

# MODELOS DE COMPORTAMENTO DA BARRAGEM DE MASSINGIR EM MOÇAMBIQUE

## BEHAVIOR MODELS FOR MASSINGIR DAM IN MOZAMBIQUE

Marcelino, João; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, marcelino@lnec.pt*  
Portugal, João; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, portugal@lnec.pt*

### RESUMO

A barragem de Massingir, com quase 5 km de comprimento e uma altura máxima de 47 m é constituída por um aterro zonado e encontra-se em exploração há cerca de 30 anos. Esta barragem, uma das maiores de Moçambique, exibiu, logo após o início da exploração problemas de comportamento da fundação. Em função disso, a sua exploração ficou condicionada e só após importantes obras de reabilitação concluídas em 2006, se iniciou a exploração normal da albufeira, embora ainda sem a central de produção de energia instalada. Na sequência do re-enchimento, um importante acidente ao nível do funcionamento das descargas de fundo, voltou a condicionar a exploração da obra. Apesar disso, desde 2006 que se encontra instalado e, pelo menos parcialmente operacional um sistema de observação da obra. Os dispositivos desse sistema permitem medir as diversas grandezas, com base nas quais é possível estabelecer modelos de cariz estatístico que permitem aferir o seu comportamento e podem incorporar sistemas de aviso e alerta. Os modelos obtidos são explorados para prever o comportamento da obra em diversos cenários e para estabelecer critérios de atenção e alerta a adotar na exploração futura.

### ABSTRACT

Massingir dam, with nearly 5 km long and a maximum height of 47 m consists of a zoned embankment and is in operation for nearly 30 years. The dam, one of the largest of Mozambique showed, shortly after the start of operation, behaviour problems on the foundation. As a result, its operation was conditioned and only after significant rehabilitation works completed in 2006, it began the normal exploitation of the reservoir. As a result of the re-filling, in a major accident at the exit of the bottom outlet discharges, re-conditioned again the exploitation of the reservoir. Nevertheless, since 2006 is installed and, at least, partial operational, a system for the dam monitoring. The devices of this system allow the measurement of the various quantities on the basis of which it is possible to establish statistical models that allow to evaluate its behaviour and may be included in warning and alert systems. These models are used to predict the behaviour of the dam in different scenarios allowing to establish values to be used in attention and alert criteria to adopt in future exploration.

### 1 - DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

O aproveitamento de Massingir consta de uma barragem de terra, barrando o leito maior do rio e dois diques, um muito extenso, na margem direita (MD), e outro de menor extensão, na margem esquerda (ME), um evacuador de cheias de superfície, no alto da margem esquerda, seguido de um canal que se desenvolve ao longo dessa margem até ao leito do rio, de uma conduta de tomada de água para a central hidroelétrica e de duas condutas de descarga de fundo, órgãos estes que se situam e desenvolvem na entre a barragem principal e o dique da margem direita (Figuras 1 e 2).

A albufeira tem uma capacidade máxima de armazenamento de cerca de 2800 hm<sup>3</sup> e a área inundada, ao nível do NPA, é de 138 km<sup>2</sup>.

A descrição da obra, que seguidamente se apresenta, baseou-se na informação recolhida no Projeto (Coba, 1969), e inclui algum nível de pormenorização relativamente à geologia do local, por se tratar de assunto relevante para a análise do comportamento observado, designadamente da barragem de aterro.

O local da barragem, próximo da antiga povoação de Tiobine, situa-se no vale do Rio dos Elefantes a jusante da antiga sede do posto Administrativo de Massingir. A garganta onde passa o rio tem cerca de 400 m de largura, apresentando margens de baixa altura, com cerca de 20 m. O leito menor do rio situa-se entre as cotas 82,00 m e 85,00 m. O leito maior inunda um primeiro patamar entre as cotas 85,00 m e 87,00 m, para atingir e ultrapassar a rota do rio junto às vertentes às cotas 90,00 m a 91,00 m, em extensas várzeas a montante e a jusante da secção de Tiobine.

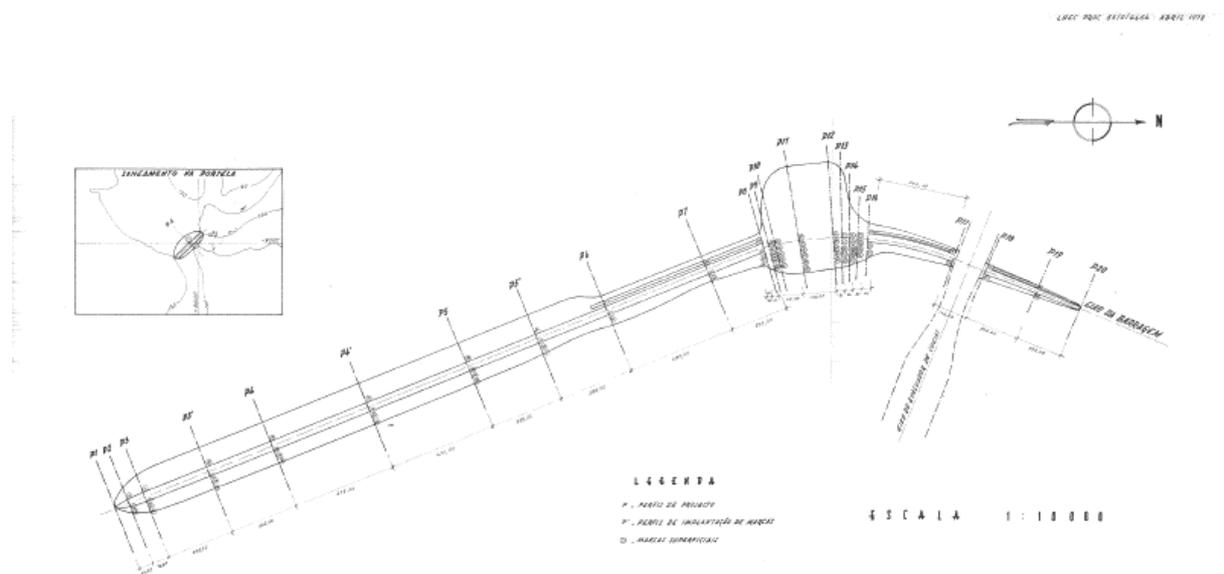


Figura 1 - Planta da barragem de Massingir

Nesta secção, escolhida para implantação da barragem, as vertentes do vale são bastante abruptas, sobretudo a margem direita que tem uma inclinação de cerca de 45°, até atingir as cotas 107,00 m a 110,00 m. A partir destas cotas, a assimetria dos terrenos das duas margens torna-se bastante acentuada. A margem direita prolonga-se, num comprimento superior a 3 km, a cotas inferiores à cota 110,00 m, com uma portela à cota 99,00 m, com quase 2 km de desenvolvimento. Este planalto cessa bruscamente contra o pé das Colinas que se elevam rapidamente até à cota 130,00 m. Na margem esquerda, a subida do terreno é regular, atingindo, a uma distância inferior a 1 km, a cota 125,00 m. O vale principal é preenchido com aluviões arenosas, por vezes com níveis ou lenticulas mais grosseiras, com seixo e mesmo calhau ou, pelo contrário, horizontes ou passagens mais finas, por vezes siltes e argilas.

O "bed-rock" encontra-se a cerca de 26 m de profundidade. Os terrenos da margem esquerda e parte dos da margem direita tem uma estrutura semelhante formada por Cascalheira de espessura variável e de carácter mais ou menos grosseiro ou silto-argiloso, assente sobre o complexo de grés argilosos e margas com bancadas calcáreas. Este complexo encontra-se mais ou menos meteorizado à superfície. A espessura da cascalheira está compreendida entre 0,50 m e 3,50 m e a profundidade de alteração do grés argiloso poderá atingir 2 m a 3 m.

Na margem direita, entre o degrau topográfico que constitui as colinas e o patamar à cota 104,00 m a 107,00 m, existem aluviões argilosas ou siltosas cuja espessura, em certos pontos, é de cerca de 30 m.



Figura 2 - Vista de montante (e da margem direita) da barragem de Massingir

Devido à sua extensão, a barragem apresenta diversas soluções para os perfis transversais em função da altura em cada zona e das condições de fundação. A barragem tem uma altura máxima acima da fundação de cerca de 47 m e um comprimento no coroamento de 4650 m. O coroamento, com 12 m de largura, está à cota 131 m. O nível de pleno armazenamento (NPA) e o nível de máxima cheia (NMC) estão às cotas 125,0 m e 128,5 m, respetivamente.

Atendendo à morfologia do terreno, disponibilidades e características dos materiais de empréstimo, e natureza das fundações, os seguintes perfis transversais tipo da barragem são os seguintes (Figura 3):

**Perfil A** - Correspondente à zona do vale principal onde a fundação é constituída pelas aluviões arenosas de baixa compacidade e elevada permeabilidade. A primeira destas características aliada à possibilidade de ocorrência de fenómenos sísmicos foi a origem da decisão de tratamento dos aluviões tendente a elevar a sua densidade relativa. A elevada permeabilidade da fundação e a possibilidade de se gerarem erosões a jusante foi a razão pela qual se projectou um tapete impermeável a montante (Fig. 4), com uma extensão de cerca de 220 m, e poços de alívio junto ao pé de jusante. O perfil caracteriza-se por possuir um núcleo central de material argiloso e maciços estabilizadores constituídos, a montante, por solos argilo-arenosos e, a jusante, por materiais provenientes das escavações. As transições entre os aterros estabilizadores e o núcleo são feitas por intermédio de cascalheiras. Na zona de jusante essa cascalheira assenta sobre um tapete filtrante que se prolonga até ao paramento de jusante.

**Perfil B** - Correspondente à zona da barragem fundada sobre materiais argilosiltosos. É constituído por um núcleo central de material argiloso ladeado por maciços estabilizadores de materiais idênticos aos utilizados nos maciços do perfil A. Tal como neste perfil, a transição a montante, do maciço estabilizador para o núcleo é feita por intermédio de cascalheira. A jusante do núcleo, existe uma camada de material filtrante (com cerca de 2 m de espessura) que se prolonga em tapete, junto à fundação, até jusante. A base do núcleo argiloso é constituída por uma trincheira corta-águas com cerca de 3,00 m de profundidade na fundação e destinada a melhorar a estanqueidade dessa zona da obra. Junto ao pé de montante deste perfil e numa extensão de cerca de 40 m, existe uma banqueteta de contrapeso constituída por materiais de natureza granular, destinada a evitar alteração dos solos de fundação e minimizar os efeitos de empolamentos dos mesmos solos, quando em contacto com a água.

**Perfil C** - Correspondente às zonas da barragem construídas sobre cascalheiras ou sobre rocha fraturada. É um perfil semelhante ao perfil B, diferindo deste, fundamentalmente, pela não existência, nem da banqueteta de contrapeso no pé de montante, nem do tapete que, no perfil B, liga o filtro encostado ao paramento de jusante do núcleo com o paramento de jusante.

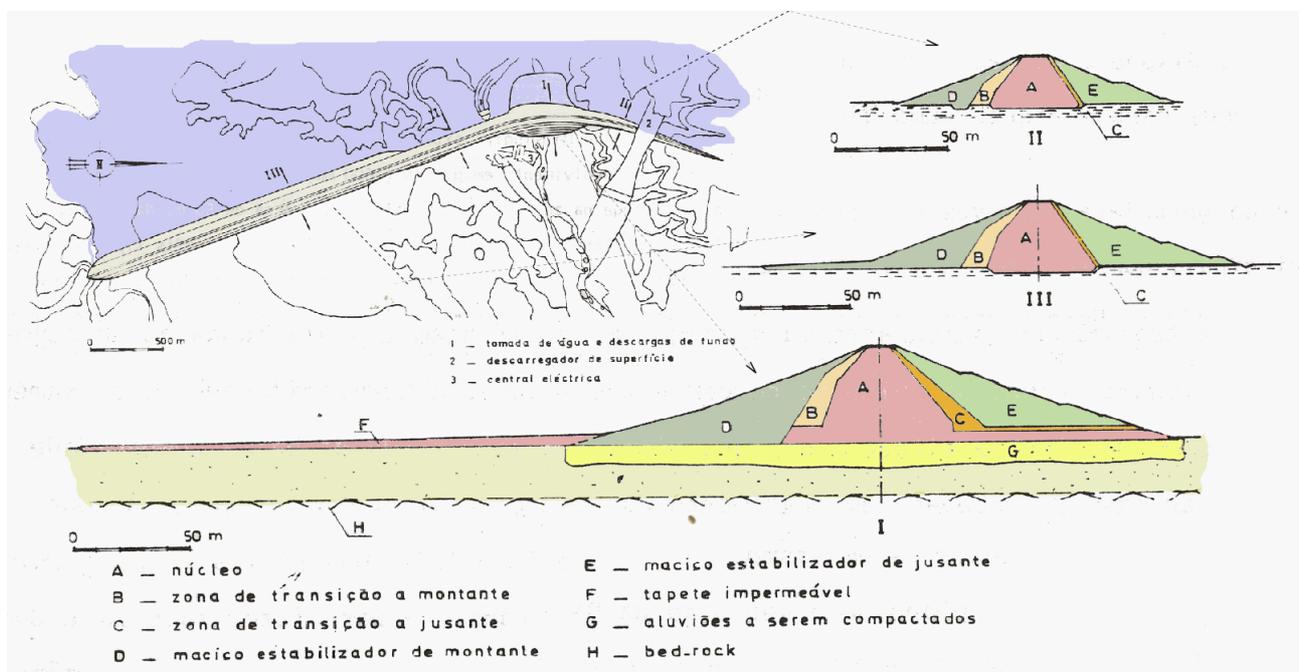


Figura 3 - Perfis transversais-tipo dos trechos em aterro da barragem (Coba, 1969)



Figura 4 - Vista aérea da barragem de Massingir e do tapete impermeabilizante no final da fase construtiva (Arquivo pessoal de Álvaro Carmo Vaz)

## 2 - HISTORIAL DA OBRA

### 2.1 - Primeiro enchimento

A construção da barragem decorreu entre 1971 e 1977, no decurso um período difícil, correspondente ao conflito armado em Moçambique. Por causa disso e por questões ligadas ao financiamento, a construção ficou incompleta, faltando instalar as comportas de sector do descarregador de cheias (6 vãos) e a central hidroelétrica. Em Novembro de 1977, é dado início ao primeiro enchimento.

Em resultado do enchimento da albufeira, foram detetadas diversas deficiências no comportamento da fundação, tanto na zona da barragem principal, como e de forma mais pronunciada, no dique da margem direita, onde se chegaram a verificar fenómenos de *piping*. A exploração da albufeira foi condicionada por estas situações e também pelo facto de não terem sido montadas as comportas do descarregador de cheias, a barragem esteve com a sua exploração fortemente condicionada desde então.

Por questões de segurança, a exploração da albufeira foi condicionada à cota 110 m, isto é, 15 metros abaixo do Nível de Pleno Armazenamento (NPA). Durante o período que antecedeu as obras de reabilitação de 2002 a 2004 o nível de água na albufeira (NAA) apenas ultrapassou a cota estabelecida, de forma esporádica, devido à ocorrência de cheias. Por conseguinte, o valor mais elevado foi atingido nas cheias de 2000, tendo-se atingido, por um período de algumas horas, a cota 124 m. Há relatos que, nessa ocasião, ocorreu um aumento significativo da percolação a jusante do dique da MD, sendo notório o aumento das áreas inundadas e das zonas onde a água emergia à superfície, borbulhando.

### 2.2 - Reabilitação

De Abril de 2004 a Dezembro 2006 a barragem de Massingir foi alvo de diversas obras de reabilitação, baseadas num projeto da WAPCOS de 1994, revisto pelo consultor da ARA-SUL (Coyne et Bellier) que incluíram, essencialmente, as seguintes tarefas: i) impermeabilização da fundação em certas zonas, através de injeções; ii) construção duma banquetta estabilizadora a jusante do dique da margem direita; iii) construção de um elevado número (85) de poços de alívio ao longo do dique da margem direita e no vale principal, com uma vala de drenagem para escoamento da água recolhida; iv) alteamento em 1 m da cota do coroamento; v) construção de um parapeito de betão sobre o coroamento da barragem para aumentar a segurança em relação a cheias extremas; vi) reabilitação do rip-rap; vii) instalação das comportas do descarregador de cheias; viii) reparação dos equipamentos hidromecânicos das descargas de fundo (comportas ensecadeiras, comportas de sector, ensecadeiras de jusante e servomotores); ix) reabilitação do sistema de observação e outros trabalhos de menor importância. A Figura 5 apresenta alguns dos trabalhos realizados.



Figura 5 - Trabalhos de reabilitação: injeções, banquetta, comportas e poços de alívio

### 2.3 - Enchimento após reabilitação e acidente nas descargas de fundo

O reenchimento da albufeira, prosseguiu, na sequência da finalização dos trabalhos de recuperação, tendo sido previstos 3 patamares (Coyne et Bellier, 2007). Esses patamares correspondiam às cotas 120 m, 122,5 m e 125 m (NPA). A par do enchimento previu-se o reforço das actividades de observação, nomeadamente através da especificação de frequências de leitura dos equipamentos ajustada a esta fase.

O enchimento foi no entanto interrompido pelo acidente que ocorreu nas descargas de fundo em 22 de Maio de 2008, quando o nível de água na albufeira (naa) se encontrava à cota 122,6 m (Figura 6). O pormenor e a análise das possíveis causas do acidente saem fora do âmbito desta comunicação, pelo que não serão apresentadas considerações obre o assunto. Interessa, porém, referir as consequências da situação.

Com efeito, desde essa data, a barragem encontra-se com a exploração muito condicionada, uma vez que as descargas de fundo se encontram praticamente inoperacionais. O nível da albufeira é controlado, acima da cota 115 m, pela abertura parcial das comportas do descarregador de cheias. Abaixo dessa cota a barragem não pode ser esvaziada, a menos que se proceda à abertura das comportas de montante das descargas de fundo, com todos os inconvenientes que daí podem resultar.

Acresce ainda que, de acordo com os estudos hidrológicos mais recentes, os descarregadores de cheias acrescidos das descargas de fundo, não têm capacidade de vazão suficiente par a cheia máxima provável (c.m.p.). É aliás por esse motivo que estão a decorrer obras para a construção de um descarregador auxiliar. Assim, na situação em que as descargas de fundo, essenciais para auxiliar o escoamento da c.m.p. Não estão operacionais, a exploração está ainda mais condicionada.



Figura 6 - Acidente na barragem (Maio de 2006) e estado final da zona da central e saídas das descargas de fundo

## 3 - SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

### 3.1 - Equipamentos instalados e frequências de leitura

A barragem de Massingir encontra-se em exploração há cerca de 35 anos tendo exibido, como se referiu, diversos acontecimentos com repercussões ao nível da segurança. Por outro lado, na sequência das obras de reabilitação foi reforçado o sistema de observação e implementado um sistema de registo razoavelmente organizado dos resultados de alguns dos dispositivos de observação instalados. Numa intervenção recente, os signatários procederam ao levantamento exaustivo do estado dos dispositivos instalados tendo-se também analisado os resultados obtidos conforme se relatará mais adiante.

Em resumo, o sistema de observação atualmente instalado na barragem de Massingir, na sequência da construção e das intervenções realizadas, compreende dispositivos para a monitorização:

- a) dos níveis de água na albufeira (NAA) e o a jusante (NAJ);
- b) dos deslocamentos superficiais através de marcas de nivelamento (MN);
- c) dos deslocamentos internos, horizontais e verticais, através de inclinómetros e baterias de assentamentos;
- d) das pressões intersticiais que se desenvolvem no corpo da barragem e na fundação (através de piezómetros de tubo aberto)
- e) dos caudais recolhidos nos poços de alívio, e

f) do caudal total recolhido pelos diversos poços no dique da margem direita.

Para além destas grandezas o sistema de observação da barragem inclui ainda uma estação meteorológica, essencial também no âmbito do balanço hídrico da albufeira.

Tendo em consideração a constituição do sistema de observação, conclui-se pela sua adequação genérica às características próprias da obra, tal como se deduz pela aplicação da metodologia preconizada na legislação portuguesa, que corresponde à quantificação dos fatores de risco associados à barragem.

No entanto, considera-se que, quer a quantidade, quer a operacionalidade quer ainda a disposição dos dispositivos ao longo da barragem revelam algumas deficiências. Em seguida apresenta-se o sumário das condições em que se encontram os equipamentos instalados:

- O sistema de medição de movimentos superficiais dos aterros e descarregador, constituído por 17 marcas superficiais e respetivos pontos de referência encontra-se inoperacional, não se procedendo a leituras.
- Os piezómetros de tubo aberto, 20 no total, estão distribuídos por apenas 8 perfis de observação, 6 no dique da margem direita e 2 na barragem principal. Alguns destes dispositivos foram instalados após a reabilitação (2005).
- Em 2005 foram ainda instaladas 18 células elétricas de pressão intersticial, distribuídas por 6 perfis de observação, 4 no dique da margem direita e 2 na barragem principal. Estão todas operacionais e instaladas na fundação. Das leituras disponíveis, embora algumas correspondam a cotas de água que indiciam poder estar avariadas, na maior parte obtêm-se resultados dentro do expectável pelo que, em princípio, estão a funcionar devidamente. A esta circunstância, não é certamente alheio o facto destes dispositivos terem sido instalados num passado recente (2005).
- Os inclinómetros e baterias de assentamento não são objeto de campanhas de medição.
- Os poços de alívio, 85 no total, estão 77 instalados a jusante do dique da margem direita e 8 a jusante da barragem principal. Entre os poços de alívio do dique da margem direita estão intercalados mais 40 piezómetros de tubo aberto para monitorizar a eficiência do alívio das subpressões. Estes equipamentos encontram-se, na quase totalidade operacionais.
- O medidor totalizador de caudal a jusante, instalado na saída da vala de drenagem do dique da margem direita está operacional.
- A escala limnimétrica e o medidor de nível, estão instalados a montante, respetivamente, no descarregador de cheias e na torre de manobra da tomada de água e descarga de fundo. Estes equipamentos estão operacionais.

## **3.2 - Modelos estatísticos**

### **3.2.1 - Introdução**

A elaboração de um juízo sobre a segurança das obras deve ser feita pela comparação entre o comportamento real (observado) e o comportamento esperado, normalmente estabelecido através de modelos.

Os modelos usados nas comparações, em certos casos, podem ser do tipo conceptual ou ter um cariz matemático. De acordo com Oliveira (2000), a análise da segurança pode ser feita através de: modelos analíticos, normalmente limitados a casos muito simples; modelos experimentais, mais aplicados em situações muito específicas, por exemplo, no que respeita à resposta dos materiais; modelos numéricos, quando as equações que definem o comportamento da barragem são resolvidas por métodos numéricos e; modelos semi-empíricos ou estatísticos, em que as relações entre as acções e as respostas são estabelecidas de forma mais ou menos simplificada, sem recorrer às equações da Mecânica, mas incorporando, normalmente, dados da observação da própria obra.

Naturalmente que as diferentes abordagens indicadas para estabelecer modelos de comportamento têm campos de aplicação e custos distintos, devendo, em geral, ser considerados como complementares.

Nos parágrafos seguintes descreve-se, genericamente, a formulação matemática associada à formulação dos modelos semi-empíricos e apresentam-se alguns dos modelos obtidos para a barragem.

A forma mais simples de estabelecer modelos de análise quantitativa consiste em procurar relacionar as variáveis do problema (tipicamente as acções ou variáveis independentes) com a resposta (ou variáveis dependentes), traduzida por deslocamentos, pressões, caudais, etc..

A relação entre os dois tipos de variáveis pode ser expressa por um conjunto de equações através de relações matemáticas, tal que, dados os valores das variáveis de *input* (variáveis independentes -  $x$ ), se possa calcular os valores previstos para as variáveis de *output* (ou dependentes-  $y$ ). O ajuste do modelo consiste na determinação dos parâmetros das equações que minimizam uma determinada função objectivo.

Por razões de simplicidade de tratamento matemático, convém que os coeficientes a determinar nas expressões afectem linearmente as variáveis, tal como expresso na Eq.1.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 \psi_1(x_1) + \beta_2 \psi_2(x_2) + \dots + \beta_n \psi_n(x_n) \quad [1]$$

onde  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  é a função que traduz o modelo de análise quantitativa,  $\beta_i$  são os parâmetros que se pretende determinar e  $\psi_n(x_n)$  funções (quaisquer) de  $x_n$ , isto é, das variáveis independentes.

Matricialmente a Eq.1 pode ser escrita como:

$$[y] = [X] \{\beta\} \quad [2]$$

onde  $[X]$  representa a matriz das funções  $\psi_n(x_n)$  e  $\{\beta\}$  o vetor das incógnitas  $\beta_i$ .

A matriz  $[X]$  não é quadrada. Possui tantas linhas quantas as observações e tantas colunas quantos os termos da expressão na Eq.1.

No entanto, multiplicando ambos os termos da Eq.2 por  $[X]^T$  ter-se-á:

$$[X]^T \{y\} = [X]^T [X] \{\beta\} \quad [3]$$

onde  $[X]^T [X]$  é uma matriz quadrada, com inversa, pelo que se pode ainda multiplicar ambos os termos da equação por  $([X]^T [X])^{-1}$ , obtendo-se:

$$([X]^T [X])^{-1} [X]^T \{y\} = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T [X] \{\beta\} \quad [4]$$

ou

$$([X]^T [X])^{-1} [X]^T \{y\} = [I] \{\beta\} \quad [5]$$

onde  $[I]$  representa a matriz identidade. Assim, finalmente, é possível calcular o valor dos coeficientes da lei pretendida através de:

$$\{\beta\} = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T \{y\} \quad [6]$$

onde  $\{\beta\}$  representa o vector contendo os valores de  $\beta_i$ ,  $\{y\}$  o vector das variáveis dependentes (valores observados) e  $[X]$  a matriz com as funções  $\psi(x_n)$ .

### 3.2.2 - Modelo do totalizador de caudais

Os caudais captados pelos diversos poços instalados a jusante da barragem, no dique da margem direita (Figura 1), são conduzidos por uma vala para a zona mais baixa, situada sensivelmente no pk 0+625. A aferição do caudal total é feita pela medição do nível de água numa secção calibrada para o efeito.

Na Figura 7 apresenta-se o ajuste efetuado para o medidor-totalizador dos caudais recolhidos ao longo da vala drenante. Foram testadas duas relações, expressas por:

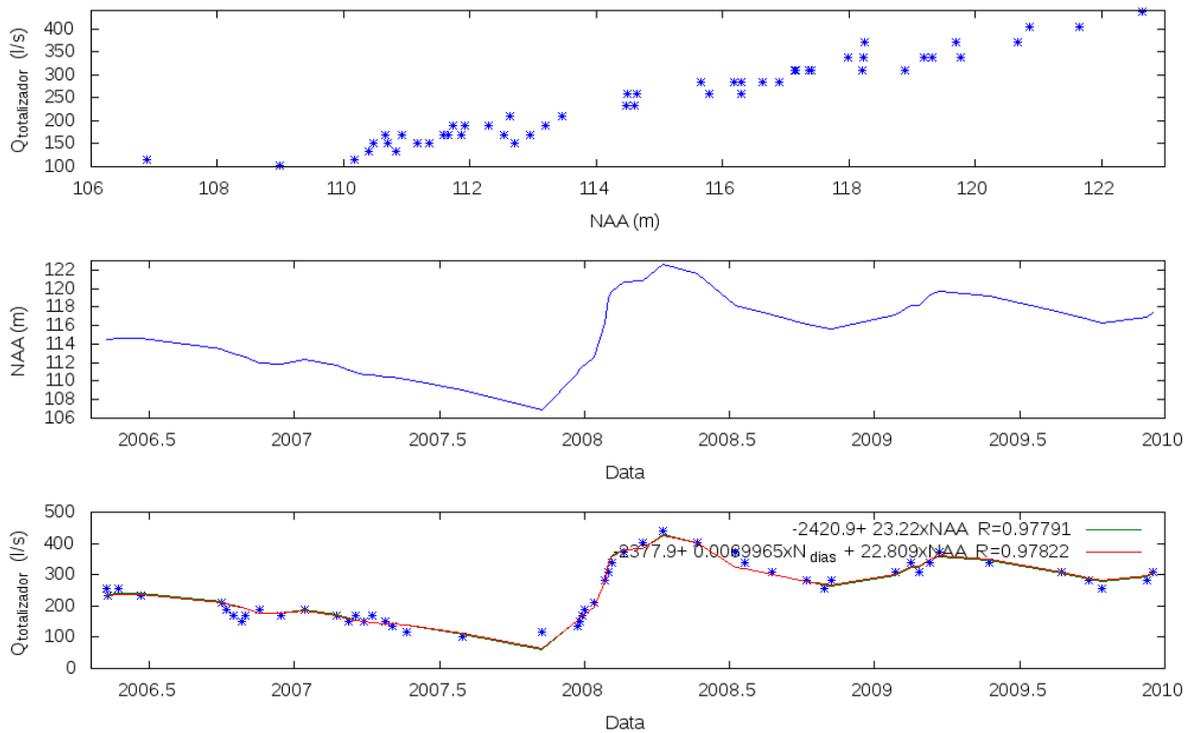
$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad [7]$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} \quad [8]$$

Verifica-se que a dependência do caudal relativamente ao nível de água na albufeira (Eq.7) é suficiente para explicar os caudais recolhidos no totalizador e que, não há uma tendência nítida para que o caudal varie no tempo. Em termos práticos, e enquanto não se proceder a ajustes no sistema de medição, pode-se considerar que os caudais recolhidos no totalizador podem ser estimados através de:

$$Q [l/s] = -2420,9 + 23,22 N_{AA} (m) \quad [9]$$

No ajuste foram usadas 51 medições, todas as disponíveis a partir de 2006, tendo-se obtido um coeficiente de correlação  $R^2$  de 0,98, pelo que se considera que este modelo representa de forma fidedigna as medições efetuadas, e, portanto, o comportamento da fundação da barragem nesta zona, desde que não haja variações nas condições de fundação.



$$p = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 N_{AA}^2$$

Figura 7 - Diagrama de ajuste da expressão (Eq.7) aos caudais do totalizador

### 3.2.3 - Piezómetros hidráulicos da vala drenante

Para o estabelecimento dos modelos de análise foram testados diversos tipos de relações entre os nível da albufeira a montante e a carga em cada piezómetro. Para avaliar uma possível variação no tempo, independente de qualquer uma das variáveis, considerou-se ainda um termo que permitisse avaliar uma tal tendência.

Foram consideradas as seguintes equações nos ajustes efetuados (em que os  $\beta_i$  são constantes a determinar, P a pressão e  $N_{dias}$  o número de dias que decorreram desde uma data arbitrária (no caso considerou-se o início das observações):

$$p = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad [10]$$

$$p = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} \quad [11]$$

$$p = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 N_{AA}^2 \quad [12]$$

Da análise dos diagramas onde se confrontam as variações do NAA com as variações das cotas piezométricas dos piezómetros da vala drenante é evidente existir uma correlação entre as duas grandezas. Essa correlação é aproximadamente linear, isto é, em geral a equação (10) é suficiente para aproximar com fiabilidade as pressões lidas. Apesar disso foram testadas também as outras relações. Na Figura 8, correspondente ao ajuste a partir de Junho de 2005, ilustra-se um dos diagramas obtidos.

Na mesma figura é também evidente que nas primeiras leituras há um desfazamento entre o modelo e as observações. Este facto pode ter diversas origens mas, muito provavelmente corresponde a um período de (re)saturação da fundação após um longo período em que a albufeira esteve vazia. Por se tratar de uma situação verificada praticamente em todos os aparelhos deste tipo, decidiu-se que o modelo não deveria incluir estes pontos, correspondentes, grosso modo, às primeiras 40 leituras. Assim, o ajuste foi realizado para as leituras posteriores a 20 de Março de 2006.

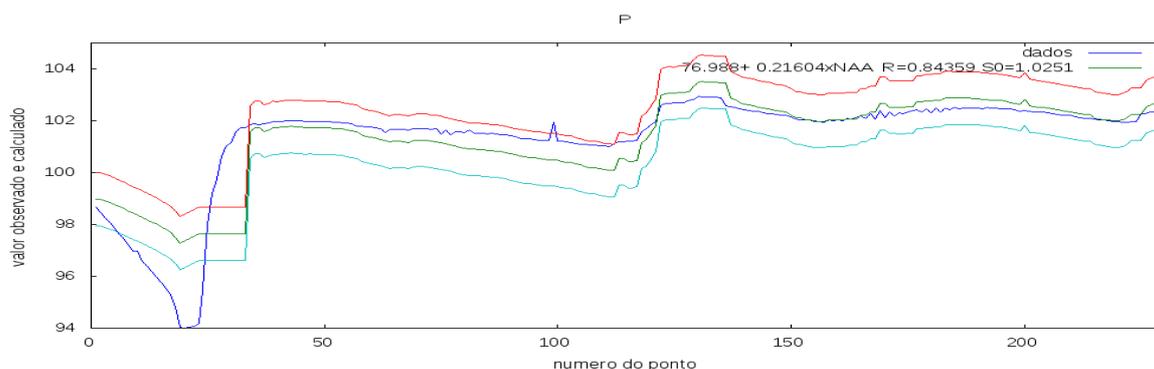


Figura 8 - Exemplo de regressão linear entre o NAA e a pressão piezométrica (Piezómetro 30-1, Pk 1+562.50)

No diagrama da Fig. 9 ilustra-se o ajuste obtido, sendo evidente, a melhoria resultante. Aliás, no caso em análise, o coeficiente de correlação R subiu de 0,84 para 0,98, tal como vem expresso nas Figuras 8 e 9, respetivamente.

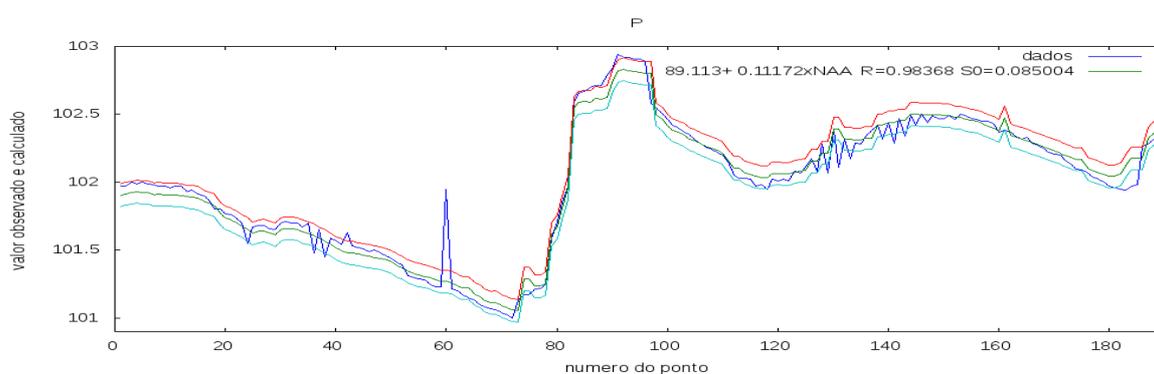


Figura 9 - Exemplo de regressão linear entre o NAA e a pressão piezométrica, excluindo as leituras iniciais (Piezómetro 30-1, Pk 1+562.50)

No Quadro 1 resumem-se os parâmetros obtidos para a relação linear (1) para todos os piezómetros da vala de drenagem. É interessante notar que, com exceção dos piezómetros aos pk 0+362.50 e 0+912.50, que apresentam um coeficiente de correlação R de apenas 0,89, todos os restantes aparelhos apresentam uma excelente aderência ao modelo linear proposto.

### 3.2.4 - Caudais nos poços de alívio

Intercalados com os piezómetros, a barragem dispõe de poços de alívio, cuja finalidade é a de diminuir os gradientes hidráulicos à saída da fundação, por forma a prevenir quaisquer fenómenos de "piping" ou de levantamento hidráulico. Tal como preconizado no plano de observação em vigor desde o final das obras de recuperação da barragem, são medidos, com a mesma frequência que os piezómetros, os caudais recolhidos nestes órgãos de segurança.

Relativamente ao sistema de medição, é conveniente referir que, pela sua concepção, a medição dos caudais é feita pelo controlo do tempo necessário para o enchimento de um recipiente de volume conhecido. Inicialmente, foi usado um recipiente de 5 l. No entanto, em muitos poços, para níveis de água da albufeira superiores à cota 115 m, ocorrem caudais bastante expressivos, que implicaram a utilização de um volume superior. Actualmente, usa-se um recipiente com 10 l, mas, ainda assim, em diversos poços, para cotas mais elevadas do NAA, há dificuldades em realizar a medição com a precisão pretendida. Este facto tem de ser tido em consideração na interpretação dos resultados obtidos por estes equipamentos, sendo natural que haja bastante dispersão nos dados.

Quadro 1 – Parâmetros de ajuste dos piezômetros da vala drenante para a expressão (10)

Localização	$\beta_1$	$\beta_2$	R	$\sigma$
0+212.50	80,438	0,194365	0,9674	0,2105
0+262.50	78,942	0,207011	0,9822	0,1558
0+312.50	69,261	0,288788	0,9725	0,2100
0+362.50	93,004	0,070028	0,8937	0,1469
0+410.50	90,849	0,086933	0,9257	0,1589
0+412.50	72,089	0,259566	0,9602	0,1396
0+462.50	78,727	0,196576	0,9524	0,1503
0+512.50	78,406	0,199649	0,9540	0,1672
0+562.50	87,110	0,113076	0,9652	0,1239
0+612.50	86,855	0,114261	0,9612	0,1306
0+662.50	88,056	0,102211	0,9685	0,1083
0+712.50	87,242	0,111051	0,9800	0,0876
0+762.50	86,961	0,113808	0,9791	0,1091
0+812.50	88,714	0,097588	0,9215	0,1707
0+862.50	79,421	0,189398	0,9588	0,2029
0+912.50	89,277	0,094896	0,8956	0,1965
0+962.50	91,292	0,076681	0,9550	0,0988
1+012.50	91,224	0,078485	0,9506	0,1063
1+062.50	91,550	0,075871	0,9693	0,0799
1+112.50	90,732	0,085663	0,9618	0,1012
1+162.50	91,277	0,080322	0,9740	0,0775
1+212.50	88,675	0,106971	0,9813	0,0871
1+262.50	90,205	0,093607	0,9793	0,0804
1+312.50	88,549	0,111068	0,9817	0,0894
1+362.50	90,134	0,096602	0,9759	0,0896
1+412.50	87,428	0,120000	0,9212	0,2064
1+462.50	85,099	0,146664	0,9756	0,1282
1+512.50	88,081	0,119778	0,9697	0,1205
1+562.50	89,111	0,111741	0,9837	0,0846
1+612.50	91,842	0,087076	0,9643	0,0999
1+662.50	90,774	0,098189	0,9762	0,0905
1+712.50	88,112	0,125179	0,9353	0,1938
1+762.50	82,270	0,179484	0,9611	0,1692
1+812.50	80,946	0,195944	0,9504	0,1593
1+862.50	69,916	0,303965	0,9575	0,0872
1+912.50	80,975	0,202504	0,9398	0,1816
1+962.50	87,763	0,143591	0,9186	0,2356
2+012.50	84,228	0,174764	0,9349	0,2753
2+062.50	84,247	0,176215	0,9356	0,2759
2+112.50	79,141	0,225242	0,9614	0,2683

$\beta_1, \beta_2$  - coeficientes do modelo, R - coeficiente de correlação,  $\sigma$ - erro quadrático médio

Para o estabelecimento dos modelos de análise, tal como se fez nos demais equipamentos, foram testados diversos tipos de relações, neste caso, entre o Nível da Água na Albufeira (NAA), a Pluviosidade ( $P_N$ ) e o caudal medido em cada poço (Q). Para avaliar uma possível variação no tempo, independente de qualquer uma das variáveis, considerou-se ainda um termo que permitisse avaliar tal tendência.

No que respeita à pluviosidade, o seu efeito deve ser contabilizado de forma a incluir as precipitações de um intervalo de tempo anterior à medição. Com efeito, é razoável admitir que a chuva que tenha caído nos dias anteriores à medição venha a influenciar o valor do caudal. Como não é conhecido o tempo necessário para que se dê a drenagem das águas que são coletadas no poço em análise, foram testados diversos intervalos de tempo de 1 a 7 dias.

Nos ajustes efetuados, muito embora a qualidade geral não seja a ideal (coeficientes de correlação baixos, da ordem de 0,6), é possível verificar que a maior dependência do caudal recolhido no medidor está relacionada com o NAA. A dependência da pluviosidade, embora existente, é fraca e pouco dependente do número de dias considerados na acumulação da pluviosidade. Em todo o caso, o melhor

ajuste corresponde a um período relativamente alargado de dias de precipitação acumulada. Porém, nesse caso, o coeficiente que afeta o termo da pluviosidade é, para a maioria dos poços, negativo e, portanto, desprovido de significado físico. Considerando apenas os valores de  $\beta$  positivos, o melhor ajuste corresponde a cerca de 2 dias de pluviosidade acumulada. No entanto, como se referiu, a variação é insignificante sendo, porventura, inadequado retirar conclusões deste tipo.

Foram consideradas as seguintes equações nos ajustes efetuados (em que os  $\beta_i$  são constantes a determinar, Q o caudal e  $P_N$  a precipitação acumulada em “N” dias - 1 a 7 dias):

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad [13]$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 P_N + \beta_4 N_{AA} \quad [14]$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 N_{AA}^2 + \beta_5 P_N \quad [15]$$

Verificou-se, tal como esperado, que alguns dos valores presentes nos dados usados disponíveis apresentam erros. Em particular, verifica-se que, em leituras consecutivas há variações do caudal da ordem de grandeza da própria leitura, sem que haja razões aparentes para que tal aconteça. Para além deste aspeto, há interrupções nas leituras, em especial quando o NAA está mais elevado, o que se relaciona com o facto de alguns poços ficarem afogados, impossibilitando as medições. Os resultados disponíveis, permitem, todavia, a realização de previsões de comportamento.

A Figura 10 apresenta as medições de caudais correspondentes à cota do NAA de 122,53 m em 8 de Abril de 2008. Alguns dos poços não foram medidos, muito provavelmente por se encontrarem afogados. A soma dos caudais medidos (em parte dos poços) nesta data é de 361 l/s. A previsão do valor do caudal medido no totalizador, de acordo com o modelo estabelecido na secção 3.2.2 é de 424 l/s. Assim, admite-se que nos poços que não foram medidos entre os pk 825 e 1100 pudesse estar a passar um caudal correspondente à diferença, isto é, a 63 l/s. Este valor é compatível com outras datas em que foram efetuadas medições nestes poços, tal como, por exemplo, na data da inspeção do LNEC, em Maio de 2010, onde, no mesmo conjunto de poços (com exceção dos situados aos pk 850, 950 e 1075) se obteve um caudal total de 68 l/s, embora para um NAA um pouco inferior (120,66 m).

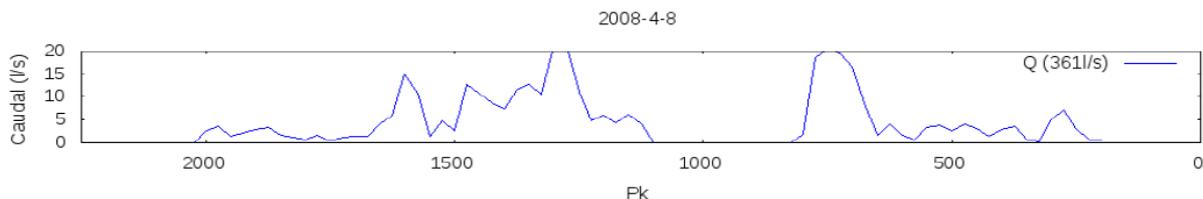


Figura 10 - Caudais medidos nos poços de alívio em 2008.04.08

## 4 - PREVISÃO DE COMPORTAMENTO

### 4.1 - Exploração dos modelos de previsão

Na barragem de Massingir, atendendo ao seu historial, é da maior importância o acompanhamento do comportamento na fundação do dique da MD. Com base nos modelos estabelecidos é possível estimar o comportamento da piezometria naquela zona. Com efeito, admitindo que não se processa uma variação substancial do comportamento da fundação, o que poderá, eventualmente, acontecer para gradientes muito elevados, pode-se prever o funcionamento da fundação.

A Figura 11 ilustra a situação registada para os níveis mais baixos da albufeira, com o NAA à cota 110 m (assinala-se com um traço amarelo, o limite de uma das zonas da fundação tratada com injeções). Embora este modelo se refira à fundação após tratamento (após a reabilitação correspondente aos poços de alívio e colocação da banquetta estabilizadora), é possível verificar que, a limitação inicialmente imposta de não se ultrapassar a cota 110 m, muito provavelmente, conduziria a resultados adequados do ponto de vista da segurança.

Na Figura 12 ilustra-se a previsão para a situação correspondente ao NPA. Verifica-se que, em extensões consideráveis da fundação, ocorrem fenómenos de artesianismo. A pressão mais alta, de 3,7 m acima da fundação, ocorre junto ao Pk 1+862.50, praticamente no limite de uma zona tratada com injeções (Marcelino, J. e Portugal, J, 2010). Apesar de o gradiente médio não ser muito elevado, registando-se na mesma zona um gradiente de cerca de 0,17, é necessário referir que esse gradiente é calculado com base na pressão medida (em média) a 23 m de profundidade. Atendendo à quantidade de zonas húmidas que ocorrem para os níveis mais elevados da albufeira, é de supor que os gradientes sejam substancialmente mais elevados. Tal facto apenas poderia ser confirmado se existissem piezómetros menos profundos.

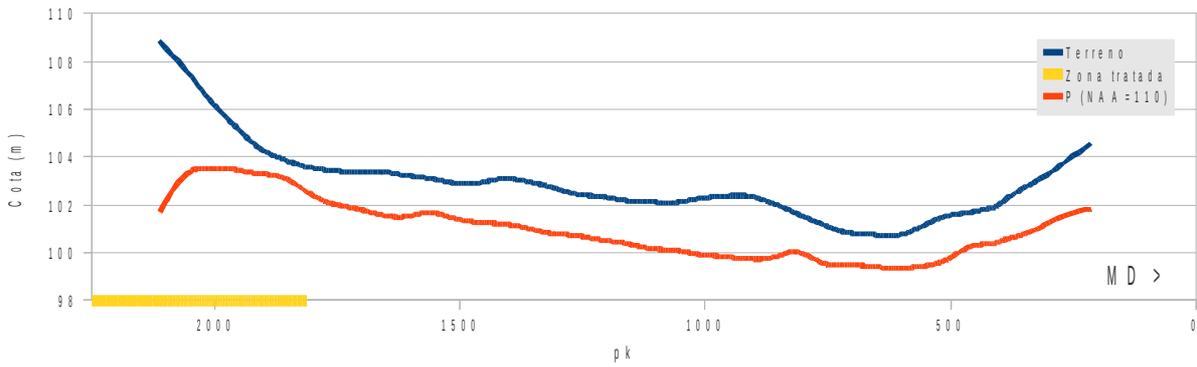


Figura 11 -Previsão das pressões na fundação do dique da MD quando o NAA = 110 m

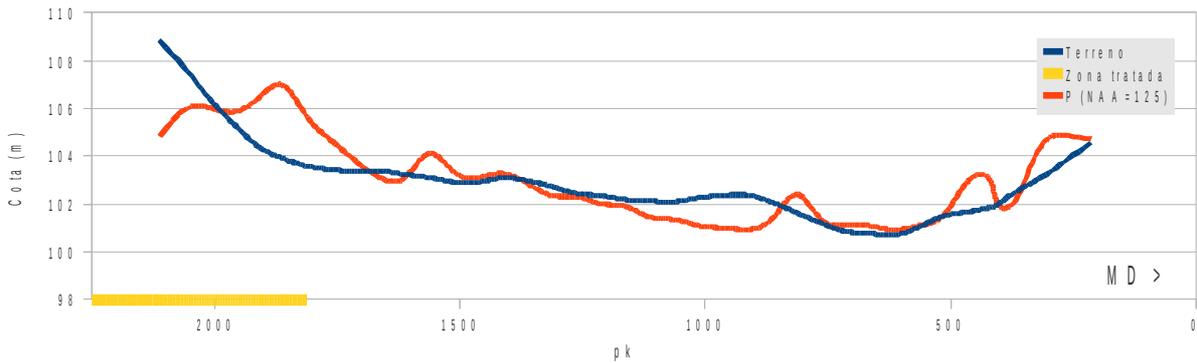


Figura 12 - Previsão das pressões na fundação do dique da MD quando o NAA = NPA = 125 m

Na Figura 13, apresenta-se a estimativa correspondente ao nível de máxima cheia (NMC). Nestas circunstâncias a altura piezométrica máxima é de 4,6 m acima do terreno e o artesianismo ocorre em cerca de 67% dos piezômetros. A Figura 14 procura ilustrar a influência do NAA no número de piezômetros com cotas piezométricas superiores à cota do terreno. Verifica-se, por exemplo, que para o Nível de Pleno Armazenamento, cerca de 50% dos poços apresentarão uma carga superior à cota do terreno.

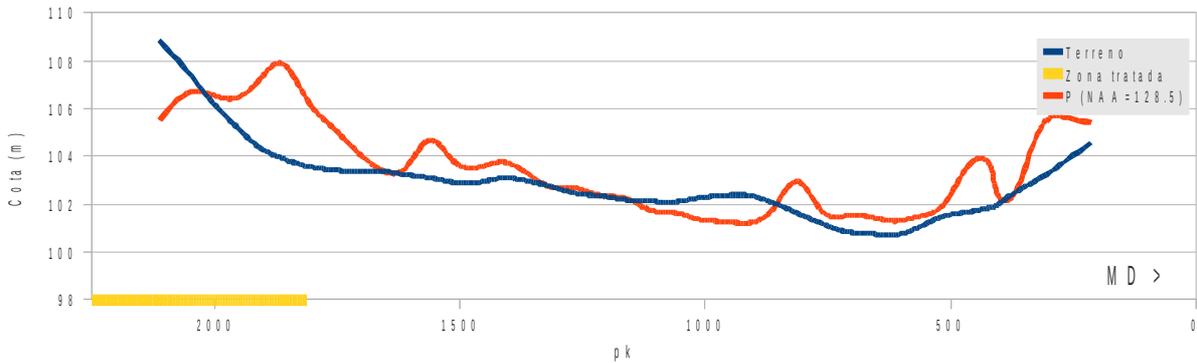


Figura 13 - Previsão das pressões na fundação do dique da MD quando o NAA = NMC = 128,5 m

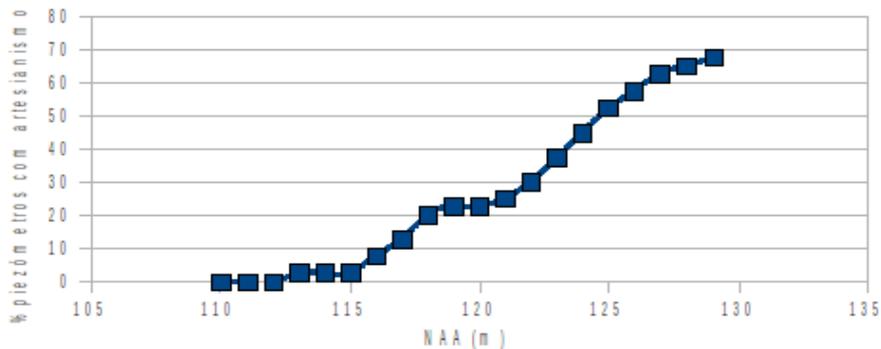


Figura 14 - Percentagem de piezômetros com artesianismo em função do NAA

## 4.2 - Estabelecimento de critérios de atenção e alerta

Após a introdução, no sistema de arquivo de dados, das leituras efectuadas nas campanhas de observação, são, em geral, feitos cálculos sobre esses valores. Normalmente esses cálculos transformam os valores lidos numa grandeza física directamente relacionável com o comportamento da barragem. Noutros casos, a própria leitura já representa a grandeza física pretendida. É exemplo deste último tipo o nível de água na albufeira, quando medido através de escala limnigráfica. Um exemplo da transformação de leituras consiste na conversão da leitura dos piezómetros de tubo aberto em cota piezométrica. Neste tipo de dispositivos a leitura consiste em medir a distância desde a boca do tubo pizométrico até à superfície da água no seu interior. Neste caso, o cálculo consiste em deduzir à cota da boca do tubo piezométrico a distância assim medida, obtendo-se a cota piezométrica.

A validação destes resultados (grandezas físicas) pressupõe a existência de um modelo de interpretação/previsão do comportamento que permita verificar que, em determinada situação, em função das variáveis independentes (tipicamente o nível da albufeira, o tempo e a pluviosidade), é esperado um determinado valor de uma grandeza. Comparando o valor esperado (dado pelo modelo) com o valor medido poder-se-á estabelecer um juízo sobre a resposta da barragem naquele aspecto em particular e, por conseguinte, integrando toda a informação, sobre a sua segurança. Este processo de validação/interpretação é directamente aplicável aos modelos estatísticos apresentados na secção anterior.

Assim, para cada aparelho em que se explicitou uma relação do tipo:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 \psi_1(x_1) + \beta_2 \psi_2(x_2) + \dots + \beta_n \psi_n(x_n) \quad [1-bis]$$

em que,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , são as variáveis independentes, é possível, para cada valor medido, obter um valor estimado pelo modelo. Uma vez que o modelo é apenas aproximado, o erro (E), associado à resposta do modelo, pode ser quantificado pela diferença entre a estimativa e o valor real. Calculando E para todas as medições disponíveis obtém-se a função de erro, que, em regra, terá uma distribuição normal. A função erro representa a variação das observações em torno do modelo estatístico e permite estabelecer os intervalos a que correspondem determinados níveis de confiança.

Na Figura 15 apresenta-se, de forma esquemática, o processo de validação dos resultados da observação, tendo em consideração os modelos de comportamento. Na mesma figura apresentam-se os múltiplos do erro padrão a que correspondem determinados intervalos de confiança.

Atendendo às considerações anteriores é possível estabelecer regras para definir níveis de atenção e alerta para cada aparelho, em função do desvio das leituras em relação aos modelos. No caso dos troços em aterro da barragem de Massingir estabeleceram-se os critérios de atenção e alarme que se resumem no Quadro 2.

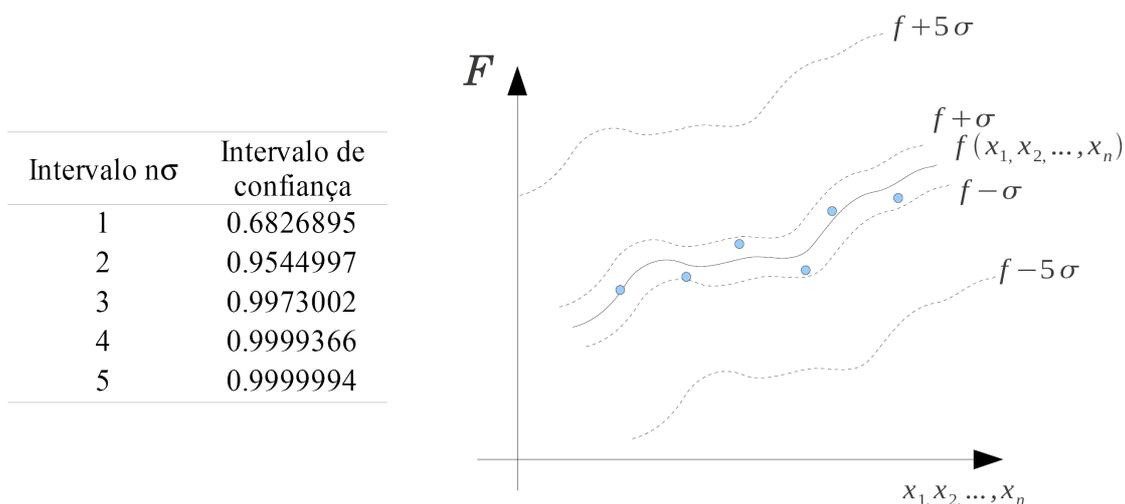


Figura 15 - Intervalos de confiança em torno dos modelos de comportamento

Quadro 2 - Níveis de atenção e alerta em função do desvio aos modelos

Nível	Definição	Descrição	Acção recomendada
Verde	$E \leq 2\sigma$	Comportamento normal: resultados de acordo com o modelo. Cerca de 95% das leituras anteriores enquadram-se neste intervalo.	Nenhuma

Nível	Definição	Descrição	Acção recomendada
Amarelo	$2\sigma \leq E \leq 5\sigma$	Há uma discrepância relevante entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) verificar boletins de registo</li> <li>b) repetir leituras</li> <li>c) verificar historial</li> <li>d) verificar necessidade de recalibração do modelo</li> </ul>
Vermelho	$E > 5\sigma$	Há uma discrepância grosseira entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) verificar boletins de registo</li> <li>b) repetir leituras</li> <li>c) verificar historial</li> <li>d) verificar ocorrências noutros aparelhos</li> <li>e) notificar responsável pela análise de segurança</li> </ul>

## 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos pela observação da barragem de Massingir, muito particularmente aqueles que se referem ao comportamento da fundação do dique da margem direita, parecem indicar que esta zona da barragem não apresenta ainda o comportamento necessário para que se considere a barragem como segura. De facto, existem fortes indícios que o fenómeno de escoamento excessivo pela fundação ainda não se encontra controlado. Por um lado, o tratamento com poços de alívio espaçados de 25 m mostrou-se ineficiente para reduzir de forma eficaz as subpressões a jusante da barragem e, por outro, os caudais elevados recolhidos nos poços de alívio indicam a ocorrência de velocidades de percolação elevadas na fundação. Para níveis mais elevados da albufeira, verifica-se o encharcamento generalizado da fundação a jusante da barragem, sendo esse fenómeno muito marcado em certas zonas na proximidade imediata do pé de talude da barragem.

Tradicionalmente as soluções a considerar para a resolução deste tipo de problemas devem procurar satisfazer dois critérios: a) impermeabilizar a barragem e fundação a montante e b) drenar a jusante, para alívio de pressões. A drenagem a jusante deve ser feita dispondo de elementos filtrantes que controlem (impeçam) o arraste de solos da fundação.

No caso da barragem de Massingir o critério de impermeabilização tem-se mostrado difícil de atingir. Por um lado, a albufeira na zona do dique não é impermeável, facto provavelmente agravado pela eventual exploração de manchas de empréstimo muito próximas da barragem. Por outro, as aluviões da fundação, muito permeáveis (coeficiente de permeabilidade - k da ordem de  $10^{-1}$  cm/s) e heterogéneas, são difíceis de tratar, nomeadamente através de injeções. Os tratamentos parciais deste tipo, tal como foram executados na reabilitação, têm um interesse duvidoso ou limitado, tal como se comprova pela análise dos resultados da observação na proximidade dessas zonas. A existência da cortina (que se destina essencialmente a controlar o caudal) é pouco eficaz no controlo da pressão, o que nesta fundação também é importante, e pode apenas redireccionar o caudal percolado para as zonas não tratadas, como parece estar a acontecer neste caso.

Outro tipo de tratamentos, tais como tapetes impermeabilizantes a montante ou paredes moldadas sob a barragem podem contribuir para a resolução do problema, mas podem também ser pouco eficientes (no primeiro caso) ou muito onerosas (no segundo caso), mas ambas de execução complexa.

Uma vez que a quantidade de caudal percolada pela fundação não é especialmente problemática, por exemplo, 500 l/s correspondem apenas a 0,6% do volume da albufeira num ano e podem ser considerados como parte do caudal ecológico, a solução provavelmente mais económica consiste em garantir que esse caudal é libertado em condições de segurança. Isso corresponde, por um lado a minimizar as velocidades de percolação e, por outro, a filtrar a zona de saída do caudal, garantindo que qualquer possível fenómeno de arraste de materiais da fundação fica contido por um órgão filtrante.

Assim, considera-se que a execução de poços de drenagem adicionais, tal como previsto no projecto de reabilitação, pode não só ser pouco eficiente, como agravar o funcionamento da fundação. De facto, a execução de mais poços de alívio, ao facilitar ainda mais o escoamento, irá aumentar as velocidades de escoamento na fundação e, conseqüentemente, o seu potencial erosivo. Pelo contrário, a execução de um tapete a jusante, munido de um filtro invertido, para além de muito provavelmente menos oneroso, permite criar condições para que, desse ponto de vista, a barragem possa ser considerada como segura.

Atendendo às pressões acusadas pela piezometria existente a jusante da barragem, pode-se antever que o tapete de jusante deva ter uma altura de 5,0 m, valor suficiente para que, numa situação de máxima cheia, na zona mais desfavorável, a pressão na fundação nunca exceda a cota do terreno (com a banquetta). Naturalmente que este valor é meramente indicativo e que, análises mais detalhadas devem

ser conduzidas por forma a, por um lado, otimizar a espessura do tapete e, por outro, garantir que este valor é suficiente.

Relativamente à extensão do tapete, a mesma deve ser estabelecida por forma a interessar toda a extensão húmida da fundação a jusante, para as condições de NAA mais elevado.

Na Figura 16 esquematiza-se a solução indicada. A extensão do tapete deverá ser estabelecida, como se disse, em função da área a proteger. A vala de drenagem existente pode ser substituída por uma conduta de diâmetro adequado ou por um dreno devidamente protegido por filtros e os poços existentes devem ser alteados por forma a permitir o acesso ao seu interior para a realização de medições.

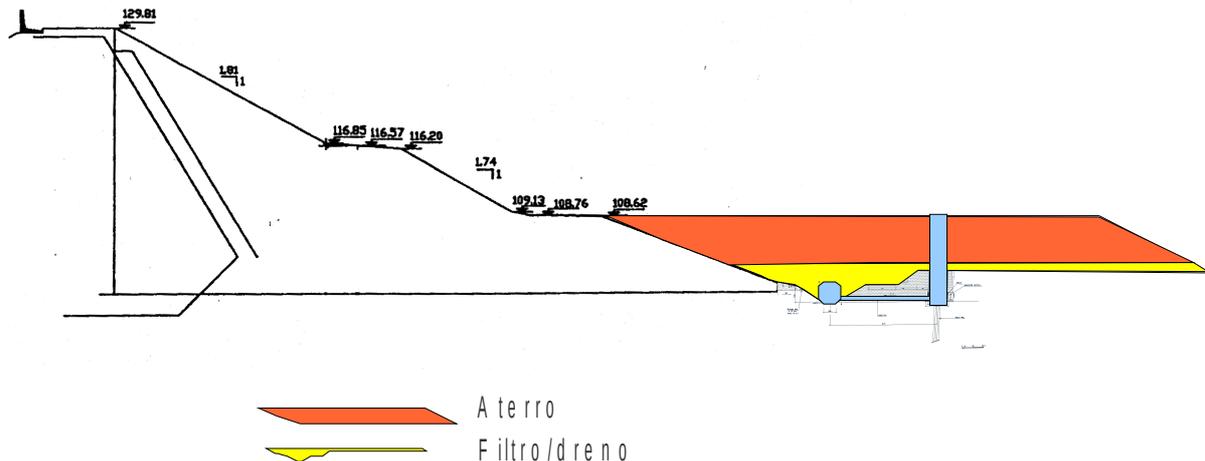


Figura 16 - Solução de estabilização possível para o dique da margem direita da barragem de Massingir

## REFERÊNCIAS

Coba (1969) - Projecto de Massingir. Ministério do Ultramar. Vols. 1 a 5.

Coyne et Bellier (2007) - Manual de operação e controle dos instrumentos de auscultação. Relatório No. 10109RP36-C; 2007.

Marcelino Silva J., Portugal, J. C. e Sousa, O. (2011) - Inspeção de segurança às barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia; 2011.