PERCOLAÇÃO TRIDIMENSIONAL ATRAVÉS DA FUNDAÇÃO*

Tridimensional seepage through a dam foundation

por
J. LAGINHA SERAFIM**
A. PORTELA SANTOS***
M. CONCEIÇÃO MATOS****

RESUMO – Este trabalho consiste no desenvolvimento de um método de análise tridimensional da percolação em meios porosos, heterogéneos e anisotrópicos e em particular no estudo de fundação de barragens.

A equação geral de percolação

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} kx + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} ky + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} kz = O$$

é integrada pelas diferenças finitas. A definição da superfície de saturação é obtida com aproximações sucessivas.

A ocorrência de água e de zonas saturadas no terreno da fundação a jusante junto ao pé da barragem de Massingir em Moçambique, tornou pertinente a aplicação deste método. Foram consideradas diferentes hipóteses na disposição e caracterização geotécnica dos estratos baseadas na informação disponível. Este trabalho permitiu quantificar a eficiência de algumas soluções estudadas no que diz respeito a valores de caudais escoados e gradientes hidráulicos. Este estudo teve importância na solução escolhida que consiste na realização de uma cortina impermeável através das formações aluvionares da fundação do dique.

SYNOPSIS – This paper concerns a method for the tridimensional study of the seepage in porous, heterogeneous and anisotropic media, being specially applied to the study of dam foundations.

The general equation of seepage defining phenomenon

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} kx + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} ky + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} kz = O$$

is integrated by finite differences. The definition of the upper seepage surface is obtained through sucessive approaches.

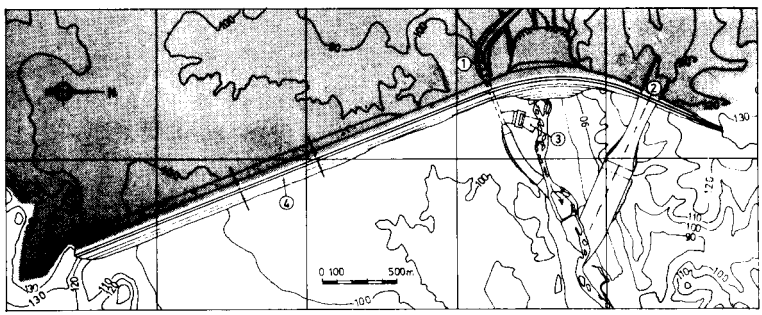
The occurrence of springs and some saturated zones in the natural ground downstream form the foundation by the toe of the right bank of the Massingir dam, in Mozambique, made pertinent the application of this method. Different hipotheses of the layering and geotechnical characterization of the foundation were formulated, based on the available information. This work enabled to quantify the efficiency of some studied solutions, regarding the flood and percolation gradients. The results of this study were an important element in the option taken for the performance of the diaphragm wall through alluvionar formations of the dyke.

---

* Comunicação apresentada ao XV Congresso da ICOLD, Lausanne, 1985
** Professor da Universidade de Coimbra e Presidente da COBA
*** Engenheiro Civil, Especialista em Barragens da COBA
**** Engenheira Civil da COBA

1 – INTRODUÇÃO

A barragem de Massingir (Fig. 1) integrada no plano geral da bacia do rio Limpopo, no sul de Moçambique, está localizada no Rio dos Elefantes afluente do rio Limpopo.



(1) – Tomada de água
(2) – Descarregador de cheias
(3) – Central

Fig. 1 – *Vista geral da Barragem de Massingir*

Esta barragem é de terra zonada com coroamento a cota 130,00 e tem um volume total de aterros e enrocamentos na ordem dos 10×10^6 m^3. A fundação de características aluvionares quaternária é constituída na maioria por depósitos de areias e argila. No vale principal em forma de U a barragem tem a altura máxima de 46 m numa extensão aproximada de 400 m. Na margem direita o vale é constituído por uma extensa plataforma formada por velhos depósitos aluvionares com um espessura média de 30 metros. Nesta zona a barragem prolonga-se por um extenso dique de mais de 3 km numa altura média de 30 m.

Na margem esquerda o dique tem uma extensão aproximada de 1 km. Nesta margem está instalado o descarregador de cheias dimensionado para uma vazão de 7 850 m^3/s.

A construção da barragem foi iniciada em 1971 e estava ainda em construção quando em 1974 a República Popular de Moçambique concretizou a sua independência.

Nesta altura dificuldades de ordem humana e material perfeitamente justificáveis, nas circunstâncias sócio-políticas então vividas nesse jovem país, contribuiram para que algumas situações menos favoráveis surgissem durante a construção.

Para além disto a ocorrência de grandes cheias sucessivas antes da conclusão dos aterros não permitiram o devido tratamento das camadas de empréstimo localizadas a montante do dique da margem direita.

Nesta altura verificou-se a ocorrência de água com alguma abundância na fundação junto ao pé de jusante do dique da margem direita, saturando aí algumas zonas e formando uma lagoa numa antiga câmara de empréstimo situada a cerca de 2 km a jusante do dique.

Com o objectivo de obter uma análise mais precisa dos fenómenos ocorridos, procedeu-se ao estudo tridimensional da percolação através da fundação do dique, simulando nos modelos de cálculo as características referentes a esta zona afectada. Apesar desta zona em análise apresentar muito maior dimensão segundo o coroamento que segundo as outras duas direcções (altura da fundação e dimensão na direcção transversal do eixo do dique), é de salientar que o estudo tridimensional evidencia a influência de algumas condições geotécnicas particulares. De facto algumas destas condições interferem de forma relevante na percolação, introduzindo-lhe desvios em direcções não pertencentes aos planos de perfil transversal em que tradicionalmente se desenvolvem os estudos de percolação bidimensional.

Pode-se afirmar que este estudo enriqueceu as conclusões para a análise das perturbações encontradas, ao permitir a consideração de aspectos particulares nas situações de fronteira cuja influência o estudo bidimensional não possibilitaria.

2 – MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO

O escoamento através de meios porosos (líquidos imcompressíveis) obedece à lei da continuidade

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \tag{1}$$

em que $\vec{v}$ é a velocidade do escoamento.

A equação (1) implica que na superfície de infiltração e na fronteira impermeável seja nulo o produto interno:

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \tag{2}$$

Adoptando como eixos de referência o sistema dos três eixos principais de permeabilidade (x_1, x_2, x_3) e introduzindo em (1) e (2) as componentes de $\vec{v}$ segundo a lei de Darcy

$$v_i = - k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \tag{3}$$

estas equações tomam o seguinte aspecto

$$\text{div } \vec{v} = -\Sigma \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial h}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{4}$$

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = -\Sigma\, k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \cos \alpha_i = 0 \tag{5}$$

em que h é a carga hidráulica, k_i são os coeficientes de permeabilidade nas direcções dos três eixos e cos α_i são cossenos directores da normal $\vec{n}$.

Considerando um conjunto de pontos discretos no interior do meio poroso, alinhados segundo as direcções dos três eixos x_i e expressando as derivadas $\partial h/\partial x_i$ em termos de diferenças finitas, obtem-se um sistema de equações lineares cujas incógnitas são os valores de h nesses pontos.

A Fig. 2 representa um elemento de volume constituído por oito paralelipípedos.

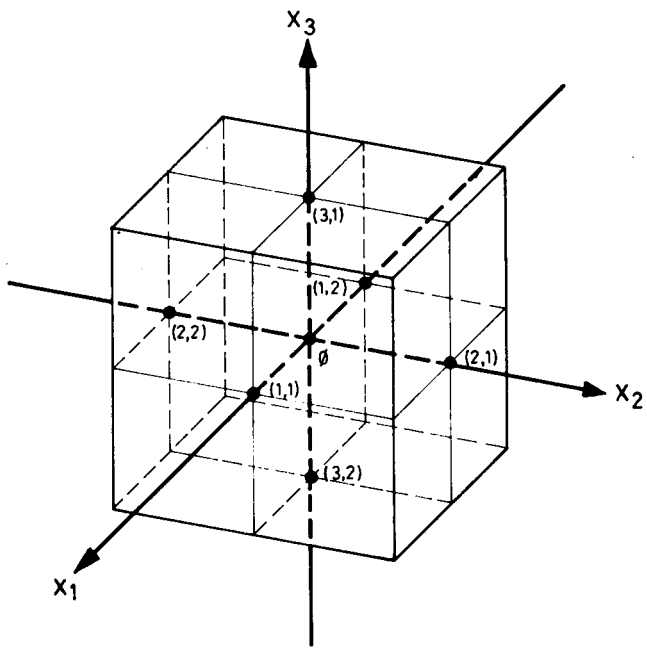


Fig. 2 – *Discretização de um elemento de volume.*

As velocidades médias segundo as direcções x_i são

$$v_{ij} = -k_{ij} \frac{h_{ij} - h_0}{x_{ij} - x_{i0}} \tag{6}$$

em que k_{ij} são os valores médios dos coeficientes de permeabilidade segundo as direcções x_i dos paralelipípedos situados antes (j = 2) e depois (j = 1) do ponto 0, comum aos oito paralelipípedos.

Introduzindo as equações (6) em (4) vem

$$\sum_{i=1}^{i=3} \frac{1}{x_{i1} - x_{i2}} \sum (k_{ij} \frac{h_{ij} - h_0}{x_{ij} - x_{i0}}) = 0 \qquad (7)$$

Fazendo

$$A_0 = \sum_{i=1}^{i=3} - \frac{\sum_{j=1}^{j=2} \frac{k_{ij}}{x_{ij} - x_{i0}}}{x_{i1} - x_{i2}} \qquad (8)$$

e

$$A_{ij} = \frac{-k_{ij}}{(x_{ij} - x_{i0})(x_{i1} - x_{i2})} \qquad (9)$$

a equação linear (7) pode ser escrita da seguinte forma:

$$A_0 h_0 + \sum_{i=1}^{i=3} \sum_{j=1}^{j=2} A_{ij} h_{ij} = 0 \qquad (10)$$

cujos coeficientes dependem exclusivamente dos coeficientes de permeabilidade (k_{ij}) e dos intervalos de derivação ($x_{ij} - x_{io}$).

No caso particular da superfície de fronteira ser um plano perpendicular a um dos eixos (x_i) faz-se na equação (10) $A_{il} = A_{i2}$ e $h_{il} = h_{i2}$.

No caso mais geral do meio poroso ser limitado por uma superfície curva (Fig. 3) esta é definida pela seguinte expressão polimonial:

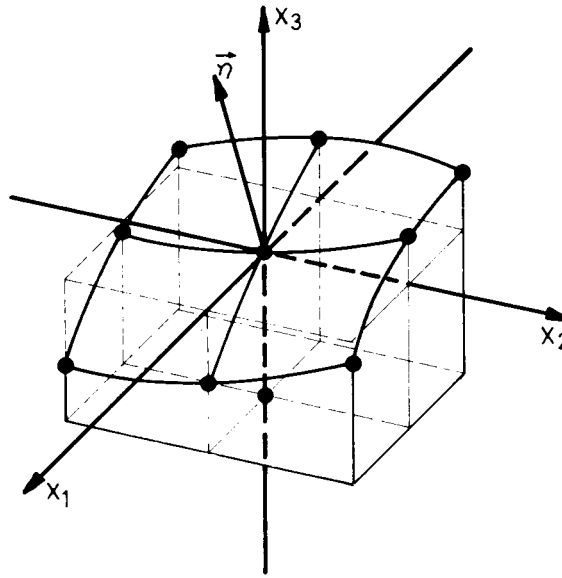


Fig. 3 — *Discretização de um elemento de volume com superfície curva.*

$$F = 1 + \Sigma S_{ijk} x_1^i x_2^j x_3^k = 0 \tag{11}$$

com i, j, k = 0,1 ou 2 e $0 < i + j + k < 3$, cujos nove coeficentes S_{ijk} são facilmente determinados a partir das coordenadas dos nove pontos que definem o elemento de superfície. Os cossenos directores de $\vec{n}$ são então:

$$\cos \alpha_i = \frac{\dfrac{\partial F}{\partial x_i}}{\sum_{i=1}^{i=3} \left(\dfrac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2} \tag{12}$$

A variação da carga hidráulica na vizinhança da fronteira pode ser definida também pela expressão polimonial

$$h(x_1, x_2, x_3) = \Sigma (H_{ijk} x_1^i x_2^j x_3^h) \tag{13}$$

com i, j, h = 0,1 ou 2 e $0 < i + j + h < 3$, cujos dez coeficientes H_{ijk} dependem das coordenadas dos nós e são funções lineares dos valores desconhecidos de h nos dez pontos considerados (Fig. 3). As derivadas $\partial h/\partial x$, que intervêm na equação (5) são por sua vez, também funções lineares das incógnitas h:

$$\frac{\partial h}{\partial x_1} = H_{100} + 2H_{200}\, x_1 + H_{110}\, x_2 + H_{101}\, x_3$$

$$\frac{\partial h}{\partial x_2} = H_{010} + H_{110}\, x_1 + 2H_{020}\, x_2 + H_{011}\, x_3 \qquad (14)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x_3} = H_{001} + H_{101}\, x_1 + H_{011}\, x_2 + 2H_{002}\, x_3$$

A substituição na equação (5) dos cos α_i pelos valores obtidos por intermédio das equações (12) e dos $\partial h/\partial x_i$ pelas expressões (14) permitem estabelecer, para os pontos situados na fronteira, um conjunto de equações lineares que associadas às equações definidas em (10) constituem um sistema cuja resolução nos dá finalmente a conhecer o valor da carga hidráulica no interior do meio poroso.

3 – APRESENTAÇÃO FORMAL DOS RESULTADOS

No sistema tridimensional as equipotenciais são superfícies cuja representação é possível através das suas intersecções com planos. Os resultados deste estudo foram apresentados sob a forma das intersecções destas superfícies segundo planos de nível e perfis transversais (estes últimos convencionalmente usados no estudo bidimensional).

Os tubos de fluxo cuja representação em qualquer rede de fluxo é de todo o interesse não só pela definição completa da rede como pela facilidade que proporcionam na determinação dos caudais escoados, e da sua orientação, oferecem dificuldades quanto à sua representação plana.

Com efeito estes tubos apresentam a forma de prismas de secção quadrada e arestas torças de representação apenas viável no espaço.

4 – CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS GERAIS DA FUNDAÇÃO

Os dados geotécnicos disponíveis sobre a configuração da fundação limitavam-se aos obtidos através da realização de um programa de sondagens. Estas sondagens efectuadas alguns metros a jusante da linha de inserção permitiram a definição geotécnica de um perfil longitudinal.

Por este motivo procedeu-se à formulação de algumas hipóteses de situações geotécnicas que possibilitassem a simulação, avaliação e quantificação dos fenónemos ocorridos, considerando como ponto de referência o citado perfil longitudinal. Das hipóteses formuladas serão apresentadas algumas no capítulo seguinte.

O perfil anteriormente referido, indica a existência de uma camada superficial, silto-argilosa com espessura de 5 a 15 metros. Esta camada assenta sobre outra também aluvionar constituída por material granular (areias de granulometria variável associada a seixos e calhaus rolados). Esta última camada apresenta uma espessura também variável entre 5 a 15 metros. A disposição destes estratos revela a existência do leito fóssil do rio, e permite admitir que, a menos de algumas perturbações pontuais, se pode considerar sem grande erro que este perfil longitudinal se mostra constante na direcção montante jusante (Fig. 4).

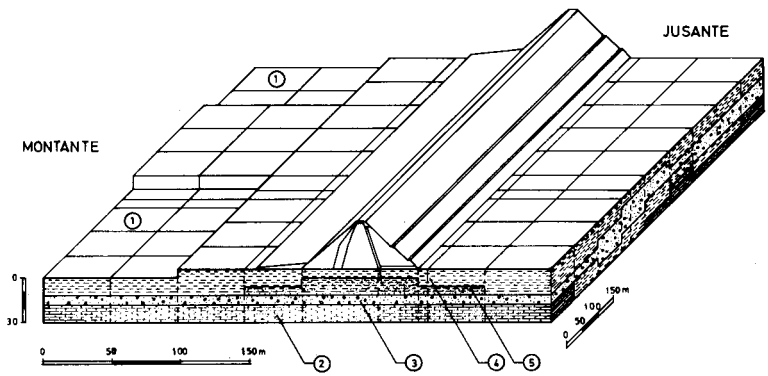


Fig. 4 – *Fundação — Vista geral*

(1) – Manchas de empréstimo

(2) – Grés-argiloso

$k_h = 1E-6$ $k_v = 1E-9$

(3) – Estrato de areia grossa com burgaus

$k_h = 1E-3$ $k_v = 1E-4$

(4) – Estrato de argila

$k_h = 5E-6$ $k_v = 5E-7$

(5) – Estrato de areia argilosa

$k_h = 5E-5$ $k_v = 5E-6$

Os modelos de cálculo utilizados consideram na generalidade uma extensão de 675 metros segundo o escoamento, 370 metros na direcção transversal a este e 30 metros em profundidade, o que corresponde à altura máxima da camada aluvionar na fundação do dique da margem direita.

5 – EXEMPLOS DA APLICAÇÃO PRÁTICA

Como foi referido no Cap. 4 foram consideradas várias hipóteses de situações geotécnicas das quais apresentaremos algumas que pelas suas características parecerem mais interessantes.

Numa das hipóteses analisa-se a influência da não continuidade da camada de areia para jusante numa zona localizada (Fig. 5).

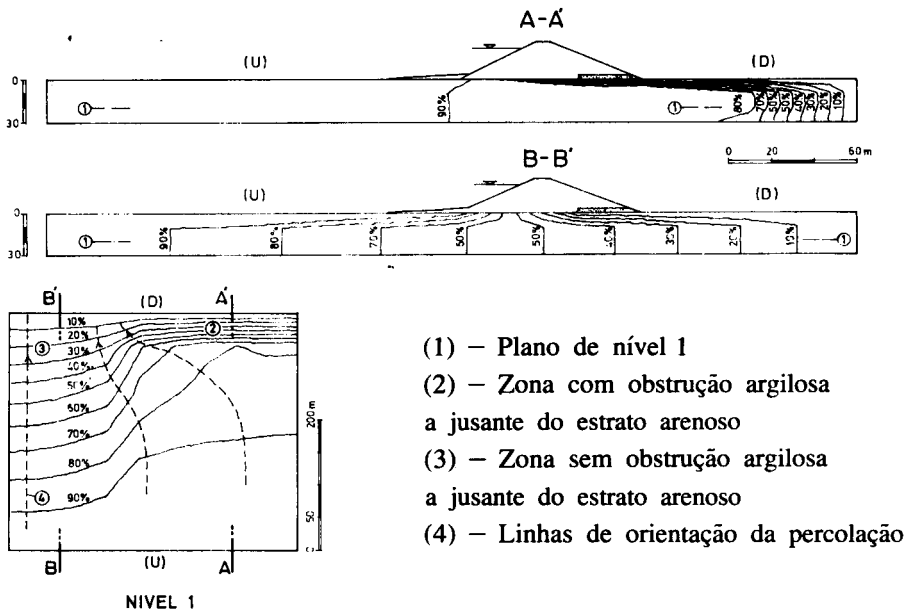


Fig. 5 – *Análise da influência da não continuidade da camada de areia.*

O andamento das equipotenciais apresentadas segundo os planos de nível indica claramente que a água ao encontrar a obstrução a jusante, se escoa na maior parte para as zonas vizinhas onde a saída de água é franca para jusante. Na observação dos perfis transversais, pode-se constactar a concentração das equipotenciais na zona de interrupção criada a jusante, com o consequente aumento do gradiente hidráulico na camada superficial de argila para um valor na ordem de 5.

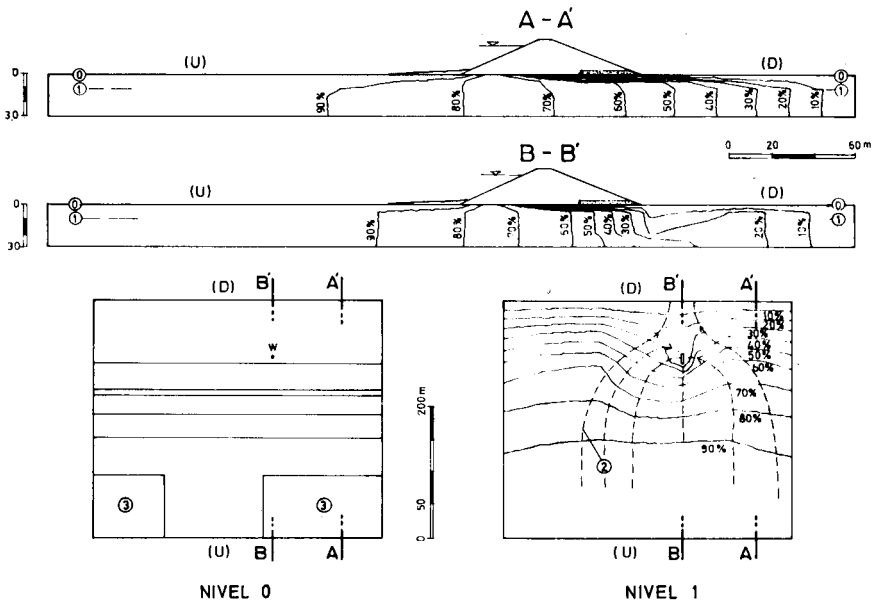
A disposição das equipotenciais nesta zona revela a existência do aumento de água percolada para a superfície, junto ao pé de jusante da obra. Este incremento corresponde a uma parte do caudal que se escoaria naturalmente para jusante pela camada de areia no caso de não existir a obstrução. Isto poderá ser uma das justificações das zonas localizadas de saturação surgidas junto ao pé de jusante anteriormente referidas.

A consideração de um tapete impermeabilizante e tratamento das manchas de empréstimo adicionadas às condições geotécnicas anteriores leva ao estabelecimento de uma rede de percolação com características a jusante semelhantes às obtidas no caso anteriormente referido, apresentando apenas pequenas alterações na zona superior e a montante do dique.

Foi estudada uma outra hipótese em que para além das características geotécnicas apresentadas na Fig. 4 se considerou a existência de uma zona de areia a jusante do dique interrompendo a camada superficial argilosa como se tratasse de um afloramento da camada subjacente de areia.

Neste caso verificou-se uma evidente chamada de água para esse afloramento enquanto nos perfis afastados da perturbação geotécnica considerada, o escoamento se efectuava para jusante através da fundação com valores de caudal elevados. Este importante afluxo de água à superfície poderá justificar as zonas de saturação localizadas junto ao pé de jusante do dique, sempre que se verifique uma diminuição da camada superficial de argila.

No sentido de analisar a interferência na rede de um poço de alívio isolado, admitiu-se para além das condições geotécnicas gerais da fundação a existência de um poço de alívio com as dimensões aproximadas dos já executados (0,2 × 0,2 m).



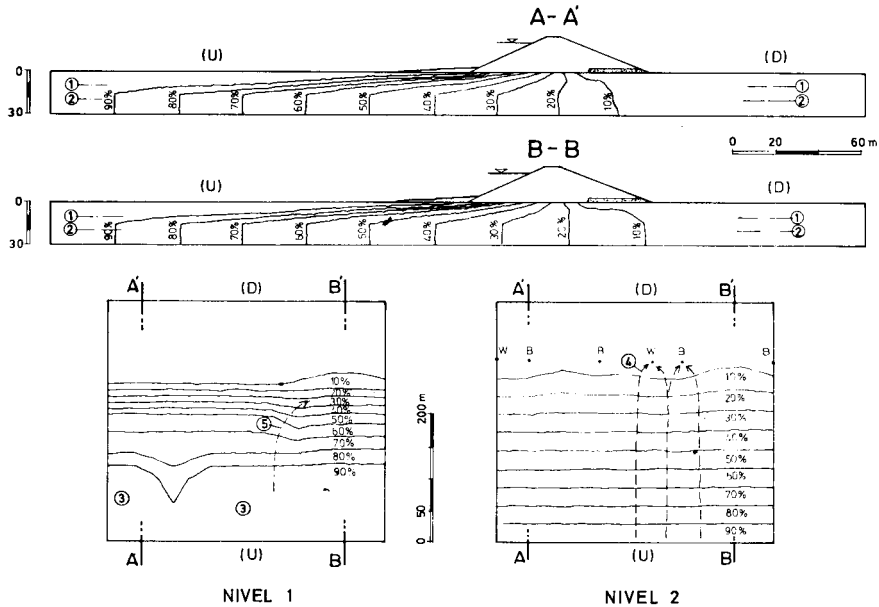
(0) – Plano de nível superficial
(1) – Plano de nível 1
(2) – Linhas de orientação da percolação
(3) – Manchas de empréstimo

Fig. 6 – *Análise da influência de um poço de alívio.*

A observação da Fig. 6 leva à conclusão que a influência do poço de alívio se faz sentir radialmente em planta até cerca de 75 metros sendo a orientação do escoamento nitidamente no sentido deste.

O caudal calculado escoado pelo poço de alívio individual é da ordem de 20 l/s muito próximo dos valores encontrados "in situ".

A interinfluência dos furos de sondagem e poços de alívio existentes foi objecto de análise através de um outro cálculo (Fig. 7).



(1) – Plano de nível 1
(2) – Plano de nível 2
(3) – Influência das manchas de empréstimo
(4) – Linhas de orientação da percolação
(5) – Influência na percolação de uma zona de alteração do estrato argiloso superficial.

Fig. 7 – *Análise da inter-influência dos furos de sondagem e poços de alívio.*

Neste caso observou-se que as zonas de influência dos vários furos de sondagem e poços de alívio se interpenetram condicionados pela distância entre eles.

A equipotencial de 10% apresenta segundo os planos de nível ligeiras inflexões provocadas pela presença dos furos mais próximos. A importância desta medida de segurança imediata da estabilidade hidráulica da fundação é aqui evidente pela diminuição considerável dos gradientes hidráulicos de valores da ordem de 1,2 para valores de 0,4.

CONCLUSÕES

Sempre que as condições geotécnicas não se mantenham em continuidade integral montante jusante, quer pela existência de uma interferência pontual quer pela variação da disposição das camadas existentes, a análise tridimensional da percolação poderá ser de todo o interesse. Esta análise permite nestas condições uma compreensão e quantificação mais perfeita das condições de percolação reais e um enriquecimento das conclusões conforme acabamos de mostrar.

Esta análise permitiu por exemplo concluir que a influência do não tratamento das manchas de empréstimo de montante do dique não foi neste caso decisivo para as condições de percolação que se estabeleceram.

Com efeito a análise das superfícies equipotenciais tanto nos diversos casos estudados em que foi considerada a existência das referidas camadas como naquele em que o seu tratamento e colocação do tapete são introduzidos denota que a sua influência não é muito importante.

No último caso apresentado também é salientado a importância dum estudo deste tipo revelando que em casos semelhantes se poderia falar numa optimização devidamente fundamentada da distância entre poços a executar.

No caso particular descrito a análise tridimensional, foi importante para a optimização da solução final do tratamento do dique.

A medida proposta para a solução deste problema consiste na execução de uma parede moldada que atravessa os estratos aluvionares permeáveis e irá ligar-se ao subestrato margoso de baixa permeabilidade.