

OBSERVAÇÃO DA BARRAGEM DO PINHÃO DURANTE O PRIMEIRO ENCHIMENTO

MONITORING OF PINHÃO DAM DURING THE FIRST FILLING OF THE RESERVOIR

Marcelino, João, *LNEC, Lisboa, Portugal, marcelino@lnec.pt*

Moras, Manuel, *ATMAD, Vila Real, Portugal, m.moras@atmad.pt*

Ribeiro, Sotero, *ATMAD Vila Real, Portugal, s.ribeiro@atmad.pt*

RESUMO

A barragem do Pinhão situa-se no concelho de Vila Pouca de Aguiar, no distrito de Vila Real, intersectando o rio Pinhão. O seu objectivo primordial é o de criar uma albufeira com o volume total de $4,24 \times 10^6$ m³ para o abastecimento urbano. A solução estrutural da barragem consiste num perfil de enrocamento de granito com cortina de betão armado a montante. A altura máxima da barragem é de 22 m. A comunicação destina-se a apresentar os dados essenciais sobre a barragem, sobre a sua fase construtiva e sobre as actividades de observação desenvolvidas pela ATMAD em estreita colaboração com o LNEC e INAG no sentido de assegurar o correcto controlo de segurança desta importante estrutura.

ABSTRACT

The Pinhão dam is located in the municipality of Vila Pouca de Aguiar in the district of Vila Real, intersecting the Pinhão river. Its primary objective is to create a water reservoir with 4.24×10^6 m³ for urban supply. The dam has profile of granite riprap with a concrete curtain in the upstream face. The maximum height of dam is 22 m. This paper is intended to provide basic data on the dam and its construction phase and on the monitoring activities undertaken by the ATMAD in close collaboration with LNEC and INAG to ensure the safety control of this dam.

1. INTRODUÇÃO, DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A barragem do Pinhão situa-se no concelho de Vila Pouca de Aguiar, no distrito de Vila Real, intersecta o rio Pinhão e destina-se a criar uma albufeira com o volume total de $4,24 \times 10^6$ m³ para o NPA, cujo objectivo primordial é o abastecimento urbano. A altura máxima da barragem acima da fundação é de 22 m. A folga para o NMC é de 2,0 m, enquanto que para o NPA é de 3,5 m. A cota do coroamento é de 682,5 m e, no que respeita às cotas notáveis da albufeira, tem-se ainda:

- Nível de máxima cheia (NMC): 680,5 m ($V=5,19$ hm³);
- Nível de pleno armazenamento (NPA): 679 m ($V=4,24$ hm³);
- Nível mínimo de exploração (Nme): 671 m ($V=0,64$ hm³).

O coroamento, com uma extensão de 280 m, tem 7 m de largura e desenvolve-se segundo um alinhamento recto. Os paramentos de montante e jusante apresentam inclinações de, respectivamente, 1:1,4 (v:h) e 1:1,5 (v:h), tendo este último uma banquetta de largura 3,0 m, à cota 672,5 m.

A barragem localiza-se numa zona planáltica com um vale muito aberto e assimétrico. Os encontros apresentam-se suaves, com inclinações médias de 1:8,8 (v:h) para a ME e 1:4,2 (v:h) para a MD.

De acordo com a caracterização geológico-geotécnica, a fundação da barragem é constituída essencialmente por um maciço granítico, de grão médio e grosseiro, profiróide, de boa qualidade.



Figura 1- Vista da Barragem do Pinhão no Final do 1º Enchimento em Setembro de 2009

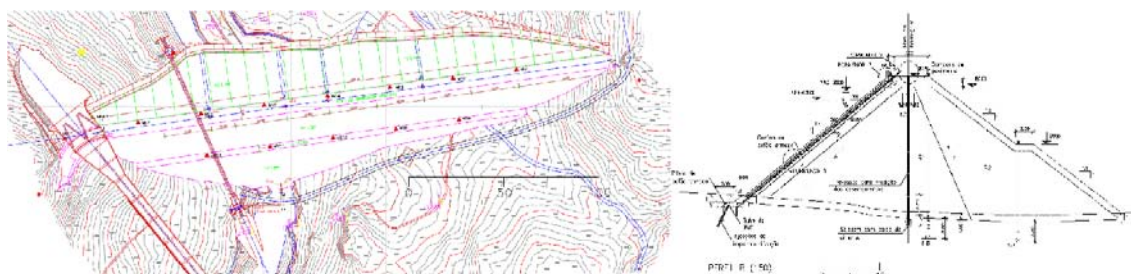


Figura 2- Planta e Perfil Transversal Tipo da Barragem do Pinhão

A fundação da barragem, na zona dos aterros, foi sujeita a uma operação geral de saneamento, com vista à eliminação de quaisquer materiais rochosos ou terrosos soltos ou com matéria orgânica. Em resultado do saneamento, e por recomendação do LNEC, foi necessário, posteriormente, proceder à regularização da fundação, por forma a evitar superfícies escarpadas ou com variações muito pronunciadas de inclinação. Essa regularização foi feita, essencialmente, com recurso ao enchimento das depressões mais significativas com betão pobre. Nesta fase, mesmo em época estival, foram identificadas diversas ressurgências tendo-se procedido à sua captação e condução para um posto de medição a colocar a jusante. Foi concebido um sistema que permitiu separar essas ressurgências do sistema geral de drenagem da barragem, tendo-se criado pontos de medição distintos.

Na zona do plinto ocorriam duas zonas de qualidade distinta mas sempre suficiente para permitir uma fundação adequada a este elemento da barragem. A escavação da superfície de fundação foi feita com recurso a supermartelo. A estrutura do plinto com largura na base de 5.5 m e uma espessura mínima de encastramento de 0,60 m foi solidarizada à fundação através de uma série de pregagens por meio de varões Ø32 mm, afastados de 2.5 m. As juntas entre o plinto e os painéis, bem como as juntas entre painéis incluíam juntas water-stop como elementos de estanquidade. A partir do plinto foi criada uma cortina de injeções composta por injeções de consolidação até uma profundidade média de 5 m e, injeções de furos com profundidades de 20 m na zona mais funda do vale e 15 m para furos acima da cota 670.

2. SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

2.1. Grandezas a Observar e Equipamentos

O plano de observação (PO) foi elaborado pelo LNEC (2007), tendo em consideração os aspectos mais relevantes do comportamento deste tipo de barragens e as grandezas consideradas necessárias para o controlo da segurança, bem como as disposições regulamentares aplicáveis. Com base nestes aspectos, o plano elaborado compreendeu a instalação de dispositivos para a medição do nível de água na albufeira (NAA), dados meteorológicos, deslocamentos externos e internos, pressões na fundação e caudais percolados.

No que respeita à medição de deslocamentos externos, foram colocadas 12 marcas superficiais que permitem a medição dos deslocamentos verticais (por nivelamento geométrico de precisão) e horizontais, por triangulação. Dessas marcas, 7 encontram-se no coroamento e as restantes na banquetta a jusante. Para a medição dos deslocamentos internos dispuseram-se 8 inclinómetros, segundo quatro perfis transversais considerados mais representativos. Quatro inclinómetros estão posicionados na vertical, sensivelmente no eixo da barragem. Os restantes encontram-se instalados segundo o paramento de montante, por baixo da cortina de betão, destinando-se a medir os deslocamentos deste órgão de impermeabilização.

A medição das pressões de água é feita ao nível da fundação, nos mesmos perfis em que se procede à medição dos deslocamentos. Muito embora o controlo da pressão e caudais seja conseguida através da cortina de betão a montante e da cortina de injeções, foi considerado útil poder aferir as pressões ao longo de dois alinhamentos no sentido montante-jusante, um na vertical do eixo da barragem e outro no alinhamento da banquetta de jusante.

A medição de caudais é feita a jusante da barragem através de descarregadores em “V”. No caso da barragem do Pinhão, existem dois medidores distintos. O primeiro, recebe os caudais que foram captados durante a construção, antes de existir a albufeira, tendo sido encaminhados para um medidor. O segundo mede os caudais que passam através da barragem e da fundação. Atendendo à sua concepção e à natureza da barragem, este medidor capta também águas provenientes da pluviosidade.

2.2. Freqüências

As freqüências de medição preconizadas no plano de observação foram estabelecidas, não só, em função das recomendações das NOIB mas também, e fundamentalmente, tendo em consideração a necessidade de um efectivo controlo de segurança da barragem durante a sua vida. Para além deste aspecto, procurou-se ainda maximizar a informação disponível no sentido de calibrar modelos de interpretação do comportamento. No Quadro 1 apresentam-se as freqüências preconizadas nos planos de observação e de primeiro enchimento, sendo de notar que, à excepção da Precipitação, em geral, as freqüências foram superiores às preconizadas.

Quadro 1-Freqüências de Leitura Preconizadas no Plano de Observação e de Primeiro Enchimento

Grandeza	Freqüência mínima	Leituras obrigatórias
Nível da albufeira	Diária	Não aplicável
Deslocamentos superficiais	Anual	a)
Caudal total	Quinzenal	a)
Níveis piezométricos	Mensal	a)
Precipitação	Diária	Não aplicável
Inspeção visual de rotina	Mensal	a)
Inspeção visual de especialidade	Anual	a)
Inspeção visual excepcional	Após ocorrência	Não aplicável

a)Início, patamares, fim do enchimento ou esvaziamento rápido

2.3. Plano de Primeiro Enchimento

Tal como previsto no RSB, o enchimento da barragem do Pinhão foi feito segundo um plano – Plano de primeiro enchimento (PPE), que teve em consideração todos os aspectos considerados relevantes do projecto e construção. Assim foi preconizado que o enchimento se deveria efectuar em duas fases, com um patamar intermédio, no fim do qual, após uma avaliação do comportamento durante a primeira fase se processaria o enchimento até ao NPA. O patamar foi fixado tendo em consideração a necessidade de maximizar o volume de água disponível para consumo com os aspectos relativos à segurança e á avaliação do comportamento estrutural. Assim, considerou-se que seria desejável poder dispor de aproximadamente 50% do volume pelo que se estabeleceu a cota 675 como patamar de enchimento (Figura 3).

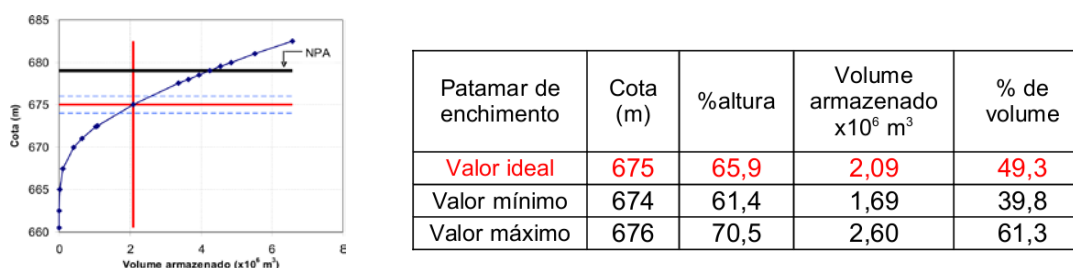


Figura 3- Estabelecimento do Patamar de Enchimento

2.4. Modelo de Comportamento

O plano de observação da barragem estabelece o modelo de comportamento da obra no que respeita à percolação através da fundação da barragem e ao comportamento tensão-deformação durante a fase construtiva. Nesse modelo, estabelecido com recurso ao Método dos Elementos Finitos (MEF), foi feita a previsão das pressões de água na fundação da barragem, dos caudais percolados e do assentamento máximo em resultado da construção. A modelação do comportamento foi feita através do programa Code-Aster, disponibilizado em regime GPL pela EDF. Na preparação da malha de elementos finitos e no pós-processamento usou-se o programa SALOME (<http://www.salome-platform.org/>). A Figura 4 apresenta a malha de elementos finitos usada nos cálculos.

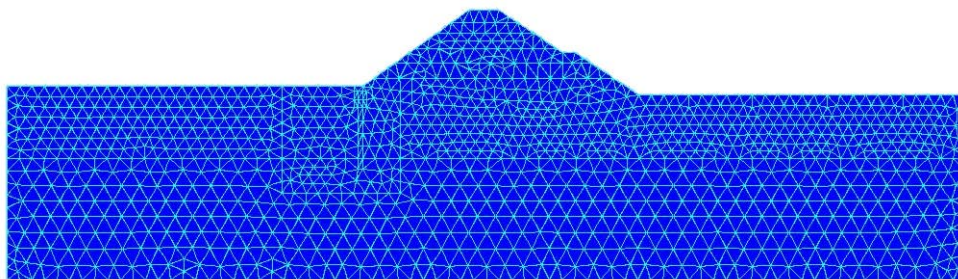


Figura 4- Malha de Elementos Finitos (2383 Elementos Triangulares e 4875 Pontos Nodais)

Como os cálculos foram efectuados antes da construção, foram considerados dois cenários distintos no que respeita à permeabilidade da fundação. O primeiro cenário, mais optimista, corresponde a uma fundação mais impermeável e um segundo a uma fundação mais permeável. A diferença entre as duas hipóteses de cálculo corresponde a uma variação de 10x na permeabilidade. O Quadro 2 apresenta os parâmetros considerados. De acordo com os cálculos efectuados, para o NPA, o caudal esperado nos medidores deverá oscilar entre 0,079 m³/dia/m e 0,692 m³/dia/m, a que correspondem, para a totalidade da barragem, 11 ou 98 m³/dia, isto é, num ano, 0,1% e 0,86% do volume da albufeira.

Quadro 2 - Parâmetros Considerados no Cálculo de Percolação

	kx=ky	kx=ky
	m/s	m/dia
Corpo da barragem*	0,0001	86,4
Fundação Superior	10^{-7} a 10^{-6}	$8,64 \times 10^{-3}$ a $8,64 \times 10^{-2}$
Cortina**	10^{-8} a 10^{-7}	$8,64 \times 10^{-4}$ a $8,64 \times 10^{-3}$
Fundação inferior	10^{-8} a 10^{-7}	$8,64 \times 10^{-4}$ a $8,64 \times 10^{-3}$

* Valor nominal, estabelecido de forma a representar um material muito permeável

** Valor estabelecido como 10x inferior ao da fundação superior

No que respeita ao comportamento mecânico da barragem o PO estabelece um modelo de comportamento baseado nas características mecânicas consideradas no projecto. Essas características estão traduzidas no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros Considerados no Modelo Tensão-deformação

Material	E	n	g
	MPa		kN/m ³
Bedrock	500	0.27	25
Enrocamento	60 a 80	0.27	22

De acordo com o modelo elaborado, e tendo em consideração a gama de parâmetros considerados, os deslocamentos verticais esperados para a barragem, durante a fase construtiva devem ser inferiores a 3 cm.

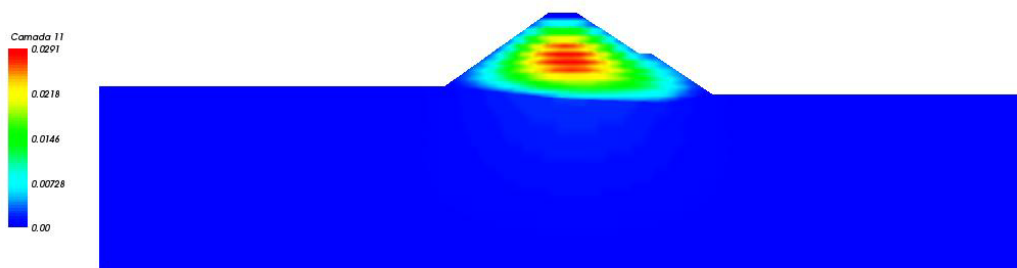


Figura 5- Regiões de Igual Assentamento Durante a Fase Construtiva ($E_{\text{enroc}}=60\text{MPa}$)

3. RESULTADOS DA OBSERVAÇÃO

3.1. Acções

A principal acção a considerar na barragem corresponde à variação do nível de água na albufeira. De acordo com o plano de enchimento elaborado pelo LNEC, essas variações foram condicionadas, tendo-se seguido, na medida do possível, o plano preconizado. A Figura 6 refere-se à variação do NAA ao longo do período de primeiro enchimento. Em termos médios, durante o primeiro enchimento até à cota máxima, atingida em 10/2/2009, a albufeira encheu a uma taxa de 9 cm/dia até ao primeiro patamar e depois de um período de permanência nesse patamar, o NAA subiu em média 6 cm/dia até se iniciar a descarga pelo descarregador de cheias em 24/1/2009.

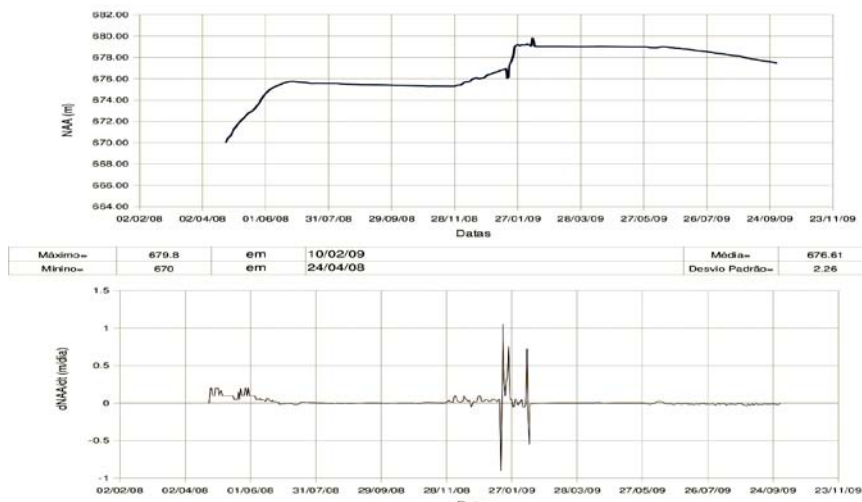


Figura 6- Cotas do NAA e Variações Diárias

3.2. Deslocamentos Horizontais Internos

Conforme se referiu anteriormente, a barragem encontra-se instrumentada com 8 tubos inclinométricos instalados segundo 4 perfis transversais. Nas Figuras 7 e 8 apresentam-se os diagramas dos deslocamentos registados nos perfis de maior altura. Salienta-se que os deslocamentos na cortina correspondem a um perfil inclinado, correspondente à geometria deste órgão. Da análise das figuras é possível concluir que, até ao momento, os deslocamentos horizontais registados a barragem do Pinhão têm uma expressão reduzida.

Na cortina, os deslocamentos máximos ocorrem, como seria de esperar, nos perfis de maior altura, PB (150) e PC (175), atingindo, no coroamento, valores da ordem dos 20 mm. Nos perfis PA (100) e PC (200) (não representados) os valores máximos registados são de cerca de metade daquele valor.

Nos inclinómetros verticais, em geral, os deslocamentos registados são reduzidos. Os inclinómetros IV2, IV4 e IV8 apresentam deslocamentos inferiores a 2 mm. A única exceção é registada no inclinómetro IV6 (perfil C (175)) onde o deslocamento obtido em Julho de 2009 apresenta maior expressão, em especial no sentido da MD. Convém salientar que, nessa data, o NAA era de 678,64 m enquanto que em Setembro a cota da albufera era de 677,67 m. Parece, pois, haver uma relação entre a variação das duas grandezas.

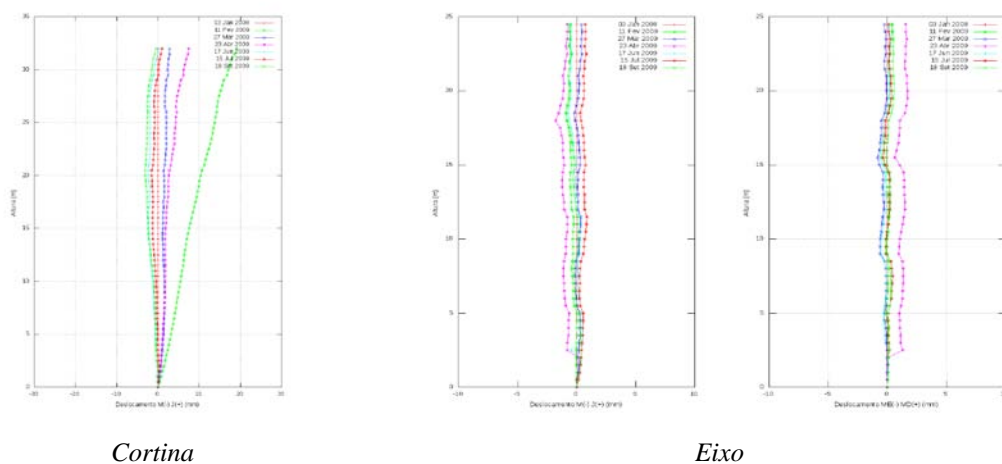
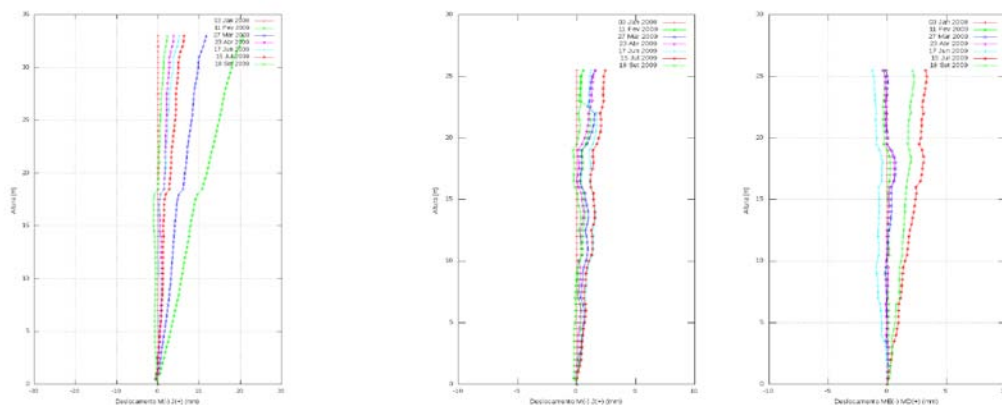


Figura 7- Deslocamentos Horizontais no Perfil B (150)



Cortina

Eixo

Figura 8- Deslocamentos Horizontais no Perfil C (175)

3.3. Deslocamentos Verticais Internos

No que respeita à medição dos assentamentos internos, durante o primeiro enchimento, os valores medidos nas baterias de assentamento (nos mesmos tubos que os inclinómetros) são residuais. Os diagramas apresentados na Figura 9 indicam que o assentamento se manifesta com maior expressão nos 5 metros inferiores do tubo, mantendo-se depois praticamente constante até à superfície. Vale a pena notar que a dispersão que se verifica nos diversos diagramas se relaciona com a precisão do método.

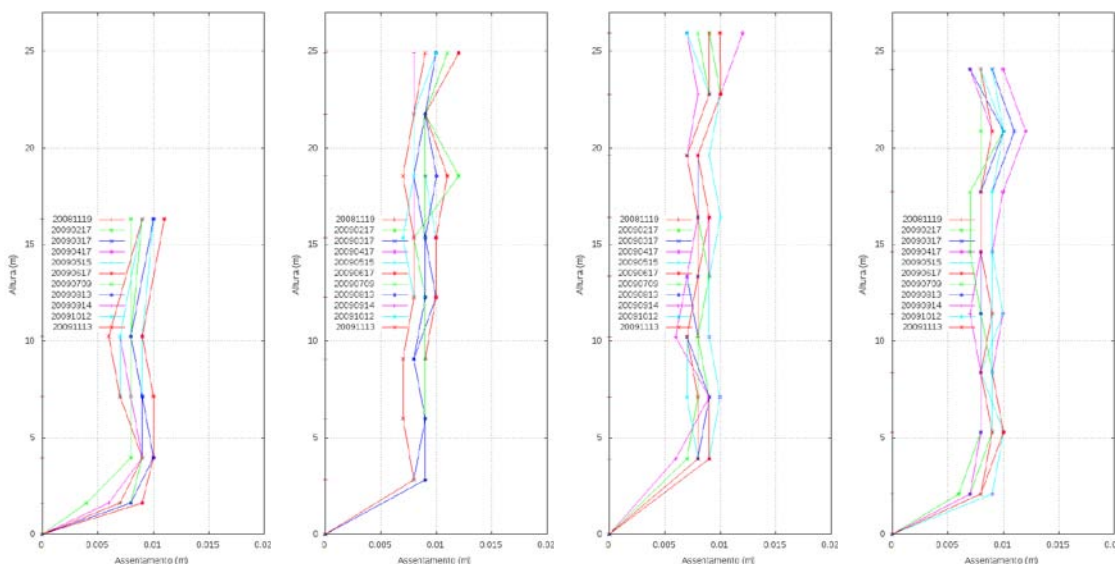


Figura 9- Assentamentos Medidos nos Quatro Tubos Inclinométricos

3.4. Pressões de Água na Fundação

A barragem do Pinhão tem instalado, um conjunto de piezómetros que se destinam a permitir aferir a perda de carga ao longo da fundação. A localização em planta desses dispositivos encontra-se representada na Figura 2. O modelo de percolação (Figura 10) previa, como seria de esperar que as perdas de carga se concentrassem na cortina, a montante. Por esse motivo, em condições normais de funcionamento da fundação, as pressões dos piezómetros deveriam ser

baixas e praticamente iguais entre si. Na Figura 11 apresenta-se as pressões medidas em dois dos perfis instrumentados. Conforme se pode verificar, os piezómetros apresentam pressões muito reduzidas e com pequena variação com o NAA. Os valores obtidos estão muito próximos da previsão efectuada no Plano de Observação (LNEC, 2007) onde se estimou que para os perfis PB e PC, correspondentes à secção de maior altura da barragem, se teria, para os piezómetros instalados no alinhamento do coroamento, sensivelmente a meio da fundação, uma pressão máxima de 5 m de coluna de água. O valor medido é de cerca de 3 m.

De acordo com este modelo, os piezómetros colocados num mesmo alinhamento devem exibir perdas de carga muito reduzidas. O valor mais alto que se registou até ao momento é de 0,5 m entre o PH3 e o PH4.

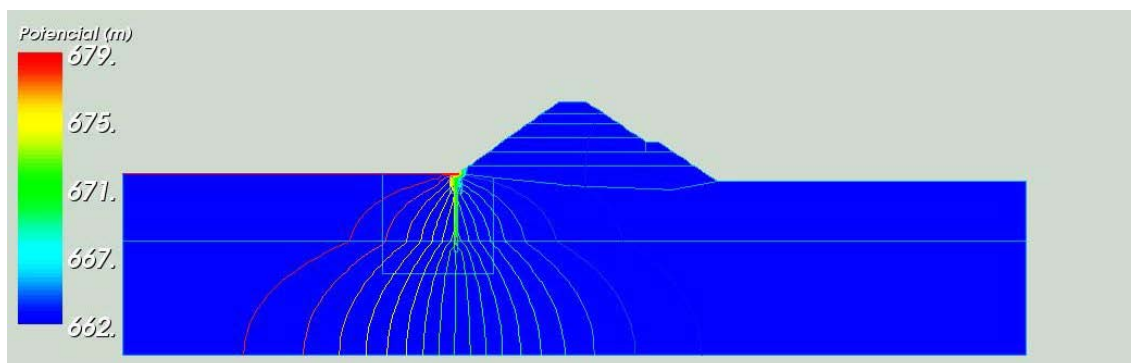


Figura 10- Equipotenciais do Modelo de Percolação

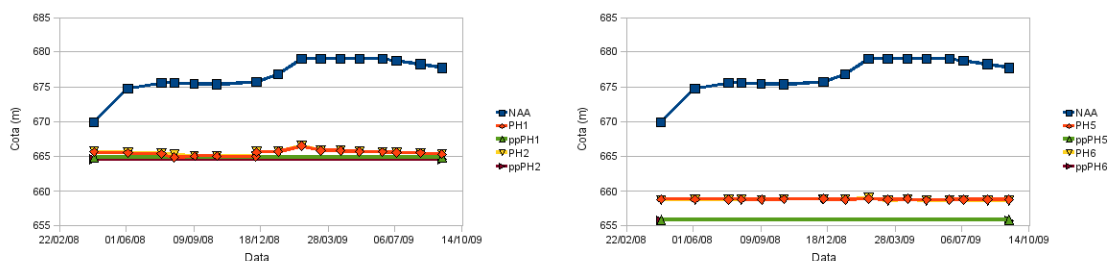


Figura 11- Pressões da Água nos Perfis de Maior Altura da Barragem

3.5. Caudais

A barragem do Pinhão dispõe, como se referiu acima, de diversos dispositivos para a medição de caudais. Merecem especial destaque os medidores de caudais instalados no fundo do vale e que se destinam à medição dos caudais provenientes da fundação da barragem e à medição das captações da fase construtiva. A Figura 12 refere-se aos equipamentos e grandezas em análise. É possível verificar existir correlação entre o NAA e o caudal captado pelos medidores. Esse caudal é também influenciado pela pluviosidade, da qual, não se dispõe até ao momento de leituras. Através de um modelo de análise quantitativa seria possível estabelecer a relação entre o NAA, a pluviosidade e o caudal captado. Para ultrapassar a falta de dados pode-se, de forma aproximada, admitir que a pluviosidade segue uma lei do tipo sinusoidal, estimando-se de forma aproximada a relação entre as grandezas.

A lei de variação do caudal será do tipo:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 \psi_1(x_1) + \beta_2 \psi_2(x_2) + \dots + \beta_n \psi_n(x_n)$$

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

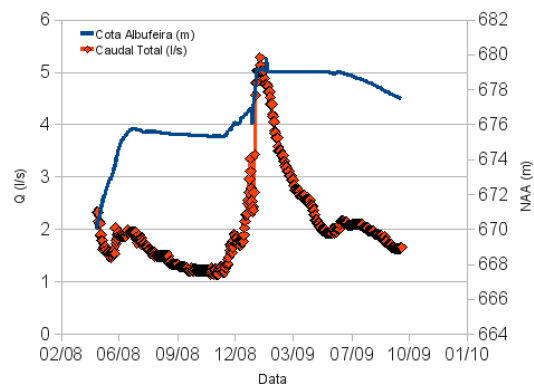


Figura 12- Medidores de Caudais, Leituras de Caudais e Comparação com o NAA

Os coeficientes do modelo ficam determinados através de:

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

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

Testando diversos modelos, obteve-se uma boa concordância para a expressão:

$$Q(l/s) = 2,149 - 0.00133N + 0.3046 f(M) - 0,3537(NAA - 670) + 0.0451(NAA - 670)^2$$

onde $f(M)$ representa uma função sinusoidal do mês. Atendendo à elevada pluviosidade que se verificou em Janeiro e Fevereiro de 2009, o que levou à subida do NAA, a utilização da aproximação sinusoidal para a pluviosidade não é adequada para simular esse período, pelo que esse conjunto de pontos não foi considerado para a determinação dos parâmetros. O ajuste do modelo está representado na Figura 13.

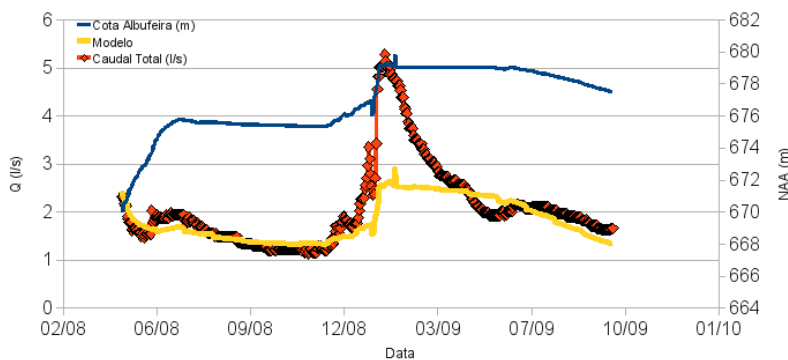


Figura 13- Modelo de Cálculo do Caudal

Da análise da figura interessa destacar os seguintes aspectos:

- o caudal medido para o nível mínimo da albufeira (no início do enchimento) não corresponde ao mínimo histórico, que se veio a verificar mais tarde, já com a albufeira à cota do primeiro patamar;
- o mínimo histórico foi obtido em 9 de Novembro de 2008, correspondendo ao valor de 1,14 l/s, sendo, provavelmente esse o valor correspondente à drenagem natural do maciço sem pluviosidade;
- o valor máximo observado de 5,28 l/s obtido em 30 de Janeiro de 2009, coincidiu com um período de forte pluviosidade (embora não haja ainda medições de pluviosidade, o

TRE regista de forma qualitativa, o estado do tempo) sendo, portanto fortemente influenciado pela água captada pela superfície exposta da barragem e pela fundação; aliás, nesse período verificou-se uma forte subida do NAA;

- da análise das leituras, pode-se inferir que o caudal correspondente ao NPA, sem influência da pluviosidade deve ser da ordem dos 1,7 l/s, valor que se veio a verificar na estiagem de 2009 (valor muito próximo do mínimo histórico).

Finalmente, pode dizer-se que o modelo obtido apresenta um ajuste aceitável em face dos dados disponíveis. Verifica-se que, não há qualquer tendência para aumento de caudal com o tempo, dado que, no modelo, o coeficiente que afecta o número de dias passados desde o início é praticamente nulo (na verdade é mesmo negativo).

No plano de observação da barragem do Pinhão (LNEC, 2007) apresentou-se uma estimativa do caudal percolado pela fundação da barragem. Foram considerados 2 cenários distintos, correspondentes a qualidades distintas do maciço superior da fundação. Para a fundação mais permeável, o caudal estimado foi de 98 m³/dia. O valor medido (1,7 l/s), corresponde a 146,9 m³/dia, valor que se considera adequado à previsão efectuada, tendo em consideração a incerteza da quantificação da permeabilidade do maciço de fundação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente comunicação apresenta a descrição da barragem do Pinhão e das actividades de observação levadas a cabo durante a fase de primeiro enchimento da albufeira. Esta importante fase da vida da obra foi conduzida no estrito cumprimento do plano de primeiro enchimento, tendo-se verificado, a cada momento, as condições de segurança da obra. A barragem apresenta um comportamento que pode ser classificado como bom, dentro das previsões efectuadas antes da sua construção, quer do ponto de vista de comportamento hidráulico da fundação, quer do ponto de vista das deformações. A continuação das actividades de observação permitirá, em breve, a preparação de modelos de validação dos resultados da observação de forma a serem integrados no controlo de segurança e em sistemas de apoio à decisão.

Tal como noutros empreendimentos, um dos principais factores de sucesso corresponde ao empenho e atenção que as diversas Entidades intervenientes dedicam ao projecto, aos meios que alocam, e destes, os decisivos são os meios humanos, pois é com o seu contributo e envolvimento na resolução dos problemas, que estes vão sendo ultrapassados e as soluções vão surgindo. Desde a sua concepção até à conclusão e início de exploração, a Barragem do Pinhão contou com o apoio dedicado de todos os intervenientes, desde o Projectista (PROSISTEMAS S.A.), às entidades licenciadoras e de tutela (CCDR-N e INAG), ao consórcio construtor (SOMAGUE S.A. / Chupas e Morrão S.A.), à fiscalização (PROSPECTIVA) o Dono da Obra (ATMAD – Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro do Grupo AdP) e o LNEC.

De facto desde o início da concepção deste empreendimento que a ATMAD estabeleceu com o LNEC uma verdadeira parceria que muito tem contribuído para o sucesso do projecto nas suas diferentes fases (concepção, construção, primeiro enchimento e agora exploração). Esta parceria tem permitido ao Dono da Obra dotar-se e formar competências próprias imprescindíveis à gestão deste tipo de infra-estrutura e ao LNEC poder usufruir de importantes casos de estudo.

REFERÊNCIAS

- NOIB (1993) – Normas de observação e inspecção de barragens. *Anexo à Portaria nº 847/93*
LNEC (2007) – Plano de observação da barragem do Pinhão. *Rel 137 DG/NBOA*
LNEC (2007) – Plano de primeiro enchimento da barragem do Pinhão. *Rel 201 DG/NBOA*