

# MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO DA BARRAGEM DE PEQUENOS LIBOMBOS

João Candeias Portugal<sup>\*1</sup>, João Marcelino Silva<sup>1</sup>, Olinda Sousa<sup>2</sup>, Danyvan Levi<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: [portugal@lnec.pt](mailto:portugal@lnec.pt)

**RESUMO:** A barragem dos Pequenos Libombos é constituída por um aterro zonado que dispõe de um sistema de observação em exploração há cerca de 20 anos. Os dispositivos desse sistema permitem medir as seguintes grandezas: nível de água na albufeira, deslocamentos superficiais, deslocamentos internos, caudais de infiltração, níveis piezométricos no 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

A oportunidade deste artigo decorre do 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, incluiu-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 dos Pequenos Libombos decorrido em Abril de 2010.

Neste artigo é apresentada uma parte 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). Na secção 6, aplicam-se os modelos desenvolvidos para extrapolar o comportamento da obra em diversas situações de armazenamento (NAA), designadamente no que se refere ao volume de água percolado através do aterro e fundação.

## 2. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

O aproveitamento hidráulico dos Pequenos Libombos fica situado no rio Umbeluzi, no distrito de Boane, cerca de 35 km a SW da cidade de Maputo. A construção da barragem decorreu de 1983 a 1986.

A barragem, embora de fins múltiplos, destina-se essencialmente a abastecimento de água à cidade de Maputo. Tem também a função de controlo de cheias e de irrigação de terras de cultivo. Recentemente foi instalada uma central hidroeléctrica de pequena potência (1,7 MW), a qual não se encontra ainda em funcionamento.

A albufeira tem uma capacidade máxima de armazenamento de 400 hm<sup>3</sup> e a área inundada, ao nível de pleno armazenamento (NPA), é de 38 km<sup>2</sup>. A bacia hidrográfica é de 5700 km<sup>2</sup>.

Trata-se de uma estrutura mista de aterro e betão, constituída por um descarregador de cheias na zona central (em betão) e por dois trechos em aterro, localizados nas zonas laterais, constituídas por um perfil zonado (Figs. 1 e 2).



Fig. 1. Vista de montante da barragem dos Pequenos Libombos

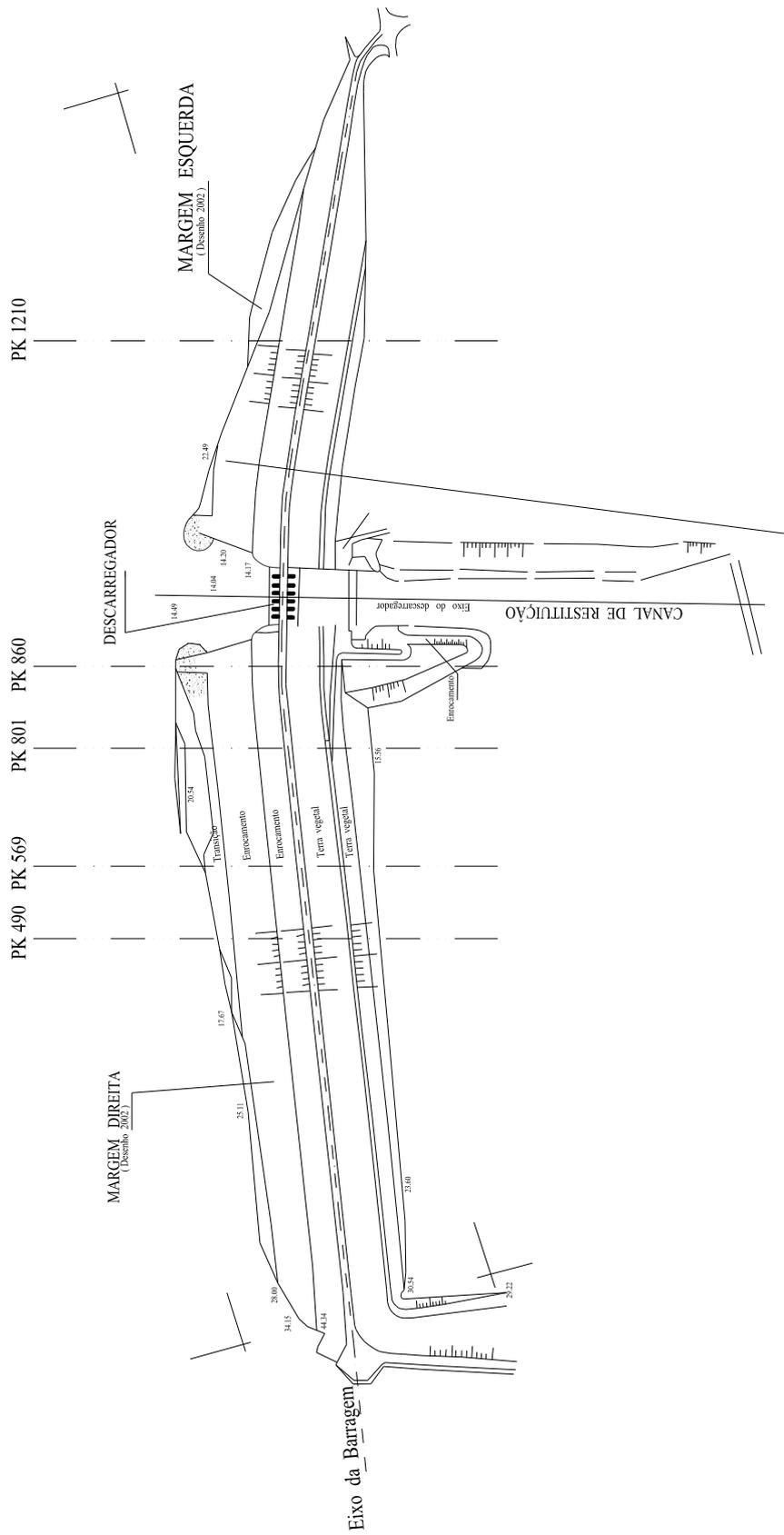


Fig. 2. Planta da barragem dos Pequenos Libombos

A barragem tem uma altura máxima acima da fundação de cerca de 46 m e um comprimento no coroamento de 1540 m. O coroamento, com 8 m de largura, está à cota 51,00 m. O nível de pleno armazenamento (NPA) e o nível de máxima cheia (NMC) estão às cotas 47,00 e 49,55 m, respectivamente.

A inclinação do paramento de montante é de 1V/3,0H até à cota 40,00 m e 1V/3,2H para cotas superiores (Fig. 3). O declive do paramento de jusante é de 1V/2,4H. Este paramento tem uma banquetta à cota 35,00 m, com uma largura de 3,00 m.

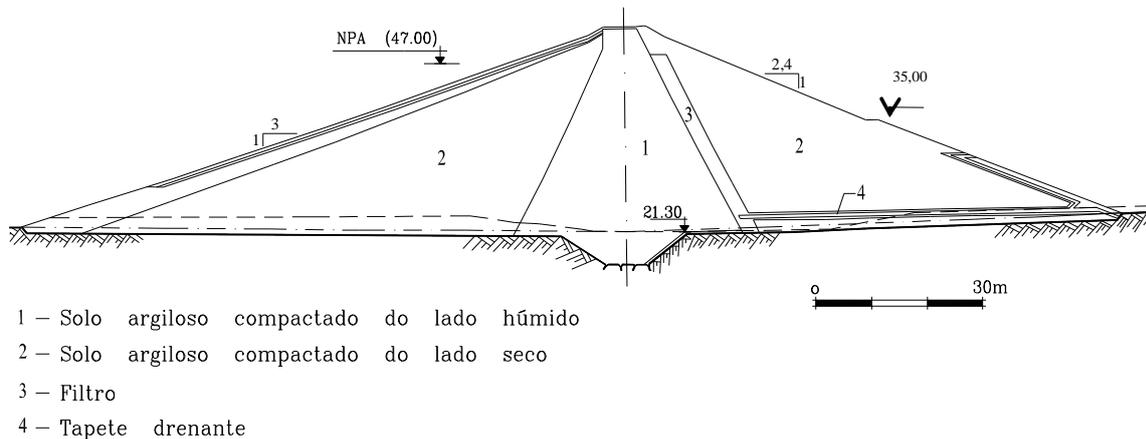


Fig. 3. Perfil transversal-tipo dos trechos em aterro da barragem

O descarregador de cheias está limitado por dois muros de ala, é formado por seis blocos com 10,5 m de largura e é constituído por duas secções. A principal, situada num nível inferior, foi dimensionada para um caudal máximo de 5600 m<sup>3</sup>/s, é constituída por sete orifícios pouco profundos equipados com comportas de segmento. A outra, a secundária ou de emergência, é constituída por sete vãos em superfície livre, que permitem a passagem de um caudal de 515 m<sup>3</sup>/s para o NMC.

A descarga de fundo é constituída por duas condutas metálicas, implantadas ao longo dos muros de ala, com 1,50 m de diâmetro e 110,0 m de desenvolvimento. A sua capacidade máxima, no NPA, é de 2×30 m<sup>3</sup>/s.

### 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 inspecções visuais e das campanhas de observação, é função das condições de risco associadas a uma barragem.

Para a avaliação da adequação do sistema de observação da barragem dos Pequenos Libombos, 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=2,0)**

$\alpha_1 = 2$  – aceleração sísmica máxima de projecto inferior a 0,10 g para um período de retorno de 1000 anos;

$\alpha_2 = 2$  – baixa probabilidade de escorregamento dos taludes nas encostas das margens da albufeira;

$\alpha_3 = 3$  – muito baixa probabilidade de cheias superiores à de projecto;

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

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

### **Fiabilidade da obra (F=2,0)**

$\alpha_6 = 1$  – dimensionamento estrutural adequado;

$\alpha_7 = 3$  – condições de fundação aceitáveis;

$\alpha_8 = 1$  – órgãos de descarga fiáveis;

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

### **Factores humanos e económicos (R=4,5)**

$\alpha_{10} = 4$  – volume da albufeira de  $400 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;

$\alpha_{11} = 5$  – ocupação dos terrenos a jusante da barragem com diversos aglomerados populacionais, 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 18,0.

## **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 dos Pequenos Libombos (mínimo recomendável).

Para uma altura da barragem de 46 m,  $\alpha_g=18$  e  $R=4,5$  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 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	---	

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 dos Pequenos Libombos encontra-se em exploração há cerca de 20 anos sem ter exibido comportamentos que indiquem fenómenos lesivos da sua segurança. Por outro lado, tem um registo 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. Assim, quer os resultados da inspeção visual, quer os resultados da observação instrumental concorrem para a inexistência de mau comportamento.

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 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.

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 dos Pequenos Libombos, 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 inicialmente instalado na barragem dos Pequenos Libombos, na sequência da construção, compreendia dispositivos para a monitorização (LNEC, 2005):

- a) dos níveis de água na albufeira (NAA);
- b) dos deslocamentos superficiais através de marcas superficiais;
- c) dos deslocamentos internos, horizontais e verticais, através de inclinómetros clinométricos subverticais;
- d) das pressões intersticiais que se desenvolvem no corpo da barragem e na fundação (através de células eléctricas e piezómetros de tubo aberto);
- e) do caudal drenado infiltrado nas galerias do descarregador;
- f) dos caudais drenados e das pressões na fundação do descarregador, através de drenos e piezómetros de tubo aberto;
- g) das pressões sob a bacia de dissipação, através de piezómetros de tubo aberto, e;
- h) dos níveis de água no terreno a jusante da obra, através de poços de alívio.

Para além destas grandezas o sistema de observação da barragem inclui ainda uma estação meteorológica, essencial também no âmbito do balanço hídrico da albufeira, que inclui dispositivos para medição da precipitação, da evaporação, da temperatura e da humidade relativa.

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

O sistema de medição de movimentos superficiais dos aterros e descarregador, constituído por 47 marcas superficiais e respectivos pontos de referência encontra-se inoperacional, não se procedendo a leituras.

Os 8 tubos inclinométricos estão distribuídos por 4 perfis de observação e em 2 deles verificam-se obstruções que impedem a medição de movimentos até ao fundo de furo. Estes dispositivos permitem medir, quer movimentos horizontais – com recurso a sonda inclinométrica, quer movimentos verticais em relação à boca – com recurso a sonda magnética.

Os piezómetros de tubo aberto, instalados nos aterros e respectivas fundações, 41 no total, estão distribuídos por 4 perfis de observação. Destes, 9 estão inoperacionais, mas os restantes 32 permitem monitorar a rede de percolação interna dos aterros.

Das 9 células eléctricas de pressão intersticial, que se encontram distribuídas por 3 perfis de observação, uma está avariada, desde 2005, e as restantes 8 fornecem leituras que indiciam também estar avariadas.

Os poços de alívio a jusante, 19 no total, encontram-se distribuídos da seguinte forma: 5 à esquerda do descarregador, dos quais 3 fora de serviço, e 14 à direita do descarregador, todos operacionais.

A escala limnimétrica, instalada no descarregador de cheias encontra-se em bom estado de conservação.

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

O resumo das variações registadas no Nível de Água na Albufeira da barragem dos Pequenos Libombos, desde Novembro de 1990, ano de início da exploração, está ilustrado no Quadro 3. A representação dos valores diários do NAA e respectivas variações encontra-se na Fig. 4.

As variações diárias do NAA dos Pequenos Libombos são, em geral, modestas. Pontualmente ocorrem variações um pouco superiores, correspondendo a períodos de grande afluência e consequentes descargas. O caso mais relevante ocorreu no início de 2000, por ocasião de uma grande cheia em Moçambique. Esses casos, embora bem ilustrados na Fig. 4, representam, na verdade, uma pequena parcela dos valores diários. A maioria, cerca de 74% corresponde a variações negativas de apenas 5 cm. Outra parcela com alguma relevância (19%) corresponde a valores positivos, também de 5 cm/dia. Todos estes valores e outros relacionados com a exploração da albufeira encontram-se resumidos no Quadro 3.

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)
1986	22.6	18.11	4.49	0.04	-0.03		22.6	22.6	-	4.1	-	11	25
1987	38.95	22.99	15.96	1.87	-0.03	22.6	36.63	14.03	4.1	106.8	102.7	65	5.6
1988	44.62	38.95	5.67	0.33	-0.15	36.63	44.62	7.99	106.8	302.6	195.8	91	4.0
1989	47.25	44.15	3.1	0.95	-0.2	44.62	44.4	-0.22	302.6	295.2	-7.4	48	7.6
1990	44.98	44.22	0.76	0.05	-0.12	44.4	44.22	-0.18	295.2	289.2	-6.0	103	3.5
1991	45.8	43.99	1.81	0.39	-0.02	44.24	44.08	-0.16	289.9	284.6	-5.3	304	1.2
1992	44.07	41.36	2.71	0.14	-0.07	44.09	42.15	-1.94	285.0	226.4	-58.6	305	1.2
1993	43.75	42.27	1.48	0.37	-0.02	42.2	42.69	0.49	227.9	241.8	13.9	304	1.2
1994	43.1	41.85	1.25	0.12	-0.02	42.71	41.95	-0.76	242.3	220.9	-21.4	304	1.2
1995	42.31	39.78	2.53	0.65	-0.03	41.95	41.77	-0.18	220.9	216.0	-5.0	304	1.2
1996	47.06	41.92	5.14	0.44	-0.05	41.82	45.08	3.26	217.4	318.6	101.2	305	1.2
1997	46.39	45.12	1.27	0.14	-0.16	45.07	46.02	0.95	318.2	353.0	34.8	304	1.2
1998	47.85	44.86	2.99	2.16	-1.93	46.03	44.91	-1.12	353.5	312.6	-40.9	304	1.2
1999	46.65	44.65	2	0.57	-0.22	44.86	45.59	0.73	310.9	337.0	26.2	274	1.3
2000	48.28	44.44	3.84	2.57	-1.95	45.66	45.46	-0.19	339.4	332.3	-7.1	305	1.2
2001	47.03	44.34	2.69	0.81	-0.28	45.47	45.05	-0.42	332.7	317.5	-15.2	304	1.2
2002	44.92	44.03	0.89	0.07	-0.08	45.04	44.29	-0.75	317.0	291.4	-25.6	304	1.2
2003	44.27	41.56	2.71	0.31	-0.34	44.29	41.67	-2.62	291.5	213.4	-78.1	304	1.2
2004	44.37	41.59	2.78	0.42	-0.02	41.66	43.45	1.79	213.1	264.5	51.4	305	1.2
2005	44.04	42.31	1.73	0.19	-0.02	43.43	42.4	-1.03	264.0	233.3	-30.6	304	1.2
2006	45.82	42.22	3.6	0.67	-0.02	42.39	45.16	2.77	233.1	321.4	88.3	304	1.2
2007	44.89	42.95	1.94	0.11	-0.03	45.16	43.33	-1.83	321.4	260.9	-60.5	304	1.2
2008	43.75	42.01	1.74	0.1	-0.02	43.33	42.37	-0.96	260.9	232.7	-28.2	305	1.2
2009	43.87	41.43	2.44	0.46	-0.02	42.42	43.84	1.42	233.9	276.8	42.8	304	1.2
2010	46.75	43.76	2.99	0.22	-0.05	43.83	45.32	1.49	276.5	327.1	50.6	304	1.2
Máximo	48.28	45.12	15.96	2.57	-0.02	46.03	46.02	22.6	353.5	353.0	195.8		
Mínimo	22.6	18.11	0.76	0.04	-1.95	22.6	22.6	-2.62	4.1	4.1	-78.1		

\* - 1º registo em 28 de Março de 1986

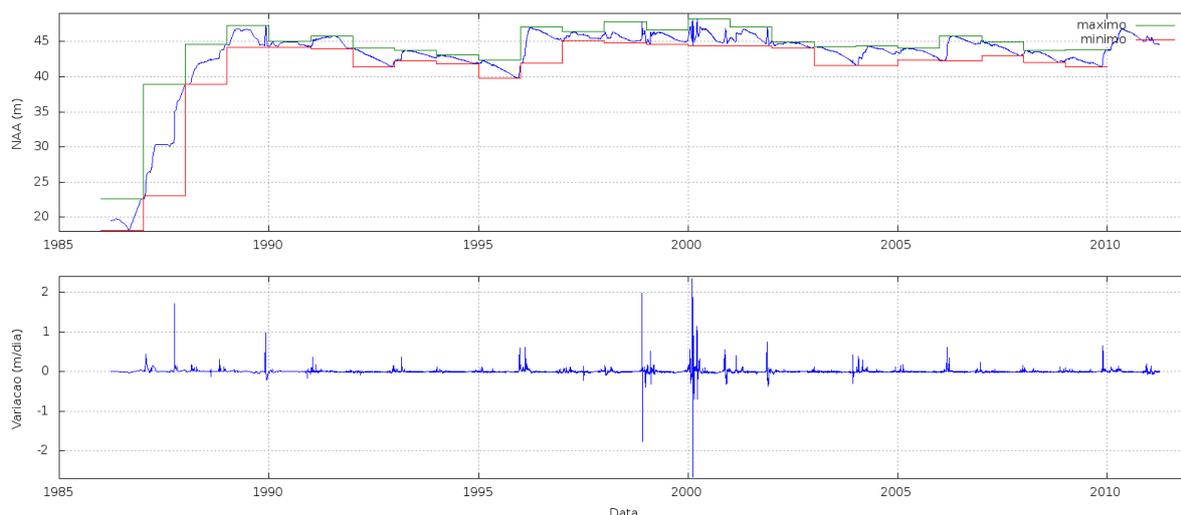


Fig. 4. Variação do NAA entre Novembro de 1990 e Março de 2011

## 5. MODELOS DE COMPORTAMENTO E ANÁLISE DAS OBSERVAÇÕES

### 5.1. Inclínómetros clino-altimétricos subverticais

A leitura dos inclinómetros esteve interrompida durante um período considerável por falta ou avaria no torpedo sensor. Em 2004 passou a estar disponível um sensor novo e, assim, desde essa data retomaram-se as campanhas de observação inclinométrica com periodicidade mais ou menos regular.

No que respeita aos resultados obtidos, os deslocamentos são reduzidos e compatíveis com as observações resultantes da inspeção visual. De facto, assim como na inspeção visual não foram detectados quaisquer desalinhamentos, também se pôde verificar que os movimentos registados pelos inclinómetros são sempre inferiores a 10 mm. Os movimentos são predominantemente no sentido de jusante, muito embora entre campanhas sucessivas, por vezes, aparentem ocorrer deslocamentos no sentido de montante. Atendendo à fase de vida da obra, em que o primeiro enchimento ocorreu há bastante tempo, às pequenas variações do nível da albufeira e à precisão inerente ao método inclinométrico, é possível concluir que essas pequenas variações possam estar associadas a erros inerentes a este último. Assim, no âmbito deste artigo, dispensa-se uma apresentação mais detalhada dos resultados obtidos com estes dispositivos.

### 5.2. Piezómetros de tubo aberto no aterro e fundação

Para o estabelecimento dos modelos de análise das variações das pressões de água no aterro e fundação foram testados diversos tipos de expressões que procuram relacionar as variações do nível de água na albufeira, o tempo e as pressões medidas nos diversos piezómetros. Foram consideradas as seguintes equações nos ajustes efectuados (em que os  $\beta_i$  são constantes a determinar,  $P$  a pressão,  $N_{AA}$  o nível da água na albufeira e,  $N_{dias}$  o número de dias que decorreram desde uma data arbitrária):

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

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

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

Perfil 490: Na Fig. 5 resumem-se os valores das pressões em cada piezómetro com relação ao máximo disponível em cada instante (pressão relativa,  $P_r$ , expressa em %):

$$P_r = \frac{P_{piez} - C_{pp}}{N_{AA} - C_{pp}} \quad (4)$$

onde  $P_{piez}$  representa a carga lida no piezómetro,  $N_{AA}$  o nível de água na albufeira e  $C_{pp}$  a cota da ponteira porosa. Esta grandeza mantém-se praticamente constante, independentemente do  $N_{AA}$ , permitindo uma avaliação simples do funcionamento hidráulico da barragem nesta zona.

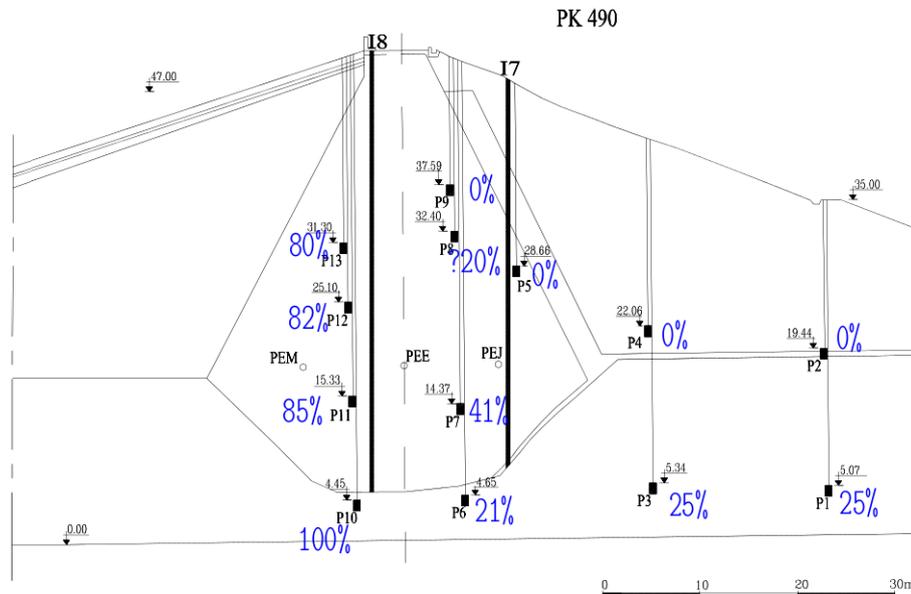


Fig 5. Pressão relativa nos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 490

Verifica-se que os piezómetros mais a montante apresentam em geral cargas elevadas, entre 80 a 85%, no núcleo. É de realçar também a carga muito elevada no piezómetro situado na fundação, a montante da cortina. Em termos práticos não há perda de carga até aquela zona. Na zona de jusante do núcleo as cargas são substancialmente mais reduzidas, atestando o bom funcionamento do núcleo e, em especial, da cortina. Saliente-se que o gradiente entre os piezómetros P10 e P6, faz dissipar 80% da carga da albufeira, numa distância de cerca de 10 m. Os valores obtidos para os coeficientes numéricos dos modelos estão resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros dos modelos (Eq. 1 ou 4) dos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 490

	$C_{pp}$ (m)	$\beta_1$	$\beta_2$	R	$P_r$	Modelo
P01	5.3				25%	$P=0.25NAA+3.975$
P02	19.44				0%	$P=0NAA+19.44$
P03	5.34				25%	$P=0.25NAA+4.005$
P04	22.06				0%	$P=0NAA+22.06$
P05	28.66				0%	$P=0NAA+28.66$
P06	7.15				21%	$P=0.21NAA+5.6485$
P07	14.37	13.820	0.317	0.73	~42%	$P=0.317NAA+13.82$
P08	32.4				20%	$P=0.2NAA+25.92$
P09	37.59				0%	$P=0NAA+37.59$
P10	4.45	-1.75	1.034	0.99	100%	$P=1.034NAA+-1.75$
P11	15.33	10	0.658	0.75	85%	$P=0.658NAA+10$
P12	25.1	4.66	0.823	0.74	82%	$P=0.823NAA+4.66$
P13	31.3	-4.26	1.03	0.73	80%	$P=1.03NAA+-4.26$

Nalguns casos os modelos foram estabelecidos utilizando a expressão (1), enquanto que noutros, (em regra quando a variação de pressão é muito reduzida) houve vantagem em aplicar a expressão (4). Note-se que as expressões são equivalentes mas, no caso da expressão (4), impõe-se o valor da relação entre o NAA e a carga ao invés de a determinar com base em algoritmos de minimização do erro.

**Perfil 801:** Este perfil dispõe apenas de 2 piezómetros, situados na fundação, às cotas 4,97 m e 8,25 m. As pressões registadas em ambos têm-se mantido sensivelmente constantes, e correspondem a cerca de 20 m de coluna de água. As cargas relativas são altas (Quadro 5, Fig. 6), sensivelmente o dobro das registadas nos piezómetros da fundação do perfil 490.

Quadro 5 – Parâmetros dos modelos (Eq. 1 ou 4) dos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 801

	$C_{pp}$ (m)	$\beta_1$	$\beta_2$	R	$P_r$	Modelo
P01	4.97	12.73	0.246	0.67	40%	$P=0.246NAA+12.73$
P02	8.25	13.66	0.211	0.63	44%	$P=0.211NAA+13.66$

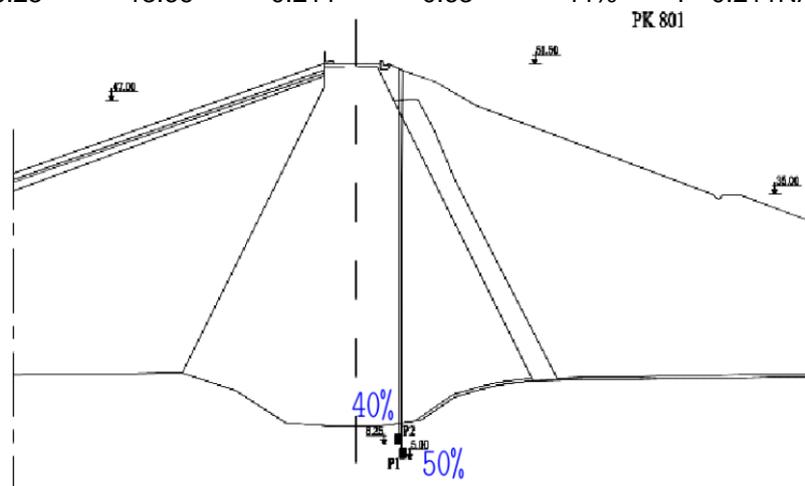


Fig 6. Pressão relativa nos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 801

**Perfil 860:** À semelhança do que acontece no perfil 490, verifica-se, em geral, uma elevada pressão no núcleo a montante, e valores um pouco mais reduzidos a jusante, como é desejável (Quadro 6, Fig. 7). Na fundação, sob o maciço de jusante, os valores obtidos são também da ordem de grandeza dos observados no perfil 490.

Quadro 6 – Parâmetros dos modelos (Eq. 1 ou 4) dos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 860

	$C_{pp}$ (m)	$\beta_1$	$\beta_2$	R	$P_r$	Modelo
P01	8.79		inop?		20%	$P=0.2NAA+7.032$
P02	14.31	18.23	-0.080	0.33	0%	$P=-0.080NAA+18.23$
P03	8.36		inop?		20%	$P=0.2NAA+6.688$
P04	13.05	34.83	-0.459	0.69	0%	$P=-0.459NAA+34.83$
P05	22.53	40.36	-0.331	0.51	0%	$P=-0.331NAA+40.36$
P06	10.64	61.28	-0.596	0.83	70%	$P=-0.596NAA+61.28$
P07	27.89				40%	$P=0.4NAA+16.734$
P08	33.45				0%	$P=0NAA+33.45$
P09	38.31				0%	$P=0NAA+38.31$
P10	10.87	46.98	-0.155	0.40	90%	$P=-0.155NAA+46.98$
P11	20.3				89%	$P=0.89NAA+2.233$
P12	29.04	32.58	0.237	0.74	95%	$P=0.237NAA+32.58$
P13	9.57	47.56	-0.168	0.56	82%	$P=-0.168NAA+47.56$

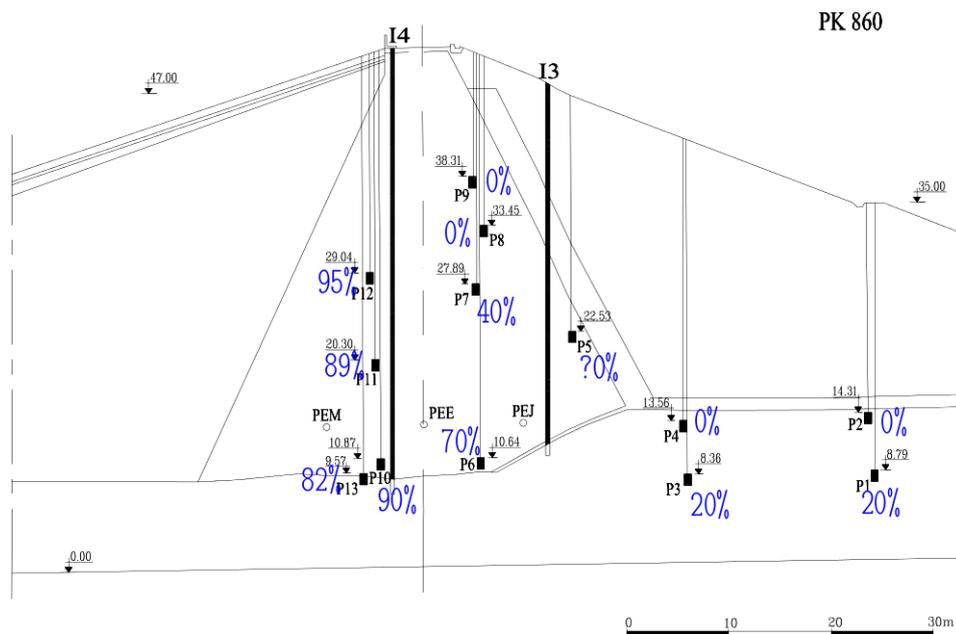


Fig 7. Pressão relativa nos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 860

Perfil 1210: À semelhança do que acontece nos perfis 490 e 860 verifica-se um nível de pressão elevado na zona mais a montante do núcleo e valores um pouco mais reduzidos, a jusante, como é desejável (Quadro 7, Fig. 8). Na fundação, sob o maciço de jusante, os valores obtidos são também da ordem de grandeza dos observados nos perfis 490 e 860.

Quadro 7 – Parâmetros dos modelos (Eq. 1 ou 4) dos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 1210

	$C_{pp}$ (m)	$\beta_1$	$\beta_2$	R	$P_r$	Modelo
P01	20.57	10.96	0.355	0.82	20%	$P=0.355NAA+10.96$
P02	30.55				0%	$P=0NAA+30.55$
P03	18.79	10.05	0.408	0.95	35%	$P=0.408NAA+0.408$
P04	30.6				0%	$P=0NAA+30.6$
P05	17.1	13.43	0.363	0.89	42%	$P=0.363NAA+13.43$
P06	23.48	18.67	0.256	0.78	38%	$P=0.256NAA+18.67$
P07	33.55	27.02	0.242	0.79	40%	$P=0.242NAA+27.02$
P08	37.89	40.20	-0.040	0.33	10%	$P=-0.040NAA+40.20$
P09	42.71	43.46	-0.017	0.64	0%	$P=-0.017NAA+43.46$
P10	17.95	3.15	0.775	0.99	78%	$P=0.775NAA+3.15$
P11	23.39	5.43	0.733	0.96	75%	$P=0.733NAA+5.43$
P12	33.89	30.71	0.215	0.44	?	$P=0.215NAA+30.71$
P13	37.59	28.65	0.326	0.72	95%	$P=0.326NAA+28.65$

Em geral, é possível verificar o correcto funcionamento do núcleo e da fundação da barragem. Os resultados fornecidos por estes equipamentos encontram-se dentro do previsível para este tipo de barragem. A maioria dos modelos forneceram resultados que podem ser incluídos num sistema de validação automática. Nos Quadros 4 a 7 são listados os parâmetros dos modelos obtidos por aplicação das Eq. 1 ou 4 e que apresentam uma correlação considerada adequada.

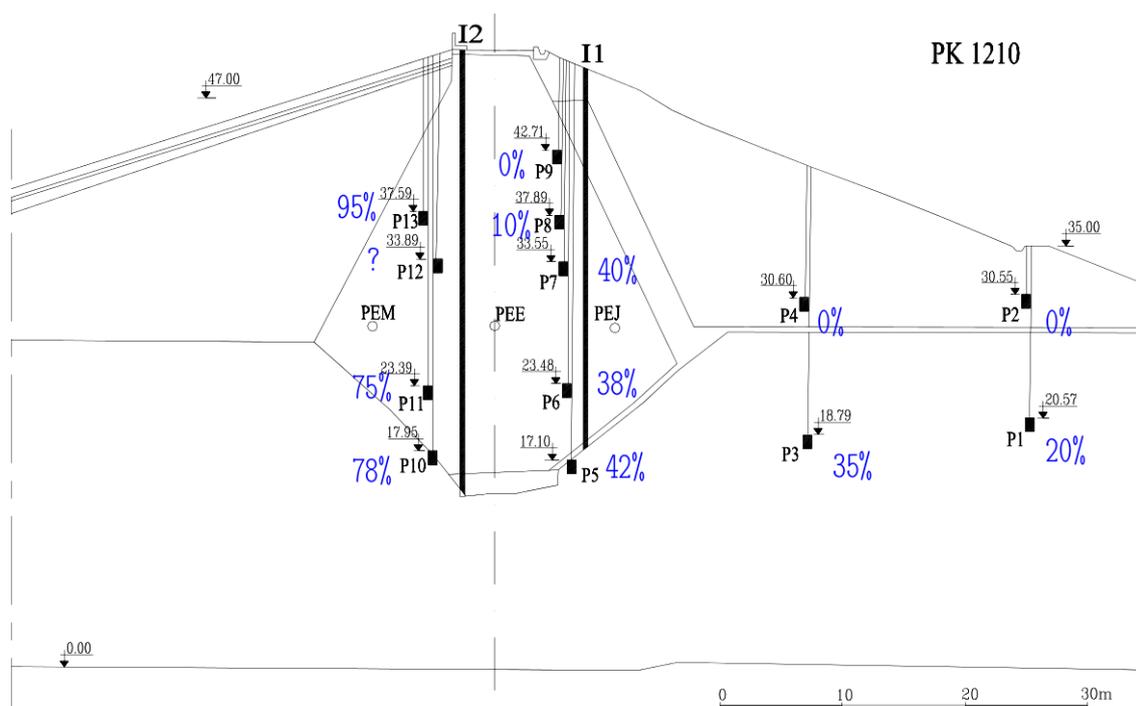


Fig 8. Pressão relativa nos piezómetros de tubo aberto instalados no perfil 1210

### 5.3. Células eléctricas de pressão intersticial no aterro

No que concerne à observação piezométrica e, em complemento aos piezómetros de tubo aberto, a barragem dispõe de 3 perfis (PK 149, 860 e 1210) instrumentados com células eléctricas para a medição das pressões intersticiais. Estes equipamentos foram instalados ainda no decorrer da fase construtiva, pelo que possibilitaram a monitorização dos acréscimos de pressão intersticial decorrentes do crescimento do aterro, permitindo complementar agora a monitorização das variações de pressão intersticial devidas às variações do NAA.

À semelhança do que foi feito nos demais aparelhos foram testados diversos modelos semi-empíricos para procurar ajustar as medições disponíveis. Tendo em consideração a variação observada, tal como se ilustra, a título de exemplo na Fig. 9, decidiu-se considerar os seguintes modelos:

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad (5)$$

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} \quad (6)$$

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} + \beta_3 \log(N_{dias}) \quad (7)$$

Na Fig. 9 é também notório que o crescimento da pressão intersticial cessou quando se iniciou o enchimento da albufeira, por volta de 1987. Esta circunstância é compatível com o facto de as células estarem a registar acréscimos de pressão intersticial decorrentes do crescimento do próprio aterro. Noutros casos, a pressão intersticial apresenta variações com o início do enchimento da albufeira e, só quando se atinge o nível máximo, é que se observa de forma mais evidente alguma dissipação das pressões intersticiais. Por esse motivo, nos modelos com dependência do tempo (Eqs. 6 e 7) o ajuste foi feito apenas com os dados após se ter atingido o NAA máximo (Abril de 1989).

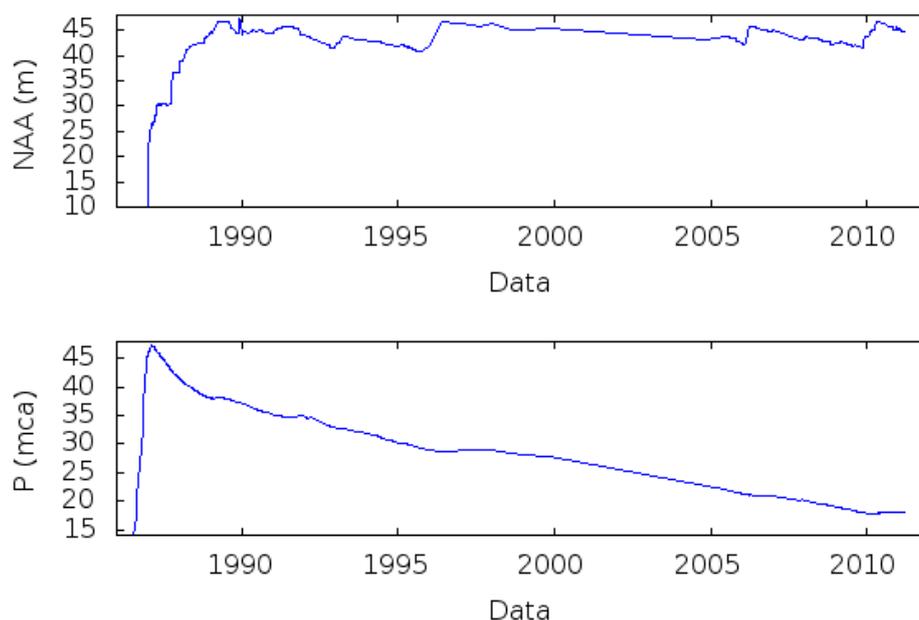


Fig. 9. Pressão (em metros de coluna de água) no piezómetro eléctrico PEM3 do P1210

Em geral os ajustes obtidos foram satisfatórios (Quadro 8) e indicam invariavelmente que as pressões intersticiais devidas à construção dos aterros, que foram muito elevadas (Fig. 9), se encontram quase totalmente dissipadas. O modelo que se parece adequar melhor à generalidade dos piezómetros é o que corresponde à Eq. 7. No entanto, o modelo que considera uma dependência linear com o tempo (Eq. 6) também apresenta bons resultados. Isso deveu-se ao facto de não se ter considerado alguns dados da fase inicial das observações (de 1987 a 1989), pelo que o ajuste foi feito com um conjunto de observações aproximadamente linear (por exemplo entre 1990 e 2010, na Fig. 9).

Quadro 8 - Parâmetros dos modelos (Eq. 7) dos piezómetros eléctricos

Perfil	Piezómetro	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\sigma$	$R$
490	PEM9	93.49	-0.08	-6.74	2.84	0.84
	PEE8	116.07	-0.29	-8.91	0.87	0.99
	PEJ7	76.94	0.17	-7.25	0.53	0.99
860	PEM6	123.52	-0.29	-10.12	0.87	0.99
	PEE5	76.73	-0.09	-5.28	0.4	0.98
	PEJ4	110.05	0.2	-11.92	1.89	0.98
1210	PEM3	59.39	0.39	-5.29	0.58	0.99
	PEE2	44.21	0.14	-2.13	0.69	0.9
	PEJ1	36.3	0.03	-0.97	0.27	0.9

PEM - piezómetro localizado mais a montante

PEE - piezómetro localizado sobre o eixo

PEJ - piezómetro localizado mais a jusante



$$C_r = \frac{P_{piez} - C_m}{N_{AA} - C_m} \quad (8)$$

onde  $P_{piez}$  representa a carga lida no piezómetro,  $N_{AA}$  o nível de água na albufeira e  $C_m$  a cota do manómetro (neste caso particular os valores calculados referem-se às cotas dos manómetros por desconhecimento das cotas exactas das câmaras de tomada de pressão).

Na generalidade dos piezómetros a carga varia entre 0 e 5% da carga de montante.

Quadro 9 – Parâmetros dos modelos (Eq.1) dos piezómetros na fundação do descarregador

Piezómetro	$\beta_1$	$\beta_2$	R
905.07_1	2.32	0.134	0.538
905.07_2	4.13	0.089	0.419
906	1.29	0.161	0.606
913.27	1.90	0.144	0.585
916	1.39	0.155	0.612
916.12	1.80	0.149	0.592
921.08	2.27	0.136	0.530
927.11	2.92	0.120	0.483
928.17	0.88	0.170	0.592
930	0.73	0.174	0.663
933	1.07	0.168	0.613
938.97	5.21	0.063	0.391
939.2	5.73	0.025	0.181
944.97	2.23	0.136	0.593
945.19	6.63	0.005	0.195
948	6.78	0.002	0.028
951.07	4.63	0.077	0.185
951.12	6.18	0.037	0.225
954.32	7.04	0.017	0.106
957.12	5.67	0.050	0.294
960.12	6.04	0.042	0.226
961.22	7.19	0.108	0.312
961.22_2	4.99	0.069	0.578

#### 5.4.2. Caudais

Os piezómetros instalados na fundação do descarregador são usados para drenar a fundação, por isso, encontram-se, normalmente, a cumprir essas funções. Só quando se pretende medir as subpressões é que os drenos/piezómetros são fechados.

Da análise da variação temporal dos caudais medidos é evidente que tem havido uma redução não desprezável dos valores registados. Por esse motivo, no estabelecimento dos modelos, consideraram-se as seguintes expressões (em que  $Q$  é o caudal):

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad (9)$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 P_N + \beta_4 N_{AA} \quad (10)$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} + \beta_3 \log(N_{dias}) \quad (11)$$

Os valores dos caudais totais medidos nas galerias (grande e pequena) resumem-se nas Figs. 11 e 12. Nestas figuras representam-se também os resultados do ajuste resultante da equação 11, podendo-se verificar a boa aderência deste modelo às observações e, para além disso, avaliar também a importante variação nos caudais drenados desde o início da exploração. Grosso modo, os caudais diminuíram 10 vezes, desde cerca de 250 l/min para cerca de 25 l/min, o que indicia um processo gradual de entupimento.

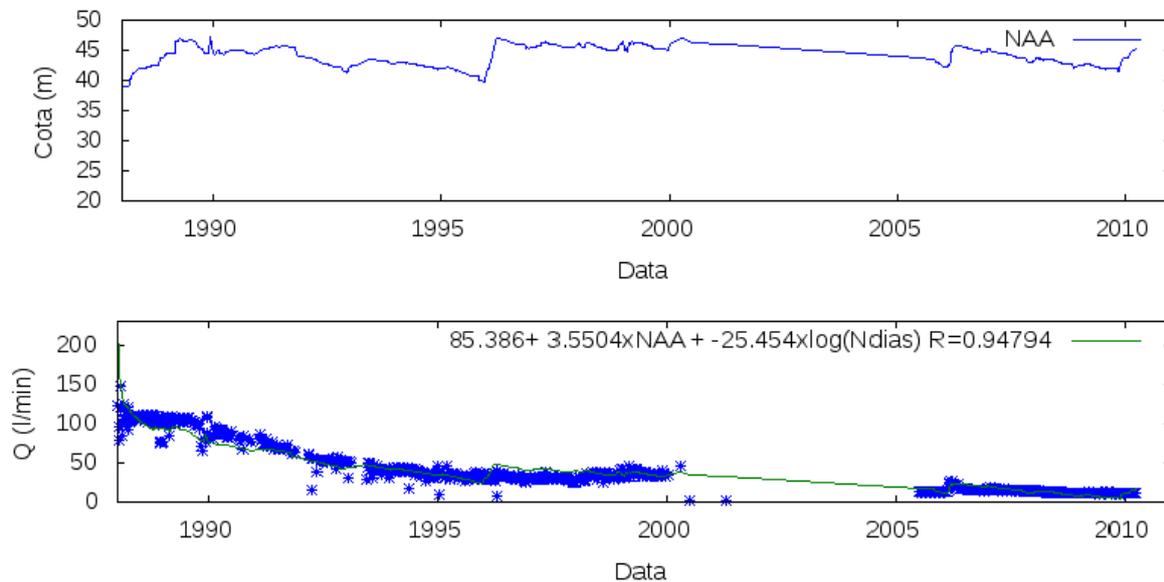


Fig 11. Caudais totais na “galeria grande”

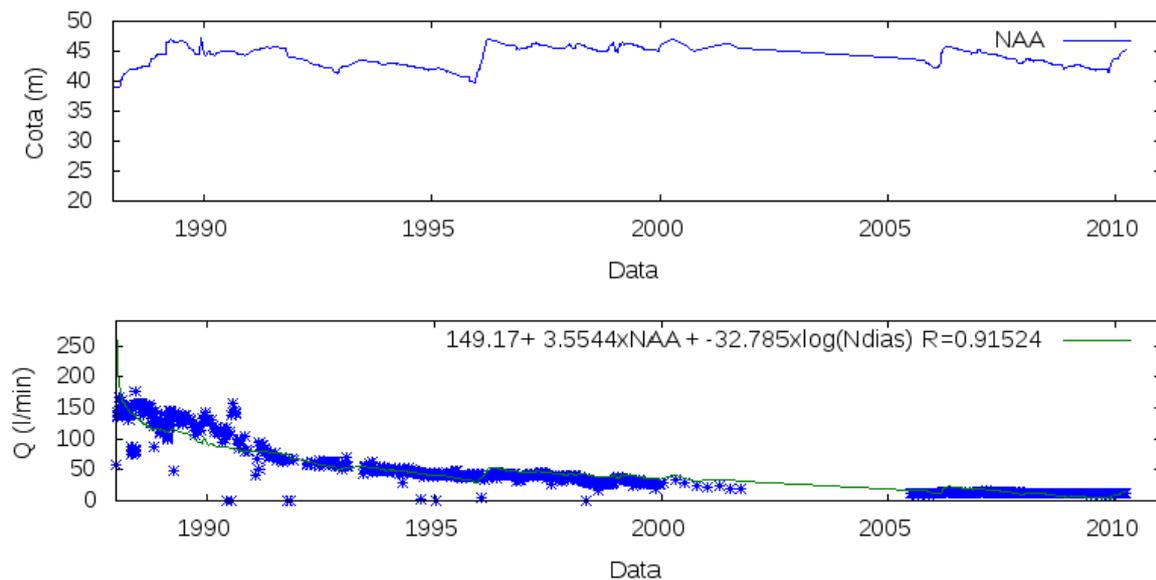


Fig 12. Caudais totais na “galeria pequena”

### 5.5. Piezómetros sob a bacia de dissipação

A base da bacia de dissipação encontra-se instrumentada com um conjunto de 6 piezómetros dispostos segundo uma malha rectangular. Foram testados os mesmos modelos que os descritos na secção 5.4. Na Fig. 13 resumem-se, em planta, os valores das pressões relativas obtidas para estes aparelhos. De salientar que, a par de um valor médio aproximadamente

constante de pressão relativa de 33% de carga da albufera, ocorre no piezômetro 5 um valor de 60%, portanto substancialmente mais elevado.

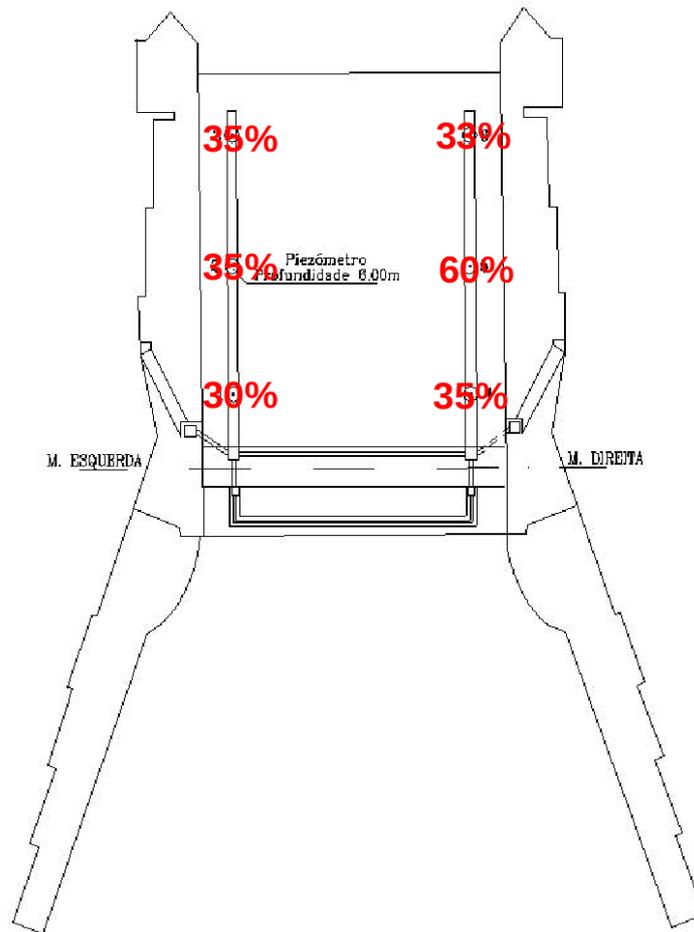


Fig 13. Pressão relativa nos piezômetros de tubo aberto instalados sob a bacia de dissipação

### 5.6. Poços de alívio no terreno a jusante

O nível de água dentro dos poços de alívio tem-se mantido relativamente estacionário ao longo do tempo. No início do enchimento, houve algumas variações, naturalmente relacionadas com a variação da carga induzida pela albufera a montante. Após essa fase inicial as variações registadas têm sido diminutas. A carga relativa em cada poço, à semelhança do que se fez para os piezômetros de tubo aberto, pode ser calculada por:

$$C_r = \frac{P_{piez} - C_f}{N_{AA} - C_f} \quad (12)$$

onde  $P_{piez}$  representa a carga lida no poço,  $N_{AA}$  o nível de água na albufera e  $C_f$  a cota do fundo do poço. Esta grandeza mantém-se praticamente constante, independentemente do nível a montante, permitindo uma avaliação simples do funcionamento hidráulico da barragem nesta zona. A maioria dos poços apresenta uma carga relativa de cerca de 20% da carga máxima teórica. Este comportamento está em sintonia com as observações registadas nos piezômetros hidráulicos situados na fundação a jusante (§5.2). O Quadro 10 resume as variações do nível de água nos poços considerando o início do enchimento ou o fim do enchimento. A Fig. 14 ilustra a situação em Março de 2010 ( $N_{AA} = 46,75$  m), sendo possível

verificar que, em geral, a carga nos poços é muito inferior à cota do terreno, garantido uma confortável margem de segurança. No poço 4 (PAD 4) essa margem é inferior.

Quadro 10 – Variação do nível da água nos poços de alívio

Poço	Variação máxima desde 1987 (m)	Variação máxima desde 1991 (m)
PAD4	1,02	1,70
PAD7	1,70	1,42
PAD8	1,61	1,28
PAD9	1,87	1,50
PAD10	1,98	1,54
PAD11	2,05	1,56
PAD12	2,19	1,58
PAD13	2,54	1,74
PAD14	2,81	1,82
PAD15	3,04	1,88
PAD16	3,34	1,99
PAD17	3,65	2,02
PAD18	3,59	2,05
PAD19	5,39	3,72
PAE3		
PAE4		
PIEZ6	seco/inop	
PIEZ9		
PIEZ10		

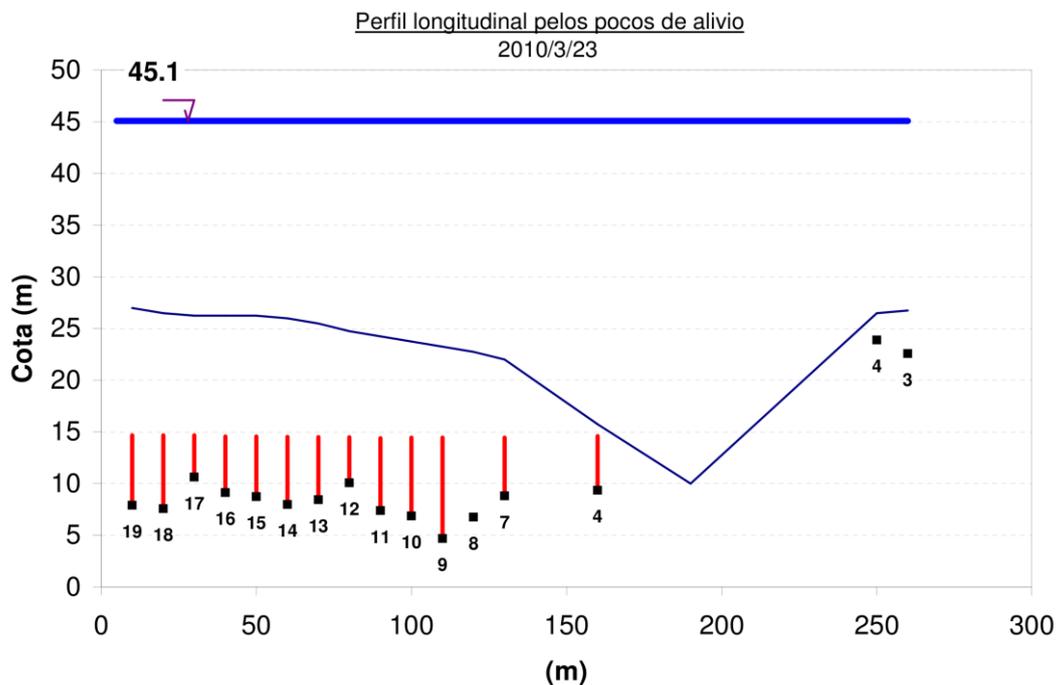


Fig 14. Nível de água nos poços em Março de 2010 ( $N_{AA} = 46,75$  m)

## 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 do núcleo e da fundação da barragem. Com efeito, admitindo que não se processa uma variação substancial do comportamento da fundação, o que poderia, eventualmente, acontecer para gradientes muito elevados, pode-se prever o funcionamento do corpo dos aterros e respectivas fundações. Tendo por base os mesmos pressupostos, é também possível estimar o comportamento da piezometria na zona do pé de talude de jusante.

Assim, nas Figs. 15 e 16 ilustra-se a previsão para a situação correspondente ao NPA (NAA = 47 m) nos perfis 490 e 1210, respectivamente. A Fig. 17 ilustra a previsão de níveis de água a jusante, também na situação de pleno armazenamento. Nestas condições está garantida a segurança da barragem.

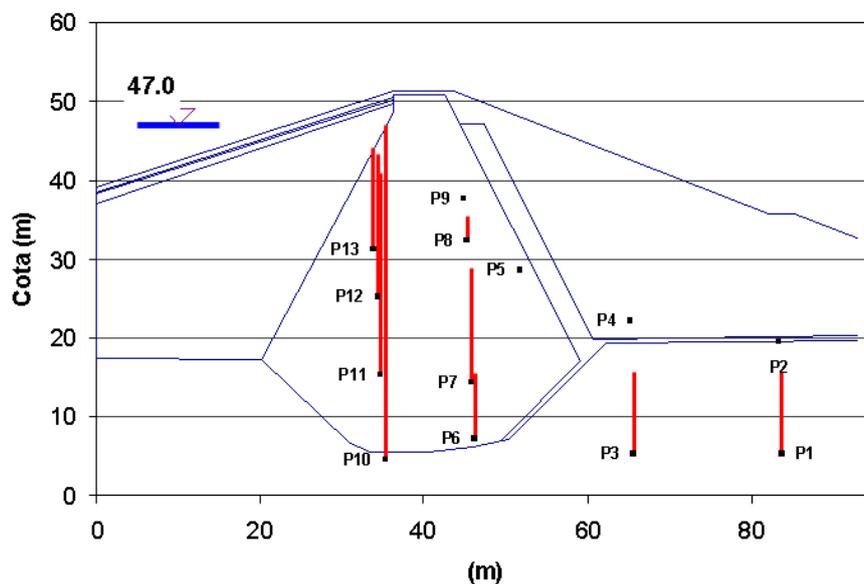


Fig 15. Previsão do nível de água nos piezômetros de tubo aberto instalados no perfil 490 (NAA=NPA)

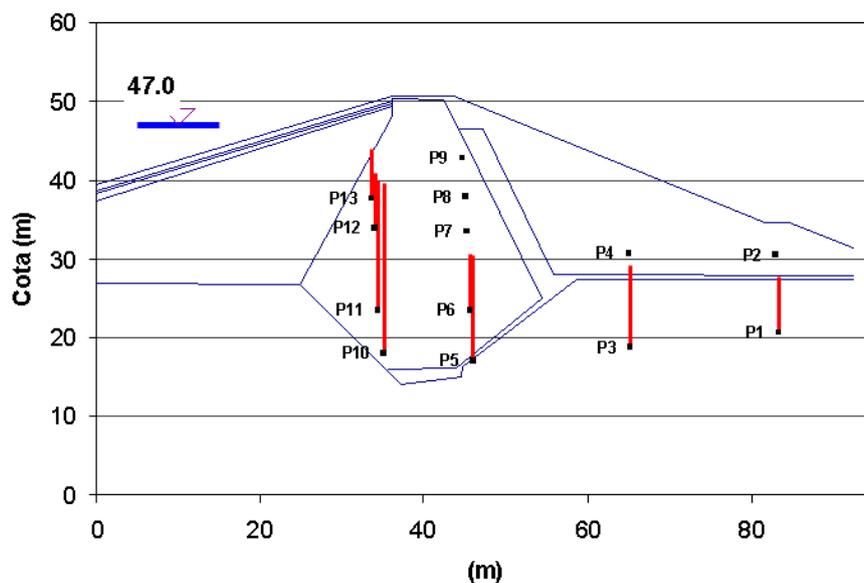


Fig 16. Previsão do nível de água nos piezômetros de tubo aberto instalados no perfil 1210 (NAA=NPA)

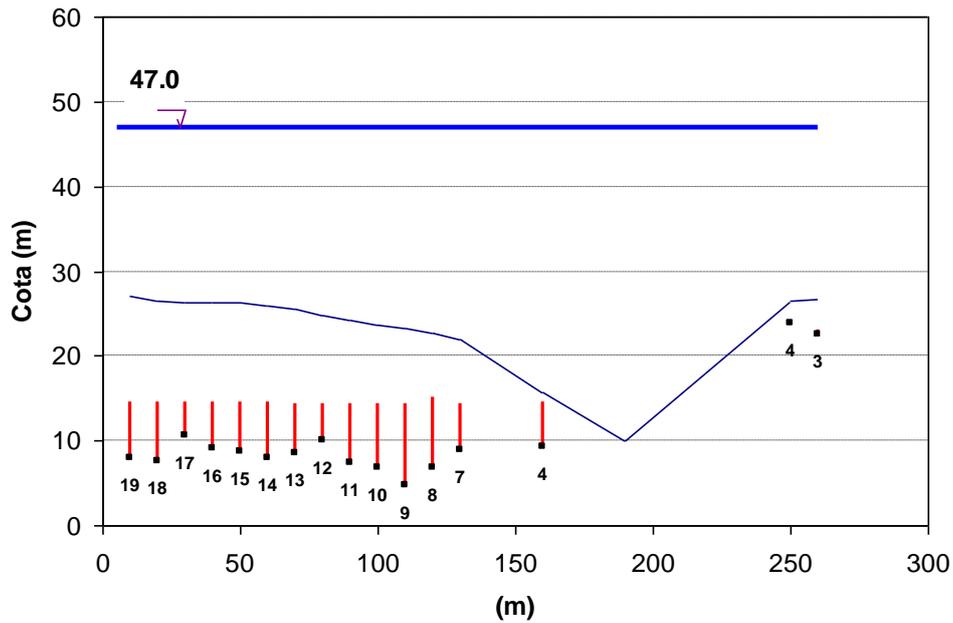


Fig 17. Previsão do nível de água nos poços de alívio quando o NAA = NPA

## 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 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 piezométrico até à superfície da água no seu interior. Neste caso, o cálculo consiste em deduzir a 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, 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:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \beta_3 x_2 + \dots + \beta_{n+1} x_n \quad (13)$$

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, tem 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. 18 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.

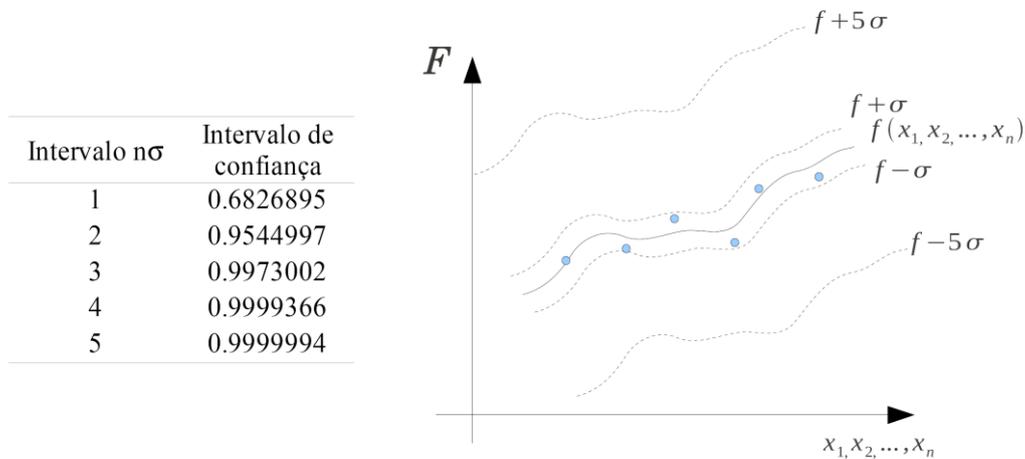


Fig 18. Intervalos de confiança em torno dos modelos de comportamento

Por outro lado, 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 dos Pequenos Libombos estabeleceram-se os critérios de atenção e alarme que se resumem no Quadro 11.

Quadro 11 – Níveis de atenção e alerta em função do desvio aos modelos

Nível	Definição	Descrição	Acção 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.	<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>

## **7. CONCLUSÕES**

Em resultado da análise do comportamento da barragem dos Pequenos Libombos é possível inferir sobre o bom comportamento geral da obra. Com efeito, apesar de haver algumas lacunas na informação resultante da observação instrumental, não existem indícios de fenómenos lesivos da segurança, para as condições de exploração actuais.

No que respeita a deformações a barragem não apresenta quaisquer indícios de deformação excessiva generalizada ou localizada. Todas as deformações detectadas visualmente podem ser consideradas normais, tendo em consideração a idade da barragem. Os resultados da observação inclinométrica, no que respeita às deformações verificadas desde 2004, corroboram estas conclusões.

No que respeita à piezometria no corpo da barragem e respectiva fundação, de acordo com a análise efectuada, não se detectou nenhum indício que possa ser considerado preocupante no que respeita à segurança da barragem. Assinala-se apenas que o sistema de drenagem da fundação do descarregador deverá ser alvo de operações de manutenção. A diminuição dos caudais recolhidos pelo sistema parece indicar que se encontra em desenvolvimento um processo de colmatção da drenagem, com os inconvenientes que daí derivam, nomeadamente o aumento das subpressões.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

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

LNEC. Barragem dos Pequenos Libombos. Avaliação da Segurança em Novembro de 2004 e Revisão do Plano de Observação. Relatório 459/2005, DG/NBOA Proc. Int. 0502/541/221; DB/NO Proc. 0403/001/14990; 2005

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

Normas de Observação e Inspecção de Barragens (NOIB), aprovadas pela portaria nº 847/93, de 10 de Setembro de 1993.