

Artigo REF: 49A008

A IMPORTÂNCIA DA OBSERVAÇÃO NO CONTROLO DE SEGURANÇA. EXEMPLO DA BARRAGEM DO LAPÃO

João Marcelino Mateus da Silva

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Lisboa, Portugal

Email: marcelino@lnec.pt

RESUMO

As barragens são estruturas com um elevado risco potencial. Nesse sentido, o Regulamento de Segurança de Barragens, impõe a necessidade de implementar sistemas de observação, dando indicações muito concretas sobre esses sistemas. Em Portugal, mais concretamente na barragem do Lapão, situada próximo de Mortágua ocorreu uma situação de emergência durante o primeiro enchimento da albufeira. Essa situação foi prontamente detectada pelo sistema de observação instalado pelo que o primeiro enchimento foi interrompido para se proceder ao diagnóstico da situação.

1 - DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A barragem do Lapão, intersecta a ribeira da Fraga e destina-se a criar uma albufeira com o volume total de 1,26x106 m³, para fornecimento de água para rega. A barragem, com altura máxima acima da fundação de 39 m, é constituída por um perfil homogéneo que incorpora materiais de aterro (Fig 1). O controlo de percolação da água no corpo da barragem é conseguido através de um sistema drenante constituído por um filtro vertical ligado a um tapete drenante que se encaixa na zona mais baixa do leito da ribeira. O maciço de jusante compreende ainda diversos níveis de drenos horizontais destinados a facilitar a dissipação das pressões intersticiais resultantes do processo construtivo.

A barragem insere-se num vale com vertentes inclinadas e mesmo com pequenos trechos escarpados. A forma do vale é de um V ligeiramente assimétrico (Fig 2). O seu desenvolvimento longitudinal apresenta a particularidade de, a montante, ter uma curva pronunciada pelo que, o eixo da ensecadeira de montante faz, com o eixo da barragem um ângulo superior a 90° (Fig 3). O coroamento tem uma extensão de 97 m. O NPA situa-se à cota 217 e o coroamento à cota 220.

As inclinações dos paramentos de montante e jusante são de respectivamente, 1:3 e 1:2,9. O paramento de jusante inclui ainda a estrada de acesso à saída da descarga de fundo. A fundação rochosa é constituída fundamentalmente por rochas xistentas, apresenta fracturação acentuada à superfície e menos intensa em profundidade. O tratamento da fundação previa inicialmente a execução de uma cortina de injeções em toda a sua extensão que, posteriormente, ficou limitada a parte da MD.

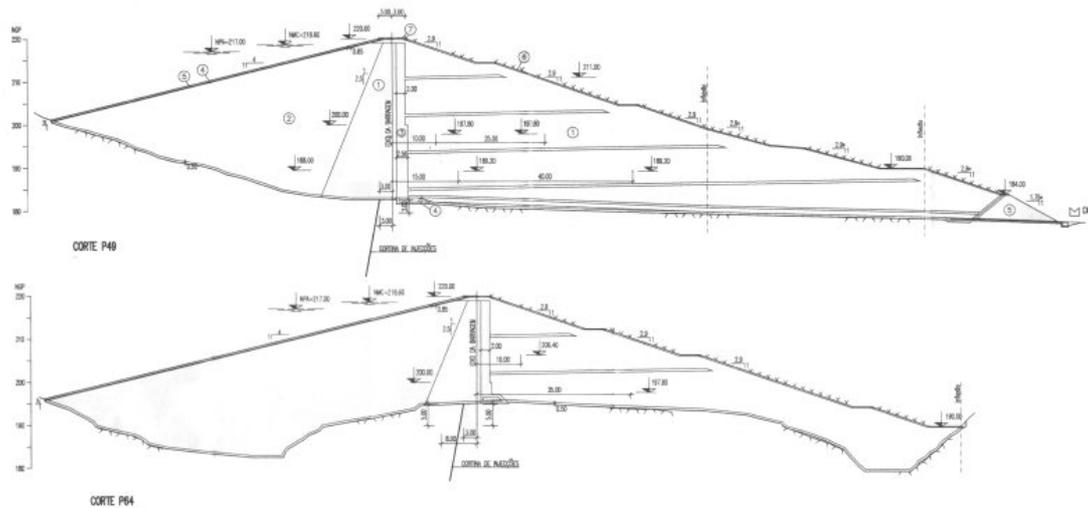


Fig 1-Perfis transversais da barragem do Lapão

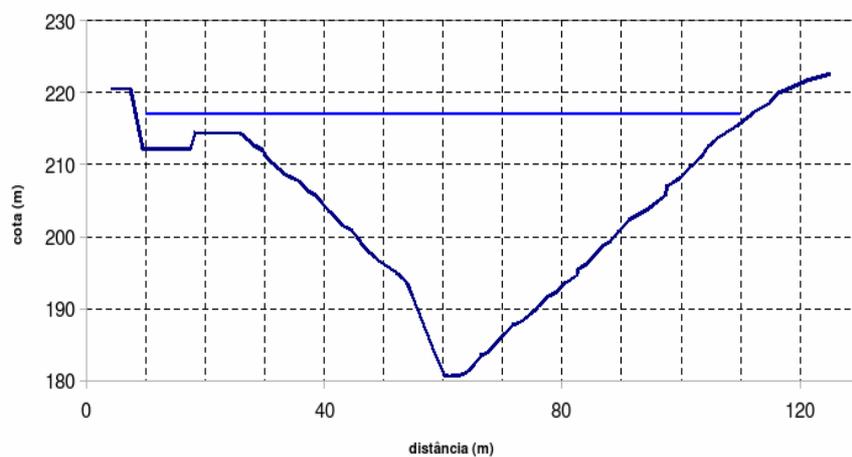


Fig 2-Perfil longitudinal da barragem do Lapão

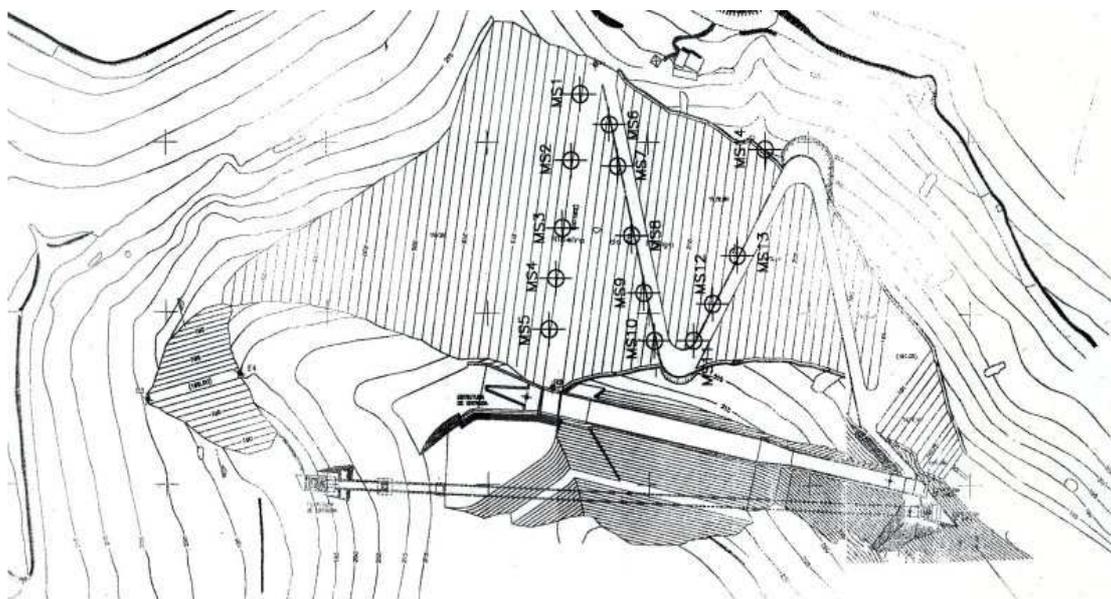


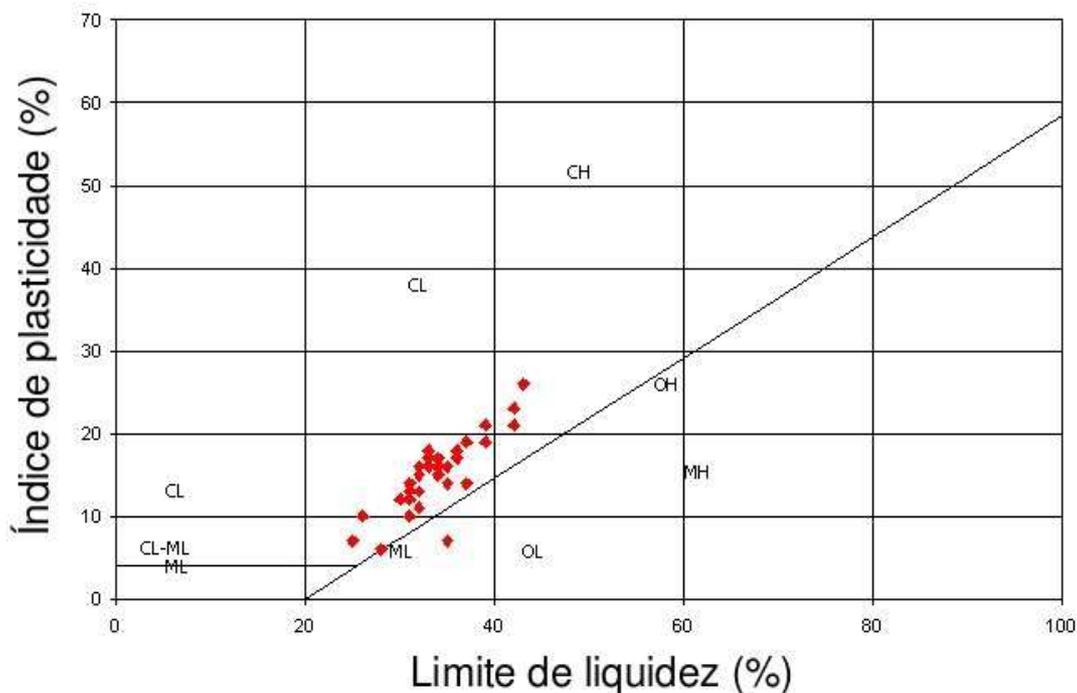
Fig 3-Planta da barragem do Lapão

2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE ATERRO

De acordo com o especificado inicialmente no projecto, a barragem deveria incluir 2 tipos de materiais distintos, a saber:

- para a construção do núcleo e maciço estabilizador de jusante, materiais provenientes dos "Grés do Buçaco" e dos depósitos detríticos argilosos da Bacia Sedimentar, localizados, uns e outros, a sul da povoação do Sobral;
- para a construção do maciço estabilizador de montante, materiais provenientes dos rejeitados das cerâmicas.

Para além destes materiais, seriam usados, para os filtros e drenos materiais provenientes de pedreiras graníticas existentes nas vizinhanças do concelho de Mortágua. No decorrer da construção verificou-se que os materiais inicialmente previstos apenas para o maciço de jusante e zona do núcleo, ocorriam em quantidade e qualidade que permitiam a sua utilização também no maciço de montante, pelo que, na construção apenas se usaram, nessas zonas da barragem, esses materiais. Os restantes materiais (filtros, drenos) foram mantidos conforme o previsto no projecto. A Fig 4 e 5 referem-se aos resultados de amostras retiradas do aterro no decorrer de uma campanha de caracterização suplementar, na qual foram ainda instalados tubos inclinométricos. Da análise dos quadros é possível verificar que os solos usados na construção são do tipo CL, e quanto à distribuição granulométrica apresentam alguma regularidade.



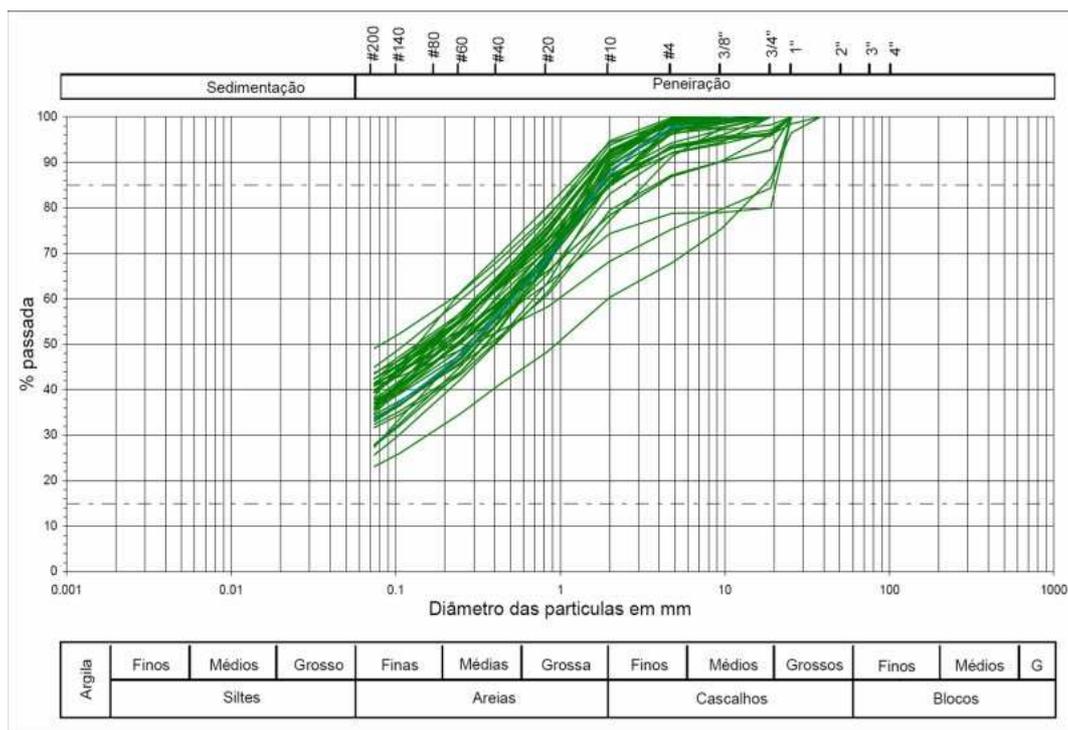


Fig 5-Fuso granulométrico das amostras ensaiadas

3 - SISTEMA DE OBSERVAÇÃO DA BARRAGEM E PRIMEIRO ENCHIMENTO

No âmbito do controlo de segurança da barragem do Lapão, foi elaborado um plano de observação onde se dimensionou um sistema que permitia o acompanhamento das grandezas consideradas necessárias para inferir sobre a segurança da barragem. Assim, o plano de observação preconizava a medição de pressões intersticiais no aterro e fundação, a medição de deslocamentos superficiais no aterro e, atendendo à forma particular do vale, foram também instalados grupos de células de tensão total em zonas escolhidas de forma a avaliar a ocorrência de eventuais transferências de tensão entre os aterros da barragem e os encontros. A localização destes equipamentos encontra-se indicada na Fig 6, onde se ilustra o perfil longitudinal da obra.

O sistema original de observação compreendia os seguintes dispositivos:

- Marcas superficiais para observação dos assentamentos;
- Piezómetros eléctricos (resposta rápida) para monitorização das pressões intersticiais durante a fase construtiva e primeiro enchimento;
- Piezómetros hidráulicos para acompanhamento da variação da pressão intersticial no corpo da barragem e fundação;
- Medidor de caudais totais;
- Células de tensão total para acompanhamento da variação desta grandeza durante a fase construtiva e primeiro enchimento.

Naturalmente que, para além destes dispositivos era registada a cota da albufeira (diariamente) e os dados referentes à pluviosidade.

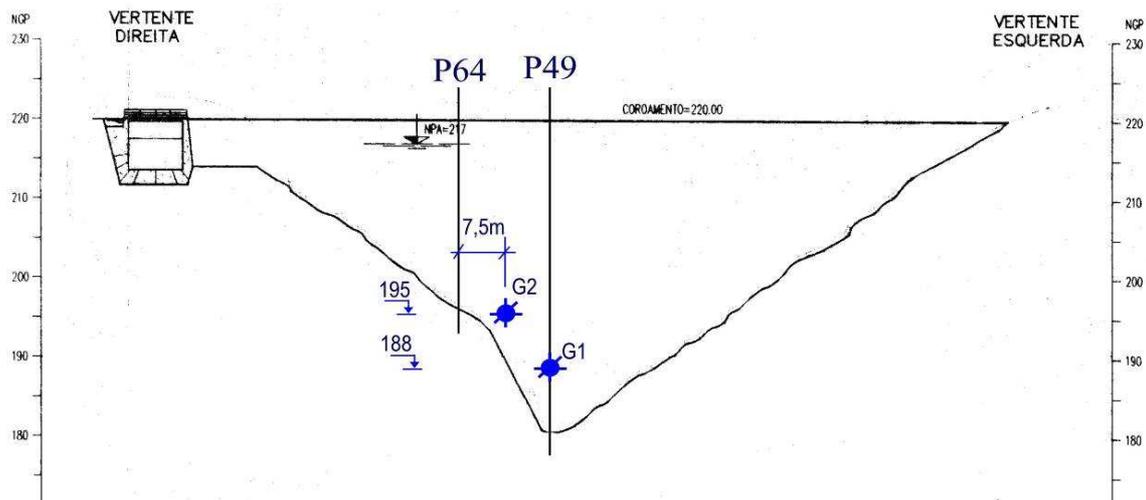


Fig 6-Localização dos grupos de células de pressão intersticial

O plano de primeiro enchimento foi estabelecido tendo em atenção as disposições regulamentares relativas a este importante período de vida da obra. Foi determinado que o enchimento se processaria em duas fases, isto é, com um patamar intermédio. A cota desse patamar foi fixada tendo em atenção por um lado a necessidade de armazenamento de água e por outro, a carga que ficaria instalada na barragem. Assim o patamar ficou fixado a uma cota correspondente a 80% da altura máxima e cerca de 62% do volume armazenado. O tempo mínimo de manutenção do patamar seria de 3 meses. Nesse intervalo proceder-se-ia à aferição do comportamento tomando-se a decisão de avançar para o patamar seguinte.



Fig 7-Vista de montante da barragem antes do primeiro enchimento

3.1 - Início do enchimento

O início do 1º enchimento da barragem do Lapão teve lugar a 13 de Dezembro de 2001, na sequência de uma inspeção realizada nos termos do RSB. Nessa inspeção foi verificado o estado da barragem e foram anotadas as pequenas anomalias que se verificaram. É necessário salientar que, à data, não se detectaram anomalias de monta (facto que permitiu que se iniciasse o enchimento) mas apenas pequenos indícios que poderiam passar despercebidos mas que se veio a verificar serem manifestações precoces do que se detectaria mais tarde. Um primeiro indício detectado foi a verificação visual de um nivelamento deficiente na guarda metálica de montante. Esse fenómeno era mais aparente junto à ME. Outro indício foi uma pequena fissura junto a um tubo de drenagem do coroamento no lancil na margem direita. Relativamente a estes dois indícios nada se poderia inferir, na medida que, quer um quer outro poderiam ser resultado de pequenas imprecisões nos trabalhos de acabamento da barragem (Fig 8).



Fig 8-Pequenas anomalias detectadas durante a inspeção prévia

3.2 - Primeira detecção do comportamento anómalo

O enchimento iniciou-se na data indicada tendo a evolução no nível da albufeira sido registada diariamente (Fig 9) e dado-se cumprimento ao plano de observação da barragem. A 15 de Fevereiro de 2002, por ocasião de uma das campanhas de nivelamento das marcas superficiais, foram detectados deslocamentos elevados que se manifestavam em especial na ME, precisamente na zona que, na inspeção prévia se havia detectado um nivelamento deficiente da guarda metálica de montante.

O Técnico Responsável pela Exploração (TRE) deu conhecimento imediato ao LNEC desse facto e realizou-se, no dia seguinte, uma inspeção de carácter excepcional onde se confirmou existirem indícios que comprovavam os deslocamentos elevados.

Os deslocamentos que haviam sido detectados atingiam, no coroamento valores da ordem da dezena de centímetros, conforme se pode ver na Fig 10 onde se apresenta também a evolução desta grandeza no período subsequente durante o esvaziamento da albufeira que entretanto foi preconizado.

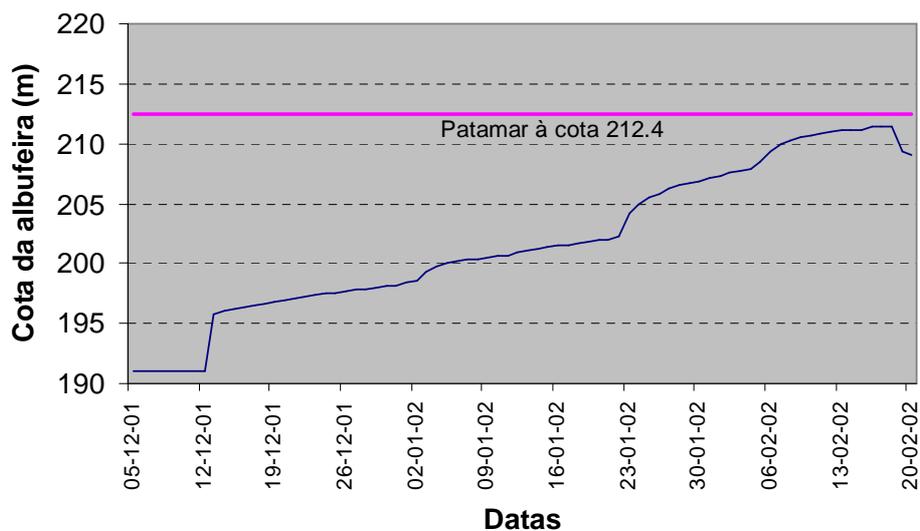


Fig 9-Evolução da cota da albufeira até à detecção dos deslocamentos excessivos

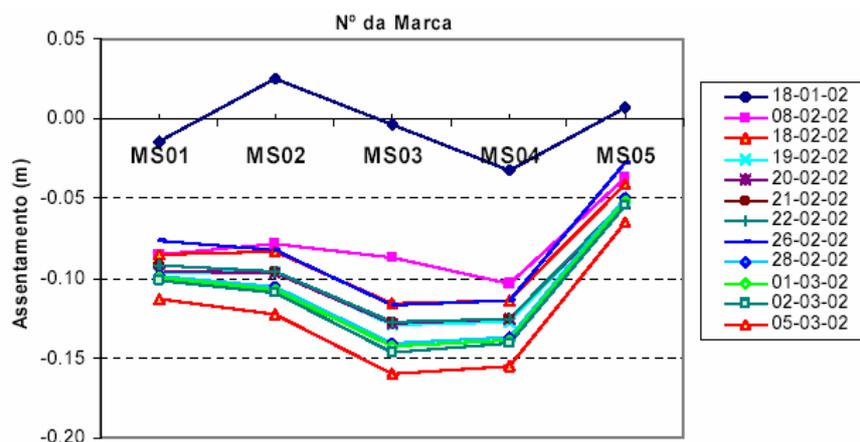


Fig 10-Assentamentos nas marcas superficiais do coroamento

A decisão de promover o abaixamento controlado da albufeira baseou-se quer nos resultados das observações dos equipamentos instalados quer nas manifestações exteriores, detectadas após as diversas inspeções visuais realizadas nos dias subsequentes. De facto, foram detectados diversos indícios de deformações elevadas sendo a variação desses indícios sensível de inspeção para inspeção. Nas figuras seguintes ilustram-se os exemplos mais notáveis da evolução detectada.



Fig 11-Evolução da fendilhação do lancil de montante



Fig 12-Evolução da fendilhação no pavimento

Dos indícios detectados é de salientar o aumento muito significativo da fendilhação do pavimento betuminoso do coroamento. Além disso, o nivelamento da guarda metálica de montante também evidenciava a ocorrência de elevadas deformações. Em determinada data decidiu-se retirar a referida guarda que se encontrava já muito deformada. O INAG, de acordo com o parecer técnico do LNEC, decidiu promover o abaixamento do nível de água na albufeira uma vez que a barragem estava a exibir um comportamento deficiente não sendo possível assegurar a segurança.

3.3 - Período posterior

A decisão de não prosseguir com o enchimento da albufeira e, pelo contrário, proceder ao seu esvaziamento revelou-se como sendo a decisão acertada. De facto, não obstante as deformações dos aterros prosseguirem a taxas muito elevadas, os valores dessas taxas foram sempre decrescentes, conforme se pode observar na Fig 13.

No tempo que decorreu desde a decisão de esvaziar a albufeira e o final do ano, em que não foi possível manter o seu nível, manteve-se um ritmo de observação e de inspecções muito elevado. Essas observações, complementadas com as inspecções visuais, permitiram verificar (ou apenas confirmar) o mau comportamento estrutural da barragem, apesar da albufeira se encontrar vazia.

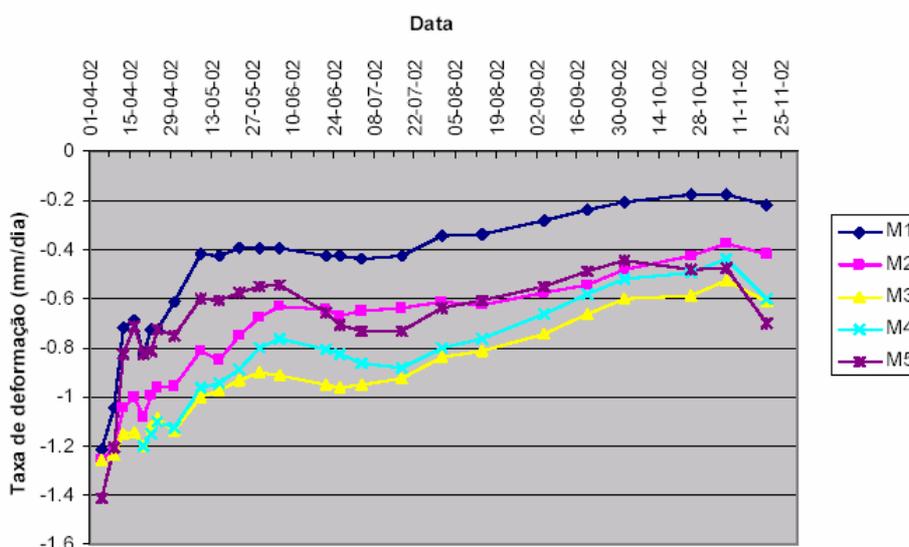


Fig 13-Taxas de deformação das marcas instaladas no coroamento

Foi também estabelecido um plano de trabalhos de caracterização dos aterros da barragem através da realização de ensaios SPT, da fundação através da realização de ensaios de absorção de água e o reforço da instrumentação através da instalação de dispositivos adicionais na barragem (Fig 13).

O reforço da instrumentação compreendeu a colocação de piezómetros, inclinómetros e marcas superficiais adicionais de forma a permitir a monitorização de deslocamentos horizontais a par dos assentamentos. Na Fig 14 ilustra-se a localização dos dispositivos.

Os trabalhos iniciaram-se em Novembro de 2002, mais tarde do que seria desejável devido a uma série de infortúnios, mas ainda a tempo de complementarem de forma muito útil a informação que foi colhida durante o incidente de Janeiro. A informação resultante será analisada mais à frente.

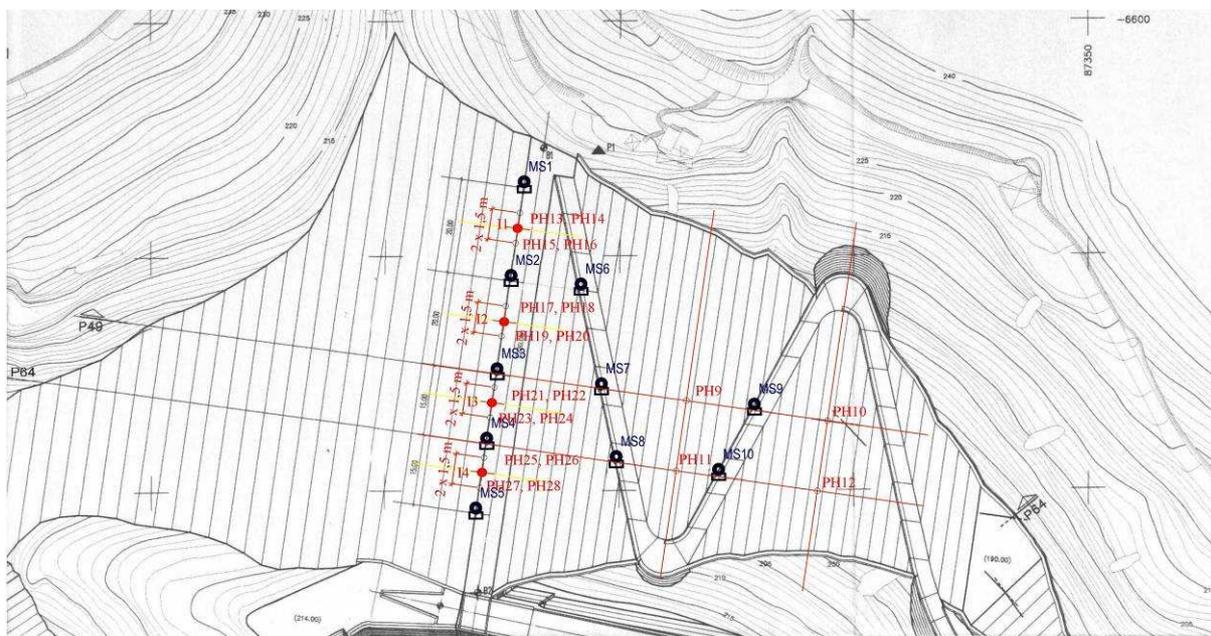


Fig 14-Localização, em planta, dos equipamentos de observação na barragem

3.4 - Descrição do incidente e medidas tomadas

O inverno de 2002, início de 2003 foi particularmente chuvoso, em especial no período de Natal e Ano Novo. De facto, apesar de se ter mantido a descarga de fundo totalmente aberta durante todo este período crítico este órgão não foi capaz de descarregar todo o caudal afluente.

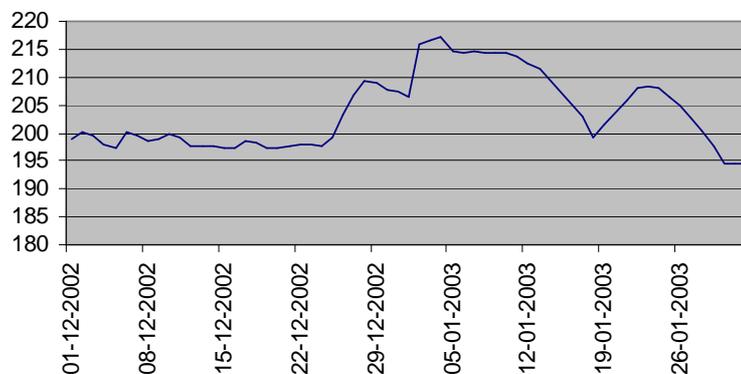


Fig 15-Evolução da cota da albufeira de Novembro (2002) a final de Janeiro (2003)

Em Novembro (2002), após a realização dos primeiros ensaios constatou-se que os aterros da barragem se encontravam em condições muito deficientes, em especial nos metros superiores. O coroamento situava-se à cota 220. De acordo com os resultados dos ensaios SPT os últimos 6 metros da barragem apresentavam valores da resistência muito deficientes. Para além disso os resultados dos ensaios eram muito irregulares (Fig 16), havendo alternâncias de zonas com resistência razoável com zonas de resistência muito reduzida.

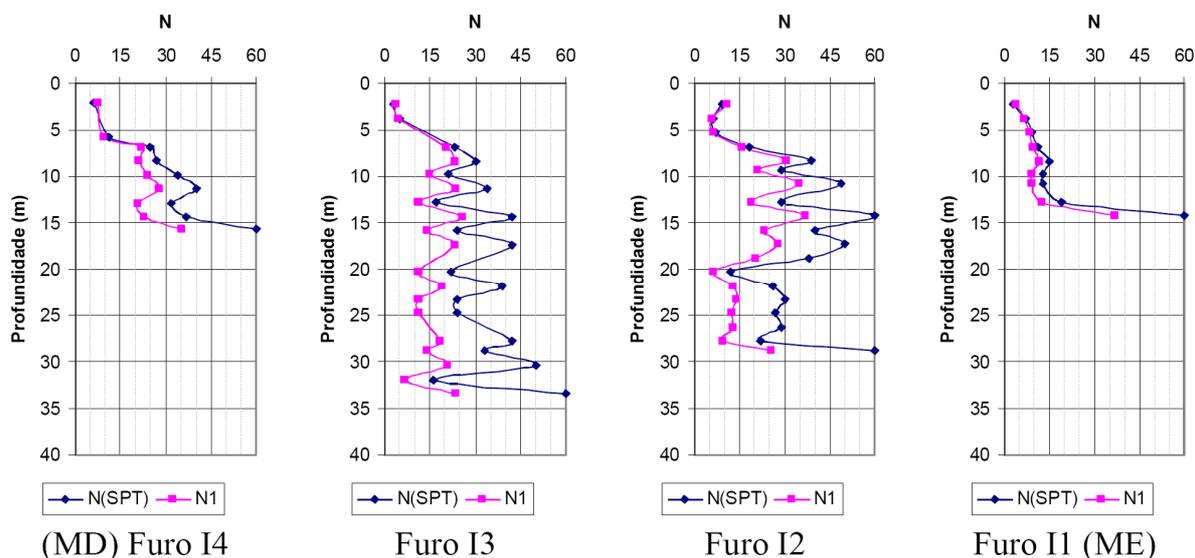


Fig 16-Resultado dos ensaios SPT

Esta descrição das resistências dos aterros no ensaio SPT, embora estranha, permitia explicar as muito elevadas deformações que se verificavam então, com especial incidência no coroamento. Explicavam, por exemplo a fendilhação que se verificava no pavimento betuminoso. Por outro lado, ao existirem zonas no interior do aterro, mesmo a profundidades consideráveis, até junto à fundação com resistências muito baixas causou grande preocupação pois essas zonas podem não ser competentes, por exemplo, no que respeita ao controlo da percolação pelo aterro da barragem.

Nesta altura, em Dezembro detectou-se a jusante, junto ao pé de talude uma cavidade de dimensões apreciáveis (Fig 17). Embora o aparecimento desta cavidade suscite, naturalmente, muita preocupação, após uma análise cuidada da mesma, concluiu-se que, em princípio, não teria tido origem no interior da barragem, isto é, não deveria ser causada por um fenómeno de erosão interna. Por outro lado, no interior da cavidade não se detectou a passagem de água, apesar de toda essa zona estar bastante húmida, o que, naturalmente se relacionava com as chuvas que durante esse mês caíram sempre com abundância.

Após a realização dos furos e dos ensaios SPT instalaram-se nesses furos, inclinómetros e efectuou-se a campanha de referência desses aparelhos (entre 16 e 18 de Dezembro).

Durante a época de Natal 2002 e Ano Novo, o TRE manteve vigilância diária à barragem e informou de forma contínua o LNEC e o INAG da situação da barragem, nomeadamente da evolução da cavidade, dos resultados da inspecção visual que sempre fazia e, acima de tudo, da evolução do nível da albufeira, que subia incessantemente. No apresenta-se a cota da albufeira e a respectiva variação diária durante o período em causa.



Fig 17-Cavidade detectada no pé de jusante

No dia 2 de Janeiro, no local da barragem, choveu incessantemente. Aliás, a variação de cota do dia 1 para o dia 2, foi superior a 9 m, apesar de se manter, como até aí, a descarga de fundo totalmente aberta.

Quadro 1-Variação da cota da albufeira

Data	Cota	Variação diária (m)
25-12-02	199.3	
26-12-02	203.4	4.1
27-12-02	206.86	3.46
28-12-02	209.31	2.45
29-12-02	208.98	-0.33
30-12-02	207.77	-1.21
31-12-02	207.49	-0.28
1-1-03	206.46	-1.03
2-1-03	215.9	9.44
3-1-03	216.54	0.64
4-1-03	217.07	0.53

Foi nesse dia que o TRE detectou diversas zonas no paramento de jusante onde, aparentemente, jorrava água do aterro. Essas zonas localizavam-se, em especial junto à encosta esquerda e a quantidade de água era tal, que não era possível discernir sobre a sua origem. Na verdade essa observação era impossível devido também à quantidade de chuva que caía. Por outro lado, verificava-se visualmente o aumento da fendilhação no pavimento do coroamento. Em resumo, todos os indícios apontavam para uma situação de rápida deterioração da barragem tendo-se então decidido dar conhecimento às autoridades de Protecção Civil locais da situação tendo-se também mobilizado uma equipa do LNEC e do INAG que se deslocou nesse mesmo dia à barragem.

A referida equipa chegou à barragem durante a madrugada do dia 3 e, porque havia parado de chover, foi possível, então verificar que as ressurgências de água eram oriundas, muito provavelmente, da encosta e não da albufeira, como se chegou a temer. Em princípio tratava-se de água proveniente da encosta da ME que não sendo devidamente captada nas caleiras surgia uns metros mais à frente, já no paramento da barragem. Assim, e embora esse cenário muito preocupante não se tivesse confirmado, as observações feitas nessa mesma noite e durante o dia seguinte reafirmavam o mau comportamento da estrutura da barragem. De facto, quer os deslocamentos verticais externos (obtidos por nivelamento) quer os horizontais internos (medidos nos inclinómetros), eram muito elevados e apresentavam variações preocupantes. A título de exemplo apresenta-se na Fig 18 os deslocamentos medidos no inclinómetro II junto à margem esquerda. Em cerca de 15 dias, os deslocamentos registados no encabeçamento do inclinómetro, são de cerca de 15mm para montante e de 20 mm para a MD.

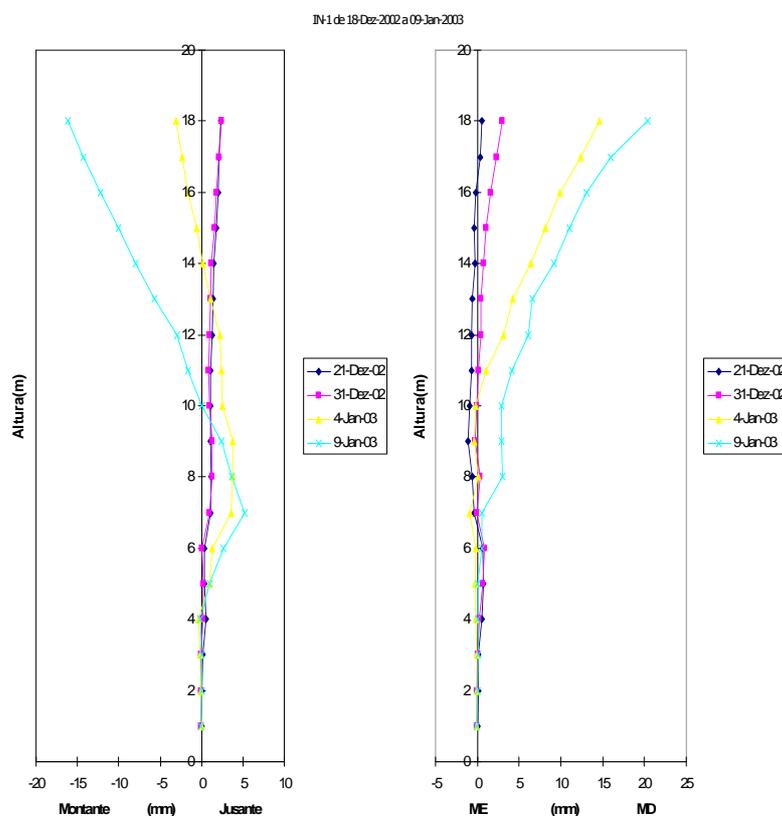


Fig 18-Deslocamentos horizontais internos no inclinómetro II (ME)

Embora o nível da albufeira continuasse a subir, concluiu-se que a barragem não apresentava, à data, indícios de qualquer fenómeno de instabilização eminente. Não obstante de se saber que as deformações eram muito elevadas, que a situação da barragem estava longe de ser normal. Assim, decidiu-se aguardar pelo abaixamento do nível da albufeira, mantendo observações diárias dos diversos equipamentos instalados e diversas inspecções visuais por dia.

No dia 4 de Janeiro de 2003, o TRE, informa o LNEC que se havia detectado a passagem de água turva na zona do pé de talude de jusante. Perante este novo indício de que algo de anormal se estaria a passar, a equipa do LNEC e INAG deslocou-se novamente à barragem. Todos os indicadores de comportamento acusavam situações anómalas. Os deslocamentos verticais evoluíam de forma muito notável, as taxas de deformação máximas (Fig 19) exibiam valores muito elevados em especial na zona da MD onde chegavam a atingir os 16 mm/dia.

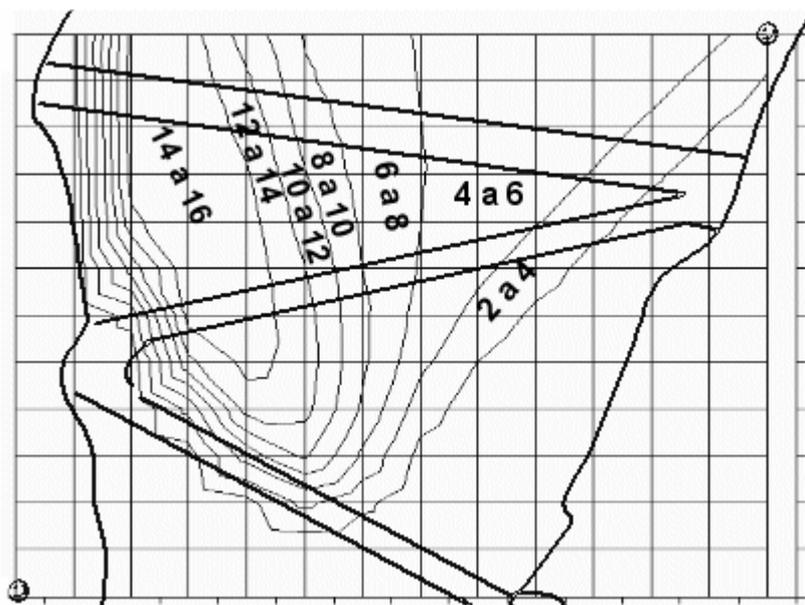


Fig 19-Taxas de deformação máxima durante o enchimento de Janeiro de 2003
(linhas obtidas a partir dos deslocamentos nas marcas superficiais)

Em face desta situação foi decidido que seria necessário promover o rápido abaixamento do nível da albufeira. Foram analisadas diversas hipóteses que apenas em teoria seriam viáveis mas rapidamente se concluiu que a melhor alternativa consistiria na demolição parcial do muro do labirinto do descarregador de cheias. De facto, no dia 4 de Janeiro a barragem havia iniciado a descarga por este órgão dado que o nível da albufeira era superior ao NPA. A demolição parcial do muro foi efectuada durante a noite, com recurso a um martelo pneumático tipo “pica-pau”.



Fig 20-Descarregador de cheias em 2002/01/03 e após demolição parcial em 2002/01/04

Uma das vantagens desta opção foi a de ser possível descarregar a barragem rapidamente mas sem causar caudais excessivos a jusante. De facto, a demolição foi feita em diversas etapas e entre cada etapa, era feita a verificação do caudal que se escoava para jusante, inspeccionando a ribeira e as diversas pontes ao longo do seu curso.

Outro aspecto muito importante e que levou à opção de demolir o muro do descarregador, relacionava-se com os resultados dos ensaios SPT e com a cota da soleira do descarregador. Como se disse, embora os resultados dos ensaios SPT fossem globalmente maus, nos primeiros 6 m de aterro, eram muito maus. A cota do coroamento era 220. Ora $220-6=214$ que é precisamente a cota da soleira do descarregador. Assim, a destruição do muro do labirinto, embora não permitisse a descida total da albufeira permitia, pelo menos que os últimos 6 m da barragem que se encontravam em pior estado não fossem sujeitos à acção da água.

Ultrapassada a situação de maior emergência, e tendo-se conseguido promover o abaixamento da albufeira, foi mantida durante os dias seguintes uma actividade de inspecção e observação intensa até se ter considerado que a situação da barragem não oferecia qualquer risco.

3.5 - Situação actual

Na sequência do abaixamento da albufeira foi possível terminar a destruição do muro do labirinto do descarregador de cheias. Desta forma garantiu-se que mesmo que voltasse a haver uma subida repentina da albufeira a cota da mesma nunca ultrapassaria muito a cota 214 (Fig 21).

Uma vez concluída esta fase foi possível proceder à reactivação do desvio provisório da barragem. Esta operação consistiu na abertura de uma entrada de água junto à torre de manobras, no desmante da conduta $\phi 600$ da galeria que atravessa a fundação na MD e no desmante dos órgãos hidráulicos na zona de saída da descarga de fundo. Estes trabalhos ficaram concluídos em Outubro de 2003.



Fig 21-Aspecto do descarregador de cheias após corte do muro

Na presente data (Setembro de 2008) a barragem ainda se encontra vazia. Foi decidido pelo dono de obra fazer um projecto de reabilitação da barragem que já foi concluído. A solução preconizada pelo projecto, consiste, de forma resumida, em desmontar a parte superior do aterro bem como uma fatia a montante. Em seguida reconstrói-se essas parcelas do aterro (Fig 22), com os mesmos materiais que haviam sido empregues na construção da barragem

original mas com algumas alterações em termos de especificações construtivas, nomeadamente usando um teor em água mais elevado. A fundação será tratada através de uma cortina de injeções a executar a partir da plataforma de trabalho resultante do desmonte parcial da barragem.

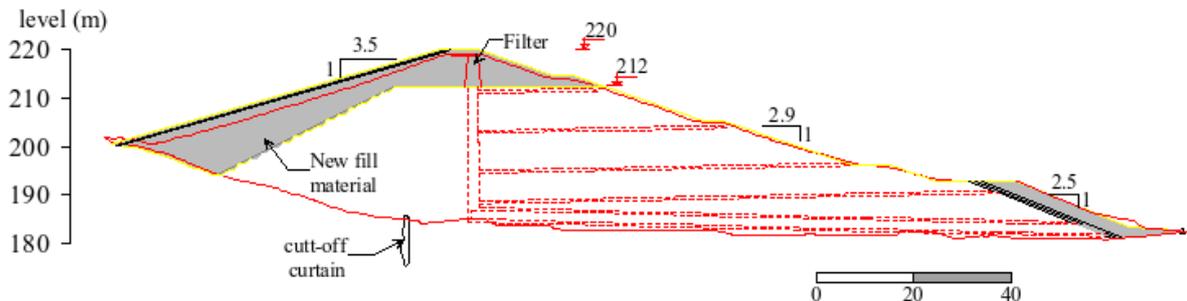


Fig 22-Solução de reabilitação da barragem do Lapão

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo descreve, através de um exemplo real que se passou em Portugal, a importância de duas das obrigações da regulamentação Portuguesa de Segurança de Barragens: o plano de observação, onde se indicam as grandezas a observar, a frequência das leituras e os critérios de análise destas; o plano de primeiro enchimento onde se estabelecem o(s) patamar(es) para esta importante fase da vida da obra. Quer um, quer outro documentos cumpriram as suas obrigações. Por um lado, o enchimento faseado da albufeira permitiu controlar a forma como se detectaram as anomalias; por outro, o plano de observação permitiu confirmar, através de observação instrumental a existência de um comportamento anormal. De igual forma, mesmo durante o acidente, foi possível, recorrendo à observação e inspeção visual da obra, aferir sobre a sua segurança e proceder em conformidade.

5 - BIBLIOGRAFIA

RSB – “Regulamento de Segurança de Barragens”. Decreto-lei nº 11/90

NOIB – “Normas de observação e inspeção de barragens”. Anexo à Portaria nº 847/93