

MODELOS DE COMPORTAMENTO DA BARRAGEM DE CORUMANA EM MOÇAMBIQUE

BEHAVIOR MODELS FOR CORUMANA DAM IN MOZAMBIQUE

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

RESUMO

A barragem da Corumana é uma barragem de 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 interior do aterro e fundação e precipitação atmosférica. Após a apresentação e validação dos resultados do sistema de observação, que serviram de base à modelação matemática (estatística) 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 adotar na exploração futura.

ABSTRACT

Corumana dam is a zoned embankment dam, which has an monitoring system in operation for nearly 20 years. The devices of this system allow measuring the following quantities: water level in the reservoir, surface displacements, internal displacements, seepage flow, piezometric levels in the dam and foundation and rainfall. After the presentation and validation of the results of the monitoring system, which formed the basis for mathematical modeling of the behaviour of the work describes the application of statistical models to these results. The models obtained are then used to predict the behaviour of the dam in various scenarios and to establish criteria for attention and alert to adopt in the future.

1 - DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

O aproveitamento hidráulico da Corumana fica situado no rio Sabié, na Província de Maputo, a cerca de 16 km da povoação de Sabié. A construção da barragem decorreu de 1983 a 1989.

O aproveitamento da Corumana, embora de fins múltiplos, destina-se essencialmente à regularização dos caudais do rio Sabié para a sua utilização, quer na rega por gravidade dos terrenos imediatamente a jusante da barragem, no vale do Sabié, quer no reforço dos caudais de estiagem para rega de terrenos no médio e baixo Incomáti. Para além disso, o aproveitamento inclui uma central hidroelétrica. Com a construção da barragem conseguiu-se uma redução sensível das pontas das cheias excecionais no Sabié, a jusante do aproveitamento (HP, 1981).

A albufeira tem uma capacidade máxima de armazenamento de 1350 hm³ e a área inundada, ao nível do NPA, é de 90 km². A bacia hidrográfica é de 6750 km².

Trata-se de uma estrutura mista de aterro e betão, constituída por um descarregador de cheias à direita da zona central (em betão) e por dois trechos em aterro, localizados nas zonas laterais, constituídas por um perfil zonado (Figura 1). O aterro lateral esquerdo é designado por "Barragem", e o aterro lateral direito por "Dique Lateral".

A barragem tem uma altura máxima acima da fundação de cerca de 46 m e um comprimento no coroamento de 3048 m (Barragem e Dique Lateral, incluindo o descarregador). O coroamento, com 8 m de largura, está à cota 122,50 m. O nível de pleno armazenamento (NPA) e o nível de máxima cheia (NMC) estão às cotas 117,00 e 120,00 m, respetivamente (Figura 2).

A inclinação do paramento de montante é de 1V/2,5H até à cota 96,00 m e 1V/2,75H para cotas superiores. A inclinação do paramento de jusante é também variável de 1V/2,25H até à cota 106,50 m e 1V/2,50H para cotas superiores. Este paramento tem 2 banquetas às cotas 106,50 e 91,50 m, com uma largura de 4,00 m.

O descarregador de cheias está limitado por dois muros de ala (Figura 3), e é formado por uma soleira descarregadora, com crista à cota 111,0 m, onde se previa a instalação de 6 comportas de segmento automáticas (fechadas para NAA < 117,00; totalmente abertas para NAA > 117,50) em posição frontal; canal de descarga retangular e convergente, terminando numa bacia de dissipação de energia. As comportas ainda não estão instaladas.

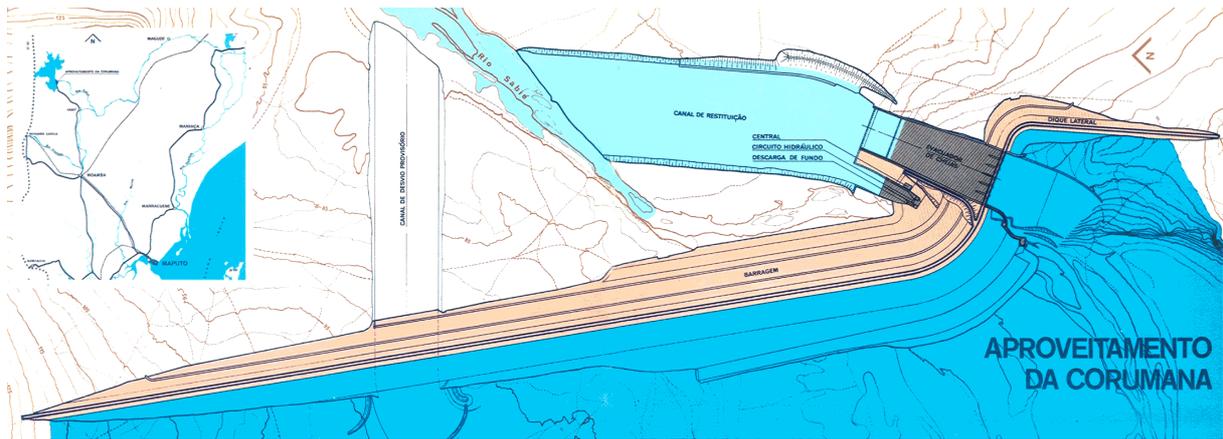


Figura 1 - Planta da barragem da Corumana (HP, 1981)

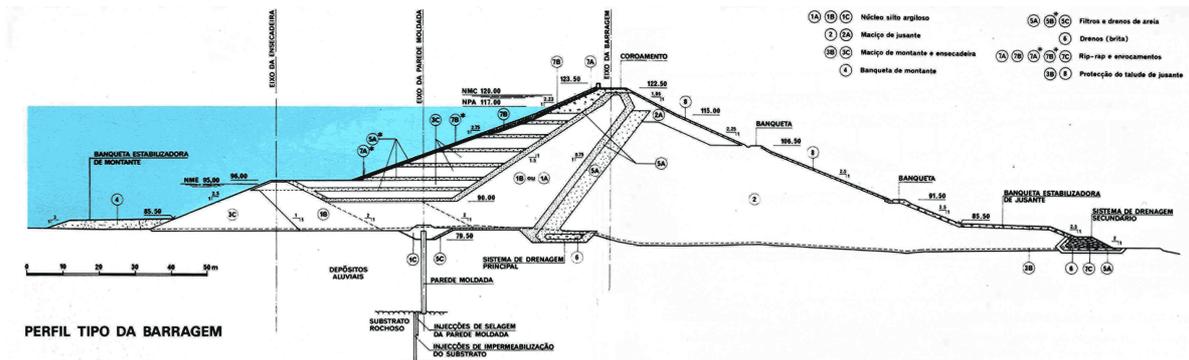


Figura 2 - Perfil transversal-tipo dos trechos em aterro da barragem (HP, 1981)



Figura 3 - Vista de montante da barragem da Corumana

O desenvolvimento útil da soleira é de 108 m (6x18m). O descarregador foi dimensionado para uma cheia máxima de 10 800 m³/s a que corresponde um caudal amortecido de 6 300 m³/s e uma altura máxima de água de 9,0 m, para o NMC.

A descarga de fundo e tomada de água estão implantadas à esquerda do descarregador. A primeira é constituída por torre e conduta, com 7,50 m de diâmetro e 240 m de desenvolvimento (conduta 1 do desvio provisório) com comporta vagão a montante e comportas a jusante. A sua capacidade máxima, ao NPA, é de 620 m³/s. A segunda é idêntica à primeira na sua constituição (torre e conduta com 7,50 m de diâmetro e 240 m de desenvolvimento - conduta 2 do desvio provisório), mas dotada de comporta vagão a montante e 2 válvulas de borboleta a jusante. A jusante desta conduta está instalado o ramal de alimentação para a central, uma válvula reguladora do caudal com capacidade de escoar, no total, 20 m³/s para o rio, uma derivação para a rega por gravidade que se bifurca para duas condutas, uma para a margem esquerda e outra para a margem direita, ambas equipadas a montante com válvula de borboleta.

A central, fundada numa plataforma rochosa situada entre as condutas e o descarregador de cheias, é equipada com 2 turbinas Kaplan de eixos verticais com 8,2 MW de potência instalada cada uma, para uma queda útil de cerca de 36 m.

2 - SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

2.1 - Verificação do dimensionamento

A fim de facilitar o dimensionamento dos sistemas de observação, as Normas de Observação e Inspeção de Barragens da regulamentação portuguesa - NOIB (1993) propõem uma abordagem sistematizada para a quantificação dos aspetos 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 da Corumana, 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 (α_g) é necessário determinar diversos índices parciais (α_i) correspondentes aos diversos fatores de risco. 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: fatores exteriores ou ambientais; fiabilidade da obra; fatores humanos e económicos.

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

A adoção dos índices (α_i) associados a cada um dos descritores é justificada de seguida:

Fatores exteriores ou ambientais (E=2,2):

$\alpha_1 = 2$ - aceleração sísmica máxima de projeto de 0,05 g para um período de retorno de 1000 anos;

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

$\alpha_3 = 4$ - média probabilidade de cheias superiores à de projeto;

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

$\alpha_5 = 2$ - fracas ações 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.

Fatores humanos e económicos (R=4,5):

$\alpha_{10} = 5$ - volume da albufeira de $1\,350 \times 10^6 \text{ m}^3$;

$\alpha_{11} = 4$ - 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 19,8.

2.2 - 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 α_g e parcial α_1 (sismicidade), e do descritor associado aos fatores humanos e económicos (R), tal como se apresenta no Quadro 1, onde se encontram assinaladas a sombreado as grandezas a observar na barragem da Corumana (mínimo recomendável).

Para uma altura da barragem de 46 m, $\alpha_g=19,8$ 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.

A barragem da Corumana 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.

Quadro 1 - Fatores das condições de risco e grandezas mínimas obrigatórias

	ASSOCIADOS A FACTORES EXTERIORES OU AMBIENTAIS (E)						ASSOCIADOS BARRAGEM - FIABILIDADE (F)				ASSOCIADOS A FACTORES HUMANOS E ECONÓMICOS (R)	
	Sismicidade (1 000 anos)	Escorregamento taludes (probabilidade)	Cheias superiores a projeto (probabilidade)	Gestão da albufeira	Ações agressivas (Clima, água, etc)	Dimensio-namento estrutural	Fundações	Órgãos de descarga	Manutenção	Volume da albufeira (m³)	Instalações a jusante	
α_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$\alpha=1$	Mínima ou nula a <0,05g	Mínima ou nula	Muito baixa (barragens e betão)	Plurianual, anual ou sazonal	Mínimas	Adequado	Muito boas	Fiáveis	Muito boa	< 10 ⁵	Zona não habitada sem valor económico	
$\alpha=2$	Baixa 0,05 g < a < 0,1 g	Baixa	---	---	Fracas	---	Boas	---	Boa	10 ⁵ - 10 ⁶	Áreas isoladas, agricultura	
$\alpha=3$	Média 0,1 g < a < 0,2 g	---	Muito baixa (barragens de aterro)	Semanal	Médias	Aceitável	Aceitáveis	---	Satisfatória	10 ⁶ - 10 ⁷	Pequenos aglomerados populacionais, agricultura, indústria artesanal	
$\alpha=4$	Forte 0,2 g < a < 0,4 g	---	---	Diária	Fortes	---	---	---	---	10 ⁷ - 10 ⁹	Aglomerados populacio-nais médios, pequenas indústrias	
$\alpha=5$	a > 0,4 g	---	---	Bombagem	Muito fortes	---	Mediôcres	---	---	> 10 ⁹	Grandes aglomerados populacionais, indústrias, instalações nucleares	
$\alpha=6$ (a)	---	Grande	Elevada	---	---	Inadequado	Mediôcres a más	Insuficientes não operacionais	Insatisfatórias	---	---	

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 ≥ 3	X se $\alpha_g > 10$ ou R ≥ 3	-	-	X se $\alpha_g > 9$ com $\alpha_1 = 5$
15 a 30	X se $\alpha_g > 10$ ou R ≥ 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 ≥ 3	X	X se $\alpha_1 \geq 4$	X Se R ≥ 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

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 deteção, quando possível, é feita, quer de forma direta, através da medição de caudais, quer de forma indireta, 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. Além disso, visualmente, não se deteta a existência de qualquer deformação anormal, global ou localizada.

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 ação de sismos. Outras possibilidades são as de ocorrência de cheias superiores às de projeto 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 da Corumana, considera-se adequada a medição das grandezas preconizadas nas NOIB, anteriormente referidas.

2.3 - ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE DO SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

O sistema de observação inicialmente instalado na barragem de Corumana, na sequência da construção, compreendia 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 ISP e assistímetros ASM;
- d) das pressões intersticiais que se desenvolvem no corpo da barragem e na fundação (através de piezómetros electro-pneumáticos - PEP e piezómetros de tubo aberto - PTA e FP)
- e) das subpressões nos muros guia da descarga de fundo (DV);
- f) das tensões totais (verticais) através de células electro-pneumáticas (CEP), e;
- g) 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. Acresce, a medição dos caudais que são captados no "pântano", zona situada a jusante da barragem onde se verifica o aparecimento de água com alguma expressão.

Tendo em consideração a constituição do sistema de observação inicial, conclui-se pela sua adequação às características próprias da obra e respetivo risco potencial induzido, sem qualquer lacuna relativamente às grandezas cuja medição se referiu como necessária pela aplicação das NOIB.

O sistema de medição de movimentos superficiais dos aterros e descarregador, constituído por 93 marcas superficiais e respetivos pontos de referência encontra-se inoperacional, não se procedendo a leituras.

Os piezómetros de tubo aberto, 42 no total (incluindo os designados na obra como furos piezométricos, FP), estão distribuídos por diversos perfis de observação. Alguns destes dispositivos foram instalados após a construção (em 1991). Em relação aos PTA, os instalados a montante não têm sido alvo de leituras pois a sonda disponível é mais larga que o diâmetro do tubo. Em relação aos PTA instalados a jusante, alguns, também não se conseguem ler, devido a dificuldades de passagem da sonda. Os restantes registam níveis de água na fundação. Em relação aos Furos Piezométricos, a maior parte deles encontra-se fora de serviço, devido a obstruções.

Os 53 piezómetros electro-pneumáticos, que se encontram distribuídos por 6 perfis de observação, forneceram todas leituras de pressão, mas um número significativo (13) não fornece leitura eléctrica. Das leituras disponíveis, embora algumas correspondam a cotas de água verosímeis, noutras obtêm-se resultados que indiciam poder estar avariadas.

As 10 células electro-pneumáticas de tensão total, que se encontram distribuídas por 5 perfis de observação, forneceram todas leituras de pressão, mas 4 não fornecem leitura eléctrica.

Os 10 tubos de assistímetro estão distribuídos por 6 perfis de observação, estando 2 abandonados pelo facto de se encontrarem instalados na enseadeira de montante, submersos. Estando a sonda magnética avariada, não foi possível proceder ao levantamento do estado de operacionalidade dos restantes dispositivos.

Os 7 tubos inclinométricos estão distribuídos por 3 perfis de observação. Também neste caso, estando a sonda inclinométrica avariada, não foi possível proceder ao levantamento do respetivo estado de operacionalidade.

Os medidores de caudal a jusante, 7 no total, encontram-se distribuídos da seguinte forma: 2 no pântano da margem esquerda, e 5 imediatamente a jusante da barragem (3) e dique lateral (2). Os medidores de caudais do pântano são em bica e encontram-se operacionais. Localizam-se a jusante da barragem e recolhem águas da margem esquerda. Os caudais são expressivos pelo que é de ponderar a instalação de soluções do tipo descarregador, pois a medição indireta através de volume não se afigura suficientemente exata. Os medidores de caudal imediatamente a jusante da barragem estão operacionais.

As escalas limnimétricas estão instaladas, a montante no descarregador de cheias, e a jusante na margem do rio.

2.4 - Análise da variação do NAA e volume armazenado

O resumo das variações registadas no Nível de Água na Albufeira da Corumana, desde 1989, ano de início da exploração, está ilustrado no Quadro 2. A representação dos valores diários do NAA e respetivas variações encontra-se na Figura 4. A albufeira, em exploração há cerca de 21 anos, atingiu o nível máximo no ano de 2000. À parte dessa data a albufeira encontra-se em geral com o NAA inferior à cota 110 m, cota da soleira do descarregador de cheias. Este valor foi ultrapassado em 4 ocasiões: 1996, 2000, 2007 e 2009.

Quadro 2 - Resumo das cotas, variações do NAA e volumes armazenados na albufeira

Ano	Cota máxima (m)	Cota mínima (m)	Varição máxima (m)	Varição + (m/dia)	Varição - (m/dia)	Início ano (m)	Fim ano (m)	Varição no ano (m)	Volume início (Mm3)	Volume fim (Mm3)	Var. volume (Mm3)	Nº leituras anuais	Intervalo médio (dias)
1989	96.95	87.54	9.41	1.33	-0.74	87.67	96.95	9.28	28.32	189.20	160.88	365	1
1990	102.89	96.12	6.77	1.67	-1.65	97.01	102.87	5.86	190.85	396.14	205.29	365	1
1991	106.72	102.89	3.83	0.75	-0.80	102.89	103.46	0.57	397.00	421.90	24.91	365	1
1992	103.47	98.96	4.51	0.68	-0.52	103.46	101.1	-2.36	421.90	324.63	-97.27	366	1
1993	106.63	101.2	5.43	1.99	-1.51	101.2	104.4	3.2	328.44	465.00	136.56	365	1
1994	105.24	101.27	3.97	0.24	-0.26	104.53	101.27	-3.26	471.16	331.13	-140.03	365	1
1995	101.6	98.55	3.05	0.54	-0.04	101.26	100.71	-0.55	330.74	310.01	-20.73	365	1
1996	112.18	100.79	11.39	2.25	-2.29	100.79	102.59	1.8	312.98	384.25	71.27	366	1
1997	103.61	99.99	3.62	0.24	-0.15	102.55	101.6	-0.95	382.57	343.96	-38.61	365	1
1998	106.48	100.83	5.65	0.41	-0.24	101.6	105.29	3.69	343.96	508.17	164.21	365	1
1999	109.9	105.42	4.48	0.99	-1	105.42	106.05	0.63	514.67	546.89	32.22	365	1
2000	115.44	104.77	10.67	5	-0.65	106.14	105.15	-0.99	551.59	501.22	-50.36	366	1
2001	110.24	105.24	5	0.34	-0.15	105.24	109.28	4.04	505.68	731.23	225.55	365	1
2002	108.67	105.69	2.98	0.24	-0.17	109.12	105.88	-3.24	721.32	538.08	-183.25	365	1
2003	105.84	101.24	4.6	0.05	-0.03	105.88	101.24	-4.64	538.08	329.97	-208.10	365	1
2004	107.48	101.11	6.37	0.53	-0.09	101.23	105.27	4.04	329.59	507.17	177.58	366	1
2005	105.29	101.75	3.54	0.05	-0.04	105.25	101.79	-3.46	506.18	351.49	-154.69	365	1
2006	111.83	101.8	10.03	1.19	-0.09	101.8	104.79	2.99	351.89	483.63	131.75	365	1
2007	105.04	100.76	4.28	0.31	-0.05	104.79	102.9	-1.89	483.63	397.42	-86.21	365	1
2008	105.06	102.23	2.83	0.33	-0.14	102.94	103.22	0.28	399.14	411.30	12.16	366	1
2009	111.14	103.35	7.79	0.89	-0.77	103.35	107.15	3.8	417.03	606.02	188.99	365	1
Máximo	115.44	105.69	11.39	5	-0.03	109.12	109.28	9.28	721.32	731.23	225.55		
Mínimo	96.95	87.54	2.83	0.05	-2.29	87.67	96.95	-4.64	28.32	189.20	-208.10		

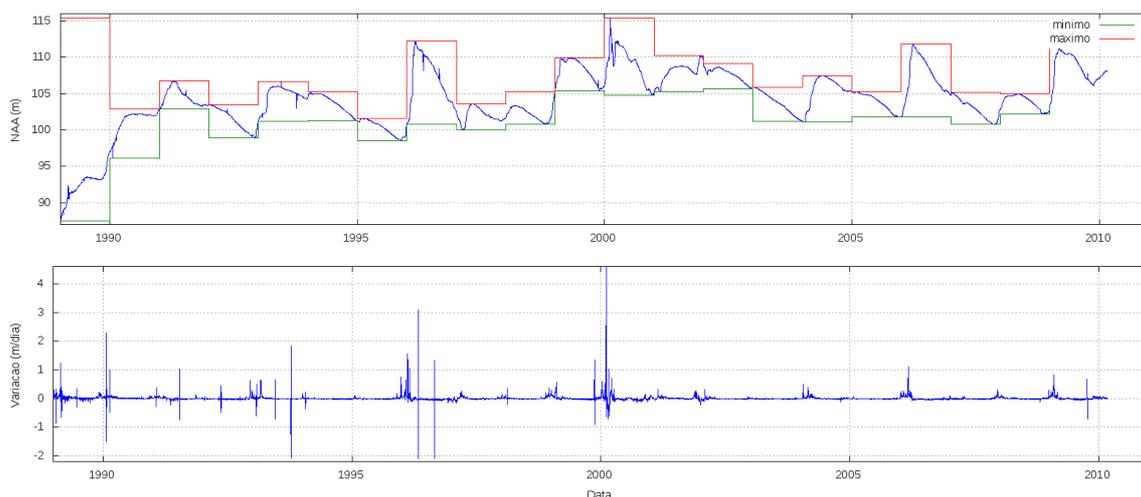


Figura 4 - Variação do NAA de 1989 a final de 2009

As variações diárias do NAA são, em geral, modestas, o que é justificado pela capacidade da albufeira. A variação diária média é de apenas 3 cm. No entanto, têm ocorrido alguns picos de variação que, regra geral, não ultrapassam +1,5 m/dia ou -0,75 m/dia. O valor mais elevado de variação do NAA ocorreu a 8 de Fevereiro de 2000, com uma subida de 5 m do NAA, por ocasião de um período de cheia. A máxima variação positiva de nível do início para o fim de um ano foi de 9,28 m, atingidos no início da exploração (1989). A maior descida num mesmo período ocorreu em 2003, com -4.64 m. Todos estes valores e outros relacionados com a exploração da albufeira encontram-se resumidos no Quadro 2.

3 - MODELOS DE COMPORTAMENTO

3.1 - Piezómetros de tubo aberto - PTA

Os piezómetros de tubo aberto PTA encontram-se instalados junto ao pé de talude em 3 perfis transversais da barragem.

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

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

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad [1]$$

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{Aj} \quad [2]$$

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} + \beta_3 N_{Aj} \quad [3]$$

$$P = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 N_{Aj} \quad [4]$$

Verificou-se que alguns dos valores presentes nos dados usados disponíveis parecem apresentar algum erro. Esses erros podem ser provenientes de incorreto procedimento de leitura, ser originados no processo de registo, no processo de transposição dos dados dos boletins de registo para o computador ou a deficiências dos equipamentos de leitura. Por serem em número reduzido e ocorrerem de forma aleatória, não se atribui a esses valores relevância, tendo-se apenas procurado retirá-los das séries de dados antes da aplicação dos modelos.

Sem prejuízo da utilização de algoritmos mais elaborados, dada a ordem de grandeza e a gama de variação dos valores em causa, considerou-se ser suficiente um filtro que elimina todas as leituras que excedem um desvio padrão da linha de média móvel dos dados de cada aparelho.

A média móvel é calculada através de:

$$P_{\text{filtrado}}(i) = \begin{cases} P_{\text{filtrado}}(i) = P(i) & \text{se } i < n_f \text{ ou } i > n_{\text{tot}} - n_f \\ \sum_{j=i-\frac{n_f}{2}}^{j=i+\frac{n_f}{2}} P(j) & \\ P(i)_{\text{filtrado}} = \frac{\sum_{j=i-\frac{n_f}{2}}^{j=i+\frac{n_f}{2}} P(j)}{n_f} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [5]$$

Considerou-se um filtro de média móvel de 8 pontos ($n_f = 8$), apresentando-se na Figura 5 um exemplo dos dados originais e dos dados filtrados. O filtro elimina todas as leituras fora da banda [-desvio, +desvio].

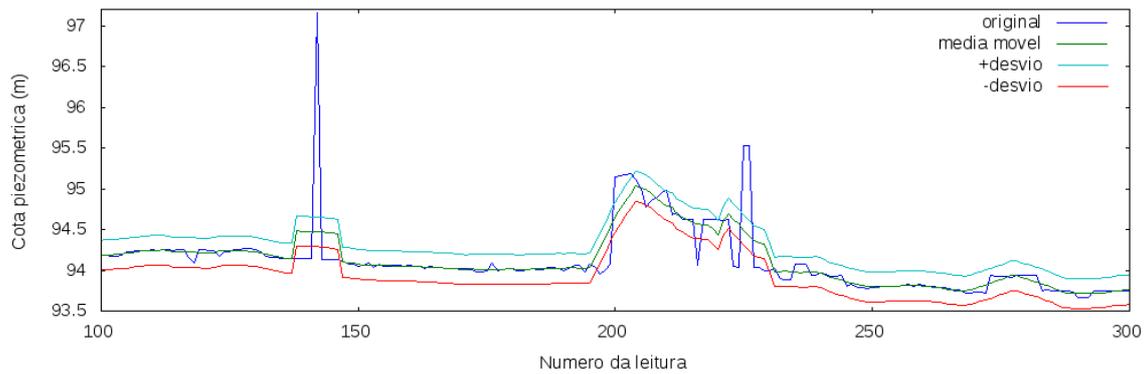


Figura 5 - Exemplo de funcionamento do filtro

Dos ajustes efetuados para os PTAs foi possível concluir que a pressão exibida pelos piezômetros depende essencialmente do nível de água a jusante (N_{AJ}), muito embora também exista alguma influência do de montante (N_{AA}). Assim, o modelo que melhor descreve o andamento da pressão dos piezômetros é do tipo da expressão [3]. Em geral os coeficientes de correlação são superiores a 0,85. No Quadro 5 apresentam-se os parâmetros desses ajustes. A título de exemplo, na Figura 6 ilustra-se o diagrama do ajuste para o PTA09.

Foi ainda possível verificar que a contribuição das variações do nível de água a montante é pequena (no modelo que apenas considera esta variável, o coeficiente de correlação - R^2 - é reduzido, em geral entre 0,3 e 0,4). No entanto, a sua consideração melhora um pouco o ajuste, o que indica haver, apesar de tudo, uma pequena contribuição do NAA na carga exibida pelos piezômetros. De salientar no diagrama da Figura 6 a falta de continuidade que, por vezes ocorre nos dados. Estas lacunas devem-se, por vezes, a problemas com a leitura dos níveis de jusante enquanto que noutras vezes, se ficam a dever a problemas com a leitura dos próprios piezômetros, por exemplo, por avaria nas sondas.

Quadro 3 - Parâmetros de ajuste dos PTAs para a expressão [3]

Nome	β_1	β_2	β_3	R^2
PTA02	16.80	0.0224	0.7484	0.88
PTA03	14.92	0.0264	0.7704	0.91
PTA04	18.65	0.0195	0.7273	0.88
PTA05	18.85	0.0210	0.7227	0.87
PTA07	21.61	0.0404	0.6915	0.87
PTA08	20.66	0.0401	0.7043	0.87
PTA09	18.02	0.0312	0.7220	0.89
PTA11	24.70	0.0104	0.6657	0.87
PTA12	47.78	0.0371	0.3212	0.60
PTA13	21.94	0.0189	0.6860	0.85
PTA14	16.70	0.0284	0.7420	0.83
PTA15	-13.59	-0.5624	2.3844	0.84
PTA16	92.82	0.1299	-0.0404	0.26
PTA17	136.96	0.1910	-0.6071	0.56
PTA18	-158.26	-0.1497	3.6390	0.43
PTA19	100.71	0.0528	-0.0493	0.83
PTA20	67.51	0.1298	0.0221	0.85
PTA21	66.51	0.0654	0.1844	0.63

Nome	β_1	β_2	β_3	R ²
PTA22	84.40	0.0562	-0.0423	0.29
PTA23	79.01	0.1100	0.0487	0.88

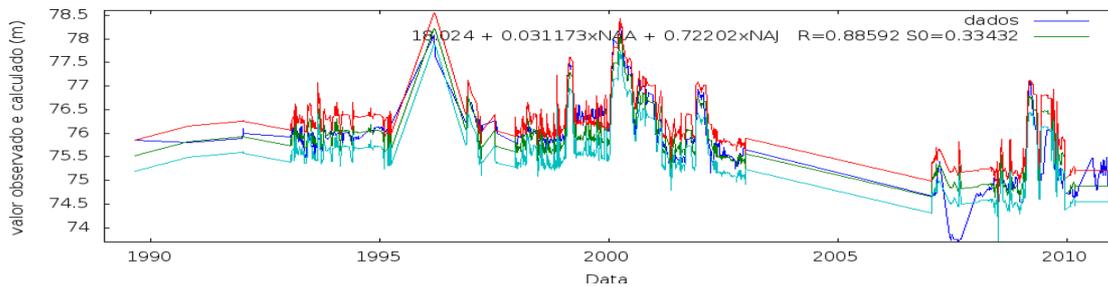


Figura 6 - Diagrama de ajuste da expressão (3) ao PTA09

3.2 - Medidor de caudais no pântano

A jusante da barragem da Corumana, na margem esquerda, existe uma zona alagada designada por "Pântano" onde ocorre água que se considera estar associada, à albufeira da barragem. Atendendo à forma como são recolhidos e medidos os caudais, concluiu-se que parte das aflúências se poderão dever às águas superficiais coletadas à superfície. Assim, nos modelos estatísticos é necessário considerar as duas variáveis independentes: Nível de Água na Albufeira (NAA) e Pluviosidade (P_N).

No que respeita à pluviosidade, o seu efeito deve ser contabilizado de forma a incluir as precipitações de um intervalo de tempo anterior à medição. Com efeito, é razoável admitir que a chuva que tenha caído nos dias anteriores à medição venha a influenciar o valor do caudal. Como não é conhecido o tempo necessário para que se dê a drenagem das águas que são coletadas no medidor, foram testados diversos intervalos de tempo de 1 a 60 dias. Os valores mais elevados são manifestamente altos, mas a sua consideração visa contabilizar também a eventual influência da drenagem das águas vindas do Monte Corumana, localizado na margem esquerda da barragem. Atendendo à distância em causa, admitiu-se que o intervalo de tempo pudesse ser elevado.

Foram consideradas as seguintes equações nos ajustes efetuados (em que os β_i são constantes a determinar, Q o caudal, N_{dias} o número de dias desde uma data arbitrária e P_N a precipitação acumulada em "N" dias - 1 a 60 dias):

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad [6]$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 P_N \quad [7]$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 P_N \quad [8]$$

Nos ajustes efetuados, muito embora a qualidade geral não seja a ideal (coeficientes de determinação - R - baixos, da ordem de 0,6), é possível verificar que a maior dependência do caudal recolhido no medidor está relacionada com o NAA. A dependência da pluviosidade, embora existente, é fraca e pouco dependente do número de dias considerados na acumulação da pluviosidade. Em todo o caso, o melhor ajuste corresponde a um período relativamente alargado de dias de precipitação acumulada. Porém, nesse caso, o coeficiente que afeta o termo da pluviosidade é negativo e, portanto, desprovido de significado físico. Considerando apenas os valores de β_4 positivos, o melhor ajuste corresponde a cerca de 10 dias de pluviosidade acumulada. No entanto, como se referiu, a variação é insignificante sendo, porventura, excessivo retirar conclusões deste tipo.

Cabe aqui referir, que a qualidade do ajuste é fortemente condicionada pela qualidade dos dados usados na sua formulação. Ora no caso do medidor dos caudais do pântano, a determinação do valor do caudal é feita pelo enchimento de um volume de 10 l numa bica para onde são encaminhadas as aflúências e ressurgências da zona. Os caudais medidos são, por vezes, elevados, superiores a 10 l/s. Isso implica que o enchimento do recipiente é feito num segundo, ou menos. Assim os dados superiores a 10 l/s vêm afetados de um erro de leitura considerável. Por este motivo, nos ajustes efetuados decidiu-se não considerar os valores superiores a 15 l/s. Este facto alertou para a importância de se alterar o sistema de medição dos caudais do pântano, tendo-se sugerido a instalação de um medidor em descarregador de soleira delgada que permite uma leitura mais simples e muito mais fiável.

Em termos práticos, e enquanto não se proceder a ajustes no sistema de medição, pode-se considerar que os caudais no pântano podem ser estimados através de:

$$Q = -38,507605 + 0,000015 N_{dias} + 0,394201 N_{AA} + 0,002156 P_N \quad [9]$$

Na Figura 7 ilustra-se o diagrama deste ajuste para os caudais no pântano.

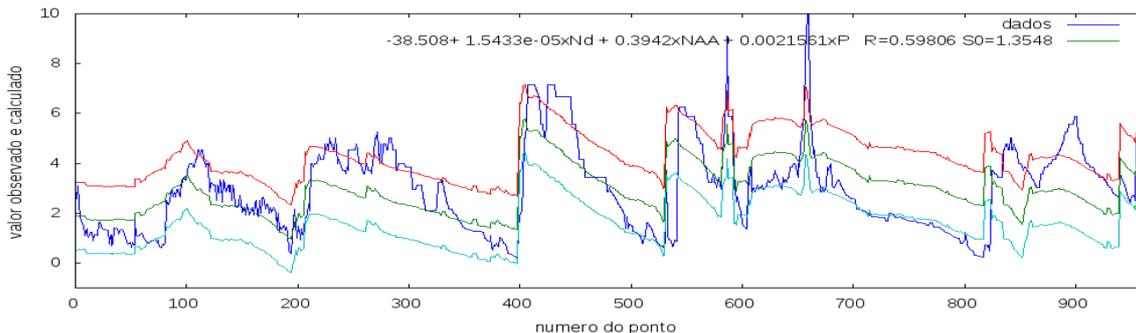


Figura 7 - Diagrama de ajuste da expressão (8) aos caudais no pântano (P10) - expressão (9)

3.3 - Câmaras de medição de caudais

Como se referiu, a jusante da barragem encontram-se instaladas 5 câmaras de medição dos caudais. Uma das câmaras (CQ09) nunca debitou caudal. Essas câmaras concentram as aflúncias provenientes do sistema drenante, permitindo a sua medição. Também neste caso é vantajoso procurar averiguar as eventuais relações entre o caudal captado nas câmaras e o NAA, eventualmente o NAJ, e a pluviosidade.

Analisando os dados disponíveis foi possível verificar que os caudais medidos em cada câmara não apresentam uma variação "contínua", isto é, na verdade, os caudais são registados em "degraus". De facto, os operadores registam, nas datas estabelecidas, o valor do nível de água na régua de medição de cada câmara. Esses valores são medidos com uma resolução de apenas 1 cm. Assim, os valores registados apresentam sempre a variação em patamares. Já os modelos usados, uma vez que dependem linearmente de variáveis com variação praticamente contínua, apresentam-se com um andamento correspondente, isto é, linear em cada uma das variáveis. A Figura 8 ilustra a diferença referida.

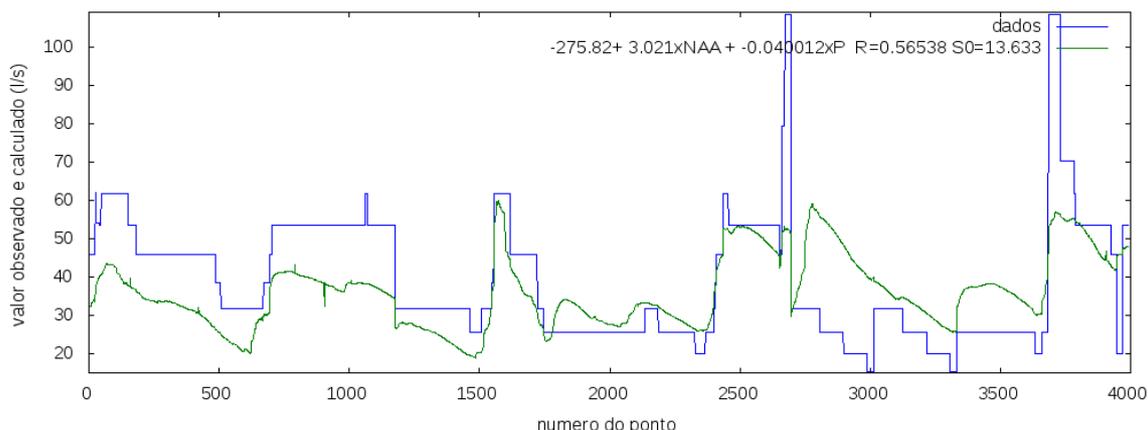


Figura 8 - Exemplo de comparação das leituras de caudais com o modelo linear no NAA e na Pluviosidade

Apesar desta importante limitação, procurou-se relacionar as variáveis em jogo através do mesmo tipo de modelos que se usou anteriormente. As expressões testadas foram:

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} + \beta_3 N_{AJ} \quad [10]$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} + \beta_3 P_N \quad [11]$$

$$Q = \beta_1 + \beta_2 N_{dias} + \beta_3 N_{AA} + \beta_4 P_N \quad [12]$$

À semelhança do que se considerou para os caudais medidos no pântano, admitiu-se que poderia ser necessário considerar a pluviosidade não apenas do dia da leitura mas também dos dias anteriores. Atendendo à configuração do sistema de drenagem, que apenas marginalmente será afetado pela pluviosidade, considerou-se que apenas seria necessário considerar a pluviosidade acumulada de 1, 2 ou 4 dias. Testadas as três hipóteses, verificou-se que a consideração de apenas 2 dias conduzia a resultados melhores, muito embora, apenas por questões meramente algébricas, uma vez que o coeficiente que afeta o termo da pluviosidade é negativo. Na prática tal significa que esta variável não tem qualquer influência no valor do caudal medido, confirmando a independência do sistema de drenagem interna (e respetiva medição) relativamente à pluviosidade.

Em termos práticos, pode-se considerar que os caudais afluentes às câmaras de medição de caudais da barragem podem ser estimados através da expressão [12], com os parâmetros apresentados no Quadro 4. Na Figura 9 ilustra-se o diagrama deste ajuste para a câmara CQ03.

Quadro 4 - Parâmetros de ajuste das câmaras de medição de caudais para a expressão [12]

Nome	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R ²
CQ01	-709.66	-0.0023	3.6040	5.04	-0.01534	0.761
CQ02	-13.42	0.0001	0.0349	0.16	-0.00219	0.488
CQ03	-23.71	-0.0003	0.1197	0.19	-0.00022	0.869
CQ10	10.96	0.0000	-0.0023	0.02	0.04235	0.059

A qualidade dos ajustes é bastante diversa, conforme se pode deduzir da análise dos valores do coeficiente de correlação apresentados no Quadro 4. O ajuste é adequado para as câmaras CQ01 e CQ03. Para as restantes câmaras, o modelo, embora numericamente possível, não é verosímil.

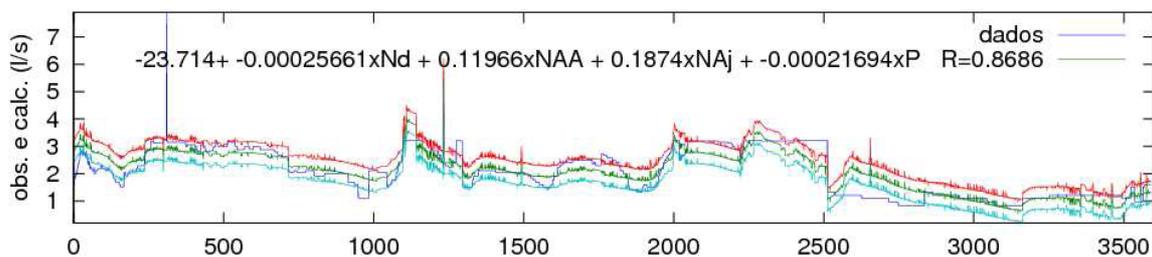


Figura 9 - Diagrama de ajuste da expressão [12] para os caudais da câmara CQ03

4 - PREVISÃO DE COMPORTAMENTO DA OBRA

4.1 - Exploração dos modelos de previsão

Com base nos modelos estabelecidos é possível estimar o comportamento da piezometria na zona do pé de talude da barragem. Com efeito, admitindo que não se processa uma variação substancial do comportamento da fundação, o que poderá, eventualmente, acontecer para gradientes muito elevados, pode-se prever o funcionamento da fundação.

A Figura 10 ilustra a situação registada para os níveis mais baixos da albufeira, com o NAA à cota 110 m (NAJ = 75 m). Nestes condições está garantida a segurança da barragem. As subpressões mantêm-se confortavelmente abaixo da superfície do terreno o que, desse ponto de vista, corresponde a um comportamento satisfatório.

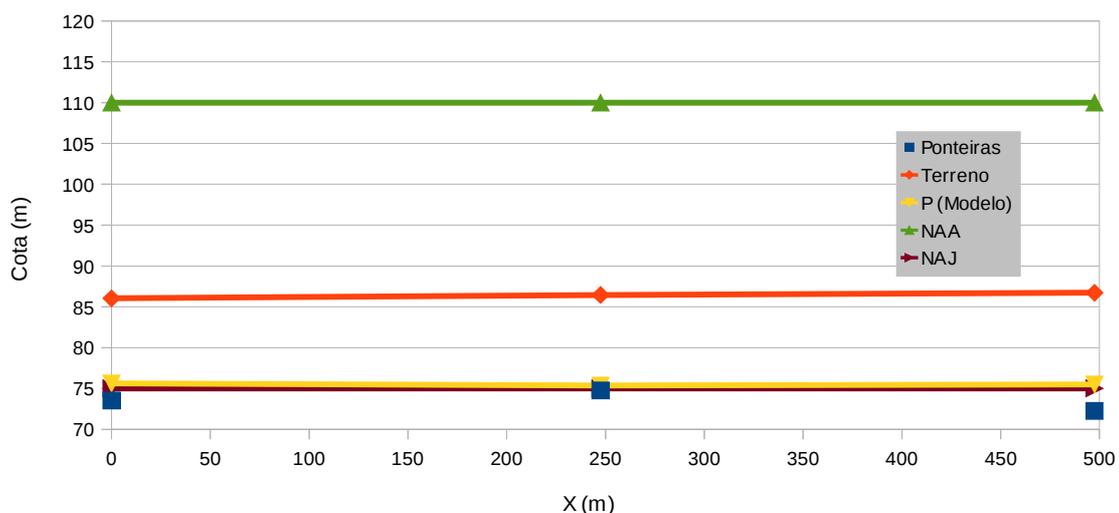


Figura 10 - Previsão das pressões na fundação da barragem quando o NAA = 110 m

Na Figura 11 ilustra-se a previsão para a situação correspondente ao NPA (NAA = 117 m, NAJ = 81 m). Nestes condições continua a estar de igual forma, garantida a segurança da barragem.

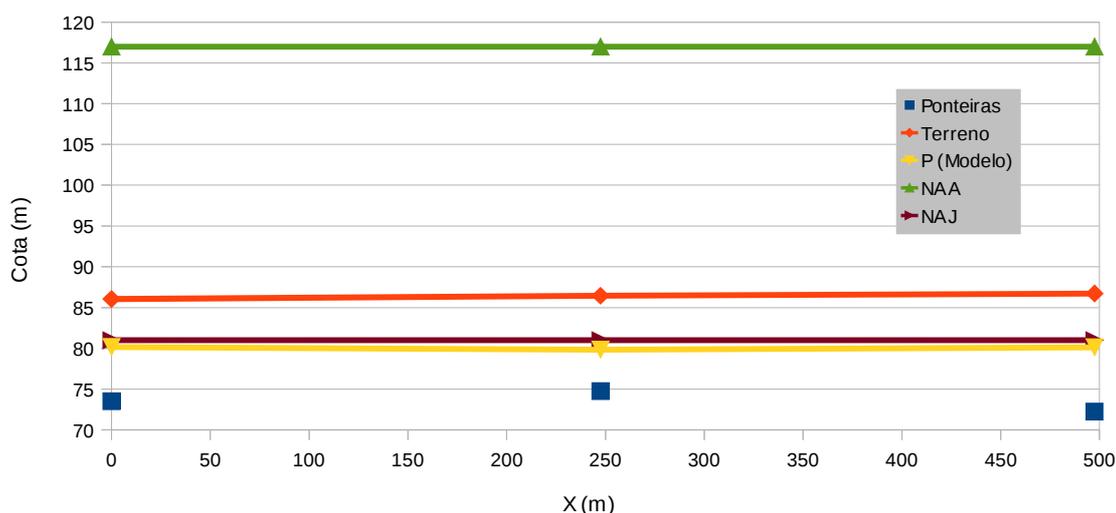


Figura 11 - Previsão das pressões na fundação da barragem quando o NAA = NPA = 117 m

Na Figura 12, apresenta-se a estimativa correspondente ao nível de máxima cheia (NMC = 120 m, NAJ = 81 m). Mais uma vez, constata-se estar garantida a segurança, uma vez que as pressões na fundação são baixas.

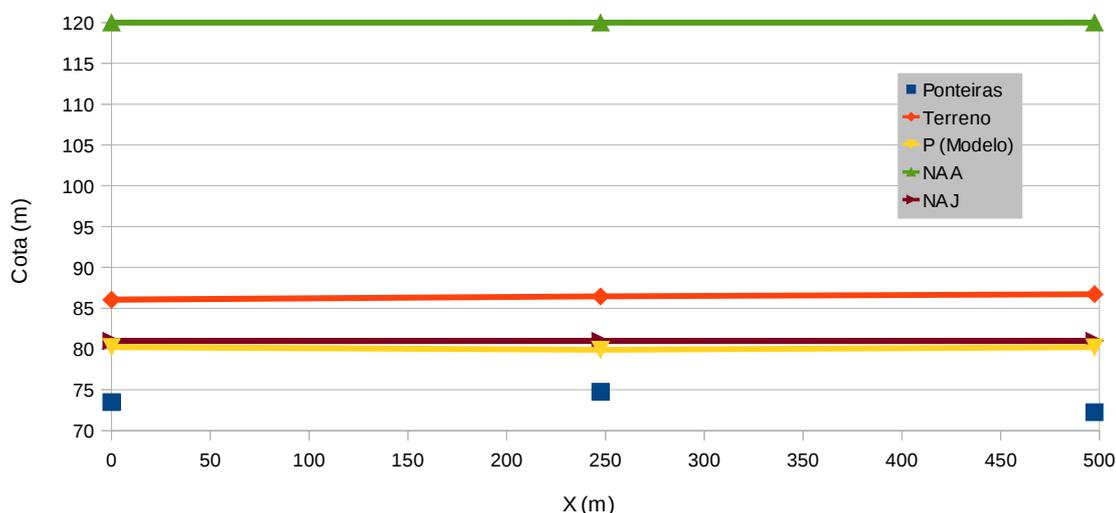


Figura 12 - Previsão das pressões na fundação da barragem da Corumana quando o NAA = NMC = 120 m

No que respeita aos caudais percolados, para os níveis mais elevados da albufeira ocorrem alguns valores que podem ser considerados excessivos. Esses caudais não apresentam qualquer problema do ponto de vista do volume armazenado, mas são indicadores que existem algumas passagens de água pela fundação que ultrapassam o esperado. Uma dessas situações ocorre no medidor CQ1 onde já foram registados valores de 110 ou mesmo 120 l/s (valores que ocorrem para o NAA da ordem de 110 m).

Uma situação semelhante é a que se verifica na zona designada por pântano, próximo do encontro da margem esquerda, a jusante. Nessa zona, e também para os períodos de NAA mais elevado, ocorre uma saturação generalizada da superfície do terreno. O caudal medido nos dispositivos que procuram encaminhar as aflúências sobe para valores que, apesar de não serem medidos com a precisão desejável, são superiores a 15 l/s. Não são conhecidas as subpressões na zona mas, pelos indícios relatados, são superiores ao que seria adequado para a garantia da segurança. Apesar destes indícios, na situação atual, parece não existirem problemas relacionados com a segurança. Com efeito, os caudais captados são sempre de água límpida e não tem havido evolução nos valores medidos.

Porém, é necessário distinguir a situação atual da situação que se verificará após a instalação das comportas do descarregador de cheias. Com efeito, apesar de, como acima se referiu, no momento, a barragem se encontrar em condições satisfatórias, considera-se que com a montagem das comportas, o acréscimo de carga na albufeira em 9 metros pode alterar de forma substancial o comportamento observado.

Assim, e de acordo com os modelos de análise previamente apresentados e discutidos, pode-se prever a evolução de algumas das grandezas medidas, nomeadamente daquelas para as quais se considera que o

comportamento é menos satisfatório. Assim, para o NPA com as comportas instaladas e considerando um nível elevado também a jusante (situação verosímil) para a câmara de medição de caudais CQ1, obtém-se :

$$Q_{CQ1} = -709,66 + 3,604 N_{AA} + 5,039 N_{AJ} = -709,66 + 3,604 \times 120 + 5,039 \times 81 \approx 131 \text{ l/s} \quad [13]$$

Este caudal é superior ao valor máximo para o qual foram dimensionados os medidores de caudais, configurando, no entanto, uma situação para a qual o sistema de drenagem se encontra dimensionado.

4.2 - Estabelecimento de critérios de atenção e alerta

Após a introdução, no sistema de arquivo de dados, das leituras efetuadas nas campanhas de observação, são feitos cálculos sobre esses valores. Normalmente esses cálculos transformam os valores lidos numa grandeza física diretamente 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 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, 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 aspeto em particular e, por conseguinte, integrando toda a informação, sobre a sua segurança. Este processo de validação/interpretação é diretamente aplicável aos modelos estatísticos apresentados na secção 5.

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

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \beta_3 x_2 + \dots + \beta_{n+1} x_n \quad [14]$$

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 Figura 13 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.

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 da Corumana estabeleceram-se os critérios de atenção e alarme que se resumem no Quadro 5.

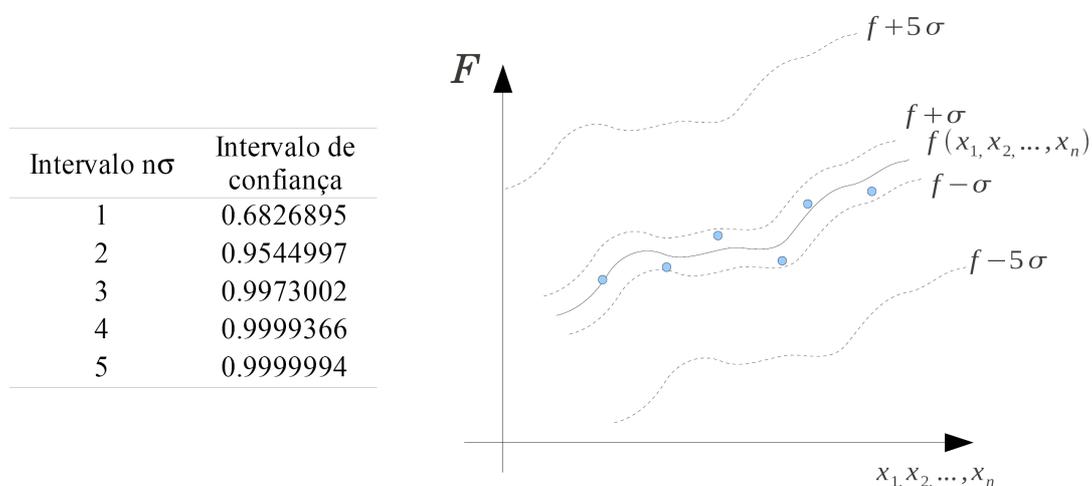


Figura 13 - Intervalos de confiança em torno dos modelos de comportamento

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

5 - CONCLUSÕES

Em resultado da análise do comportamento da barragem de Corumana é possível inferir sobre o bom comportamento geral da obra. Com efeito, apesar de haver algumas lacunas na informação resultante da observação instrumental e de existirem alguns aspetos em que o comportamento da barragem se encontra aquém do ótimo, não existem de imediato indícios de fenómenos lesivos da segurança, para as condições de exploração atuais.

No que respeita a deformações a barragem não apresenta quaisquer indícios de deformação excessiva generalizada ou localizada. Todas as deformações detetadas visualmente podem ser consideradas normais, tendo em consideração a idade da barragem.

No que respeita à piezometria no corpo da barragem, apesar de não ser evidente o funcionamento em condições perfeitas de alguns dos piezómetros electro-pneumáticos, de acordo com a análise efetuada, as respostas dadas pelos dois sistemas são, na sua generalidade, coincidentes. Tendo em consideração essa resposta, não se detetou nenhum indício que possa ser considerado preocupante no que respeita à segurança da barragem.

Os piezómetros de tubo aberto instalados a jusante da barragem, com o objetivo de avaliar o comportamento da parede moldada, exibem uma carga que, no essencial, reflete, como seria de esperar e desejável, o nível de água a jusante.

No que respeita aos caudais percolados, para os níveis mais elevados da albufeira ocorrem alguns valores que podem ser considerados excessivos. Esses caudais não apresentam qualquer problema do ponto de vista do volume armazenado, mas são indicadores que existem algumas passagens de água pela fundação que ultrapassam o esperado.

Uma situação semelhante é a que se verifica na zona designada por pântano, próximo do encontro da margem esquerda, a jusante. Nessa zona, e também para os períodos de NAA mais elevado, ocorre uma saturação generalizada da superfície do terreno. Apesar destes indícios, na situação atual, parece não existirem problemas relacionados com a segurança. Com efeito, os caudais captados são sempre de água límpida e não tem havido evolução nos valores medidos.

Apesar de, atualmente, a barragem se encontrar em condições de segurança, há indícios de comportamento menos eficiente da fundação do encontro esquerdo. A instalação, a breve prazo, das comportas do descarregador de cheias, virá impor um acréscimo de carga à barragem de 9 m, para a situação de pleno armazenamento. Um acréscimo desta ordem, nas condições atuais de funcionamento daquela zona da barragem, pode causar alguns fenómenos que imponham, por questões de segurança, restrições ao pleno funcionamento da barragem. Este assunto será, certamente, explicitamente abordado no projeto dos trabalhos a realizar.

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.
- Hidrotécnica Portuguesa (HP). Aproveitamento da Corumana, Revisão do Projecto, Vol. 1 - Memória Geral. Maio de 1981.

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.

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