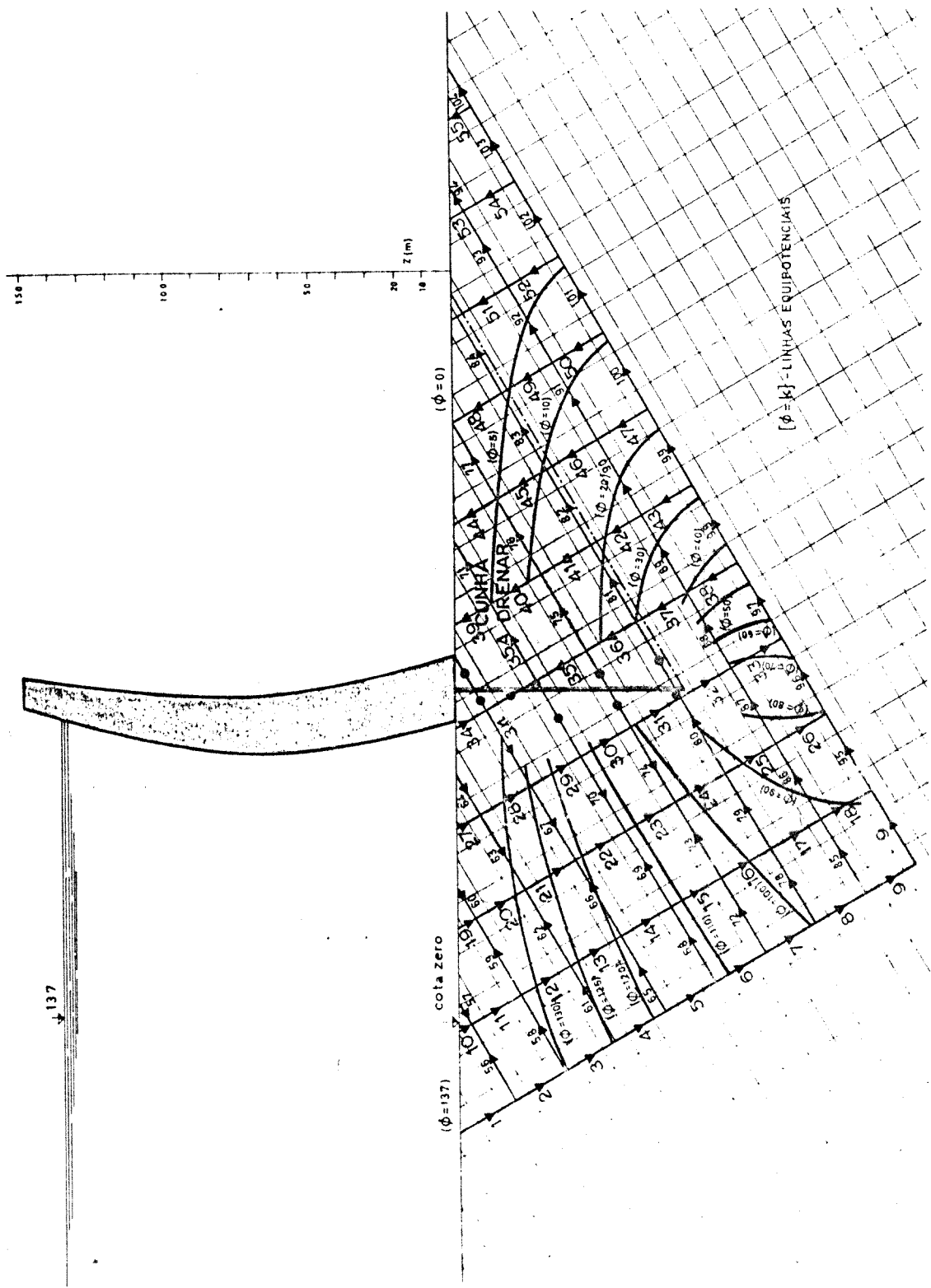


Fig. 105 - Escoamento através do maciço rochoso fissurado constituente da zona de fundação de uma barragem em cùpula. Cortina de injeção vertical.

Os valores dos gradientes activos nas fissuras pertencentes ao domínio ABC, foram obtidos a partir da relação geral dos 104 valores considerados na definição do fâcies do escoamento da água através do maciço de fundação da barragem.

Convirá recordar o ponto 6.2.2.2.A. (de I a VI).

Os doze gradientes hidráulicos são os seguintes:

$$\begin{aligned} j_{39} &= 3,659411 \times 10^{-1} ; & j_{45} &= 2,679209 \times 10^{-1} ; & j_{77} &= 1,806277 \times 10^{-1} \\ j_{40} &= 3,238003 \times 10^{-1} ; & j_{48} &= 2,299657 \times 10^{-1} ; & j_{82} &= 2,600323 \times 10^{-1} \\ j_{41} &= 3,399203 \times 10^{-1} ; & j_{71} &= 2,049270 \times 10^{-1} ; & j_{83} &= 2,075757 \times 10^{-1} \\ j_{44} &= 2,993258 \times 10^{-1} ; & j_{76} &= 2,120326 \times 10^{-1} ; & j_{84} &= 1,456450 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

Na figura 106 está representada com mais pormenor a zona da cunha em estudo. Pode ver-se a numeração dos n.ºs nos quais estão instalados os potenciais hidráulicos seguintes:

$\phi_1 = 0$ m	$\phi_6 = 5,24$ m
$\phi_2 = 0$ m	$\phi_7 = 4,37$ m
$\phi_3 = 0$ m	$\phi_8 = 11,60$ m
$\phi_4 = 0$ m	$\phi_9 = 10,60$ m
$\phi_5 = 5,12$ m	$\phi_{10} = 18,40$ m

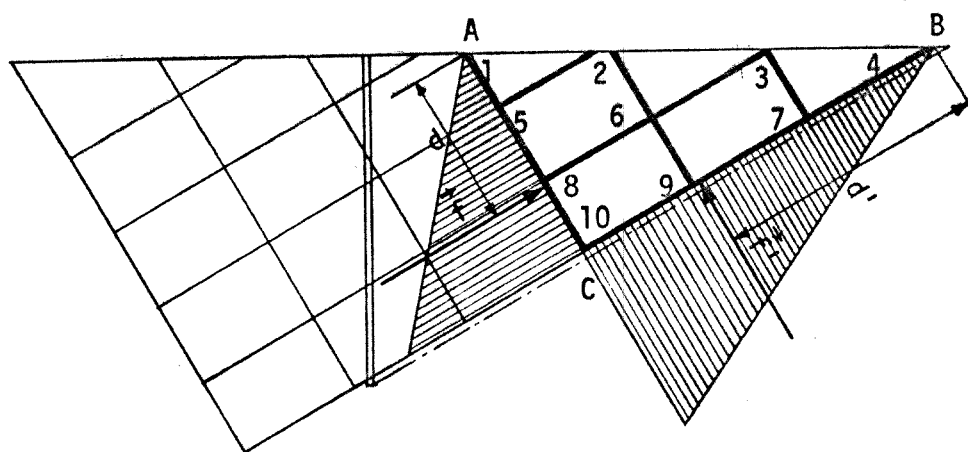


Fig. 106 - Avaliação das acções normais sobre uma zona do maciço de fundação da barragem.

Com base nos valores do potencial  $\phi$ , facilmente se determinam as pressões reinantes nos vários pontos do domínio do problema, particularmente ao longo de  $\overline{AC}$  e  $\overline{BC}$ .

Efectivamente, de posse das cotas topográficas dos n.ºs 5, 8, 10 (so

bre  $\overline{AC}$ ) e 7, 9 (sobre  $\overline{BC}$ ), que se apresentam de seguida

$$z_5 \cong - 12,2 \text{ m}$$

$$z_9 \cong - 32 \text{ m}$$

$$z_8 \cong - 29,5 \text{ m}$$

$$z_7 \cong - 17 \text{ m}$$

$$z_{10} \cong - 47 \text{ m}$$

concluem-se os valores da altura piezométrica instalada nos nós das superfícies limites

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_5 \cong 17,3 \text{ m}$$

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_9 \cong 42,6 \text{ m}$$

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_8 \cong 41,1 \text{ m}$$

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_7 \cong 21,4 \text{ m}$$

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_{10} \cong 65,4 \text{ m}$$

Ainda na figura 106 pode observar-se o diagrama de pressões ao longo de  $\overline{AC}$  e  $\overline{BC}$ .

Como se pode constatar não se verifica uma variação linear das pressões em profundidade.

Este facto pode comprovar-se analiticamente de uma forma muito simples.

Da observação do conjunto dos gradientes hidráulicos activos nas diversas físsuras, ressalta imediatamente o facto de não ocorrerem valores iguais desses gradientes ao longo de percursos de percolação através de fissuras elementares situadas no mesmo alinhamento.

Então, nessas condições, pode concluir-se que não há uma variação linear do potencial  $\phi$  ao longo de qualquer desses trajectos, isto é

$$j = \frac{\partial \phi}{\partial \ell} \neq \text{constante} \quad \therefore \quad \phi \neq c \ell$$

sendo

$\ell$  - percurso ou trajecto de percolação

$c$  - constante

Ora, existe uma relação trigonométrica simples ligando a percurso  $\ell$



e a cota topográfica  $z$ , ou seja

$$z = \ell \cos \alpha = c' \ell \quad \therefore \quad \ell = c'' z$$

sendo  $\alpha$  o ângulo que a direcção de fissuração faz com a horizontal (no caso presente os valores de  $\alpha$  são  $30^\circ$  e  $60^\circ$ ).

Resulta então

$$\phi \neq c c'' z \quad \therefore \quad \phi \neq \bar{c} z$$

Como por definição o potencial hidráulico num dado ponto é igual à soma da cota topográfica definida nesse ponto com a altura piezométrica característica desse mesmo ponto, resulta

$$\phi \neq \bar{c} z \quad \therefore \quad z + \frac{p}{\gamma} \neq \bar{c} z \quad \therefore \quad \frac{p}{\gamma} \neq c_1 z$$

Assim, a distribuição das pressões instaladas nos vários nós do domínio percolante não reflecte uma variação linear com a profundidade.

Voltando ao problema que vem sendo desenvolvido, calculam-se seguidamente os valores das resultantes das acções normais ao longo de  $\overline{AC}$  e  $\overline{BC}$ , considerando um troço de maciço com um metro de desenvolvimento.

No que diz respeito à superfície  $\overline{AC}$ , a resultante total obtém-se do modo seguinte

$$\begin{aligned} |\vec{f}_{AC}| &= |\vec{f}_{15}| + |\vec{f}_{58}| + |\vec{f}_{810}| = 121100 \text{ kgf.m}^{-1} + \\ &+ 584000 \text{ kgf.m}^{-1} + 1065000 \text{ kgf.m}^{-1} = 1770100 \text{ kgf.m}^{-1} \end{aligned}$$

O centro de pressões, ponto de encontro da resultante com a superfície  $\overline{AC}$ , é definido calculando os momentos das acções parcelares em relação a A.

$$\begin{aligned} 121100 \times 9,33 + 584000 \times 25,36 + 1065000 \times 44,78 = \\ = 1770100 \times d \quad \therefore \quad d = 35,95 \text{ m} \end{aligned}$$

Quanto  $\bar{a}$  resultante total das acções normais sobre a superfície BC, vale

$$|\vec{f}_{BC}| = |\vec{f}_{4,7}| + |\vec{f}_{7,9}| + |\vec{f}_{9,10}| = 321000 \text{ kgf.m}^{-1} + \\ + 960000 \text{ kgf.m}^{-1} + 1620000 \text{ kgf.m}^{-1} = 2901000 \text{ kgf.m}^{-1}$$

O centro de pressões  $\bar{e}$  é definido do modo seguinte

$$321000 \times 20,00 + 960000 \times 46,66 + 1620000 \times 76,06 = \\ = 2901000 \times d' \quad \therefore d' = 60,13 \text{ m}$$

Na mesma figura 106 podem ver-se os vectores representativos da solicitação estudada, cujos módulos acabaram de ser calculados.

Com a apresentação deste problema procurou-se ilustrar o processo de avaliação das acções normais devidas ao escoamento, através da definição do regime de pressões instaladas nas fronteiras do domínio em estudo.

Este método é, de resto, o mais utilizado na quantificação da referida solicitação.

## CAPÍTULO 8

---

### CONCLUSÕES FUNDAMENTAIS

---

#### 8.1. PROPÓSITO DESTE CAPÍTULO

Após terem sido focados os pontos fundamentais que qualquer estudo versando a Hidráulica das Rochas deve apresentar, não seria aceitável terminar esta Dissertação de um modo brusco, sem realçar quer as conclusões principais, quer os conceitos mais importantes.

No que respeita aos temas fundamentais, tentou-se fazer a sua apresentação e análise de uma forma que pareceu menos cansativa para quem se debruça sobre esta Tese.

Efectivamente, nos pontos sobre os quais se realizaram estudos experimentais no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P., estes foram apresentados e comentados em comparação com outras análises de índole semelhante realizadas no estrangeiro.

Nos pontos de índole teórica, intercalaram-se certos casos práticos estudados no decorrer da preparação da Dissertação, tornando assim mais aliciante a sua análise.

Após estas considerações sobre a forma como foi apresentada a Tese, passam-se a analisar as conclusões fundamentais a ela inerentes.

#### 8.2. HIDRÁULICA DOS SOLOS - HIDRÁULICA DAS ROCHAS. SÍNTESE COMPARATIVA

Não serão repetidas fastidiosamente certas conclusões sobre este assunto. Ten-

tar-se-ã sim, sistematizã-las.

Assim, nos meios porosos verifica-se toda uma distribuiçã mais ou menos homogênea dos grãos, enquanto que nos maciços rochosos fissurados se podem isolar blocos rochosos separados por fissuras da mais variada natureza.

Nos solos os fenômenos de percolaçã sã analisados ã luz da teoria do potencial, verificando-se a equaçã de LAPLACE respeitante ao potencial hidráulico instalado no domínio do escoamento.

Este é caracterizado por homogeneidade e isotropia notãveis.

Quanto ao escoamento em maciços rochosos fissurados, apenas se pode efectivar atravẽs das fissuras que constituem os caminhos privilegiados para o escoamento, na medida em que o valor da permeabilidade da matriz rochosa é desprezãvel face ao correspondente ã permeabilidade do maciço rochoso fissurado. Recorde-se o ponto 1.4..

No caso dos solos, as linhas de corrente sã na grande generalidade dos casos as trajectõrias ortogonais das linhas equipotenciais cinéticas (supõe-se o movimento plano).

Nestas mesmas condições, mas agora no caso dos meios rochosos fissurados, as linhas de corrente sã paralelas ã direcçã das fissuras, nã se dispondo por esse facto normalmente ãs linhas equipotenciais.

As característias tão diferentes destes dois fãcies do escoamento (o correspondente aos meios porosos e o respeitante aos maciços rochosos fissurados), acarretam tratamentos completamente diferentes quando da anãlise de problemas concretos tais como injecções, drenagens, definiçã de cortinas de estanqueidade, etc..

Quanto ãs acções mecãnicas devidas ao escoamento, esse tipo de soliciuçãõ tem, na sua essẽncia, uma definiçãõ bastante diferente no caso dos escoamentos em meios porosos ou no caso dos escoamentos em maciços rochosos fissurados. Recordando no entanto as correspondentes expressões, constata-se pela anãlise da sua forma, uma razoãvel analogia entre as respectivas soliciuçãões.

### 8.3. CONCEITO DE ESTRUTURA DO MACIÇO ROCHOSO FISSURADO

Desenvolveu-se na pre-

sente Dissertação a ideia de que o maciço rochoso fissurado é caracterizado por uma distribuição ordenada de blocos rochosos separados por fissuras.

Este é talvez um modo rígido de definir a geometria de tal meio percolante. Foi esta a orientação seguida na Universidade de Karlsruhe e em certa medida no Rock Mechanics Center do Imperial College.

O esquema desenvolvido tem recebido numerosas críticas pois, na natureza, nem sempre um maciço rochoso aparece fissurado de forma a apresentar uma malha regular.

Claro que a própria fissuração é suposta, hoje em dia, função da energia intrínseca da própria formação rochosa, e, esta energia pode variar dentro de determinada região.

No entanto, constitui o tratamento aqui desenvolvido uma forma de começar a interpretar os escoamentos em meios rochosos de um modo diferente do que tem vindo a ser feito na maioria dos casos concretos. Hoje em dia ainda se levam a cabo muitos trabalhos no domínio da Hidráulica das Rochas utilizando processos de natureza empírica, baseados em considerações práticas e não apoiados numa base teórica sólida.

Quanto ao facto da hipótese desenvolvida ao longo da presente Dissertação estar mais ou menos de acordo com a realidade, convém referir que grande número de maciços rochosos fissurados são caracterizados por uma geometria muito regular no que diz respeito ao conjunto das fissuras principais.

Outras formações rochosas existem, nas quais esta regularidade não está tão evidenciada.

No entanto, se forem recordados os conceitos fundamentais referentes à determinação do fácies do escoamento no caso da sua repartição tridimensional no domínio percolante, facilmente se verificará como se poderá conceber um modelo tridimensional com base nos valores das permeabilidades direccionais principais. Atente-se nos pontos 6.3.4.1., 6.3.5.1., 6.3.5.2. e 6.3.6..

Se eventualmente o maciço rochoso aparecer fissurado de uma forma perfeitamente desordenada, e, se a concentração das fissuras for evidente, poderá ser considerado como meio contínuo, admitindo-se as hipóteses da teoria do potencial na definição do fácies do escoamento.

#### 8.4. REGIME DE TENSÕES INSTALADO NO MACIÇO ROCHOSO FISSURADO

No equacionamento geral do fenómeno do escoamento através de determinado domínio percolante (rochoso e fissurado), referiu-se a dada altura (veja-se o capítulo 5), a influência do estado de tensão instalado no maciço, no fenómeno da percolação.

Desenvolveu-se todo um conjunto de considerações que culminaram com a obtenção de uma correlação geral entre o caudal escoado, o valor da carga hidráulica instalada e a grandeza da tensão de compressão (simples) actuante na fissura rochosa.

No entanto, quando da apresentação no capítulo 6 do modo de definir a distribuição do potencial hidráulico numa dada região do domínio percolante, apenas se tomou em linha de conta o conjunto dos valores dessa grandeza ao longo de determinadas condições fronteira, sem contudo atender ao regime de tensões instaladas no maciço.

Evidentemente que esta forma de proceder integra-se na linha de vários investigadores estrangeiros como WITTKÉ, LOUIS, PERNOT, MAINI, SHARP, WILSON, WITHERSPOON, etc, que admitem esta maneira de encarar a resolução de um problema no domínio da Hidráulica das Rochas como uma etapa necessária ao estabelecimento de condições do escoamento muito mais realistas do que as inerentes ao tratamento da questão por processos quase empíricos.

Para além deste facto, a teoria ora exposta tem aplicação perfeita em problemas práticos nos quais se verifiquem pequenas variações no estado de tensão instalado.

Nos outros casos em que se prevêem modificações importantes no estado de tensão, servem os fundamentos desenvolvidos nesta Tese para um primeiro estudo do fâcies do escoamento. Este primeiro estudo torna-se muitas das vezes definitivo na medida em que fornece já informações muito importantes para o projecto de determinados trabalhos, que, doutro modo, era bem possível que fossem esquematizados por meio de dados puramente inerentes à prática corrente de execução.

Ora, as modificações do estado de tensão instalado em determinada zona do maciço, traduzem-se na variação do valor da abertura das fissuras. Atente-se no capítulo 5.

Então, por meio de correções sucessivas da abertura das fissuras, poder-se-á definir uma distribuição do potencial hidráulico no domínio percorrente já muito próxima da realidade. Neste processo, a etapa inicial seria assim um estudo do escoamento na hipótese de uma rede rígida de caminhamentos de percolação.

Futuramente, e isso já tem vindo a ser feito, é intenção melhorar os processos de definição do fâcies do escoamento entrando em linha de conta com a variação da abertura das fissuras por efeito da acção conjunta das forças devidas ao próprio escoamento, das forças ~~externas~~ que solicitam o maciço (por exemplo o peso próprio), e das solicitações acidentais que constituem como que as condições fronteira de índole mecânica.

Assim, o refinamento do problema da distribuição tridimensional do potencial hidráulico no maciço rochoso e o melhoramento dessa solução entrando em linha de conta com as modificações no regime das tensões instaladas, são metas que se pretendem atingir num próximo programa de estudos a realizar sob a orientação do autor no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P..

Ilustrando as considerações que se têm vindo a fazer, achou-se muito interessante apresentar para finalizar este número, um esquema de um programa de análise que foi desenvolvido na Universidade da Califórnia (BERKELEY) por BREKKE, WITHERSPOON, MAINI e NORISHAD [7].

Trata-se de um cálculo utilizando o método dos elementos finitos referente à análise bidimensional da zona de fundação de uma barragem.

Se se tratasse de um problema tridimensional, evidentemente que a única dificuldade que apareceria residiria no elevado número de memórias utilizadas.

Trata-se de um processo iterativo utilizando dois programas de elementos finitos: o programa de definição do estado de tensão e o programa de definição do fâcies do escoamento.

Na figura seguinte pode observar-se o diagrama de sequência do programa de cálculo utilizado.

Em primeiro lugar é estudado o efeito que a estrutura da barragem tem na distribuição das tensões na zona da fundação.

Por meio desta análise é possível fazer a determinação da correspon

dente modificação operada na geometria da fissuração.

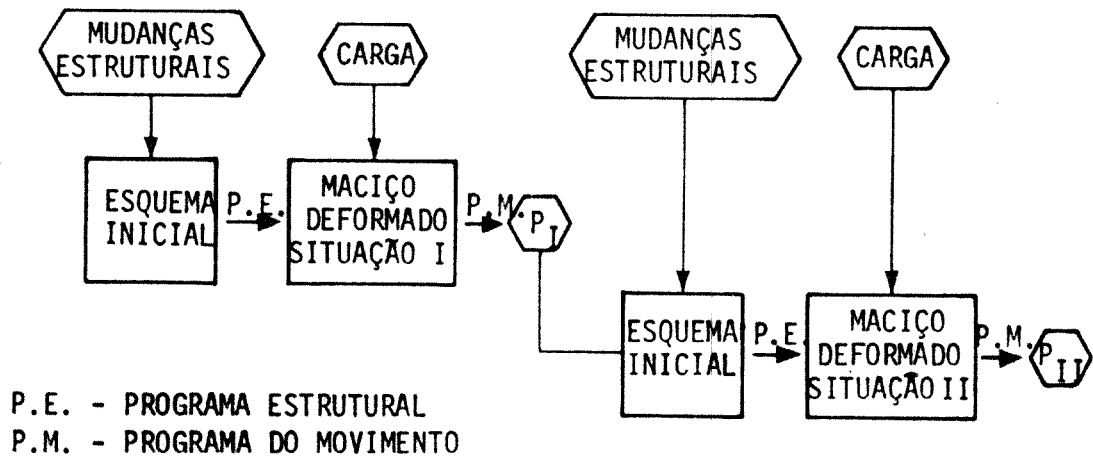


Fig. 107 - Processo iterativo de definição do fâcies do escoamento.

Passa-se então à definição do fâcies do escoamento, resultando um primeiro conjunto de valores das pressões instaladas nos diversos pontos da região em estudo. No diagrama de sequência esta etapa está assinalada pelo símbolo  $P_I$ .

Seguidamente, repete-se a análise das tensões instaladas entrando em linha de conta quer com os efeitos da estrutura projectada, quer ainda com as condições piezométricas determinadas anteriormente.

Conseguem-se assim novos valores para a abertura das diversas fissuras, passando a conhecer-se as novas características geométricas do domínio percolante.

Podem então definir-se as novas condições do escoamento, obtendo-se um segundo conjunto de valores das pressões reinantes nos vários pontos da região em estudo. No diagrama de sequência esta etapa está assinalada pelo símbolo  $P_{II}$ .

O processo iterativo parará quando houver pequenas diferenças entre dois conjuntos consecutivos de pressões instaladas nos vários pontos do domínio, isto é  $P_N \cong P_{N+I}$ .

Na figura apresentada no final deste capítulo pode constatar-se a forma de convergência do processo descrito.



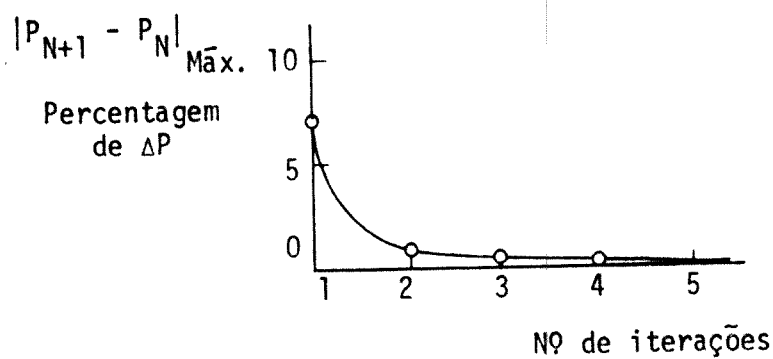


Fig. 108 - Convergência do processo iterativo.

Observa-se uma diferença máxima de 0,1% entre dois conjuntos consecutivos de pressões, após a quinta iteração.

Para mais pormenores poder-se-ã consultar a publicação citada [7]. Nela também se analisa o problema do escoamento através de um talude rochoso fissurado.

---

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] BECERRIL (E.) - HIDROMECAICA  
Publicaciones de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos. Editorial Dossat, S.A. - MADRID 1960
- [2] BARBOSA (J.N.) - A CAMADA LIMITE. DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES EM ESCOAMENTOS INTERIORES  
Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - PORTO 1968
- [3] BARBOSA (J.N.) - LIÇÕES DE HIDRÁULICA GERAL  
Publicação da F.E.U.P. - PORTO 1971
- [4] BARBOSA (J.N.) - APLICAÇÃO DA ANÁLISE DIMENSIONAL À FLUIDELASTICIDADE  
Publicação do Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P. - PORTO 1971
- [5] BARROSO (M.J.G.) - CALDAS DE INJEÇÃO À BASE DE CIMENTO. CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA AO CORTE DE MACIÇOS ROCHOSOS  
Tese apresentada no concurso para Especialista do L.N.E.C. - LISBOA 1969
- [6] BEAR (J.) - DYNAMICS OF FLUIDS IN POROUS MEDIA  
American Elsevier Publishing Company, Inc. - NEW YORK 1972

- [7] BREKKE (T.), WITHERSPOON (P.A.), MAINI (Y.N.), NOORISHAD (J.) - COUPLED STRESS AND FLOW ANALYSIS OF FRACTURED DAM FOUNDATIONS AND ROCK SLOPES  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M. -  
- STUTTGART 1972
- [8] BROCH (E.) - THE INFLUENCE OF WATER ON SOME ROCK PROPERTIES  
Comunicação apresentada ao 3º Congresso da I.S.R.M.  
- DENVER (COLORADO) 1974
- [9] CALDWELL (J.A.) - THE THEORETICAL DETERMINATION OF THE PERMEABILITY TENSOR FOR JOINTED ROCKS  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M. -  
- STUTTGART 1972
- [10] CARLIER (M.) - HIDRAULIQUE GÉNÉRALE ET APPLIQUÉE  
Collection du Centre de Recherches et d'Essais de  
Chatou  
Edições Eyrolles - PARIS 1972
- [11] CASTILLO (E.) - MATHEMATICAL MODEL FOR TWO-DIMENSIONAL PERCOLATION THROUGH FISSURED ROCK  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M. -  
- STUTTGART 1972
- [12] ÇEÇEN (K.) - SEEPAGE ON TO SLOPES IN ISOTROPIC AND ANISOTROPIC SOILS  
Comunicação apresentada à 9ª Assembleia Geral da  
I.A.H.R. 1961
- [13] COMOLET (R.) - MÉCANIQUE EXPÉRIMENTALE DES FLUIDES  
Edições Masson et C.<sup>ie</sup> - PARIS 1961
- [14] DI BIAGIO (E.), MYRVOLL (F.) - IN SITU TESTS FOR PREDICTING THE AIR AND WATER PERMEABILITY OF ROCK MASSES ADJACENT TO UNDERGROUND OPENINGS  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M. -  
- STUTTGART 1972

- [15] DOERFLING (R.) - TRATADO DE MATEMATICAS PARA INGENIEROS Y TÉCNICOS  
Tradução em espanhol da 4<sup>a</sup> edição alemã. Editorial  
Gustavo Gili, S.A. - BARCELONA 1945
- [16] EDELMAN (J.H.) - GROUNDWATER HYDRAULICS OF EXTENSIVE AQUIFERS  
Crítica a esta obra inserta no "Journal of Hydraulic  
Research". Volume 11 Nº 2 - I.A.H.R. 1973
- [17] FEDORENKO (V.S.), FALMINTSIN (B.M.) - CARACTÉRISTIQUE GÉOLOGO-TECHNIQUE  
DE LA FISSURITÉ DES TERRAINS ROCHEUX PAR LES MÉTHO-  
DES STÉRÉOPHOTOGRAMMÉTIQUES  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso da I.S.R.M.  
- BELGRAD 1970
- [18] FRANCIS (F.O.) - CURRICULA PLANNING FOR FUNDAMENTAL COURSES ON GEO-  
TECHNOLOGY  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso Internacio-  
nal da I.A.E.G. - SÃO PAULO 1974
- [19] GIGNOUX (M.), BARBIER (R.) - GÉOLOGIE DES BARRAGES ET DES AMÉNAGEMENTS  
HYDRAULIQUES  
Edições Masson et C.<sup>ie</sup> - PARIS 1956
- [20] GOGNEL (I.) - APPLICATION DE LA GÉOLOGIE AUX TRAVAUX DE L'INGÉ-  
NIEUR  
Edições Masson et C.<sup>ie</sup> - PARIS 1959
- [21] GRANVILLE (W.A.), SMITH (P.F.) - ÉLÉMENTS DE CALCUL DIFFÉRENTIEL ET IN-  
TÉGRAL  
11<sup>a</sup> Edição. Librairie Vuibert - PARIS 1952
- [22] GRAUX (D.) - FONDATIONS ET ESCAVATIONS PROFONDES. Tome 1.  
GÉOTECHNIQUE APPLIQUÉE  
Edições Eyrolles - PARIS 1967
- [23] HANNA (T.H.) - FOUNDATION INSTRUMENTATION. SERIES ON ROCK AND  
SOIL MECHANICS.  
Volume 1. (1971/73). Nº 3. 1<sup>a</sup> Edição. Transtech

## Publications - OHIO 1973

- [24] HARPER (T.R.) - SOME OBSERVATIONS OF THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT UPON GROUNDWATER  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M. -  
- STUTTGART 1972
- [25] HARPER (T.R.) - A TECHNIQUE OF FIELD PERMEABILITY TESTING EMPLOYING A SINGLE PACKER SUSPENDED BY WIRE LINE  
Comunicação apresentada ao 3º Congresso da I.S.R.M.  
- DENVER (COLORADO) 1974
- [26] HARR (M.E.) - GROUNDWATER AND SEEPAGE  
Edições McGraw-Hill Book Company, Inc. - NEW YORK  
1962
- [27] HINZE (J.O.) - TURBULENCE. AN INTRODUCTION TO ITS MECHANISM AND THEORY  
Edições McGraw-Hill Book Company, Inc. - NEW YORK  
1959
- [28] I.A.H.R. - COMUNICAÇÕES DO 15º CONGRESSO DA I.A.H.R.  
Volume 3. Assunto C - ISTANBUL 1973
- [29] JOUANNA (P.) - ESSAIS EN SITU DE PERCOLATION SOUS CONTRAINTE  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M.  
- STUTTGART 1972
- [30] KNILL (J.L.), ATTEWELL (P.B.) - POSTGRADUATE TRAINING IN ENGINEERING GEOLOGY AT DURHAM UNIVERSITY AND IMPERIAL COLLEGE  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso Internacional da I.A.E.G. - SÃO PAULO 1974
- [31] LABORATOIRES ROUTIERS - HIDRAULIQUE DES SOLS  
Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers.  
Número especial de Abril - PARIS 1970

- [32] LELIAVSKY (S.) - DESIGN TEST BOOKS IN CIVIL ENGINEERING.  
Volume 1. DESIGN OF DAMS FOR PERCOLATION AND EROSION  
Edições Chapman and Hall Ltd. - LONDON 1965
- [33] LEMOS (J.F.) - NOÇÕES DE PERCOLAÇÃO. ESCOAMENTOS EM SOLOS E EM  
MACIÇOS ROCHOSOS FISSURADOS  
Publicação do Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P.  
subsidiada pelo I.A.C. - PORTO 1973
- [34] LEMOS (J.F.) - REFLEXOS DO ESTADO DE TENSÃO INSTALADO NUM MACIÇO  
ROCHOSO FISSURADO NO FENÓMENO DA PERCOLAÇÃO  
Comunicação apresentada ao 1º Congresso Nacional de  
Mecânica Teórica e Aplicada realizado em Lisboa, De  
zembro de 1974.  
Publicação do Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P.  
subsidiada pelo I.A.C. - PORTO 1974
- [35] LEMOS (J.F.) - ESTUDO DA DRENAGEM DE UM TALUDE ROCHOSO FISSURADO.  
ANISOTROPIA NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO  
Comunicação que se destinava a ser apresentada às  
IV Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil  
~~realizadas~~ <sup>realizadas</sup> no Brasil em Agosto de 1975.  
Publicação do Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P.  
subsidiada pelo I.A.C. - PORTO 1974
- [36] LEMOS (J.F.) - NOVA INTERPRETAÇÃO <sup>DO FENÓMENO</sup> DO ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS.  
LIMITES SUPERIOR E INFERIOR <sup>VALIDADE DA</sup> DA LEI DE DARCY  
Publicação do Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P.  
subsidiada pelo I.A.C. - PORTO 1975
- [37] LEMOS (J.F.) - ALIVIAMENTO <sup>D</sup> NA ZONA DE JUSANTE DO MACIÇO DE FUNDA-  
ÇÃO DE UMA BARRAGEM DAS PRESSÕES DEVIDAS AO ESCOA-  
MENTO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA. ESCOAMENTO DA ÁGUA NUM  
MEIO ROCHOSO FISSURADO  
Memória inserta na revista "ENGENHARIA". Ano 1. II  
Série. Nº 1. Dezembro 1975  
Publicação do Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P.  
- PORTO 1975

- [38] LENCASTRE (A) - MANUAL DE HIDRÁULICA GERAL  
1ª Edição da "TÉCNICA" - A.E.I.S.T. - LISBOA 1957
- [39] LEONARDS (G.A.) - FOUNDATION ENGINEERING  
International Student Edition  
McGraw-Hill Book Company, Inc. e Kogakusha Company,  
Ltd. - TOKYO 1962
- [40] L.N.E.C. - TERMOS DE TECTÓNICA MAIS UTILIZADOS EM ENGENHARIA  
CIVIL  
Publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Ci  
vil. C.D.U. 413.164:624.49 - LISBOA 1967
- [41] L.N.E.C. - TERMOS DE PETROGRAFIA MAIS UTILIZADOS EM ENGENHARIA  
CIVIL  
Publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Ci  
vil. C.D.U. 413.164:522 - LISBOA 1971
- [42] L.N.E.C. - DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS E TÉCNICAS PARA ENSAIO  
DE MODELOS GEOMECÂNICOS  
Publicação do Laboratório Nacional de Engenharia  
Civil  
Serviço de Barragens. Divisão de Dimensionamento  
Experimental. Proc. 42/12/2665 - LISBOA 1973
- [43] LOUIS (C.) - ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS D'EAU DANS LES ROCHES FISSU-  
RÉES ET DE LEURS INFLUENCES SUR LA STABILITÉ DES  
MASSIFS ROCHEUX  
Tese apresentada na Universidade de Karlsruhe e in-  
serta no "Bulletin de la Direction des Études et Re  
cherches". Série A. Nº 3 de 1968 E.D.F. - GRENOBLE  
1968
- [44] LOUIS (C.), WITTKÉ (W.) - ANSTRÖMUNG VON HOHLRÄUMEN IN FELS  
Comunicação apresentada ao "International Symposium  
on Large Permanent Underground Openings"  
OSLO 1969

- [45] LOUIS (C.) - ÉCOULEMENTS À TROIS DIMENSIONS DANS LES ROCHES FIS-  
SURÉES  
Memória inserta na "Revue de l'Industrie Minerale".  
Número especial de 15 de Julho de 1970 - PARIS 1970
- [46] LOUIS (C.), MAINI (Y.N.) - DETERMINATION OF IN SITU HYDRAULIC PARAMETERS  
IN JOINTED ROCK  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso da I.S.R.M.  
BELGRAD 1970
- [47] LOUIS (C.), PERNOT (M.) - ANALYSE TRIDIMENSIONNELLE DES ÉCOULEMENTS DANS  
LE MASSIF DE FONDATION DU BARRAGE DE GRAND MAISON  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M.  
STUTTGART 1972
- [48] LOUIS (C.) - ROCK HYDRAULICS  
Boletim do B.R.G.M. de Janeiro de 1974  
ORLÉANS 1974
- [49] MALDONADO (A.A.B.) - SEEPAGE TOWARDS TUNNELS  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso Internacio-  
nal da I.A.E.G.  
SÃO PAULO 1974
- [50] MAMILLAN (M.), URTADO (A.) - ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE SEPT QUÁ-  
LITÉS DE GRANIT  
Memória inserta na revista "ANNALES". Nº 307-308.  
Julho-Agosto de 1973
- [51] MORLIER (P.) - ROLE DES FLUIDES EN MÉCANIQUE DE ROCHES  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso da I.S.R.M.  
BELGRADO 1970
- [52] MORLIER (P.) - DESCRIPTION DE L'ÉTAT DE FISSURATION D'UNE ROCHE À  
PARTIR D'ESSAIS NON-DESTRUCTIFS SIMPLES  
Memória inserta na revista "Rock Mechanics". Volume  
3 de 1971



- [53] NUNES (J.M.O.) - CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES EM TERRENOS ROCHOSOS - LISBOA 1968
- [54] OBERT (L.), DUVALL (W.I.) - ROCK MECHANICS AND THE DESIGN OF STRUCTURES IN ROCK  
Edições John Wiley & Sons, Inc.  
NEW YORK 1967
- [55] ORDEM DOS ENGENHEIROS - CURSO DE MECÂNICA DOS SOLOS  
LISBOA 1955
- [56] OLIVEIRA (R.) - LIÇÕES DE MINERALOGIA E GEOLOGIA  
Edição da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
PORTO 1972
- [57] OHNISHI (Y.), GOODMAN (R.E.) - RESULTS OF LABORATORY TESTS ON WATER PRESSURE AND FLOW IN JOINTS  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso da I.S.R.M.  
DENVER (COLORADO) 1974
- [58] PUECH (J.P.) - FRACTURATION DE MASSIFS ROCHEUX SUR UN SITE DE BARRAGE ET UNE TRANCHÉE D'AUTOROUTE  
Memória inserta na revista "ANNALES". Nº 301. Janeiro de 1973 - Série: Sols et Fondations
- [59] RAMLI (A.R.), SHAHIN (M.), SALEM (A.S.) - SEEPAGE THROUGH EARTH DAM ON PERMEABLE FOUNDATION WITH CUTOFF WALL  
Comunicação apresentada ao 10º Congresso das Grandes Barragens  
- MONTREAL 1970
- [60] RAMPON (A.) - L'ESSAI LUGEON: QUELQUES EXEMPLES ET LA NECESSITÉ DE RESPECTER LA NORME  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso Internacional da I.A.E.G.  
SÃO PAULO 1974

- [61] RAT (M.), LAVIRON (F.) - MESURES DU COEFFICIENT DE PERMEABILITÉ PAR  
ESSAIS PONCTUELS  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso Internacio-  
nal do I.A.E.G.  
SÃO PAULO 1974
- [62] RIBEIRO (A.A.) - LIÇÕES DE APROVEITAMENTOS HIDROELÉCTRICOS  
Disciplina de Hidráulica Aplicada. Editorial Enge-  
nharia da F.E.U.P.
- [63] RIBEIRO (A.A.) - LIÇÕES DE MECÂNICA DOS SOLOS  
Editorial Engenharia da F.E.U.P.  
PORTO 1967/68
- [64] ROSELLO (J.G.), ZALDUEGUI (J.M.G.), PAUTRE (A.) - ENSEIGNEMENTS A TIRER  
D'ESSAIS LUGEON AMELIORES  
Comunicação apresentada ao 2º Congresso Internacio-  
nal da I.A.E.G.  
SÃO PAULO 1974
- [65] SANTOS JÚNIOR (A.G.), YOUNGS (E.G.) - A STUDY OF THE SPECIFIC YIELD IN  
LAND-DRAINAGE SITUATIONS  
Memória inserta no "Journal of Hydrology" (8).  
Edição da North-Holland Publishing Co.  
AMSTERDAM 1969
- [66] SHARP (J.C.), MAINI (Y.N.) - FUNDAMENTAL CONSIDERATION ON THE HYDRAULIC  
CHARACTERISTICS OF JOINTS IN ROCK  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M.  
STUTT GART 1972
- [67] SOUSA (J.R.) - CÁLCULO INFINITESIMAL  
Publicação da Faculdade de Ciências da Universidade  
do Porto - Edição do Centro Universitário do Porto  
PORTO 1965/66
- [68] TERZAGHI (K.), PECK (R.P.) - SOIL MECHANICS IN ENGINEERING PRACTICE  
Edições John Wiley & Sons, Inc. - NEW YORK 1948

- [69] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. BUREAU OF RECLAMATION  
- EARTH MANUAL. 1<sup>a</sup> Edição - DENVER (COLORADO) 1963
- [70] VERDEYEN (J.), ROISIN (V.), NUYENS (J.) - LA MÉCANIQUE DES SOLS  
Presses Universitaires de Bruxelles  
Edições Dunod  
BRUXELLES 1968
- [71] WITTKÉ (W.), RISSLER (P.), SEMPRICH (S.) - RÄUMLICHE, LAMINARE UND TUR-  
BULENTE STRÖMUNG IN KLÜFTIGEM FELS NACH ZWEI  
VERSCHIEDENEN RECHENMODELLEN  
Comunicação apresentada ao Simpósio da I.S.R.M.  
STUTTGART 1972
- [72] WONG (H.Y.), FARMER (I.W.) - HYDROFRACTURE MECHANISMS IN ROCK DURING  
PRESSURE GROUTING  
Memória inserta na revista "Rock Mechanics"  
Volume 5 de 1973.

---

 ÍNDICE
 

---

## VOLUME I

PREFÁCIO .....	II.
----------------	-----

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1.
1.2. ISOTROPIA E ANISOTROPIA .....	2.
1.3. ESTRUTURA DO MACIÇO ROCHOSO FISSURADO .....	3.
1.3.1. Definição da Estrutura .....	3.
1.3.2. Meio Contínuo e Meio Descontínuo .....	5.
1.3.3. Elementos Hidrogeológicos do Maciço Rochoso Fissurado .	6.
1.4. CONCEITO DE PERMEABILIDADE DE UM MACIÇO ROCHOSO .....	7.

## CAPÍTULO 2 - ELEMENTOS TEÓRICOS

2.1. PROPÓSITO DESTAS CONSIDERAÇÕES .....	10.
2.2. ALGUMAS NOÇÕES DE CÁLCULO VECTORIAL .....	10.
2.2.1. Versor de uma dada Direcção .....	10.
2.2.2. Operador "NABLA" .....	11.
2.2.3. Gradiente de um Campo de Escalares .....	11.
2.2.4. Divergência de um Vector .....	12.
2.2.5. Rotacional de um Vector .....	12.
2.2.6. Operador Laplaciano .....	13.
2.3. ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS .....	13.
2.3.1. Equacionamento de Qualquer Problema de Mecânica dos Fluidos .....	13.
2.3.2. Equação da Continuidade .....	14.

2.3.2.1. Definição geral .....	14.
2.3.2.2. Sua aplicação a um tubo de corrente. Noção de caudal. Velocidade média numa secção do escoamento .....	16.
2.3.3. Equação de NAVIER-STOKES .....	18.
2.3.3.1. Caracterização do estado mecânico no interior de uma massa fluida em movimento .....	18.
2.3.3.2. Noção de tensão. Estado de tensão. Tensor das tensões .....	18.
2.3.3.3. Definição de pressão .....	20.
2.3.3.4. Estado de deformação de um fluido. Tensor das velocidades de deformação .....	21.
2.3.3.5. Viscosidade. Coeficiente de viscosidade. Relação entre tensões viscosas e deformações..	23.
2.3.3.6. Equações do Equilíbrio Dinâmico de uma dada massa fluida .....	25.
2.3.3.7. Expressão da aceleração de EULER .....	26.
2.3.3.8. Equações de NAVIER-STOKES .....	27.
2.3.4. Movimentos Planos e Irrotacionais .....	28.
2.3.4.1. Movimentos com potencial de acelerações .....	28.
2.3.4.2. Movimentos com potencial de velocidades .....	29.
2.3.4.3. Função corrente .....	29.
2.3.4.4. Figuras de corrente. Redes de escoamento. Processo para o traçado das redes de escoamento .....	30.
2.3.5. Teorema de BERNOULLI .....	32.
2.3.6. Números Índices .....	36.
2.3.7. Características Gerais dos Escoamentos Interiores .....	37.
2.3.7.1. Definições de base .....	37.
2.3.7.2. Fórmulas de resistência. Expressão geral ...	38.
2.3.7.3. Movimentos laminares. Movimentos turbulentos .....	40.
2.3.7.4. Fórmulas de resistência. Escoamento em superfície livre .....	41.
2.3.7.5. Fórmulas de resistência. Escoamento em pressão .....	47.



4.3.2.1.2. Escoamento rectilíneo e paralelo numa fissura. Análise bidimensional .....	100.
4.3.2.2. Consideração da fissura não plana .....	104.
4.3.2.2.1. Generalidades .....	104.
4.3.2.2.2. Características geométricas das fissuras naturais .....	106.
4.3.2.2.3. Escoamento através de fissuras não planas de abertura constante ..	108.
4.3.2.2.4. Escoamento através de fissuras não planas de abertura variável ...	111.
4.3.2.3. Consideração da fissura de forma e abertura variáveis .....	115.
4.3.3. Fissuras Com Enchimento .....	116.
4.4. DETECÇÃO EXPERIMENTAL DAS LEIS DO ESCOAMENTO EM FISSURAS .....	117.
4.4.1. Referência a Estudos Realizados por Diversos Investigadores .....	117.
4.4.1.1. Estudos da escola Russa .....	117.
4.4.1.2. Estudo experimental de CLAUDE LOUIS (1967) ...	121.
4.4.1.3. Estudo experimental de SHARP (1970) .....	124.
4.4.2. Estudo Realizado no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P. ....	129.
4.5. CONCLUSÕES .....	146.
4.6. SISTEMAS DE FISSURAÇÃO .....	153.

## CAPÍTULO 5 - REFLEXOS DO ESTADO DE TENSÃO INSTALADO NUM MACIÇO ROCHOSO FISSURADO NO FENÓMENO DA PERCOLAÇÃO

5.1. OBJECTIVOS DESTE ESTUDO .....	158.
5.2. ELEMENTOS TEÓRICOS .....	160.
5.3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS .....	161.
5.3.1. Considerações Gerais .....	161.
5.3.2. Trabalhos de CLAUDE LOUIS (1970-1972) .....	161.
5.3.3. Estudo Experimental de JOUANNA (1972) .....	163.
5.3.4. Trabalhos de Outros Autores .....	166.
5.3.5. Estudo Realizado no Laboratório de Hidráulica da F.E.U.P. ....	167.

5.4. CONCLUSÕES ..... 189.  
5.5. EFEITOS DAS TENSÕES TANGENCIAIS NAS CONDIÇÕES DO ESCOAMENTO .. 195.



## VOLUME II

## CAPÍTULO 6 - O POTENCIAL HIDRÁULICO

6.1. DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL HIDRÁULICO NUM DOMÍNIO PERCOLANTE ..	198.
6.2. ESTUDO A DUAS DIMENSÕES .....	199.
6.2.1. Generalidades .....	199.
6.2.2. Processo Analítico .....	200.
6.2.2.1. Bases teóricas .....	200.
6.2.2.2. Estudo de casos práticos .....	209.
6.2.3. Processo Gráfico .....	252.
6.3. ESTUDO A TRÊS DIMENSÕES DA DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL HIDRÁULICO .....	257.
6.3.1. Generalidades .....	257.
6.3.2. Métodos Empregados para a Análise Tridimensional .....	258.
6.3.3. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por um só Sistema de Fissuração .....	258.
6.3.4. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por dois Sistemas de Fissuração .....	259.
6.3.4.1. Hipótese das duas famílias de fissuras serem aproximadamente verticais .....	259.
6.3.4.2. Hipótese das duas famílias de fissuras desenvolvendo-se em regiões diversas, se intersectarem numa zona pouco extensa .....	264.
6.3.5. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por três Sistemas de Fissuração .....	266.

6.3.5.1. Hipótese das três famílias de fissuras serem aproximadamente perpendiculares entre si .....	266.
6.3.5.2. Hipótese das três famílias de fissuras terem uma orientação qualquer .....	275.
6.3.6. Distribuição Tridimensional do Potencial Hidráulico num Maciço Rochoso dividido por mais de três Sistemas de Fissuração .....	275.
<b>6.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DIRECCIONAL .....</b>	<b>277.</b>
6.4.1. Considerações Prévias .....	277.
6.4.2. Bases Teóricas .....	277.
6.4.2.1. Estudo do escoamento radial .....	277.
6.4.2.2. Estudo do escoamento no plano de uma fissura inclinada em relação à direcção horizontal. Escoamento não radial. Caso das injecções .....	287.
6.4.3. Determinação da Permeabilidade Hidráulica de um Maciço Rochoso Fissurado. Ensaios "in situ" .....	295.
6.4.4. Breve Referência às Técnicas de Ensaio da Determinação das Permeabilidades Direcctionais .....	309.
6.4.4.1. Ensaio LUGEON .....	309.
6.4.4.2. Sonda Tripla de CLAUDE LOUIS .....	311.
6.4.4.3. Ensaios de HARPER .....	316.
6.4.4.4. Considerações finais .....	322.

## CAPÍTULO 7 - ACÇÕES MECÂNICAS DEVIDAS AO ESCOAMENTO

7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	324.
7.2. ESTADO MECÂNICO INERENTE AO ESCOAMENTO ATRAVÉS DO MACIÇO FISSURADO .....	324.
7.2.1. Tensões Tangenciais .....	325.
7.2.2. Tensões Normais .....	325.
7.2.3. Definição do Fácies do Escoamento - Avaliação das Acções Mecânicas. Suas Implicações Mútuas .....	327.
<b>7.3. QUANTIFICAÇÃO DAS ACÇÕES MECÂNICAS DEVIDAS AO ESCOAMENTO .....</b>	<b>328.</b>
7.3.1. Considerações Prévias .....	328.
7.3.2. Acções Tangenciais .....	329.

7.3.3. Acções Normais .....	330.
7.3.4. Hidráulica das Rochas - Hidráulica dos Solos. Síntese Comparativa Respeitante às Acções Mecânicas Devidas ao Escoamento .....	338.
7.3.5. Considerações Gerais .....	340.
7.4. APLICAÇÃO DESTA ANÁLISE A CASOS PRÁTICOS .....	343.
7.4.1. Generalidades .....	343.
7.4.2. Ilustração do Processo de Cálculo das Acções Mecânicas Devidas ao Escoamento Através da Utilização Directa dos Resultados Obtidos em 7.3.2. e 7.3.3. ....	344.
7.4.3. Ilustração do Processo de Cálculo das Acções Mecânicas Devidas ao Escoamento Através da Definição do Regime de Pressões Instaladas nas Fronteiras do Domínio .....	346.
7.4.4. Resolução de um Problema Concreto .....	346.

## CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES FUNDAMENTAIS

8.1. PROPÓSITO DESTE CAPÍTULO .....	353.
8.2. HIDRÁULICA DOS SOLOS - HIDRÁULICA DAS ROCHAS. SÍNTESE COMPARATIVA .....	353.
8.3. CONCEITO DE ESTRUTURA DO MACIÇO ROCHOSO FISSURADO .....	354.
8.4. REGIME DE TENSÕES INSTALADO NO MACIÇO ROCHOSO FISSURADO .....	356.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	360.
----------------------------------	------