

# PRESSÕES NEUTRAS NOS ATERROS DA BARRAGEM DO MIRA. DEZ ANOS DE OBSERVAÇÃO

## Pore Pressures in the Mira Dam Earthfills. Ten Years of Observation

por

E. MARANHA DAS NEVES\*

RESUMO - Apresenta-se e caracteriza-se a evolução das pressões neutras nos aterros xisto-argilosos da barragem do Mira analisando não só o período de construção como o da vida operacional.

Também se faz referência ao comportamento dos dispositivos de medição da pressão neutra (piezómetros eléctricos, de corda vibrante) durante os dez anos de observação da barragem (1965-1975).

SYNOPSIS - The evolution of the pore pressures in the clayey shist material of the Mira dam earthfills during the construction and exploitation phases is presented and analysed.

Reference is also made to the behaviour of the piezometers (electric, vibrating wire type) throughout ten years of the observation of the dam (1965-1975).

### 1 - INTRODUÇÃO

A construção dos aterros da barragem do Mira, cujas características geométricas se apresentam na Fig. 1, foi iniciada em Setembro de 1964. O aproveitamento tem cerca de 90 m de altura e dispõe dum núcleo central de argila-xistosa e maciços estabilizadores a montante e jusante constituídos por xistos argilosos. Oportunamente [1] houve ocasião de apresentar os resultados de ensaios que, efectuados durante a construção, permitiram caracterizar os aterros do ponto de vista das propriedades físicas, mecânicas e de permeabilidade. Igualmente se fez referência à evolução das pressões neutras durante a fase de construção.

---

\* Especialista em Geotecnia, LNEC, Lisboa

No presente trabalho retoma-se primeiro a análise do período construtivo, estudando-se em seguida a repercussão do represamento no estado de pressão da água dos aterros.

Finalmente fazem-se algumas considerações sobre o comportamento dos piezómetros utilizados.

## 2 – PRESSÕES NEUTRAS

Nas Figs. 2 e 3 apresenta-se, graficamente, a evolução das pressões neutras nos aterros da barragem do Mira. Nas mesmas figuras estão representadas as curvas que traduzem a variação, no tempo, das cotas do aterro e do nível da água na albufeira. Na Fig. 1 localizam-se os dez piezómetros eléctricos.

### 2.1 – Fase de construção

No núcleo central todos os dispositivos indicam que não houve indução de tensões neutras donde o coeficiente de pressão neutra  $\bar{B}$  é  $< 0$ . Quanto ao maciço de montante, os piezómetros colocados a cotas mais baixas (6 e 8) assinalam pressões neutras já influenciadas pela sobreposição ao efeito dos terrenos sobrejacentes, do correspondente ao represamento parcial, acima da ensecadeira argilosa, efectuado durante a construção. Este último factor é tanto mais importante quanto a permeabilidade do maciço é relativamente elevada (valor médio de  $5 \times 10^{-3}$  cm/s para a permeabilidade horizontal) [2]. Para o piezómetro 7 o  $\bar{B}$  médio, durante o período em que se construiu na vertical do local de implantação do dispositivo, foi igual a 0,1. O máximo verificado foi de 0,45 em Setembro de 1966.

No maciço de jusante os piezómetros 9 e 10, colocados a cotas muito elevadas, dão resultados que se localizam sempre e francamente no campo negativo. No dispositivo 4, perto da fundação, a tensão total “overburden” chegou a elevar a tensão neutra a valores positivos (superiores à pressão atmosférica) embora com um valor médio de  $B$  muito reduzido ( $\approx 0,06$ ).

É de notar que o valor de  $B$  só é considerado no campo de pressões superiores à atmosférica. Na realidade, e tomando por exemplo a resposta do piezómetro 5, nota-se que a tensão dos terrenos sobrejacentes influencia a pressão neutra. Há uma tendência nítida para a instalação de pressões inferiores à atmosférica, fenómeno que é contrariado pelo efeito da actuação duma tensão total vertical

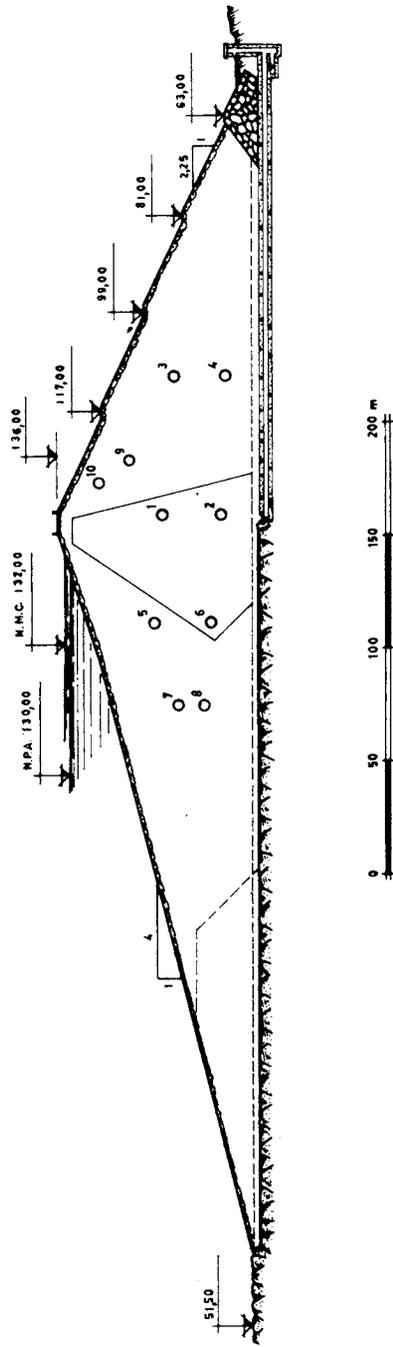


Fig. 1 – Barragem do Mira. Perfil tipo. Localização dos piezómetros

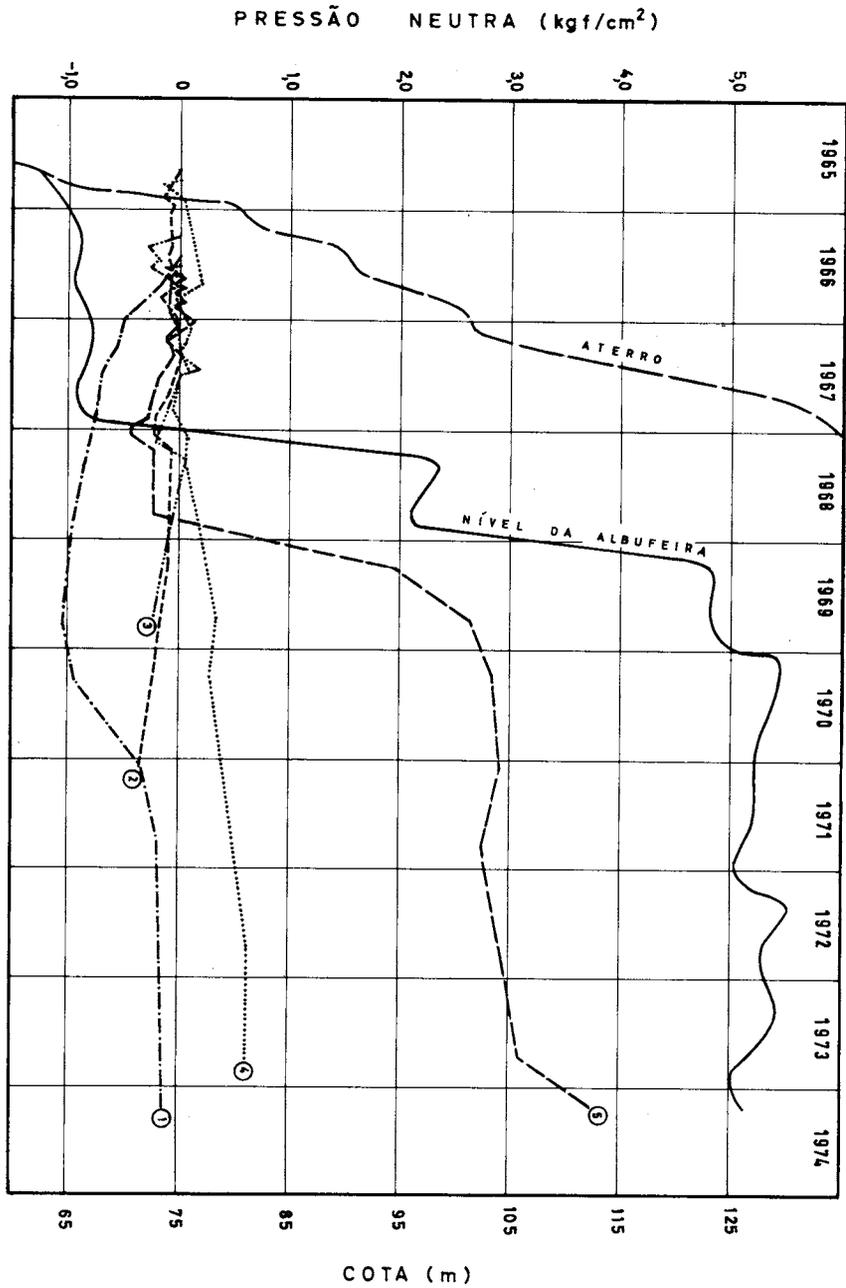


Fig. 2 - Evolução das pressões neutras (piezômetros 1 a 5)

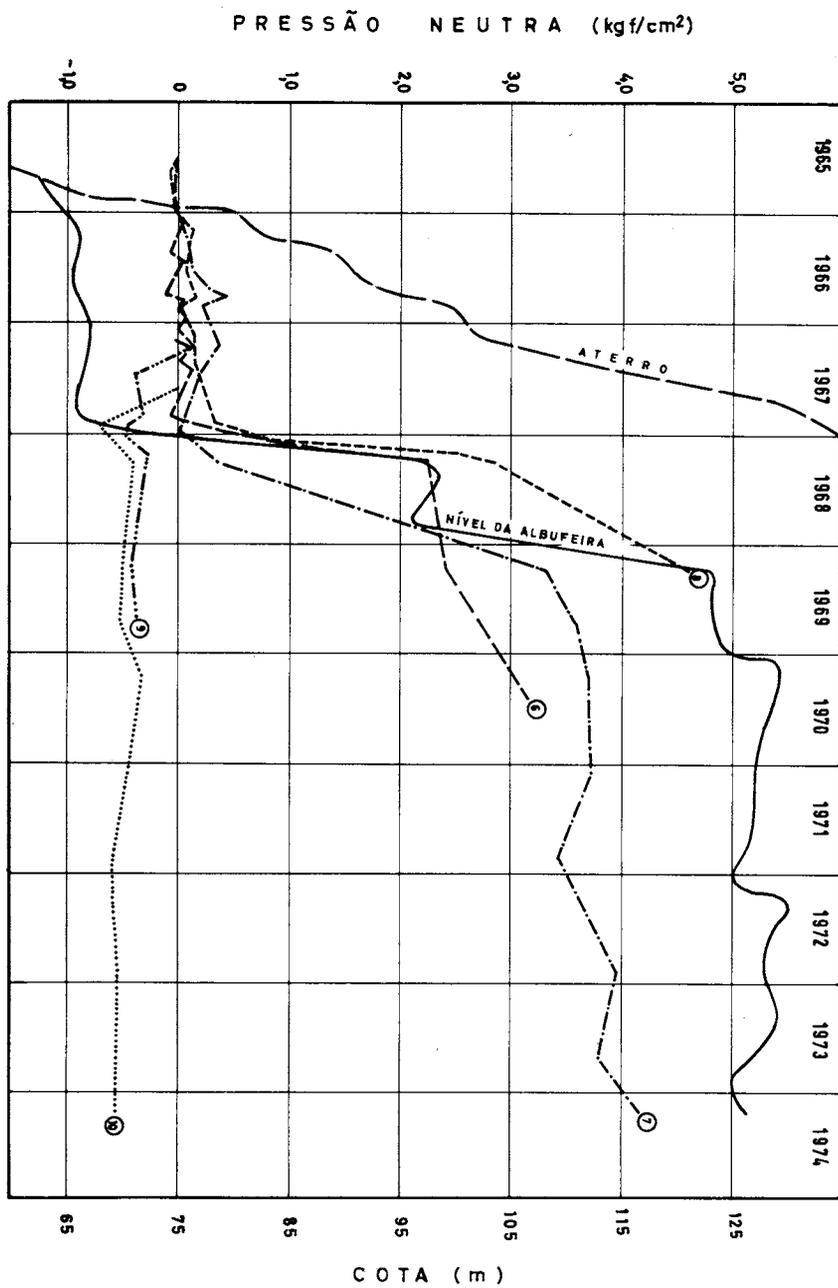


Fig. 3 – Evolução de pressões neutras (piezômetros 6 a 10)

crecente. Mas quando o incremento dessa tensão diminui (fase final da construção) a pressão neutra progride cada vez mais no campo negativo, só voltando ao positivo com o enchimento da albufeira. Se se tratasse de solos saturados com pressões neutras inferiores à atmosférica, seria conhecida a relação do coeficiente  $\bar{B}$  com as tensões efectivas, daí se tirando vantagens de índole prática. Mas em solos não saturados, como é o caso, a relação entre tensões totais, efectivas e neutras negativas é muito complexa e sem repercussões na prática, pelo que só se analisará o efeito do crescimento do aterro nas pressões neutras quando estas últimas forem superiores à atmosférica.

Deve acrescentar-se que as técnicas actualmente disponíveis não permitem medir com exactidão as pressões neutras negativas nos aterros, nem se conhecem aperfeiçoamentos que permitam vir a resolver esta dificuldade. No entanto a informação colhida, pese embora o carácter qualitativo, não é desprovida de interesse para aplicação em projecto.

Analisando globalmente a resposta dos piezómetros durante a construção, verifica-se que a progressão da pressão neutra para o campo negativo não se processou duma maneira contínua, anotando-se ligeiros acréscimos de pressão no sentido positivo a precederem acréscimos no sentido negativo. De acordo com Pachêco Silva (1966) [3] o facto explica-se por analogia entre um solo coesivo compactado não saturado e um capilar parcialmente cheio de água. O respectivo diâmetro seria o que determinaria uma tensão na água do capilar igual à reinante na água do

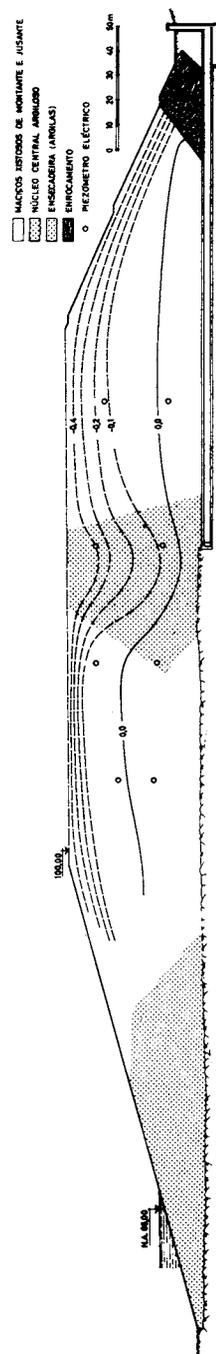


Fig. 4 – Linhas de igual pressão neutra. Construção à cota 100

solo do aterro. Para um estado de equilíbrio, essa tensão da água do aterro corresponde a um “capilar equivalente” e a pressão no ar é a atmosférica. Por compressão do solo, o índice de vazios diminui o que origina um aumento da pressão no ar simultâneo com uma diminuição do diâmetro do “capilar equivalente”. O comportamento resultante depende da predominância do efeito de um dos fenômenos. Inicialmente, o aumento da pressão do ar provoca igual variação na pressão da água. Nesta, muito embora a diminuição do raio de curvatura dos meniscos tenda a determinar um incremento da pressão negativa, verifica-se que para o acréscimo positivo da pressão do ar, a pressão negativa diminui. Posteriormente, devido a fenômenos de dissipação e solubilidade do ar na água, a pressão negativa da água tenderá para valores maiores. Como o diâmetro do “capilar equivalente” vai diminuindo podem eventualmente as pressões negativas na água serem cada vez maiores à medida que se processa a consolidação; até que a consequente diminuição de índice de vazios eleva o grau de saturação para um valor a que correspondem vazios de ar que não intercomunicam. A pressão na água inicia uma evolução para o campo positivo até que, com a saturação, a consolidação se dá nos moldes clássicos admitidos para os solos saturados.

Embora com base num esquema capilar, esta hipótese explica a natureza do desenvolvimento das pressões neutras negativas que, como se frizou, chegam a aumentar simultaneamente com o crescimento da tensão total. A explicação baseada em possíveis atrasos de leitura

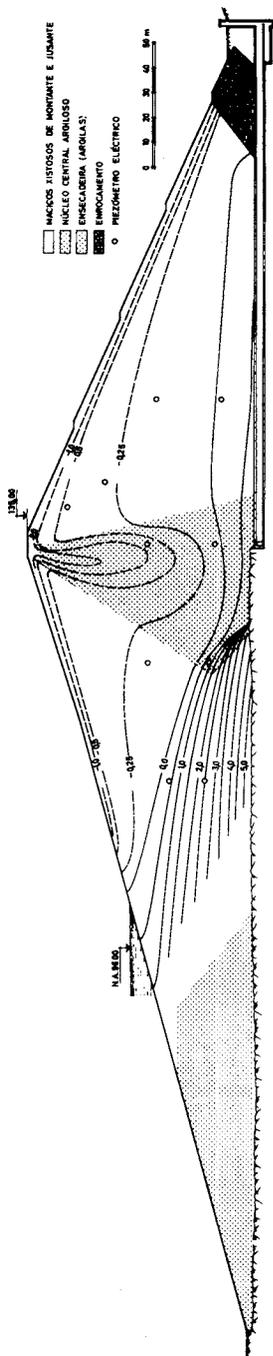


Fig. 5 — Linhas de igual pressão neutra. Final da construção

é de excluir dado o grande período de tempo de observação e características do piezómetro.

Verifica-se assim que este modelo contrasta com o normalmente admitido para a compressão de solos não saturados constituídos por partículas aproximadamente esféricas. Uma solicitação exterior de compressão tenderia a aumentar o raio de curvatura dos meniscos. Mas tendo os solos, no presente caso, elevada percentagem de partículas lamelares e aciculares e baixo grau de saturação, diminuem os raios de curvatura dos meniscos gerando aumentos da tensão neutra negativa.

Com base em elementos disponíveis fez-se uma interpretação global através do traçado de linhas de igual pressão neutra no aterro. Esse traçado apresenta-se nas Figs. 4 e 5 em que a primeira diz respeito a uma situação intermédia da fase construtiva e a segunda à situação final da construção dos aterros.

Da Fig. 4 pode verificar-se que na zona do núcleo central se instalam as maiores pressões neutras negativas. Nas proximidades da ensecadeira incorporada a montante, por falta de elementos, interromperam-se as linhas de igual pressão.

Para o final de construção (Fig. 5) a situação evoluiu acentuando-se as pressões neutras negativas no núcleo. No maciço de jusante e a despeito do substancial aumento da pressão “overburden”, as pressões neutras não sofreram modificações sensíveis. No maciço montante e dado o facto de se ter efectuado um certo represamento, as pressões evoluíram no sentido positivo na zona localizada abaixo da superfície treática.

## 2.2 – Fase operacional

No núcleo central, com o represamento a atingir as cotas mais elevadas em fins de 1969, verificou-se que as pressões aumentaram numa forma sensível, com resposta mais rápida do piezómetro 6 dada a sua localização junto ao paramento de montante do núcleo. Tanto este dispositivo como o 2 avariaram-se em 1970 mantendo-se o piezómetro 1 em funcionamento com estabilização para uma pressão ligeiramente negativa.

Relativamente ao maciço de montante qualquer dos três piezómetros (5, 7 e 8) deu uma resposta rápida ao represamento, tendo o 8 avariado em 1969. Os piezómetros 5 e 7 assinalam, a partir de 1970, uma tendência para a estabilização, facto a que não deve ser estranho o regime de exploração da albufeira.

No maciço de jusante os piezómetros 9 e 10 estão a cotas muito elevadas pelo que as pressões neutras medidas se localizam francamente no campo nega-

tivo. O piezômetro 10 dá uma resposta estabilizada desde o princípio de 1971 e o 9 foi avariado, acidentalmente, durante uma operação de leitura em Setembro de 1969. O piezômetro 3, a cotas mais baixas, assinala ainda pressões neutras inferiores à pressão atmosférica mas já próximas desta, enquanto que o piezômetro 4 completa o conjunto de resultados lógicos dos dispositivos de jusante: após a resposta às pressões “overburden”, a pressão neutra estabilizou por volta do zero tendo, cerca de meio ano depois, respondido à instalação do represamento total. Desde 1970 tem aumentado ligeira e continuamente situando-se em Setembro de 1973 em torno de  $0,6 \text{ kg/cm}^2$ .

Dois factores podem contribuir para a elevação da pressão neutra nesta zona. Inicialmente a barragem previa-se homogénea com materiais xistosos. Só após o começo da construção dos aterros se decidiu pelo zonamento donde a base do núcleo, embora objecto de cuidados especiais, constitui uma zona preferencial de percolação cujas consequências são atenuadas pelo efeito localizado dum órgão de drenagem (vala corta-águas). O outro factor relaciona-se com a anisotropia dos aterros xistosos do ponto de vista da permeabilidade, donde a superfície freática terá tendência para se horizontalizar à saída do núcleo.

Para apreciação do comportamento global apresenta-se na Fig. 6 um esquema com as linhas de igual pressão neutra que, por interpolação dos valores pontuais registados e conhecimento de condições de fronteira, se admitem traduzirem a situação em fins do ano de 1973. Na mesma figura assinalam-se os

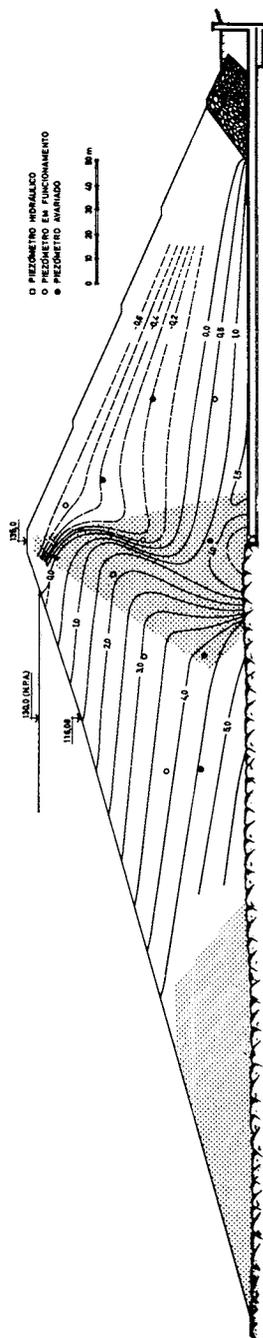


Fig. 6 - Linhas de igual pressão neutra em Setembro de 1973

piezômetros avariados bem como a resposta dum piezômetro hidráulico que é importante para a interpretação global (os outros 3 piezômetros hidráulicos, instalados no perfil em causa, não dão resposta por se situarem na zona das pressões neutras negativas).

Comparando com a situação no final da construção (Fig. 5), assinala-se a elevação da superfície freática no maciço estabilizador de montante como consequência da subida do nível da água na albufeira. Este fenómeno repercute-se também no núcleo onde, genericamente, só a zona adjacente ao seu paramento de jusante exhibe tensões neutras inferiores à atmosférica. No maciço de jusante a zona mais elevada é caracterizada por manter instaladas tensões neutras negativas, enquanto que junto à fundação há pressões neutras positivas embora não muito elevadas. Trata-se também duma consequência da subida da superfície freática no núcleo.

Relativamente à vida operacional da barragem verifica-se que, após cinco anos, a distribuição é normal face à modificação das condições de fronteira. Verifica-se que desde 1971, isto é, após dois anos de funcionamento, há uma quase estacionaridade nas leituras dos dispositivos de medida, reflectindo uma estabilização de pressões que, a montante, se deve relacionar com a pequena flutuação do nível da albufeira. Exceptua-se o piezômetro 4 por razões já expostas (singularidade da base do núcleo do ponto de vista da permeabilidade). A confirmação das causas poderia ser dada pelo piezômetro 2 mas, infelizmente, este deixou de funcionar em Janeiro de 1971. Pensa-se no entanto analisar os caudais bombados no poço do pé de jusante numa tentativa de melhor conhecimento do funcionamento daquele órgão drenante. Ficar-se-ia assim a dispor de mais um elemento informador das características reais da base do núcleo [4].

### 3 – COMPORTAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE MEDIDA

Decorridos dez anos sobre a data da colocação do primeiro piezômetro, 50% ainda se mantêm operacionais. Exceptuando o dispositivo 9, avariado acidentalmente pelo operador, não se conhecem ao certo os motivos porque os restantes deixaram de funcionar. No caso do piezômetro 8 admite-se que o sistema de vedação se comportou deficientemente face à elevada pressão instalada ( $\sim 5,0 \text{ kg/cm}^2$ ). No quadro seguinte apresentam-se elementos sobre o tempo de duração e máxima pressão instalada.

PIEZÓMETRO	ANOS DE FUNCIONAMENTO	MÁXIMA PRESSÃO REGISTADA (kg f/cm <sup>2</sup> )	OBSERVAÇÃO
1	8	0	
2	5,5	0,4	Deixou de funcionar
3	3,5	0,2	Deixou de funcionar
4	9	0,6	
5	8	3,8	
6	4	3,2	Deixou de funcionar
7	9	4,2	
8	4	4,6	Deixou de funcionar
9	2,5	0,2	Avariada
10	7	0	

Para uma barragem cuja construção dos aterros demorou 2,5 anos, verifica-se que a actual vida média dos piezómetros se cifra em 6 anos. Presentemente, já é de 9 anos o tempo em funcionamento lendo pressões da ordem dos 4,0 kg/cm<sup>2</sup>. O tempo mínimo foi de 2,5 anos (avaria).

Estes dados permitem concluir que estes piezómetros de corda vibrante exibiram um bom comportamento. Cobriram plenamente o período construtivo (objectivo fundamental) e ainda possibilitaram a observação de 7 anos da vida operacional da barragem. A análise dos resultados obtidos assegura a credibilidade do funcionamento dos aparelhos, facto que se reputa importante.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - NEVES, B., FOLQUE, J., TEIXEIRA DIREITO, F. e MARANHA DAS NEVES, E. - "Control, mechanical characteristics and observation of Mira dam", Tenth Congress of Large Dams, Question 36, Montreal, 1970.
- 2 - MARANHA DAS NEVES, E. - "Colaboração no controlo dos maciços terrosos da barragem do Mira". 12.º Relatório. LNEC, Lisboa Jan. 1969.
- 3 - SILVA, F. P. da - "Neutral pressures in compacted cohesive soils", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. ASCE, Sm1, Jan., 1966.
- 4 - MARANHA DAS NEVES, E. - "Observação da barragem do Mira", 4.º Relatório. LNEC, Lisboa, Nov., 1974.