

TRATAMENTO DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE VALTORNO-MOURÃO

FOUNDATION GROUT TREATMENT OF THE VALTORNO-MOURÃO DAM

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

Paixão, José Boal – *ATMAD, Vila Real, Portugal, jpaixão@atmad.pt*

Romeiro, Manuel – *CENORGEIO, Lisboa, Portugal, manuel.romeiro@cenor.pt*

RESUMO

A barragem de Valtorno/Mourão, no Concelho de Vila Flor, cria uma albufeira com o volume total de $1,12 \times 10^6 \text{ m}^3$, para abastecimento público. No decorrer do primeiro enchimento, a interpretação dos resultados das observações efectuadas permitiu concluir que a barragem não estava a exhibir, do ponto de vista hidráulico, o comportamento esperado, quer no que respeita aos caudais percolados, quer no que respeita às pressões em alguns piezómetros. Foi decidido interromper o primeiro enchimento da albufeira, procedendo-se ao diagnóstico das deficiências encontradas. Em resultado, promoveu-se o reforço do tratamento de impermeabilização, e, actualmente, a barragem exhibe o comportamento considerado adequado. Apresentam-se as características fundamentais da barragem e fundação, o diagnóstico das deficiências, o tratamento efectuado e, finalmente, o comportamento observado até ao final do primeiro enchimento.

ABSTRACT

The Valtorno-Mourão dam in the municipality of Vila Flor is intended to create a reservoir with the total volume of $1.12 \times 10^6 \text{ m}^3$ for water supply. During the first filling, the comparison of the results of monitoring with the predictions from the Monitoring Plan lead to the conclusion that the dam was not having the expected behaviour, both for the amount of flow and for the pore pressures measured in some piezometers. Given this scenario, it was decided to stop the first filling of the reservoir to allow the diagnosis of deficiencies. As a result, a new grouting treatment of the foundation was made, so that currently, the dam exhibits the desired behaviour. This paper seeks to describe the fundamental characteristics of the dam and foundation, the diagnosis of disabilities, the treatment performed and, finally, the behaviour observed till the end of the first filling.

1. INTRODUÇÃO, DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A barragem de Valtorno/Mourão situa-se na ribeira de Valtorno, no Concelho de Vila Flor e destina-se a criar uma albufeira com o volume total de $1,12 \times 10^6 \text{ m}^3$, para fornecimento de água a Vila Flor. Para além deste objectivo, prevê-se que futuramente a albufeira de possa ainda funcionar como reforço às afluências da barragem da Fonte Longa no Concelho de Carrazeda de Ansiães. A barragem, com altura máxima acima da fundação de 32 m, é constituída por um perfil homogéneo (Figura 1) que incorpora materiais de aterro resultantes da alteração dos xistos provenientes de manchas de empréstimo localizadas na albufeira. O controlo de percolação da água no corpo da barragem é conseguido através de um sistema drenante constituído por um filtro sub-vertical, ligado a um tapete drenante.

O coroamento da barragem tem uma extensão de 150 m, com largura de 6,0 m e desenvolve-se segundo um alinhamento recto. O paramento de jusante inclui uma banquetta com 4 m de

largura, localizada à cota 453. O paramento de montante tem uma inclinação de 1V:3,5H enquanto a jusante a inclinação é de 1V:2H (Figuras 1 e 2).

A fundação rochosa é constituída fundamentalmente por xistos e granitos. Os primeiros ocorrem em toda a margem direita, apresentando-se aí muito alterados, e a montante do plinto na margem esquerda. A jusante do plinto, na margem esquerda ocorrem formações graníticas. O controlo da passagem de água através da fundação é conseguido através de uma cortina de injecções executada a partir de um plinto construído na sequência da limpeza da fundação.

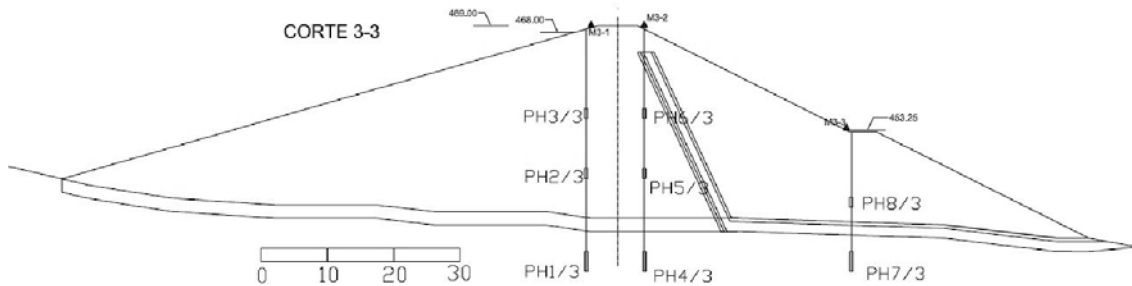


Figura 1- Perfil Transversal da Barragem de Valtorno-Mourão

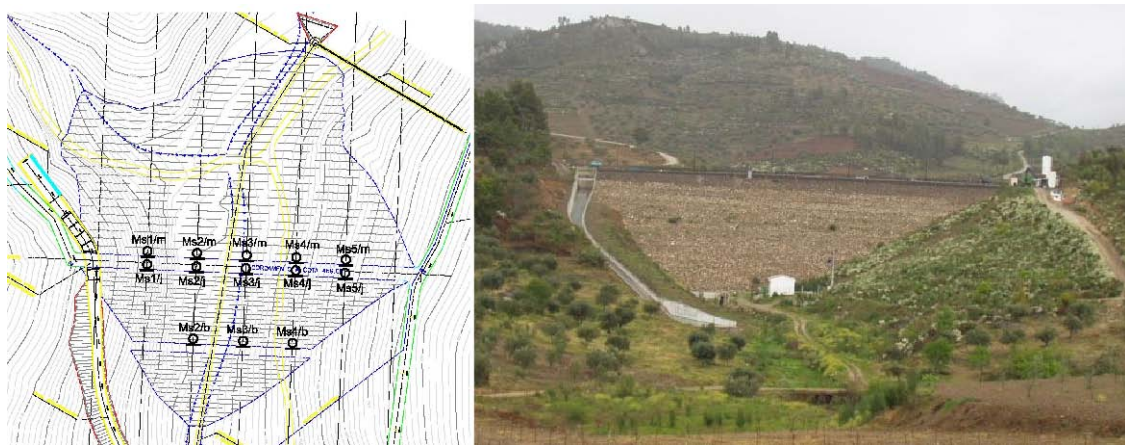


Figura 2- Planta da Barragem e Vista de Jusante

2. PLANO DE OBSERVAÇÃO E DE PRIMEIRO ENCHIMENTO

2.1. Grandezas a Observar

A análise dos elementos de projecto e os aspectos relativos ao acompanhamento durante a fase de construção, permitiram definir as seguintes grandezas a observar: nível da albufeira, pressões intersticiais (resultantes da percolação e da construção), caudal total de percolação, deslocamentos superficiais (verticais e horizontais) e dados meteorológicos.

Seguindo as recomendações da ICOLD traduzidas na regulamentação portuguesa (NOIB, 1993), verifica-se que a monitorização proposta cumpre os mínimos recomendados. No que respeita à localização dos equipamentos procurou-se repartir a sua localização por forma a representar de forma adequada o comportamento da obra e de forma a permitir detectar qualquer anomalia no funcionamento da barragem. Foram colocados 20 piezómetros hidráulicos em três perfis transversais (Figura 1), 6 piezómetros eléctricos (sem fluxo) para acompanhamento da

fase construtiva, um sistema de medição dos caudais parciais (tapete drenante e fundação) e 13 marcas superficiais para medição de assentamentos e deslocamentos horizontais.

2.2. Frequência de Leituras

A frequência de leitura dos diversos dispositivos foi estabelecida tendo em consideração os objectivos fundamentais do Plano de Observação e de Primeiro Enchimento integrando todo o conhecimento sobre a obra, nomeadamente sobre a sua fase construtiva. Assim, no caso da barragem de Valtorno, e para a fase de primeiro enchimento, foram estabelecidas as frequências resumidas no quadro seguinte.

Quadro 1 – Resumo da Frequência de Leituras dos Dispositivos de Observação

Grandeza	Frequência mínima	Leituras obrigatórias
Nível da albufeira	Diária	não aplicável
Deslocamentos superficiais	Quinzenal	Início, patamares, fim do enchimento
Níveis piezométricos	Quinzenal	Início, patamares, fim do enchimento
Caudal total	Semanal	Início, patamares, fim do enchimento

2.3. Plano de Primeiro Enchimento

O estabelecimento do programa de enchimento da albufeira deve atender aos aspectos relacionados com a segurança, regime de afluências, capacidade da albufeira, necessidade de água, etc.. No caso da barragem da Valtorno, atendendo à sua altura máxima (cerca de 32 m), volume da albufeira e localização, e atendendo ainda à necessidade de armazenamento de água para abastecimento, considerou-se ser adequado preconizar um patamar intermédio para o primeiro enchimento cumprindo, todavia, as condições de segurança pretendidas. Tendo em atenção as necessidades de água decidiu-se manter o patamar apenas durante 2 meses, o período estritamente necessário para a avaliação do desempenho estrutural e hidráulico.

Em face do exposto e conforme se apresenta na Figura 3, estabeleceu-se um patamar de enchimento à cota 459, que representa cerca de 72% da carga máxima da barragem e a cerca de 41% ($0,461 \times 10^6 \text{ m}^3$) do volume de água correspondente ao NPA ($1,12 \times 10^6 \text{ m}^3$).

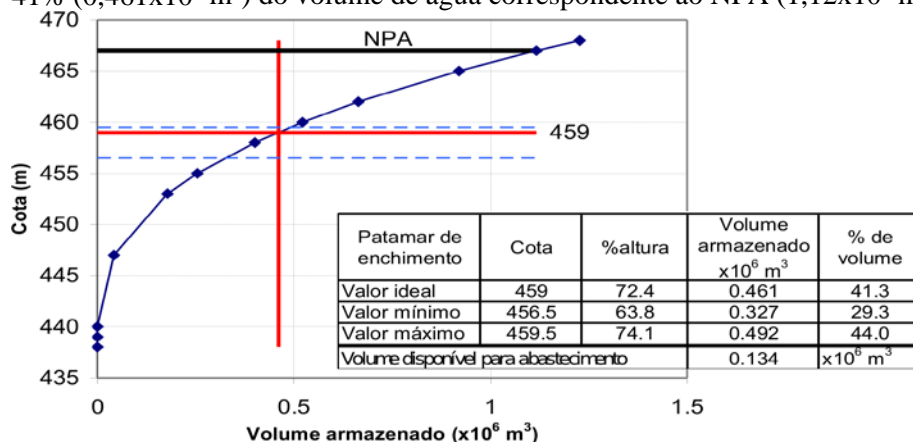


Figura 3- Definição do Patamar de Enchimento da Barragem de Valtorno

2.4. Comportamento Durante o Primeiro Enchimento

O primeiro enchimento iniciou-se após a inspeção prévia feita pela Autoridade (INAG) e pelo LNEC. De acordo com o previsto, foram feitas diversas campanhas de observação que

permitiram acompanhar o comportamento da barragem. O primeiro patamar foi atingido após cerca de 40 dias, sendo que, após os metros iniciais, o enchimento se processou a uma taxa média de 22 cm/dia. Na Figura 4 apresenta-se o diagrama com os assentamentos.

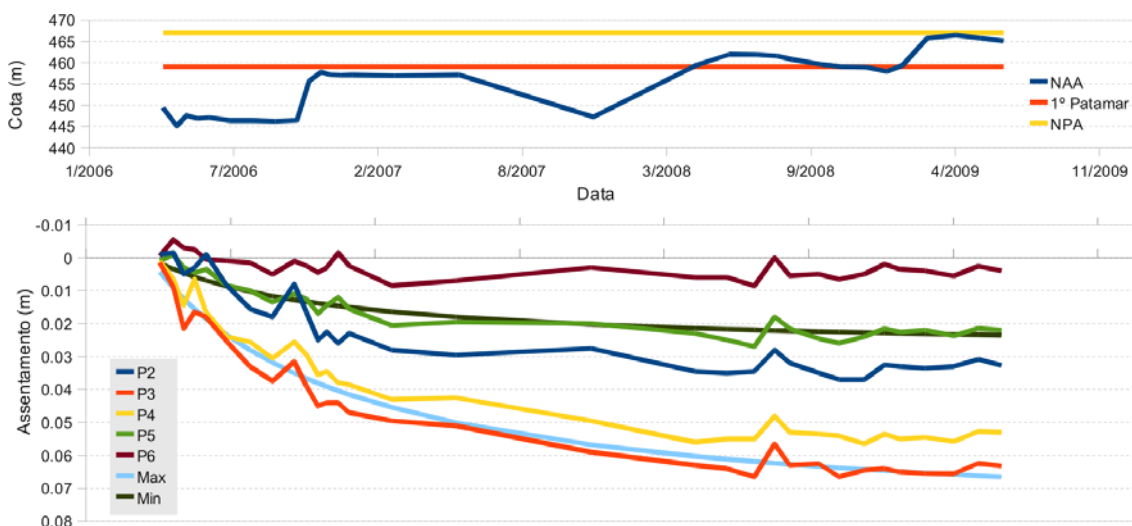


Figura 4 - Assentamentos Observados no Coroamento

Verifica-se que os assentamentos até ser atingido o patamar do primeiro enchimento são relativamente reduzidos, ocorrendo, no perfil P3 um assentamento de cerca de 5 cm. Este comportamento é compatível com a segurança e está de acordo com o esperado para uma barragem deste tipo.

Já no que respeita aos caudais percolados, tal como traduzido na Figura 5, vieram a verificar-se valores muito elevados, cerca de 10 vezes os valores previstos no plano de observação. De acordo com o cálculo de percolação efectuado (Figura 6) através do método dos elementos finitos, estimava-se para o NPA, um caudal de 2,6 l/s.

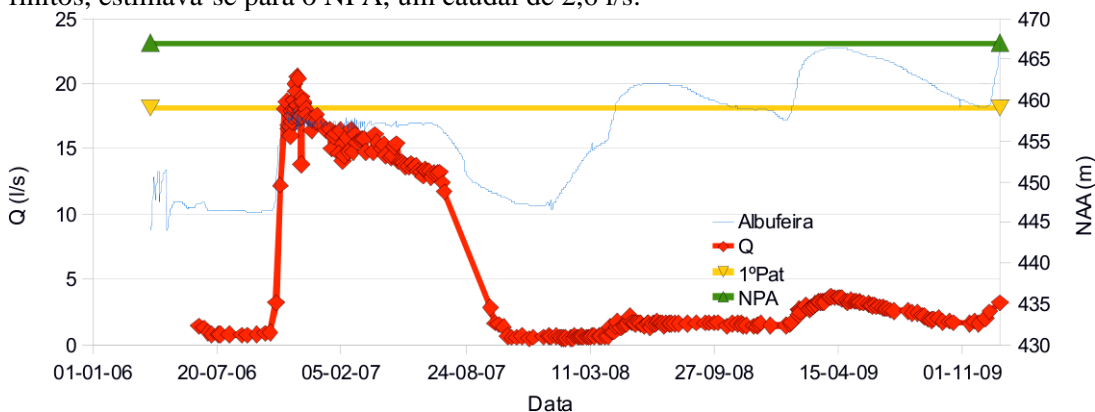


Figura 5- Caudais Percolados

Na verdade, o caudal registado chegou a ser superior a 20 l/s, mas para o primeiro patamar. Estabelecendo um modelo de análise quantitativa para os caudais em função do NAA e do tempo, obteve-se:

$$Q(l/s) = 0,7799 - 0,018N + 1,607(NAA - 446)$$

sendo N o número de dias de enchimento, o que permite avaliar a variação no tempo.

Para o NPA, a estimativa do modelo (que certamente é optimista) correspondia a 30 l/s. Para além da questão imediata de segurança, é necessário salientar que a barragem perderia através da fundação, durante um ano, praticamente a totalidade da sua capacidade de armazenamento.

Outros sintomas davam também indicações de um comportamento deficiente da fundação, nomeadamente, os níveis piezométricos a jusante do núcleo, havendo inclusivamente piezómetros acima do tapete drenante que acusavam a presença de alguma pressão.

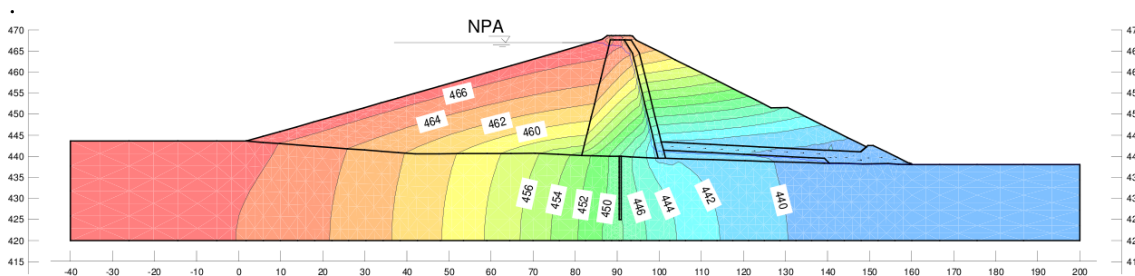


Figura 6- Modelo de percolação. Isolinhas de Potencial

Em face do comportamento verificado, o diagnóstico feito pelo LNEC, Projectista e Autoridade, indicava que a cortina de injeções não estava a desempenhar as suas funções e, em face disso, foi decidido interromper o primeiro enchimento, proceder a um projecto do reforço de impermeabilização da fundação e implementar a solução projectada.

3. INJEÇÕES DE REFORÇO DA IMPERMEABILIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO

3.1. Projecto de Execução

O projecto do reforço da impermeabilização da fundação foi elaborado com base nos resultados das injeções efectuadas durante a construção, primeiramente antes dos aterros e, depois no final da obra, a partir do coroamento e da soleira do descarregador (Ferreira Lemos, 2007). Previa a injeção do terreno em 2 cortinas já existentes, uma na albufeira junto à entrada do descarregador de cheias e outra ao longo do eixo de referência da barragem. Estas cortinas não estavam ligadas.

Em relação ao tratamento na cortina pelo eixo da barragem, objecto desta comunicação, o reforço da impermeabilização consistia na injeção de 29 furos a partir do coroamento, com afastamento de 3,0 m e inclinados a 60° para as vertentes, excepto 3 furos na zona central que seriam verticais para não intersectarem a conduta da descarga de fundo. De referir que estes furos não cobriam a totalidade da fundação da barragem, nomeadamente nos encontros e no fundo do vale.

No que respeita aos procedimentos executivos, o projecto especificava que a furação nos aterros seria a seco com trado contínuo e revestimento e, na rocha, à rotação com recuperação contínua de amostras e ensaios Lugeon sistemáticos. Para protecção dos aterros contra a circulação da água de retorno da furação, determinava-se que os tubos de revestimento fossem cravados cerca de 0,50 m na fundação em rocha compacta ou no plinto em betão e selados com calda de cimento (Tecnasol, 2007). Em geral, estes procedimentos de projecto foram seguidos em obra. No entanto, com o decorrer dos trabalhos passou-se a utilizar água na furação a trado, a baixa pressão, para arrefecimento da ferramenta e selaram-se os tubos até à boca com calda plástica, de cimento e bentonite. Depois da 1ª fase das injeções, com o maciço rochoso suficientemente caracterizado, a furação passou a ser à rotopercussão.

3.2. Tratamento de Reforço da Impermeabilização

O tratamento com injeções de caldas de cimento para impermeabilização da fundação da barragem (cortina principal) foi efectuado numa extensão de 170 m, entre os encontro direito e

esquerdo e com uma altura variando entre 15 m no fundo do vale e vertente esquerda e 30 m na vertente direita. A superfície total da cortina objecto deste tratamento foi de 3200 m², incluindo a zona sob o descarregador de cheias (Figura 7).

As injeções foram realizadas pelo método das aproximações sucessivas. Numa primeira fase o tratamento consistiu na injeção dos furos primários e secundários previstos no projecto e ainda alguns furos de reforço nos encontros, onde se detectou um maciço bastante descomprimido e com fendas abertas. Perante as dificuldades em obter “nega” e os elevados consumos de cimento, resultantes da má qualidade do maciço de fundação, decidiu-se prosseguir o tratamento para uma 2ª fase de injeções com furos terciários e quaternários implantados nas zonas mais críticas situadas próximo do contacto com os aterros e que foram identificadas em ambas as vertentes pelo zonamento geotécnico efectuado. O prolongamento da cortina no encontro direito, para além do descarregador de cheias, obrigou à execução de trabalhos específicos já que se estava em presença de um dreno longitudinal que percorria, de montante para jusante, toda a fundação deste órgão de descarga. Foi necessário cortar o dreno na zona da cortina e realizar a impermeabilização do maciço sob o descarregador com injeções pontuais, pelo método dos “tubos à manchete”, efectuadas em 9 furos com disposição em leque, designada em obra por “mini cortina”. A interrupção do dreno longitudinal do descarregador de cheias obrigou, por questões de estabilidade, à amarração da estrutura de entrada ao maciço rochoso com pregagens definitivas protegidas contra a corrosão.

3.3. Características Geológicas do Maciço de Fundação

A barragem situa-se em formações do complexo metamórfico da formação da Ervedosa, muito próximo do contacto com o granito de Mourão. O maciço rochoso, onde está inserida a cortina de impermeabilização, é constituído principalmente por diversos tipos de xisto, desde o xisto grauvacóide muito rijo até ao xisto argiloso brando. Na vertente direita os xistos são atravessados por inúmeros filões e encraves de migmatitos, granulitos e raramente pegmatitos. Uma massa de granito de grão grosseiro aparece na base da vertente esquerda. Os filões de quartzo compacto ou muito fracturado, também são frequentes no seio dos xistos ao longo de toda a cortina.

À complexidade litológica do maciço, sobrepõe-se uma compartimentação bastante pronunciada dada por uma fracturação intensa e aberta e por inúmeras falhas e bandas tectónicas de espessura muito variável. O preenchimento destes acidentes tectónicos é constituído por material de esmagamento, de resistência muito variável, desde argila, passando por brechas irregularmente consolidadas e rochas encaixantes microfissuradas. No fundo do vale, numa faixa com cerca de 20 m de largura, o maciço é bastante heterogéneo e fortemente tectonizado, tendo-se interpretado como sendo a caixa de uma falha regional com direcção NNE-SSW.

Nas vertentes os xistos apresentam um perfil de meteorização bastante evoluído, com rocha decomposta a muito alterada, em média até cerca de 5 a 6 m de profundidade. Abaixo deste horizonte superficial, a rocha é pouco alterada ou sã com passagens muito alteradas a decompostas que vão desaparecendo em profundidade.

Os sinais de circulação de água pelo maciço fracturado manifestam-se nas vertentes até profundidades próximas do leito do rio. Na vertente direita identificou-se uma banda onde a oxidação das fracturas atinge maiores profundidades e com maior permeabilidade. Esta singularidade comportou-se como um caminho de percolação preferencial através da fundação com contribuição significativa para os caudais a jusante da barragem, como se veio a verificar durante os trabalhos de injeção.

3.4. Zonamento Geotécnico

Para análise e sistematização dos resultados do tratamento de impermeabilização em tempo real foi feito um zonamento geotécnico do maciço de fundação, que permitiu individualizar as zonas mais críticas da cortina que exigiam abordagens particulares nos procedimentos de injeção. Este zonamento considerou a área total da cortina dividida em 6 zonas geotécnicas. Conforme se indica nos cortes da Figura 7, as zonas A, B e C situam-se na vertente direita, a zona D no fundo do vale e as zonas E e F na vertente esquerda (Cenorgeo, 2008). As áreas parciais de cada zona estão indicadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Áreas das Zonas Geotécnicas

Zona geotécnica	A	B	C	D	E	F	Total
Área parcial (m ²)	310	250	1140	52	400	580	3200
Percentagem	0	0	0	0	0	0	0

As zonas mais permeáveis, onde se observaram maiores consumos de cimento e dificuldades em atingir pressão ou a “nega” foram as zonas A, E e, em menor grau, a zona B, que totalizam 30% da cortina. Os restantes 70% referem-se às zonas C, D e F, com permeabilidades baixas a moderadas mas com consumos por vezes elevados, inclui o horizonte inferior de encastramento da cortina que correspondeu nesta obra a cerca de 30% da área tratada.

3.5. Composição das Caldas de Cimento

As composições das caldas de injeção utilizadas resultaram de um primeiro estudo em obra, antes do início dos trabalhos, e de ajustamentos sucessivos em função dos resultados obtidos e também da experiência da Tecnasol. Foi decidido utilizar os métodos tradicionais de injeção, recorrendo a 3 composições de cimento e água e sem bentonite. No Quadro 3 indica-se a composição das caldas produzidas na central.

Mais tarde foi decidido juntar areia fina nas injeções dos troços com consumos muito elevados. Tratou-se de uma areia quartzosa, calibrada com dimensões 0 – 2 mm. As composições com areia indicam-se no Quadro 4.

Quadro 3 – Composição das Caldas à Base de Cimento e Água

Traço	Água	Cimento	Valores dos ensaios de controlo no fabrico		
C/A	(l)	(kg)	Viscosidade (s)	Densidade	Decantação (%)
1/2	200	100	28 - 29	1,24 – 1,26	45
1/1,5	200	135	30 - 31	1,34 – 1,36	25
1/1	200	200	32 - 33	1,44 – 1,46	20

Quadro 4 – Composição das Caldas à Base de Cimento, Areia e Água

Traço	Água	Cimento	Areia	Valores dos ensaios de controlo no fabrico		
C/A	(l)	(kg)	(kg)	Viscosidade (s)	Densidade	Decantação (%)
1/0,7	140	200	40	37 - 38	1,56	9
1/0,6	120	200	40	42	1,66	8
1/0,7	140	200	60	Não injectável		

Nas injeções dos furos quaternários da cortina de impermeabilização da barragem e na injeção dos últimos furos à entrada do descarregador foi utilizado o silicato de sódio como acelerador de presa para controlar os consumos de cimento. Este acelerador só foi utilizado nos troços onde a pressão manométrica vinha a zero quando se interrompia o circuito e após se atingirem os volumes máximos preconizados.

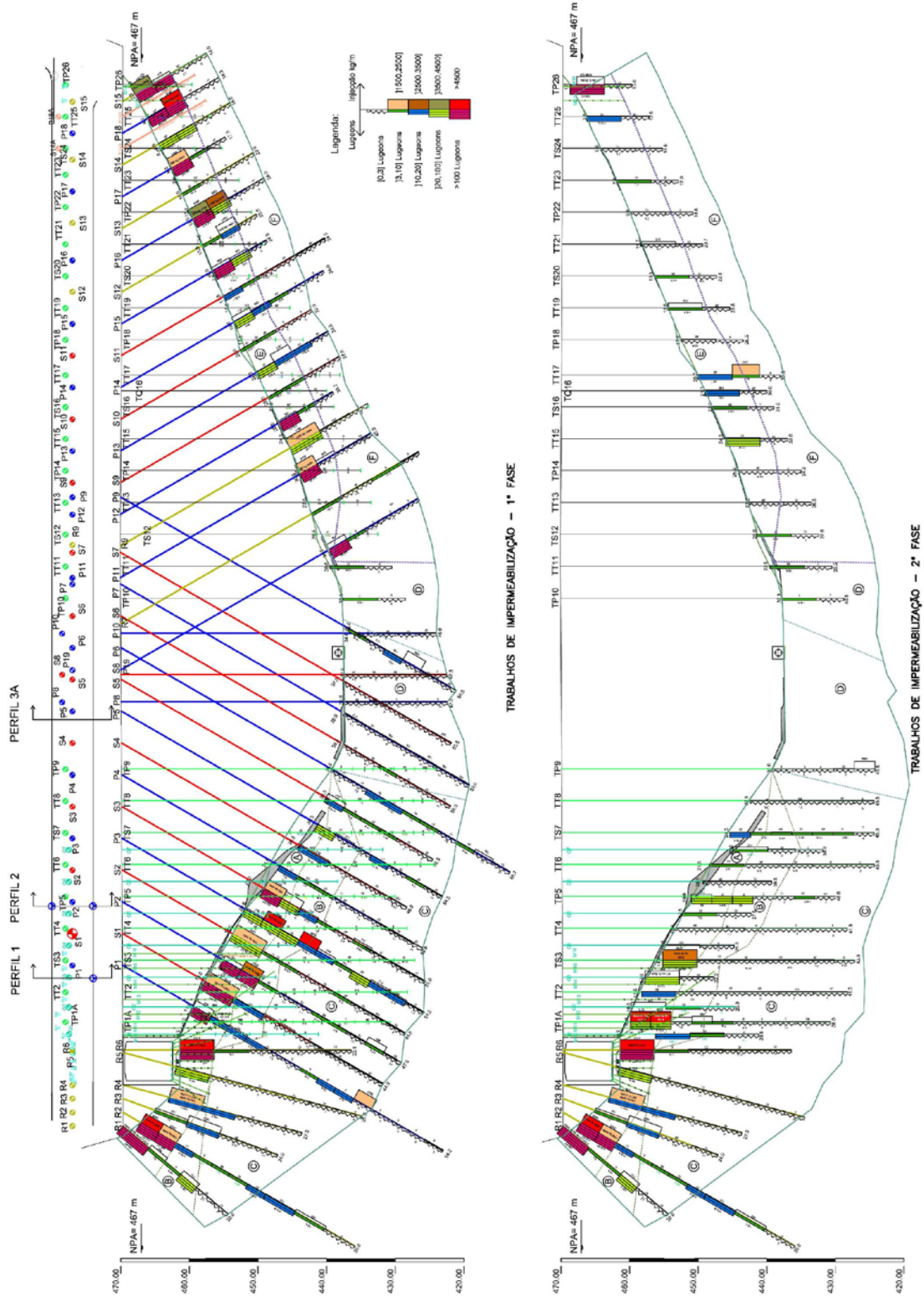


Figura 7- Resultados das Injeções de Reforço da Impermeabilização, 1ª e 2ª fases

O critério que se utilizou para a passagem de uma calda mais fluída para outra mais espessa foi de um modo geral o expresso no Quadro 5. Apenas se aplicou este critério quando a pressão de injeção era muito baixa em relação à pressão máxima estabelecida para a “nega”. Quando se começou a utilizar areia na composição das caldas, procurou-se não limitar o volume, parando a injeção apenas no fim do dia de trabalho.

Quadro 5 – Critérios para a Mudança de Caldas

Calda (C/A)	Quantidades máximas de injeção	
	Cimento (kg)	Volume de calda (m ³)
1/2	400	1
1/1,5	1080	2
1/1	2220	3

3.6. Quantidades Principais

Para o reforço da cortina de impermeabilização da barragem pelo método tradicional foram realizadas as quantidades indicadas no Quadro 6, na 1ª e 2ª fases.

Nas injeções de reforço da cortina da barragem consumiram-se 513820 kg de matérias sólidas (cimento e areia) o que corresponde a um consumo específico médio de 393,7 kg por metro de furo, sendo 474,2 kg/m na 1ª fase e 264,2 kg/m na 2ª fase. Na 1ª fase o consumo específico médio de matérias sólidas por metro quadrado de cortina foi de 119,3 kg/m². Estes dados genéricos mostram que os consumos foram muito elevados, tanto na 1ª fase como na 2ª fase, existindo muitos troços com várias toneladas de cimento injectado. Em termos relativos os consumos foram mais elevados nas zonas A, B e E, com valores entre 418 kg/m e 2050 kg/m na 1ª fase. Na 2ª fase notou-se uma redução acentuada dos consumos, no entanto, permaneceram elevados em alguns troços dos furos quaternários. Apesar de se verificarem trechos em furos quaternários com elevados consumos, foi decidido dar por concluído o tratamento, deixando nas zonas mais críticas alguns furos de reserva equipados com “tubos à manchete”.

Quadro 6 – Quantidades de Furação e Consumos de Matérias Sólidas por Zonas Geotécnicas

Zona	Área (m ²)	Primeira fase			Segunda fase		
		Furação (m)	Matérias secas(kg)	Consumos (kg/m)	Furação (m)	Matérias secas(kg)	Consumos (kg/m)
A	310	84	210450	2505,4	88	89950	1010,8
B	250	70	29290	418,4	93	8740	94,0
C	1140	306	26150	85,5	134	4510	33,7
D	520	118	10330	97,5	34	3930	115,6
E	400	106	102600	967,9	91	25370	278,8
F	580	121	2880	23,8	61	620	9,7
Total	3200	805	381700	474,2	500	132120	264,2

De salientar que estes consumos elevados se devem à penetração fácil da calda no maciço, ao preenchimento de vazios por vezes bastante abertos e à migração das caldas para zonas afastadas da cortina. Por outro lado, não se registaram sinais de ter havido penetração de calda nos filtros e drenos do sistema de drenagem interna da barragem.

3.7. Monitorização dos Caudais de Infiltração

A eficácia do tratamento de impermeabilização à medida que decorreram as injeções da cortina da barragem foi verificada através da leitura quase diária das afluências aos medidores de caudal situados no pé de jusante dos aterros. Foi ainda controlado o turvamento da água indicativo de

haver comunicação da calda com o sistema de drenagem interna da barragem. O turvamento da água nos medidores nunca foi observado. O caudal total medido foi de 1,7 l/s no início do tratamento. À medida que decorreram as injeções o caudal foi diminuindo gradualmente, com duas descidas bruscas que foi possível associar à injeção de 2 zonas mais permeáveis, com as fracturas oxidadas situadas abaixo do leito fóssil do rio. Antes da subida da água na albufeira o caudal estabilizou num valor de 0,2 l/s. Com a subida do nível de água da albufeira até à cota 460,8 m (1,8 m acima do patamar do 1º enchimento) o caudal aumentou até 1,3 l/s. A redução conseguida foi superior a 15 vezes.

4. OBSERVAÇÃO DURANTE O REENCHIMENTO

Após a conclusão do tratamento reiniciou-se o enchimento da albufeira de acordo com o mesmo plano que havia sido estabelecido inicialmente. No que respeita ao caudal percolado, o comportamento da fundação tornou-se substancialmente diferente, mas acima de tudo, enquadra-se agora no modelo de comportamento previsto (Figura 6). O valor máximo de caudal registado no NPA foi, num período de alguma pluviosidade de 3,5 l/s. Este valor, embora superior à previsão do Plano de Observação é da mesma ordem de grandeza e, em termos práticos, significa que a barragem se está a comportar, nesse aspecto, de acordo com o pretendido.