

# MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO DA BARRAGEM DE MASSINGIR

João Marcelino Silva <sup>\*1</sup>, João Candeias Portugal <sup>1</sup>, Olinda Sousa<sup>2</sup>, Oscar Sibia <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia - Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul) - Maputo, Moçambique,

\*Email: [marcelino@lnec.pt](mailto:marcelino@lnec.pt)

**RESUMO:** A barragem de Massingir é constituída por um aterro zonado que dispõe de um sistema de observação em exploração há cerca de 30 anos. Os dispositivos desse sistema permitem medir as seguintes grandezas: nível de água na albufeira, deslocamentos superficiais, caudais de infiltração, níveis piezométricos no interior do aterro e fundação e precipitação atmosférica. No artigo, após a apresentação e validação dos resultados do sistema de observação, que serviram de base à modelação matemática do comportamento da obra, descreve-se a aplicação de modelos estatísticos a esses resultados. Os modelos obtidos são depois explorados para prever o comportamento da obra em diversos cenários e para estabelecer critérios de atenção e alerta a adoptar na exploração futura. Apresenta-se ainda a revisão do sistema de observação instalado. Para isso usa-se a regulamentação portuguesa, baseada na quantificação dos factores de risco da barragem e tendo em consideração o comportamento observado até ao momento.

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo é motivado por um contrato celebrado entre a Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul) de Moçambique e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal para a avaliação da segurança das Barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane. Nesse âmbito, formulou-se um plano de trabalhos abrangente, em que foram realizados, entre outros e para cada uma das obras, os seguintes trabalhos: i) consulta da documentação existente sobre o projecto e relatórios de comportamento; ii) inspecções visuais de especialidade; iii) realização de campanhas de leitura dos dispositivos de observação e diagnóstico do respectivo estado de operacionalidade; iv) verificação dos procedimentos de leitura, validação e armazenamento de dados; v) revisão dos planos de observação das obras; vi) estabelecimento de modelos de análise dos resultados da observação e, vii) elaboração de manuais de procedimentos básicos para a supervisão, controle e o acompanhamento do comportamento das barragens, tendo por base os resultados da observação. As actividades acima indicadas foram realizadas para as 4 barragens, tendo a visita de inspecção à barragem de Massingir decorrido em Abril de 2010.

Neste artigo é apresentada uma síntese do trabalho desenvolvido. Assim, na secção 2 apresenta-se uma breve descrição da obra, bem como as suas características gerais, tal como foi possível inferir dos documentos consultados e da visita de inspecção efectuada. A secção 3 refere-se à revisão do sistema de observação da barragem. É feita uma avaliação do sistema de observação pela aplicação das recomendações da ICOLD (tal como se encontram expressas na regulamentação portuguesa), em comparação com as grandezas actualmente em observação. Na secção 4 faz-se a análise à funcionalidade do sistema de observação instalado. De seguida (secção 5) procede-se ao estabelecimento dos modelos de análise do comportamento da obra, tendo por base a metodologia descrita no artigo que lhe é dedicado, também publicado nos anais deste Congresso (Marcelino, *et al*, 2011).

Desde o início da exploração, a barragem de Massingir exibiu problemas graves que condicionaram profundamente a sua exploração e obrigaram à realização de importantes obras de reabilitação que incluíram, entre outras, a construção de uma banquetta estabilizadora ao longo do dique da Margem Direita, a instalação de poços de alívio a jusante da mesma zona, a execução de cortinas parciais de injeções na fundação, a montagem das 6 comportas do descarregador de cheias e o alteamento do coroamento, entre outras obras de reabilitação.

Não obstante as obras realizadas, a prestação da barragem não pode ainda ser considerada como satisfatória, e, em Maio de 2005, ocorreu um importante acidente nas descargas de fundo, condicionando uma vez mais, a normal exploração da obra.

Estando prevista, a curto prazo, uma intervenção no sentido de reparar os danos derivados do acidente recente, e no sentido de avaliar o comportamento da barragem para níveis da albufeira mais altos do que os actuais, que derivam de uma exploração condicionada, na secção 6, aplicam-se os modelos desenvolvidos para extrapolar o comportamento observado para diversas situações do Nível de Água na Albufeira,, designadamente na situação de Pleno Armazenamento (NAA = NPA).

## 2. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

O aproveitamento de Massingir consta de uma barragem de terra, barrando o leito maior do rio e dois terraços, 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 e de duas condutas de descarga de fundo, órgãos estes que se situam e desenvolvem na margem direita (Figs. 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 Projecto (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.

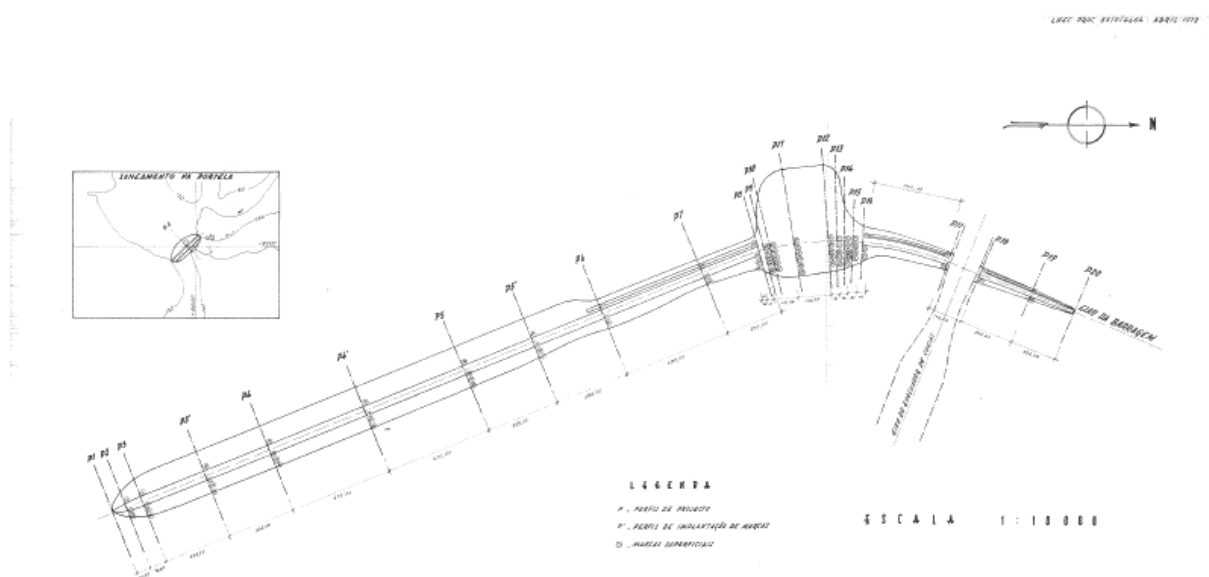


Fig 1. Planta da barragem de Massingir

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. 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 lentículas 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.



Fig 2. Vista de montante 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, respectivamente.

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 (Fig. 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 argilo-siltosos. 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 banquetta 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 fracturada. É um perfil semelhante ao perfil B, diferindo deste, fundamentalmente, pela não existência, nem da banquetta 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.

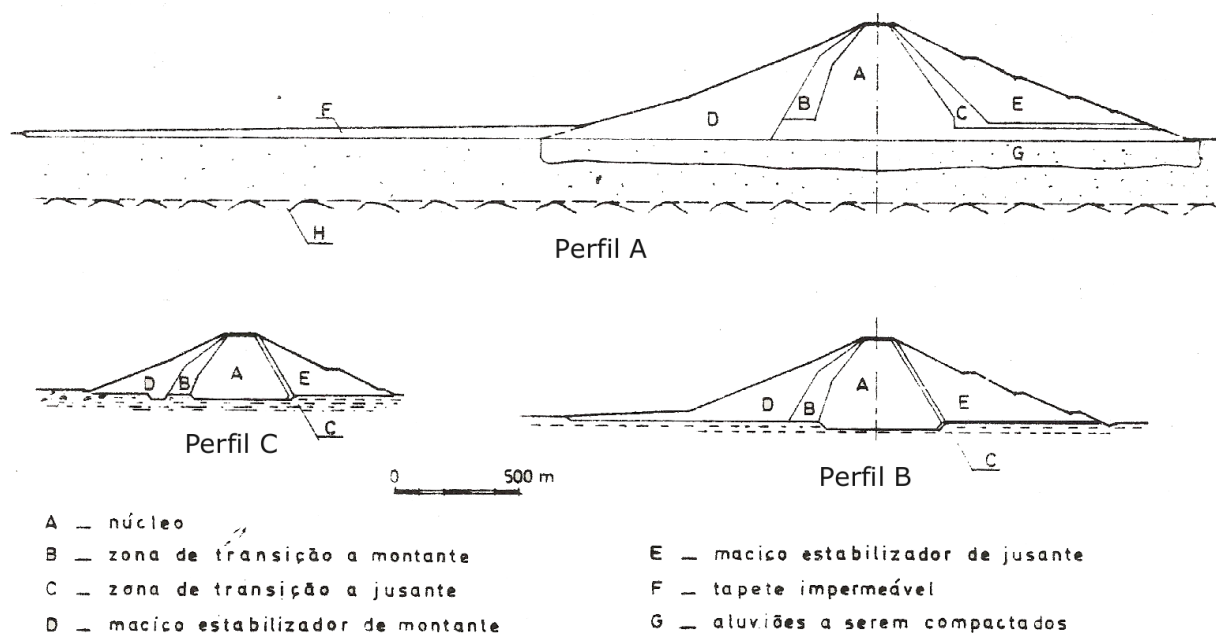


Fig 3. Perfis transversais-tipo dos trechos em aterro da barragem (Coba, 1969)





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

Na sequência do primeiro enchimento da barragem, foram detectadas 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, tendo-se, conseqüentemente, limitado a exploração da albufeira. Em resultado dessa situação, 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.

Assim, 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. 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.

De Abril de 2004 a Dezembro 2006 a barragem de Massingir foi alvo de diversas obras de reabilitação, baseadas num projecto 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 (Figs. 5 e 6); iii) construção de um elevado número 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).

As Figs. 5 e 6 ilustram a geometria da banquetta estabilizadora adoptada em duas zonas distintas (representadas pelas secções aos pk 700 e 2000). A solução adoptada consiste na estabilização mecânica do pé de talude e, simultaneamente, na colocação de uma zona de filtro/dreno na tentativa de estabilização hidráulica, procurando-se captar os caudais afluentes da fundação que, originalmente, causavam o surgimento de ressurgências de grande produção, com arrastamento de finos. A jusante da banquetta encontram-se instalados diversos poços de alívio, com espaçamentos médios de 25 m e profundidades variáveis entre 11 e 36 m.

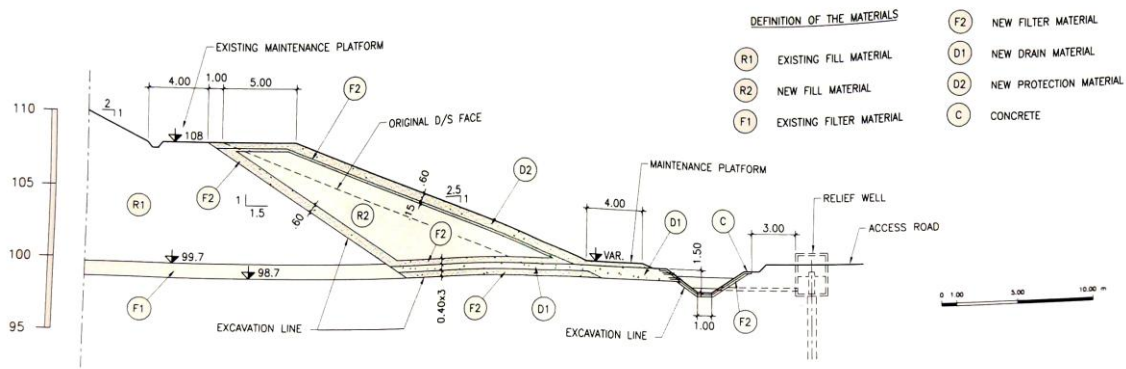


Fig 5. Geometria da banqueta estabilizadora no pk 700

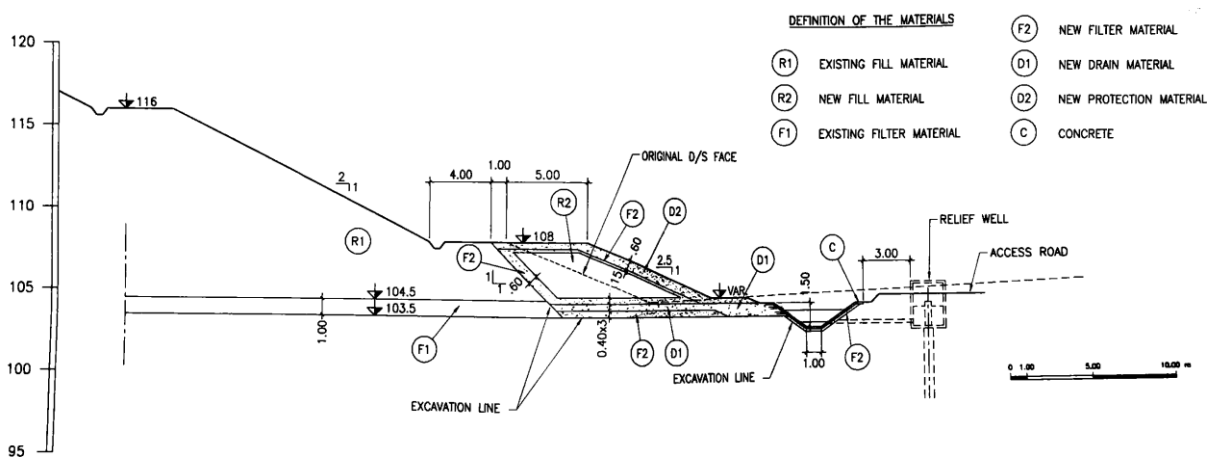


Fig 6. Geometria da banqueta estabilizadora no pk 2000

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).

O enchimento foi no entanto interrompido pelo acidente que ocorreu nas descargas de fundo em 22 de Maio de 2008, quando o NAA se encontrava à cota 122,6 m. 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.

### 3. REVISÃO DO SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

#### 3.1. Quantificação dos factores de risco

A fim de facilitar o dimensionamento de um sistema de observação, as Normas de Observação e Inspeção de Barragens - NOIB (1993) propõem uma abordagem sistematizada para a quantificação dos aspectos que permitem avaliar o risco associado à barragem. De acordo com as mesmas normas, o tipo de grandezas a observar, bem como a frequência das inspeções visuais e das campanhas de observação, é função das condições de risco associadas a cada barragem.

Para a avaliação da adequação do sistema de observação da barragem de Massingir, procedeu-se à aplicação da referida metodologia, através da determinação do índice global de risco. De acordo com as NOIB, para quantificar o índice global de risco ( $\alpha_g$ ) é necessário determinar diversos índices parciais ( $\alpha_i$ ). Tal pode ser feito recorrendo ao Quadro I das referidas normas e às características da obra. O quadro referido divide a quantificação do risco em três grupos de descritores: factores exteriores ou ambientais; fiabilidade da obra; factores humanos e económicos.

Assim, atentos os elementos de informação disponíveis sobre as características da obra foram definidos os índices parciais de risco ( $\alpha_i$ ) necessários à quantificação do índice global de risco  $\alpha_g$ , devidamente assinalados a sombreado no Quadro 1.

A adopção dos índices ( $\alpha_i$ ) associados a cada um dos descritores é justificada de seguida:

**Factores exteriores ou ambientais (E=2,6):**

$\alpha_1 = 3$  – aceleração sísmica máxima de projecto de 0,142 g (período de retorno omissos no Projecto);

$\alpha_2 = 1$  – probabilidade mínima ou nula de escorregamento dos taludes nas encostas das margens da albufeira;

$\alpha_3 = 6$  – elevada probabilidade de cheias superiores à de projecto (atendendo à revisão recente dos estudos hidrológicos iniciais);

$\alpha_4 = 1$  – gestão anual ou sazonal da albufeira;

$\alpha_5 = 2$  – fracas acções agressivas (clima, água, etc.).

**Fiabilidade da obra (F=4,25):**

$\alpha_6 = 3$  – dimensionamento estrutural aceitável (ponderada a necessidade de obras de reabilitação);

$\alpha_7 = 5$  – condições de fundação medíocres;

$\alpha_8 = 6$  – órgãos de descarga insuficientes (o descarregador de cheias não tem capacidade de vazão suficiente – atentas as conclusões dos estudos hidrológicos mais recentes - e as descargas de fundo encontram-se com a sua funcionalidade prejudicada, devido ao acidente ocorrido 2005);

$\alpha_9 = 3$  – manutenção da obra satisfatória.

**Factores humanos e económicos (R=5,0):**

$\alpha_{10} = 5$  – volume da albufeira de  $2\,570 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;

$\alpha_{11} = 5$  – ocupação dos terrenos a jusante da barragem com diversos aglomerados populacionais, entre os quais a cidade de Chokoé, pequenas indústrias e explorações agrícolas.

O valor assim determinado para o índice global de risco da barragem ( $\alpha_g = E \times F \times R$ ) é de 55,25.

Quadro 1 – Factores de apreciação das condições de risco da barragem da Corumana (NOIB)

	ASSOCIADOS A FACTORES EXTERIORES OU AMBIENTAIS (E)					ASSOCIADOS BARRAGEM - FIABILIDADE (F)				ASSOCIADOS A FACTORES HUMANOS E ECONÓMICOS (R)	
	Sismicidade (período de retorno de 1 000 anos)	Escorregamento taludes (probabilidade)	Cheias superiores a projecto (probabilidade)	Gestão da albufeira	Acções agressivas (Clima, água, etc)	Dimensio- namento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Manutenção	Volume da albufeira (m <sup>3</sup> )	Instalações a jusante
$\alpha_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\alpha=1$	Mínima ou nula a < 0,05g	Minima ou nula	Muito baixa (barragens e betão)	Plurianual, anual ou sazonal	Mínimas	Adequado	Muito boas	Fiáveis	Muito boa	< 10 <sup>5</sup>	Zona não habitada sem valor económico
$\alpha=2$	Baixa 0,05 g < a < 0,1 g	Baixa	---	---	Fracas	---	Boas	---	Boa	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>	Áreas isoladas, agricultura
$\alpha=3$	Média 0,1 g < a < 0,2 g	---	Muito baixa (barragens de aterro)	Semanal	Médias	Aceitável	Aceitáveis	---	Satisfatória	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>	Pequenos aglomerados populacionais, agricultura, indústria artesanal
$\alpha=4$	Forte 0,2 g < a < 0,4 g	---	---	Diária	Fortes	---	---	---	---	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup>	Agglomerados populacio- nais médios, pequenas indústrias
$\alpha=5$	a > 0,4 g	---	---	Bombagem	Muito fortes	---	Medíocres	---	---	> 10 <sup>9</sup>	Grandes aglomerados populacionais, indústrias, instalações nucleares
$\alpha=6$ (a)	---	Grande	Elevada	---	---	Inadequado	Medíocres a más	Insuficientes não operacionais	Insatisfatórias	---	



### 3.2. Grandezas a observar

As NOIB definem as grandezas a observar em função da altura do aterro da barragem, dos valores dos índices global de risco  $\alpha_g$  e parcial  $\alpha_1$  (sismicidade), e do descritor associado aos factores humanos e económicos (R), tal como se apresenta no Quadro 2, onde se encontram assinaladas a sombreado as grandezas a observar na barragem de Massingir (mínimo recomendável).

Para uma altura da barragem de 47 m,  $\alpha_g=55,25$  e  $R=5,0$  a barragem deverá ser munida com dispositivos que permitam medir as seguintes grandezas: i) nível de água na albufeira (NAA); ii) deslocamentos superficiais; iii) deslocamentos internos; iv) caudais de infiltração total e parciais; v) níveis piezométricos utilizando piezómetros com fluxo e; vi) precipitação atmosférica.

Quadro 2 – Grandezas mínimas obrigatórias a observar em barragens de aterro (NOIB)

Altura da barragem (m)	Deslocamentos		Tensões Totais	Caudal de infiltração	Pressões intersticiais		Precipitação atmosférica	Sismologia
	Superficiais	Internos			Piezómetro	Piezómetro sem fluxo		
< 15	x se $\alpha_g > 15$ ou $R > 3$	-	-	x Caudal Total se $\alpha_g > 10$ ou $R \geq 3$	x se $\alpha_g > 10$ ou $R \geq 3$	-	-	x se $\alpha_g > 9$ com $\alpha_1 = 5$
15 a 30	x se $\alpha_g > 10$ ou $R \geq 3$	x se $\alpha_g > 20$	-	x Caudal Total	x	x se $\alpha_1 = 5$	(x)	x se $\alpha_1 = 5$
30 a 50	x	x se $\alpha_g > 10$ ou $R > 3$	(x)	x Caudal Parcial se $R \geq 3$	x	x se $\alpha_1 \geq 4$	x Se $R \geq 3$	x se $\alpha_1 \geq 4$
50 a 100	x	x	x	x Caudal Parcial	x	x	x	x se $\alpha_1 \geq 3$
> 100	x	x	x	x Caudal Parcial	x	x	x	x

x - Dispositivo obrigatório

(x) – Dispositivo opcional

A barragem de Massingir encontra-se em exploração há cerca de 35 anos tendo exibido, como se referiu, comportamentos que indiciam fenómenos lesivos da sua segurança. Por outro lado, tem um registo razoavelmente organizado dos resultados de alguns dos dispositivos de observação instalados, o que, como se verá adiante, permite aferir o seu comportamento com base em observação instrumental. De acordo com os registos existentes, quer os resultados da inspeção visual, quer os resultados da observação instrumental passada concorrem de forma coerente para a existência de comportamentos anómalos durante o período de exploração..

Para conseguir estabelecer um juízo de valor sobre a adequação do sistema de observação da barragem, deve-se atender aos cenários de acidente e às patologias mais frequentes em barragens deste tipo e, em especial, com idades semelhantes.

De acordo com Foster et al. (2000), praticamente metade dos acidentes em barragens de aterro em operação (48,7%), ficam a dever-se a problemas de escoamento excessivo e/ou piping no aterro ou fundação. Outra grande parcela dos acidentes (34,2%) fica a dever-se ao galgamento do aterro. Do exposto resulta que a monitorização de grandezas que permitam aferir qualquer um destes fenómenos é da maior importância para barragens deste tipo, incluindo esta. No que respeita aos fenómenos de escoamento excessivo e de piping, a sua detecção, quando

possível, é feita, quer de forma directa, através da medição de caudais, quer de forma indirecta, pelas variações anormais nas pressões intersticiais ou pela manifestação de deformações que possam indiciar arrastamento de material de aterro ou da fundação.

Os cenários de deformação excessiva, que não sejam provocados por fenómenos de arrastamento de materiais, são normalmente devidos, neste tipo de barragens, à consolidação ou à fluência. Neste caso, atendendo à idade da barragem, quer os fenómenos de consolidação, quer de fluência deverão apresentar, nas condições actuais, uma expressão muito reduzida.

No que respeita à possibilidade de galgamento, tal pode acontecer, quer pela perda de folga da barragem, por exemplo, devido a deformações excessivas ou fluência, quer pela acção de sismos. Outras possibilidades são as de ocorrência de cheias superiores às de projecto ou ainda por deficiências ou obstrução nos órgãos de descarga, todas pertinentes no caso em apreço.

Tendo em atenção as considerações anteriores no que respeita à idade da barragem e aos cenários de deterioração e acidente e procurando-se otimizar a recolha de informação pertinente para a avaliação da segurança, para a barragem de Massingir, considera-se adequada a medição das grandezas preconizadas nas NOIB, anteriormente referidas.

## **4. ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE DO SISTEMA DE OBSERVAÇÃO**

### **4.1. Descrição do sistema de observação**

O sistema de observação actualmente 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) de caudais percolados recorrendo a câmaras de medição de caudais (CQ).

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

Atenta a constituição do sistema de observação inicial, conclui-se pela sua adequação às características próprias da obra e respectivo risco potencial, sem lacunas relativamente às grandezas cuja medição se referiu como necessária na secção 3.

No entanto, considera-se que, quer a quantidade, quer a operacionalidade quer ainda a disposição dos dispositivos ao longo da barragem revelam algumas fragilidades .

O sistema de medição de movimentos superficiais dos aterros e descarregador, constituído por 17 marcas superficiais e respectivos pontos de referência encontra-se inoperacional, não se procedendo a leituras.

Os piezómetros de tubo aberto, 20 no total, estão distribuídos por 8 perfis de observação, 6 no dique da margem direita e 2 na barragem principal. Alguns destes dispositivos foram instalados após a construção (2005).

Em 2005 foram instaladas 18 células eléctricas 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.

O medidor 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, respectivamente, no descarregador de cheias e na torre de manobra da tomada de água e descarga de fundo.

#### 4.2. Análise da variação do NAA e volume armazenado

O resumo das variações registadas no Nível de Água na Albufeira de Massingir, desde 2003, está ilustrado no Quadro 3. A representação dos valores diários do NAA e respectivas variações no período de 2003 a Janeiro de 2010, encontra-se na Fig. 7. Verifica-se que o enchimento se iniciou no final de 2005, tendo-se atingido a cota 114,57 m no primeiro trimestre de 2006. Nesse período (primeiro trimestre de 2006), a variação do NAA atingiu um máximo diário de + 1,67 m, sendo o valor médio da subida de 0,21 m/dia. A época de chuvas de 2006/2007 não produziu, na albufeira de Massingir, variações significativas do NAA. No final de 2007 e início de 2008, ocorre nova subida do NAA em resultado da época de chuvas. A subida máxima diária é de 1,0 m/dia e, em média a cota da albufeira sobe 0,10 m/dia.

Quadro 3 – Resumo das cotas, variações do NAA e volumes armazenados na albufeira

Ano	Cota máxima (m)	Cota mínima (m)	Variação máxima (m)	Variação + (m/dia)	Variação - (m/dia)	Início ano (m)	Fim ano (m)	Variação no ano (m)	Volume início (Mm3)	Volume fim (Mm3)	Var. volume (Mm3)	Nº leituras anuais	Intervalo médio (dias)	Observações
2003	100.84	99.3	1.54	0.15	-0.05	100.84	99.43	-1.41	229.22	174.14	-55.09		1	início em Out.
2004	114.99	99.46	15.53	1.90	-0.21	99.46	106.74	7.28	175.20	600.00	424.80	366	1	
2005	106.65	93.15	13.5	0.25	-0.15	106.71	95.98	-10.73	597.48	79.88	-517.61	365	1	
2006	114.75	96	18.75	1.67	-0.18	96	111.88	15.88	80.28	1101.89	1021.61	365	1	
2007	112.31	106.82	5.49	1.52	-0.07	111.96	111.69	-0.27	1110.68	1081.12	-29.56	365	1	
2008	122.82	111.73	11.09	1	-1.31	111.73	115.88	4.15	1085.48	1571.72	486.24	366	1	
2009	119.85	115.69	4.16	0.62	-0.14	115.97	118.09	2.12	1582.96	1855.44	272.49	365	1	
2010	119.9	118.12	1.78	0.24	0	118.12	119.9	1.78	1859.40	2099.28	239.88	32	11	Até Janeiro
Máximo	122.82	118.12	18.75	1.90	0	118.12	119.9	15.88	1859.40	2099.28	1021.61			
Mínimo	100.84	93.15	1.54	0.15	-1.31	96	95.98	-10.73	80.28	79.88	-517.61			

Da análise dos valores apresentados, verifica-se que, por vezes, ocorrem variações significativas do nível de água na albufeira de Massingir. Esses casos, embora bem ilustrados na Fig. 7, representam, na verdade, uma pequena parcela dos valores diários. A maioria, cerca de 72% corresponde a variações entre -0,4m/dia e 0 m/dia. Outra parcela com alguma relevância (27%) corresponde a valores entre 0 e +0,4 m/dia. Todos estes valores e outros relacionados com a exploração da albufeira encontram-se resumidos no Quadro 3.

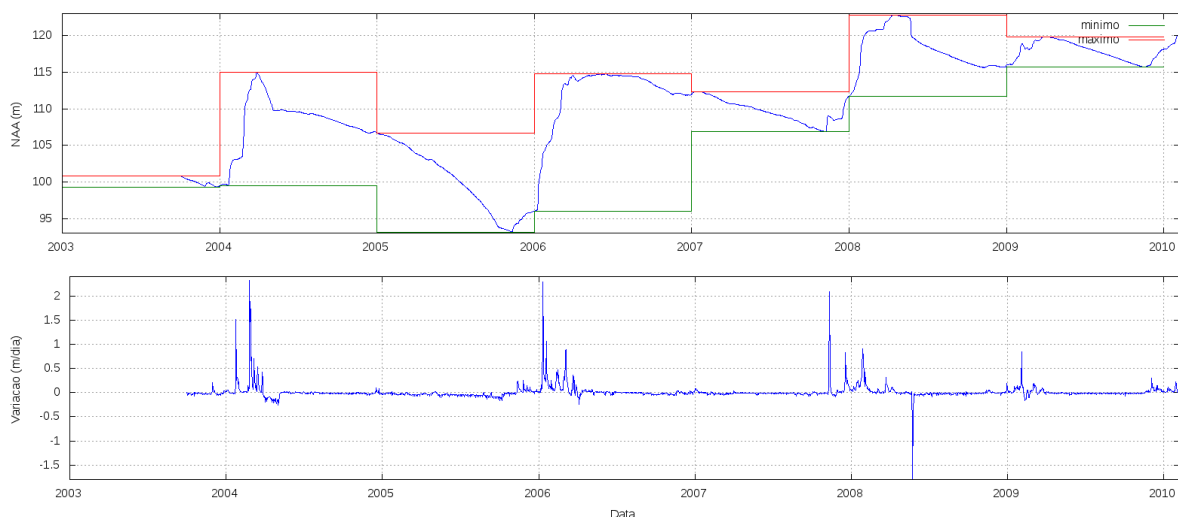


Fig 7. Variação do NAA desde Outubro de 2003 a Janeiro de 2010

## 5. MODELOS DE COMPORTAMENTO

### 5.1. 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 efectuados (em que os  $\beta_i$  são constantes a determinar,  $P$  a pressão e  $N_{\text{dias}}$  o número de dias que decorreram desde uma data arbitrária (no caso considerou-se o início das observações):

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad (1)$$

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{\text{dias}} + \beta_3 N_{AA} \quad (2)$$

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{\text{dias}} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 N_{AA}^2 \quad (3)$$

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 (1) é suficiente para aproximar com fiabilidade as pressões lidas. Apesar disso foram testadas também as outras relações. Na Fig. 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.

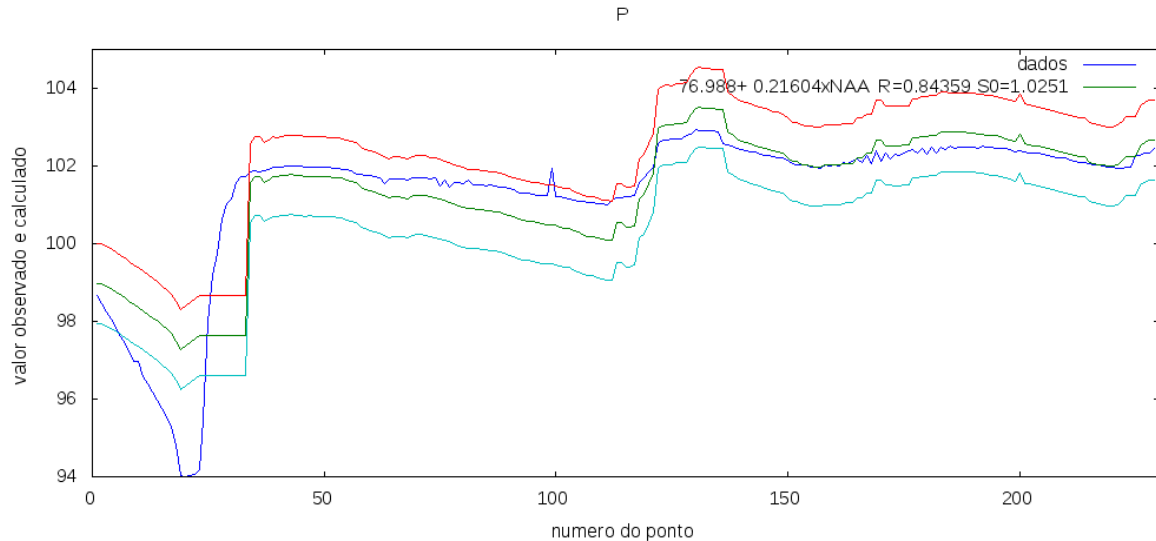


Fig 8. Exemplo de regressão linear entre o NAA e a pressão piezométrica (Piezômetro 30-1, Pk 1+562.50)

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 Figs. 8 e 9, respectivamente.

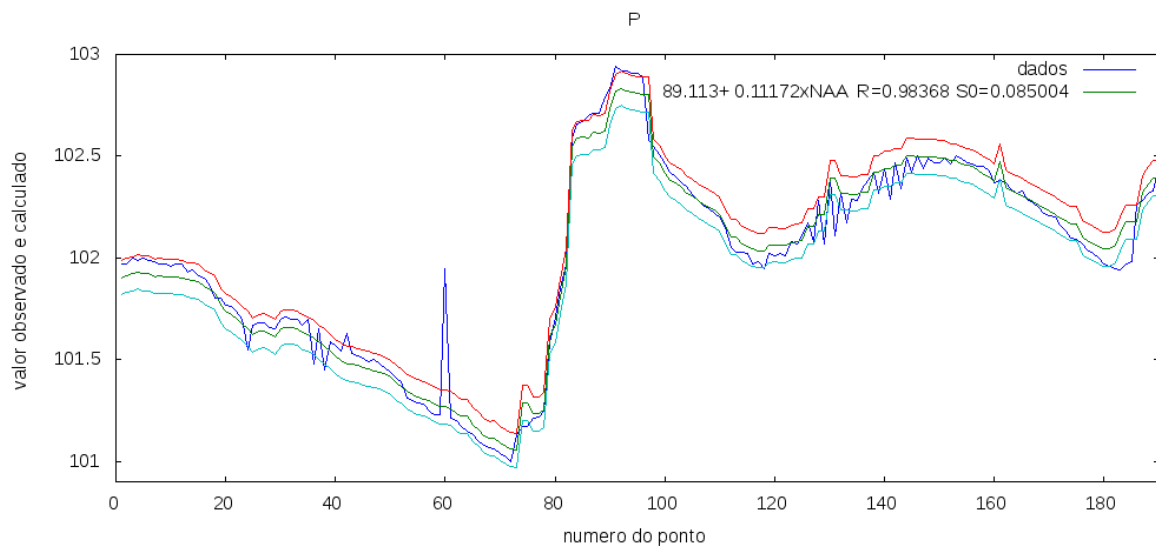


Fig 9. Exemplo de regressão linear entre o NAA e a pressão piezométrica, excluindo as leituras iniciais (Piezômetro 30-1, Pk 1+562.50)

No Quadro 4 resumem-se os parâmetros obtidos para a relação linear (1) para todos os piezômetros da vala de drenagem. É interessante notar que, com exceção dos piezômetros 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.

Quadro 4 – Parâmetros de ajuste dos piezômetros da vala drenante para a expressão (1)

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	0,12	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

## 5.2. Caudais nos poços de alívio

Intercalados com os piezômetros, 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 piezômetros, 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.

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 colectadas no poço em análise, foram testados diversos intervalos de tempo de 1 a 7 dias.

Nos ajustes efectuados, 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 afecta 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 efectuados (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):

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad (4)$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{\text{dias}} + \beta_3 P_N + \beta_4 N_{AA} \quad (5)$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{\text{dias}} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 N_{AA}^2 + \beta_5 P_N \quad (6)$$

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 aspecto, 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, permitem, todavia, a realização de previsões de comportamento.

A Fig. 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 em §5.3 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 efectuadas medições nestes poços, tal como, por exemplo, na data da inspecção do LNEC, em Maio de 2010, onde, no mesmo conjunto de poços (com excepção 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).

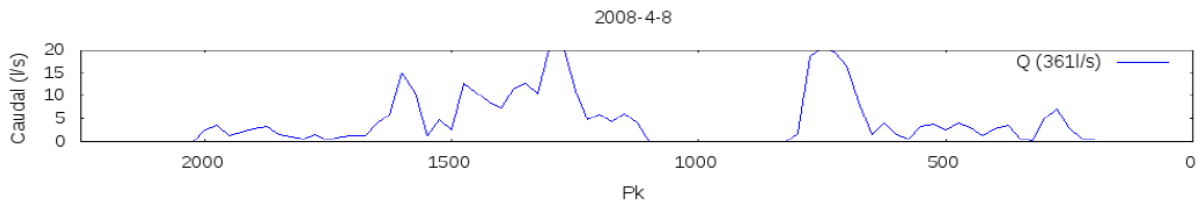


Fig 10. Caudais medidos nos poços de alívio em 2008.04.08

### 5.3. Caudal total

Os caudais captados pelos diversos poços instalados a jusante da barragem 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. Por vezes, os habitantes das imediações da barragem procediam à captação de água na zona, à lavagem de roupa ou simplesmente aproveitavam a água para recreio. Assim, é possível que algumas leituras possam estar afectadas de algum erro. Estas situações já foram corrigidas sendo raro a ocorrência destas situações.

Na Fig. 11 apresenta-se o ajuste efectuado para o medidor-totalizador dos caudais recolhidos ao longo da vala drenante. Foram testadas duas relações, expressas por:

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad (7)$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{\text{dias}} + \beta_3 N_{AA} \quad (8)$$

Verifica-se que a dependência do caudal relativamente ao nível de água na albufeira (4) 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:

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

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

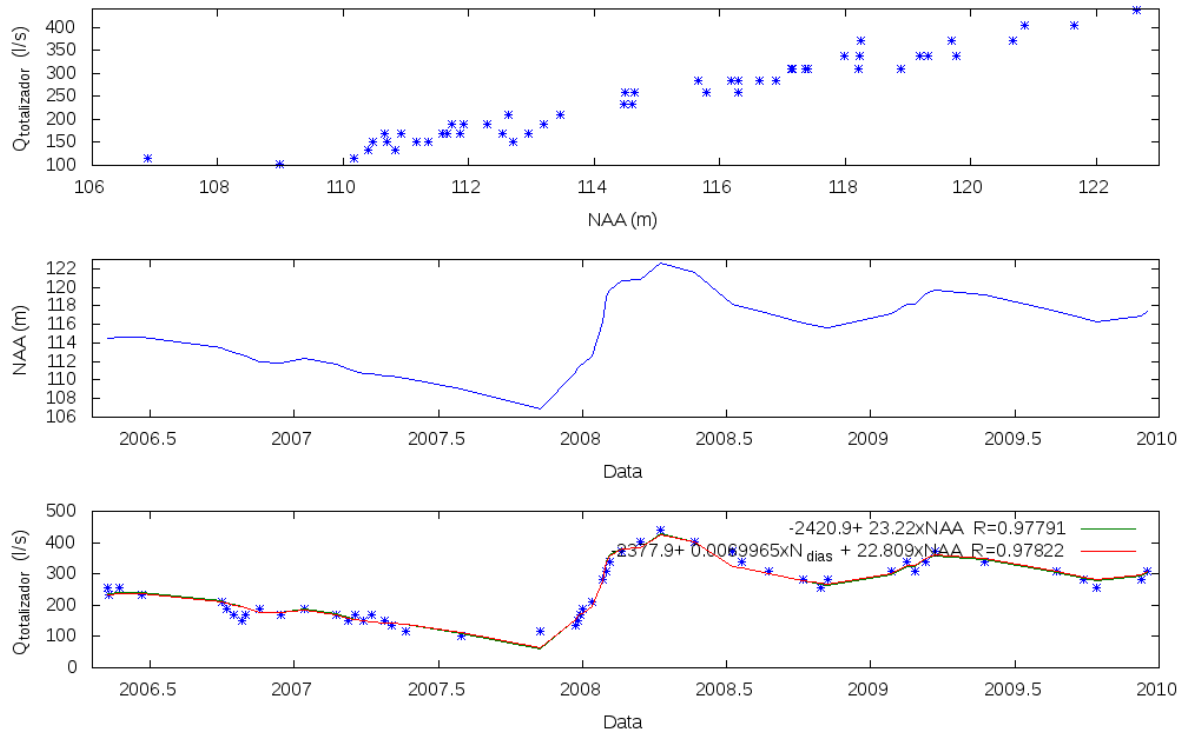


Fig 11. Diagrama de ajuste da expressão (4) aos caudais do totalizador

## 6. PREVISÃO DE COMPORTAMENTO DA OBRA

### 6.1. Exploração dos modelos de previsão

Com base nos modelos estabelecidos é possível estimar o comportamento da piezometria na zona do pé de talude do dique da MD. 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 Fig. 12 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 injecções). 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 equivalentes. Nestes condições está garantida a segurança da barragem.

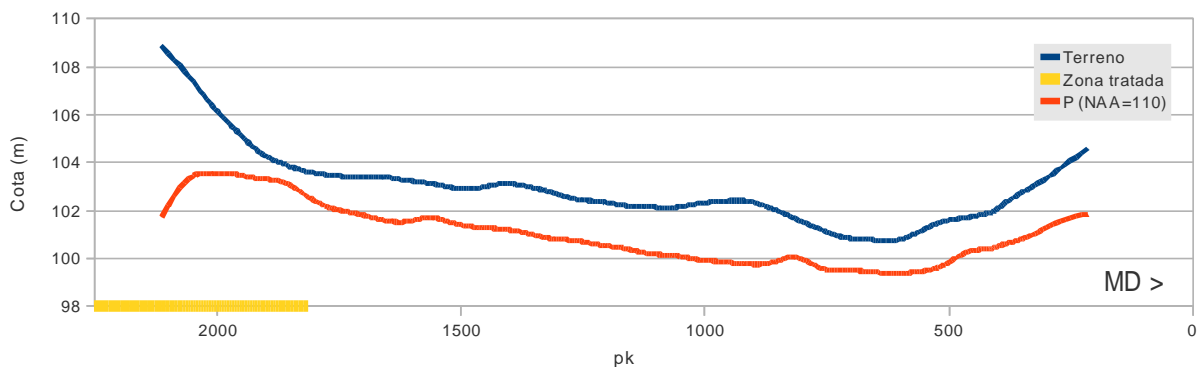


Fig 12. Previsão das pressões na fundação do dique da MD quando o NAA = 110 m

Na Fig. 13 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. 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.

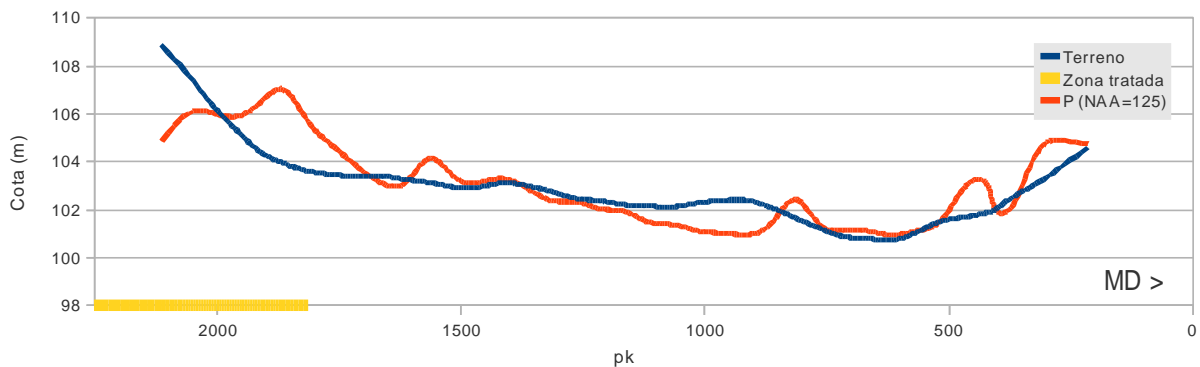


Fig 13. Previsão das pressões na fundação do dique da MD quando o NAA = NPA = 125 m

Na Fig. 14, apresenta-se a estimativa correspondente ao nível de máxima cheia (NMC). Nestas circunstâncias a altura piezométrica máxima é de 4,6 m e o artesianismo ocorre em cerca de 67% dos piezómetros. A Fig. 15 procura ilustrar a influência do NAA no número de piezómetros com cotas piezométricas superiores à cota do terreno.

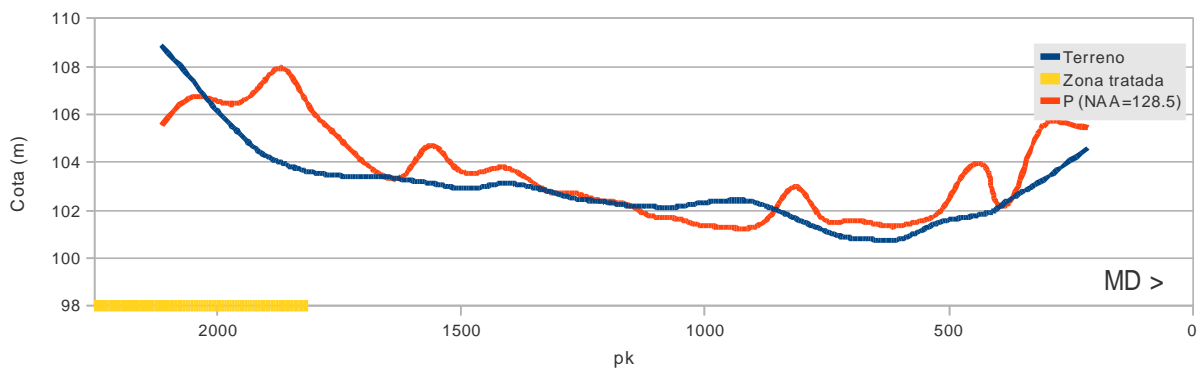


Fig 14. Previsão das pressões na fundação do dique da MD quando o NAA = NMC = 128,5 m

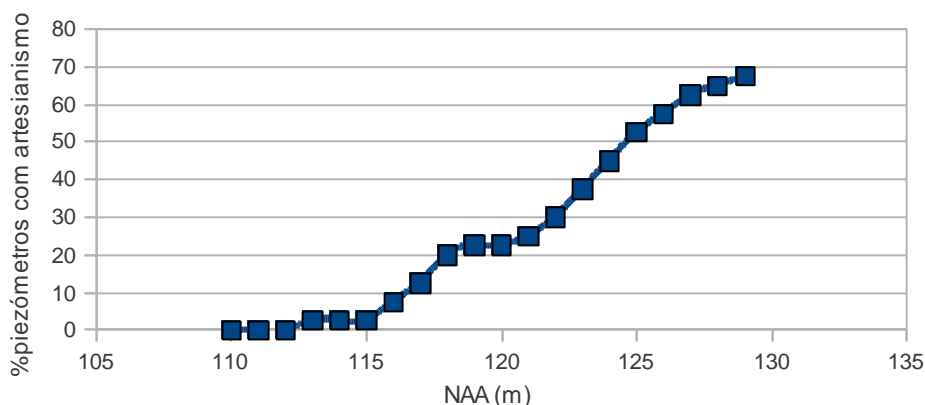


Fig 15. Percentagem de piezômetros com artesianismo em função do NAA

## 6.2. 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 piezômetros de tubo aberto em cota piezométrica. Neste tipo de dispositivos a leitura consiste em medir a distância desde a boca do tubo piezométrico 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 5.

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

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \beta_3 x_2 + \dots + \beta_{n+1} x_n \quad (10)$$

em que,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , são as variáveis independentes, conforme apresentado na secção 5, 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 Fig. 16 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 5.

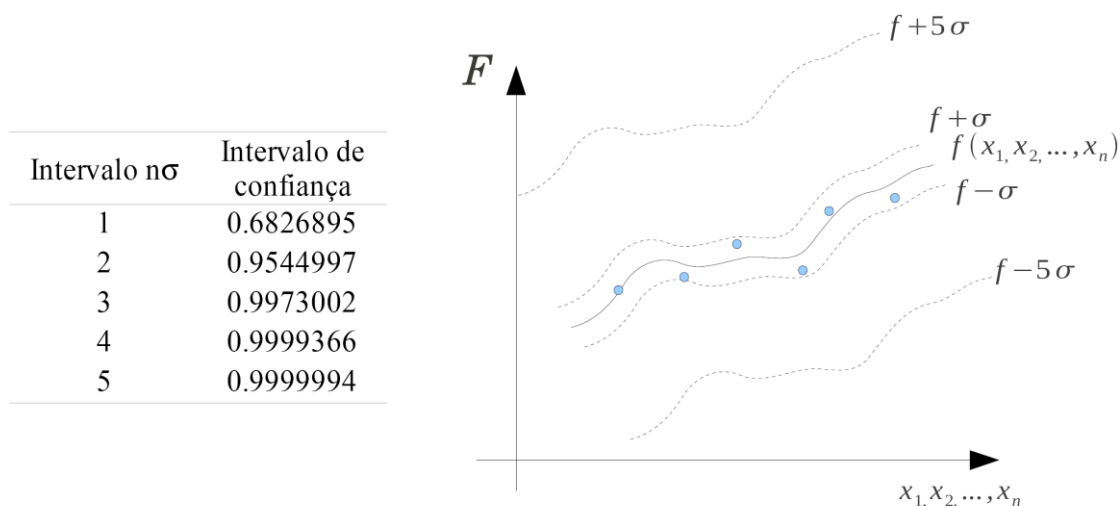


Fig 16. Intervalos de confiança em torno dos modelos de comportamento

Quadro 5 – Níveis de atenção e alerta em função do desvio aos modelos

Nível	Definição	Descrição	Ação recomendada
Verde	$E \leq 2\sigma$	Comportamento normal: as leituras estão de acordo com o modelo estatístico baseado nas leituras anteriores. Cerca de 95% das leituras anteriores enquadram-se neste intervalo.	Nenhuma
Amarelo	$2\sigma \leq E \leq 5\sigma$	Há uma discrepância relevante entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	a) verificar boletins de registo b) repetir leituras c) verificar historial d) verificar necessidade de recalibração do modelo
Vermelho	$E > 5\sigma$	Há uma discrepância grosseira entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	a) verificar boletins de registo b) repetir leituras c) verificar historial d) verificar ocorrências noutros aparelhos e) notificar responsável pela análise de segurança

## 7. CONCLUSÕES

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 fluxo 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 injecções. 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. (Marcelino, , *et al*, 2010)

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 banqueteta). 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 Fig. 17, 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.

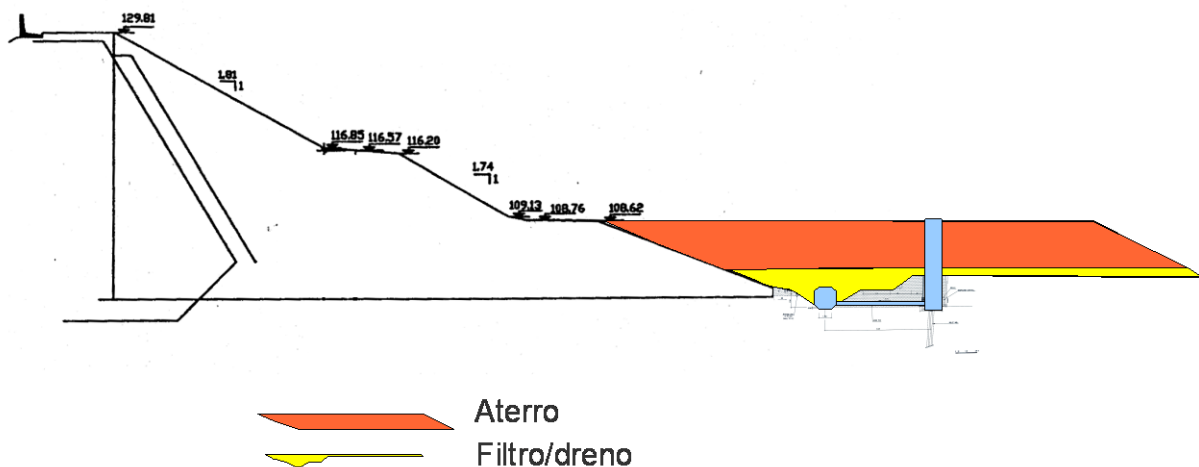


Fig 17. Solução de estabilização recomendada para o dique da margem direita da barragem de Massingir

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coba. Projecto de Massingir. Ministério do Ultramar. Vols. 1 a 5; 1969.

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

Foster, M., Fell, R. and Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadian Geotechnical Journal, 37; 2000 p. 1000–1024.

Marcelino Silva J., Portugal, J. C. e Sousa, O. Inspeção de segurança às barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia; 2011 (no prelo).

Marcelino Silva J., Portugal, J. C. Inspeção anual de segurança das barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane - Barragem de Massingir – Relatório intercalar de interpretação dos dados de observação. LNEC. NBOA. RELATÓRIO 343/2010.