

PERCOLAÇÃO NOS ATERROS DA BARRAGEM DO MIRA*

Seepage through Mira Dam embankments

por

E. MARANHA DAS NEVES** e J. FOLQUE***

RESUMO – A barragem do Mira é constituída por um núcleo central argiloso e maciços estabilizadores de xistos argilosos. Como foram utilizados materiais grosseiros com elementos de forma lamelar e a compactação feita com cilindros vibradores de rasto liso, levou-se a cabo, durante a construção, uma vasta campanha de ensaios para medição da permeabilidade dos aterros.

O objectivo foi atingido através de centenas de medições quer em ensaios *in situ* quer em ensaios de laboratório sobre amostras indeformadas. Através da análise dos resultados dessas medições concluiu-se que os aterros exibiam elevada permeabilidade horizontal acentuando-se esta anisotropia nos maciços estabilizadores.

Observando as pressões neutras geradas nos aterros tem sido possível conhecer a evolução do regime de percolação nas fases de construção e operacional.

Os elementos disponíveis bem como cálculos teóricos pelo método dos elementos finitos, evidenciam que não se atingiu ainda um regime permanente de percolação correspondente à situação de pleno armazenamento e permitem a determinação da relação entre as permeabilidades horizontais e verticais do núcleo e zonas estabilizadoras.

SYNOPSIS – The Mira dam was built with a clayey central core and shells of weathered schist. As coarse materials with plate shaped grains were used and the compaction was made with smooth track vibrating rollers, a great effort was done during construction to measure the permeability of the fills.

The objective was attained by making hundreds of measurements: *in situ* tests on recently compacted fill and laboratory tests on undisturbed samples. From the results it was concluded of larger horizontal permeabilities and that this anisotropy was particularly marked on the shells.

By the measurement of the embankments pore pressures it has been possible to follow the evolution of the seepage during construction and operation of the dam.

The available results as well as theoretical calculations by the finite element method shows that the steady-state flow for full reservoir was not attained and allows the determination of the directional permeability relationships.

* Comunicação apresentada ao 9.º Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Tóquio, Julho 1977. Tema N.º 3.

** Especialista em Geotecnia, LNEC, Lisboa.

*** Investigador, Chefe da Divisão de Fundações, LNEC, Lisboa.

1 – INTRODUÇÃO

A maior barragem de terra até hoje construída em Portugal é a do Mira. Tem uma altura máxima de 86 m, um desenvolvimento no coroamento de cerca de 500 m e um volume de aterros de aproximadamente quatro milhões de metros cúbicos. Os solos disponíveis para a construção da barragem foram obtidos de formações xistosas exibindo um maior ou menor grau de alteração até um ou dois metros de profundidade. Estas condições deram origem, à data do início da construção (1965), a problemas interessantes e não muito comuns de projecto e construção da barragem e que oportunamente foram relatados (Beja Neves *et al.*, 1969).

Na Fig. 1 apresenta-se o perfil tipo da barragem onde se destacam um núcleo proveniente da alteração dos xistos e maciços estabilizadores dum material grosseiro constituído por xistos mais ou menos alterados. A montante e incorporada na barragem localiza-se uma ensecadeira de solos argilosos e na zona central há uma galeria corta-águas.

O presente trabalho refere-se ao comportamento dos aterros do ponto de vista da permeabilidade tendo em atenção a diferença entre o valor antecipado para os coeficientes de permeabilidade a partir de ensaios em laboratório e em aterros experimentais e os valores reais. Este facto deu origem a um controlo muito intenso da permeabilidade durante a fase de construção. Simultaneamente procedeu-se à medição de pressões neutras o que permite conhecer a evolução dessas pressões não só durante a construção como ao longo dum período de vida operacional da barragem apreciavelmente extenso (8 anos). Com base nas medições características da permeabilidade dos aterros calcula-se a distribuição de pressões neutras para o regime permanente correspondente a uma situação próxima do pleno armazenamento e procura-se verificar se as pressões neutras reais se desenvolvem com tendência a estabilizarem na referida situação.

2 – MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS ATERROS

Uma das características mais afectadas pelas técnicas de escavação nos empréstimos, transporte e compactação quando se pretende uma comparação entre o valor real e o previsto nos estudos preliminares, foi precisamente a permeabilidade. Na realidade os valores antecipados para o coeficiente de permeabilidade (K) eram

da ordem dos 10^{-7} cm/s, enquanto os resultados das medições no início da construção rondavam os 10^{-3} cm/s. Casos análogos se têm verificado em outras barragens (Kennard *et al.*, 1967). Tal facto conduziu à decisão de modificar o projecto introduzindo o núcleo central, órgão inicialmente não previsto. Nessa zona seriam colocados os materiais mais argilosos dos solos residuais de alteração, cujo volume disponível dentro da área da albufeira era compatível com a construção do referido núcleo.

A determinação da permeabilidade dos aterros passou a ser um dos objectivos primordiais no controlo da construção dos aterros, com particular incidência no núcleo central. Foram efectuadas medições *in situ* e em laboratório sobre amostras indeformadas.

2.1 – Ensaio *in situ*

Os ensaios para a determinação da permeabilidade *in situ* durante a construção do aterro foram efectuados caracterizando a evolução no tempo das cotas da superfície da água introduzida num furo não revestido com um metro de profundidade (aproximadamente a espessura da camada de compactação) e cerca de 0,2 m de diâmetro. Para interpretar estes ensaios de absorção de molde a obter o coeficiente de permeabilidade, postula-se que os gradientes hidráulicos instalados são unicamente devidos a forças gravíticas e que a uma distância apreciável da parede do furo (mil vezes o seu raio) a pressão na água se anula. A não con-

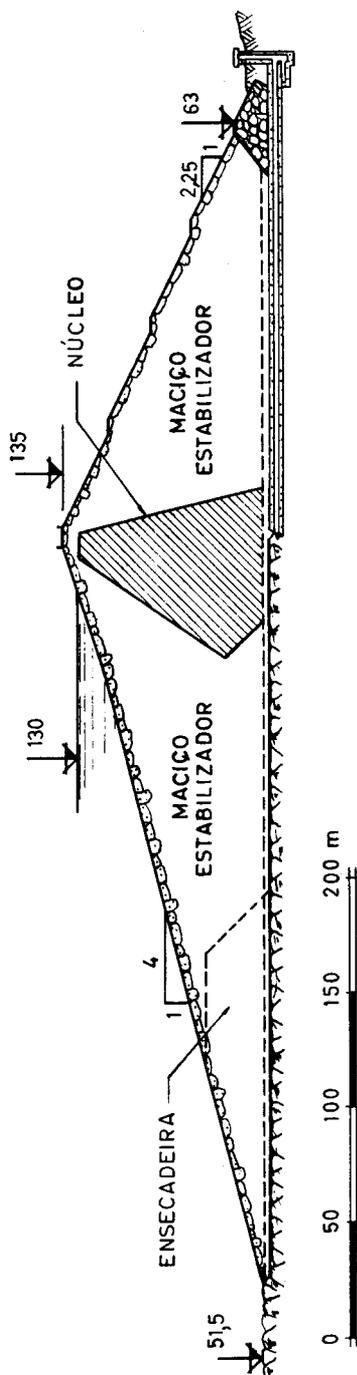


Fig. 1 – Perfil tipo da barragem do Mira

sideração da parcela do gradiente hidráulico devido às pressões neutras negativas origina resultados que se podem considerar do lado da segurança. Na realidade as pressões neutras nos aterros recém-construídos exibiam valores negativos muito elevados.

Além destes ensaios nos furos abertos com trado também foram executados ensaios em vários furos de sondagem, com cerca de 20m de profundidade nos maciços estabilizadores e 50m no núcleo central. Foram ensaiados, ao longo desses furos, troços de 1 m de espessura, tendo-se medido o rebaixamento da coluna de água em determinados intervalos de tempo. Também se fizeram ensaios a carga constante com a finalidade de comparar resultados.

2.2 – Ensaios de laboratório

Nos ensaios laboratoriais a permeabilidade foi determinada a partir de amostras indeformadas de grandes dimensões (0,23 m de diâmetro e 0,75 m de altura). Foram introduzidas em câmaras triaxiais e submetidas a tensões de confinamento substancialmente mais elevadas do que a carga hidráulica na extremidade através da qual a água era forçada a percolar a amostra. Para eliminar as tensões neutras negativas todas as amostras eram previamente saturadas.

3 – RESULTADOS OBTIDOS

Nas Figs. 2 e 3 apresentam-se os histogramas dos valores do coeficiente de permeabilidade medidos respectivamente nos maciços estabilizadores e no núcleo. Como seria de esperar, para cada tipo de ensaio a dispersão é maior naqueles maciços do que no núcleo.

Para a mesma zona da barragem verifica-se que são diferentes os resultados *in situ* e em laboratório. Tendo em atenção a descrição dos ensaios verifica-se que os primeiros medem a permeabilidade horizontal dos aterros enquanto que os segundos medem a permeabilidade vertical. Há assim uma anisotropia que os resultados indicam ser mais vincada nos maciços estabilizadores. Relativamente aos ensaios *in situ* verifica-se que os resultados dos ensaios realizados nos furos de trado e nos furos de sondagem se ajustam melhor no caso do núcleo. Provavelmente a carga hidráulica mais elevada nos furos de sondagem é suficiente para anular os efeitos da tensão neutra negativa.

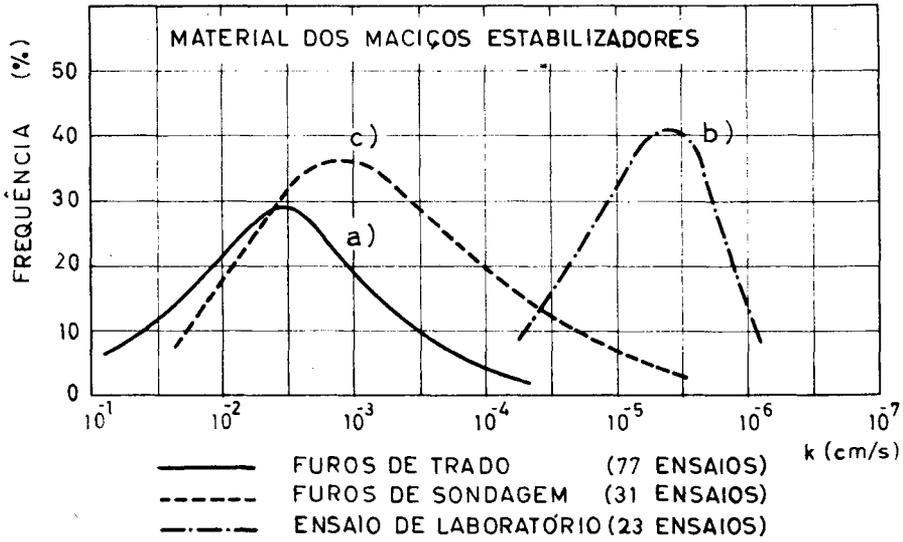


Fig. 2 – Histograma dos valores do coeficiente de permeabilidade medidos nos materiais dos maciços estabilizadores

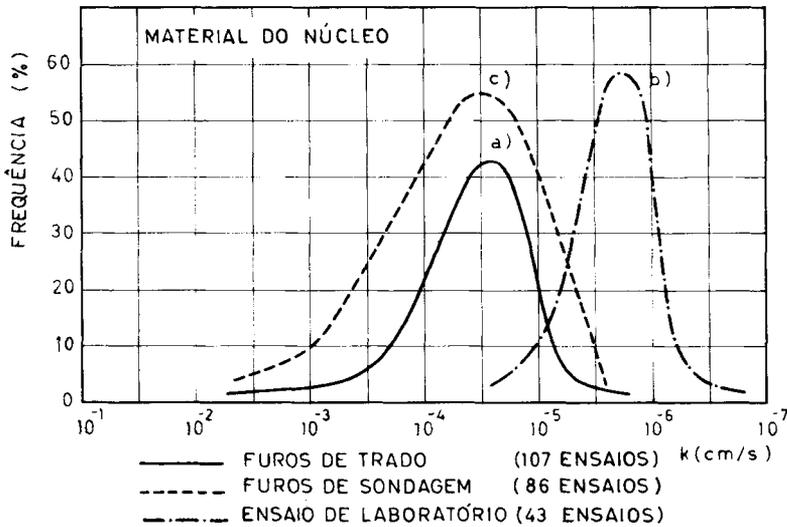


Fig. 3 – Histograma dos valores do coeficiente de permeabilidade medidos nos materiais do núcleo

Em termos de permeabilidades médias tem-se que a relação entre as permeabilidades horizontal e vertical no núcleo e nos maciços estabilizadores será de aproximadamente 15 e 700 se se considerar as curvas a) como mais representativas. Na hipótese de considerar as curvas c) aquelas relações serão 15 e 250. A relação entre as permeabilidades horizontais do núcleo e dos maciços estabilizadores é de cerca de 250 e 125 consoante se considere os resultados traduzidos pelas curvas a) ou pelas curvas c).

4 - PRESSÕES NEUTRAS OBSERVADAS

Desde o início da construção (Setembro 1964) que se procedeu à observação das pressões neutras através de piezómetros eléctricos e hidráulicos. Inicialmente essas tensões eram negativas e só devido a um represamento parcial é que, no final da fase de construção (Fevereiro, 1968), se registavam valores positivos na zona estabilizadora de montante. Desde essa data foi possível conhecer a evolução das pressões neutras e, conseqüentemente, da linha de saturação (Maranha das Neves, 1976). Na Fig. 4 apresentam-se as linhas de igual pressão em Fevereiro de 1968 referindo-se a Fig. 5 à situação em Setembro de 1973.

Como pode verificar-se cerca de metade dos piezómetros eléctricos encontram-se hoje avariados pelo que se torna bastante difícil manter um conhecimento relativamente preciso da evolução das tensões neutras.

Quanto aos piezómetros hidráulicos só um não se encontra obstruído. Com base nos

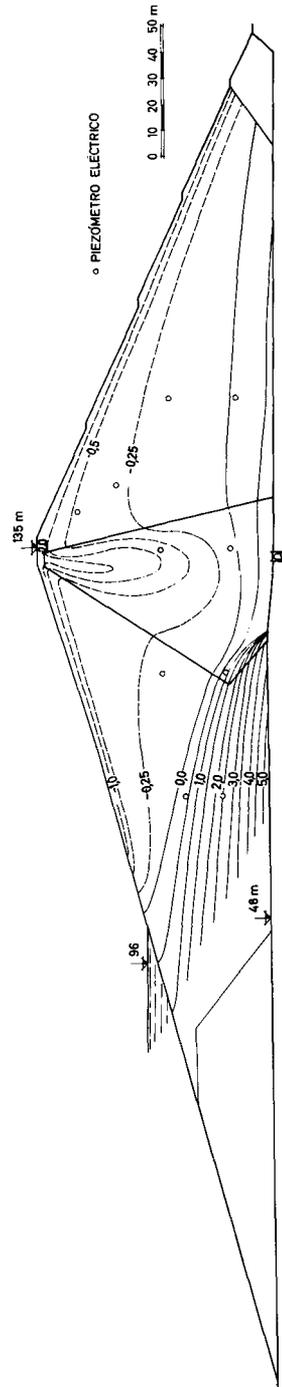


Fig. 4 - Distribuição das pressões neutras no final da fase de construção (Fev., 1968)

dispositivos disponíveis pode concluir-se que até 1976 as pressões a montante do núcleo subiram para valores que indicam ser mínima a perda de carga até ao núcleo. Os piezómetros do núcleo e do maciço de jusante permitem concluir que há estabilização das pressões em relação aos valores de 1973. Para poder ajuizar uma situação estacionária ou transitória julgou-se conveniente calcular a situação final mais provável.

5 – CÁLCULO DO ESCOAMENTO ESTACIONÁRIO

Para cálculo das equipotenciais, linha de saturação e correspondente traçado das linhas de igual pressão recorreu-se ao método dos elementos finitos, admitindo-se, em cada elemento (isoparamétricos), uma variação parabólica da carga hidráulica (L.N.E.C., 1977). Como sucede frequentemente a dificuldade surge na escolha dos valores da permeabilidade a introduzir no cálculo. No caso presente recorreu-se aos ensaios de permeabilidade já referidos e cujos resultados foram apresentados em 3. Tendo presente a ordem de grandeza desses resultados calcularam-se as linhas de igual pressão para duas hipóteses relativas não só à anisotropia dos maciços estabilizadores e do núcleo como também à relação entre as permeabilidades dessas duas zonas da barragem.

As distribuições de pressão neutra calculadas correspondem portanto à situação estacionária de pleno armazenamento. Deve assinalar-se que após o primeiro enchimento da albufeira

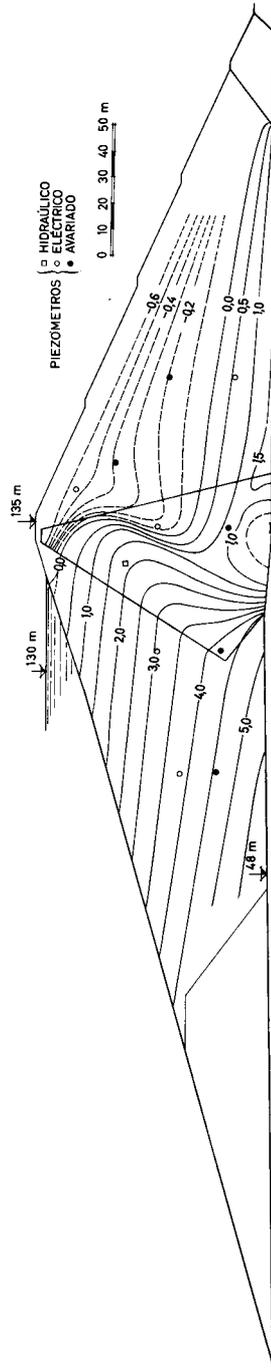


Fig. 5 – Distribuição das pressões neutras em Setembro de 1973

não houve esvaziamentos pronunciados, pelo que a introdução nos cálculos da cota 127 como a correspondente a um represamento máximo constante é uma situação muito próxima da realidade. De facto, até à presente data a cota do nível da água na albufeira não saíu fora do intervalo 127 ± 4 m.

Existindo um filtro no tecto da galeria de drenagem, cujo funcionamento é efectivo, considerou-se nessa zona da fronteira que a pressão é a atmosférica. É evidente que este órgão de inspecção foi projectado tendo em atenção o tratamento das fundações, não sendo um elemento fundamental da drenagem. Na verdade e como se assinalará mais adiante a sua acção é bastante circunscrita.

5.1 – Primeira hipótese

Com base nos resultados já referidos em 3 admitiram-se as seguintes relações de permeabilidade

$$\frac{K_h (\text{mac. est.})}{K_h (\text{núcleo})} = 100 \quad (1.a)$$

$$\frac{K_h (\text{núcleo})}{K_v (\text{núcleo})} = 15 \quad (2.a)$$

$$\frac{K_h (\text{mac. est.})}{K_v (\text{mac. est.})} = 100 \quad (3.a)$$

Perante os valores admitidos verifica-se que, em princípio, se consideraram elevados os resultados apresentados em 3. Na Fig. 6 estão as linhas de igual pressão calculadas e, comparando com os valores reais da Fig. 5, verifica-se o seguinte:

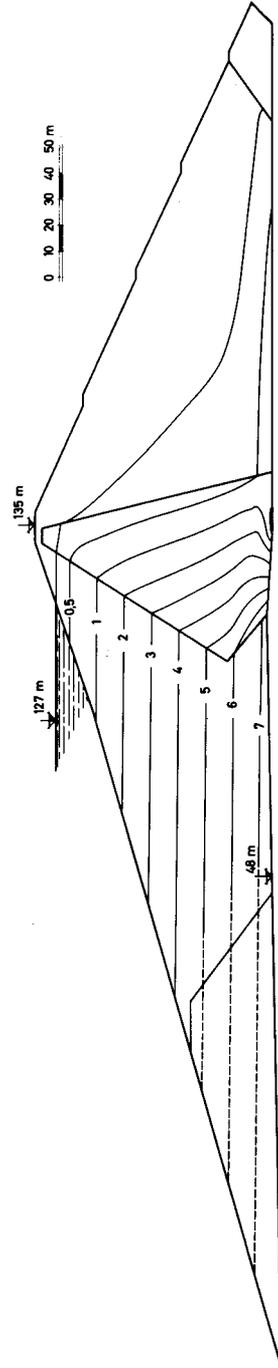


Fig. 6 – Cálculo da distribuição estacionária das pressões neutras (primeira hipótese)

- a) na zona de montante as pressões coincidem com as actualmente instaladas na barragem. Na verdade, de 1973 (situação traduzida pela Fig. 5) até 1976, os piezómetros de montante assinalaram uma subida de pressão neutra que indica que nessa zona da barragem não há praticamente perdas de carga. No respeitante aos piezómetros do núcleo e de jusante os valores lidos até 1976 têm-se mantido iguais aos registados em 1973.
- b) relativamente ao núcleo central pode concluir-se que o regime de percolação aí actualmente instalado ainda é transitório.
- c) no maciço de jusante a linha de saturação calculada situa-se a cotas inferiores à observada. Conjuntamente com o anteriormente exposto tal facto permite concluir que, dum modo genérico, as relações entre as permeabilidades do núcleo e do maciço de jusante são menores que as admitidas.
- d) uma vez obtida a solução correspondente à Fig. 6, calculou-se a distribuição de pressões para uma situação em que não existisse galeria de drenagem (ou em que este órgão não funcionasse). Mantendo todas as outras condições iguais verificou-se que a posição da linha de saturação não era afectada, apenas se verificando modificações na distribuição das pressões neutras na zona da base do núcleo.

5.2 – Segunda hipótese

Neste caso admitiram-se as seguintes relações de permeabilidade

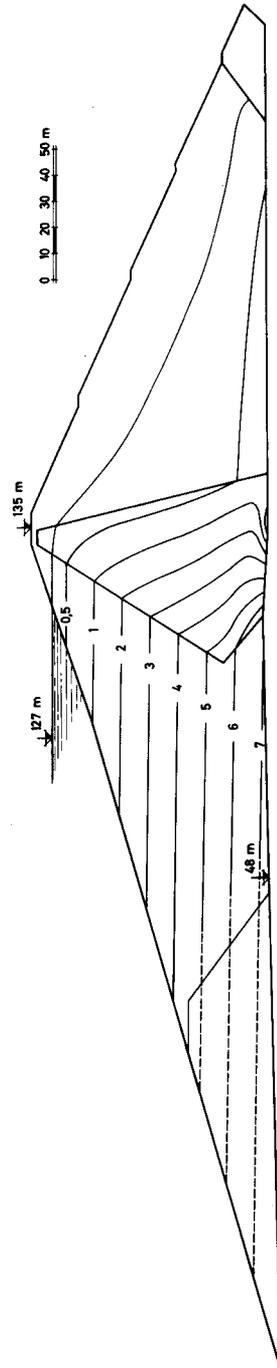


Fig. 7 – Cálculo da distribuição estacionária das pressões neutras (segunda hipótese)

$$\frac{K_h (\text{mac. est.})}{K_h (\text{núcleo})} = 50 \quad (1.b)$$

$$\frac{K_h (\text{núcleo})}{K_v (\text{núcleo})} = 15 \quad (2.b)$$

$$\frac{K_h (\text{mac. est.})}{K_v (\text{mac. est.})} = 100 \quad (3.b)$$

Quer isto dizer que se diminuiu o valor da relação entre as permeabilidades horizontais do maciço estabilizador e do núcleo. Na Fig. 7 e após cálculo da distribuição das pressões neutras para as mesmas condições de fronteira da primeira hipótese, apresentam-se as linhas de igual pressão. Assim, ter-se-á

- a) na zona do maciço de montante as pressões neutras coincidem com as actualmente instaladas na barragem;
- b) relativamente ao núcleo central os resultados indicam, como seria de esperar, que o regime de percolação presentemente aí instalado é transitório;
- c) a linha de saturação obtida localiza-se a cotas um pouco superiores relativamente à observada. Pelos motivos indicados na alínea anterior é possível que a linha de saturação real venha a evoluir para uma situação muito próxima da calculada para esta hipótese de permeabilidades relativas. Verificou-se também que a anisotropia do aterro de jusante só começa a ter uma influência importante na localização da linha freática quando o cociente K_h/K_v é menor do que 50.

6 – CONCLUSÕES

- a) No cálculo teórico da distribuição das pressões neutras as relações de permeabilidade admitidas na segunda hipótese são as que dão resultados que mais se aproximam dos valores observados nos piezómetros;
- b) estes valores das relações das permeabilidades são inferiores aos deduzidos dos ensaios de permeabilidade *in situ* e em laboratório. Tendo em atenção a descrição dos ensaios de laboratório sobre amostras indeformadas, pode afirmar-se que tais ensaios medem coeficientes de permeabilidade mais próximos do verdadeiro valor (muito embora só possam caracterizar a permeabilidade na direcção vertical). Considerando que os ensaios *in situ* medem permeabilidades hori-

zontais, pode concluir-se que os respectivos valores do coeficiente de permeabilidade devem ser mais elevados que os reais. Este fenómeno deriva principalmente das tensões neutras negativas instaladas no maciço durante a realização dos ensaios nos trados e nos furos de sondagem;

- c) nos ensaios realizados nos furos de sondagem a possibilidade de obter mais elevados graus de saturação no meio circundante é maior do que nos ensaios de trado. Este facto deve-se fundamentalmente a cargas hidráulicas mais elevadas e é assinalado nos resultados da Fig. 2 [curvas c) e a)];
- d) como método de controlo das permeabilidades dos aterros, durante a construção, o ensaio com o trado revela-se simples e útil. Mesmo no caso de materiais anisotrópicos o ensaio permite controlar a permeabilidade segundo a direcção geralmente condicionante. Na medição dos coeficientes de permeabilidade ou para abordagem do valor da relação de permeabilidades, indica o presente trabalho que os resultados podem ser majorados cerca de cinco vezes;
- e) relativamente ao regime de percolação verifica-se ser este estacionário a montante e transitório no núcleo. A transitoriedade neste órgão implica igual comportamento nos maciços de jusante. Muito embora a barragem se tenha mantido praticamente cheia durante oito anos, a situação no núcleo está praticamente estacionária há cerca de cinco anos. Tal facto confirma a progressão muito lenta das linhas de saturação, mesmo quando se trata de maciços anisotrópicos com maior permeabilidade horizontal;
- f) dado o reduzido número de piezómetros eléctricos em funcionamento, prevê-se a colocação de piezómetros hidráulicos no núcleo e maciço de jusante. Como teoricamente as pressões a jusante se vão ainda elevar, será assim possível registar tal evolução e colher elementos sobre a respectiva taxa de progressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEJA NEVES, J., J. FOLQUE, F. TEIXEIRA DIREITO e E. MARANHA DAS NEVES (1969) – *Control, mechanical characteristics and observation of Mira dam*. Tenth Int. Congress on Large Dams, Montreal, vol. I, pp. 321-337.
- KENNARD, M. F., J. L. KNILL e P. R. VAUGHAN (1967) – *The geotechnical properties and behaviour of carboniferous shale at the Balderhead dam*. The Quarterly Journal of Engineering Geology, vol. I, n.º 1, pp. 3-24.
- L. N. E. C. (1977) – *Estudo da percolação em meios porosos*. Lisboa, Junho.
- MARANHA DAS NEVES, E. (1976) – *Pressões neutras nos aterros da barragem do Mira. Dez anos de observação*. Geotecnia, n.º 17, Junho-Julho, pp. 57-67.