

O TRATAMENTO DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DO SABUGAL. DA CONCEPÇÃO À EXECUÇÃO.

SABUGAL DAM FOUNDATION GROUTING. FROM DESIGN TO CONSTRUCTION.

AMARAL, José A. *Geólogo de Engenharia, COBA, Consultores Engenharia e Ambiente*

RESUMO

Discute-se nesta comunicação a problemática do tratamento da fundação realizado para a barragem do Sabugal, que se encontra na fase final de construção, nas suas múltiplas vertentes - técnica, executiva e económica - abrangendo as diversas fases do seu desenvolvimento: dos estudos de caracterização, passando pela concepção da solução de projecto e seu desenvolvimento (elaboração do Projecto de Concurso) até à elaboração do Projecto de Execução (durante a construção) e assistência técnica à execução.

ABSTRACT

This paper presents and discusses in detail Sabugal Dam grouting works. In it, beginning by site investigation, passing through the earlier phases of the design studies and ending with detailed design and construction, most of the technical, executive and economical issues related to the grouting works involved in this large dam are described and the fundamental questions of the works discussed.

1- CONCEPÇÃO. ESTUDOS DE PROJECTO

A Barragem do Sabugal situa-se no rio Côa, a montante da vila do Sabugal, no distrito da Guarda. Tem uma altura máxima de 58,5m acima da fundação, à cota (794,00) e um comprimento de 1005m pelo coroamento. Trata-se duma barragem de aterro zonado, com núcleo espesso de solo residual de xisto e maciços em xisto ripável. Interessa um vale assimétrico, bastante suave, com uma linha de água secundária, relativamente cavada, na margem esquerda, obrigando à execução de uma portela (Fig.1).

Os estudos da barragem começaram nos anos 70, com a elaboração do Projecto em 1976, tendo o INAG reconhecido a necessidade da sua revisão, passados que foram 20 anos sobre a primeira versão.

Os estudos de revisão do projecto basearam-se nos dados disponíveis dos reconhecimentos executados na fase anterior e em trabalhos de prospecção conduzidos na fase actual dos estudos. Não se registaram discrepâncias sensíveis entre os dados recolhidos nas diversas campanhas (anterior e actual). Verificou-se aliás uma boa concordância, em particular para as sondagens e ensaios de permeabilidade. No total foram executados 21 perfis sísmicos de refração, 18 sondagens (verticais e inclinadas) e cerca de 229 ensaios Lugeon. O comprimento das sondagens variou entre os 20 e os 80m, num total de 851,5 m de furação. Com base nos dados recolhidos, foi possível definir as principais características geológicas e geotécnicas e elaborar o zonamento geotécnico do maciço de fundação da barragem, que se apresenta no Quadro 1.

Trata-se dum maciço que interessa formações do Xisto-Grauváquico, nomeadamente filádios mosqueados, metagrés e metagrauvaques, com filões intercalados de rochas básicas, muito tectonizado, evidenciando um dobramento intenso e um forte diaclasamento até grandes profundidades. As dobras são geralmente apertadas, frequentemente de tipo isoclinal. O seu estado de

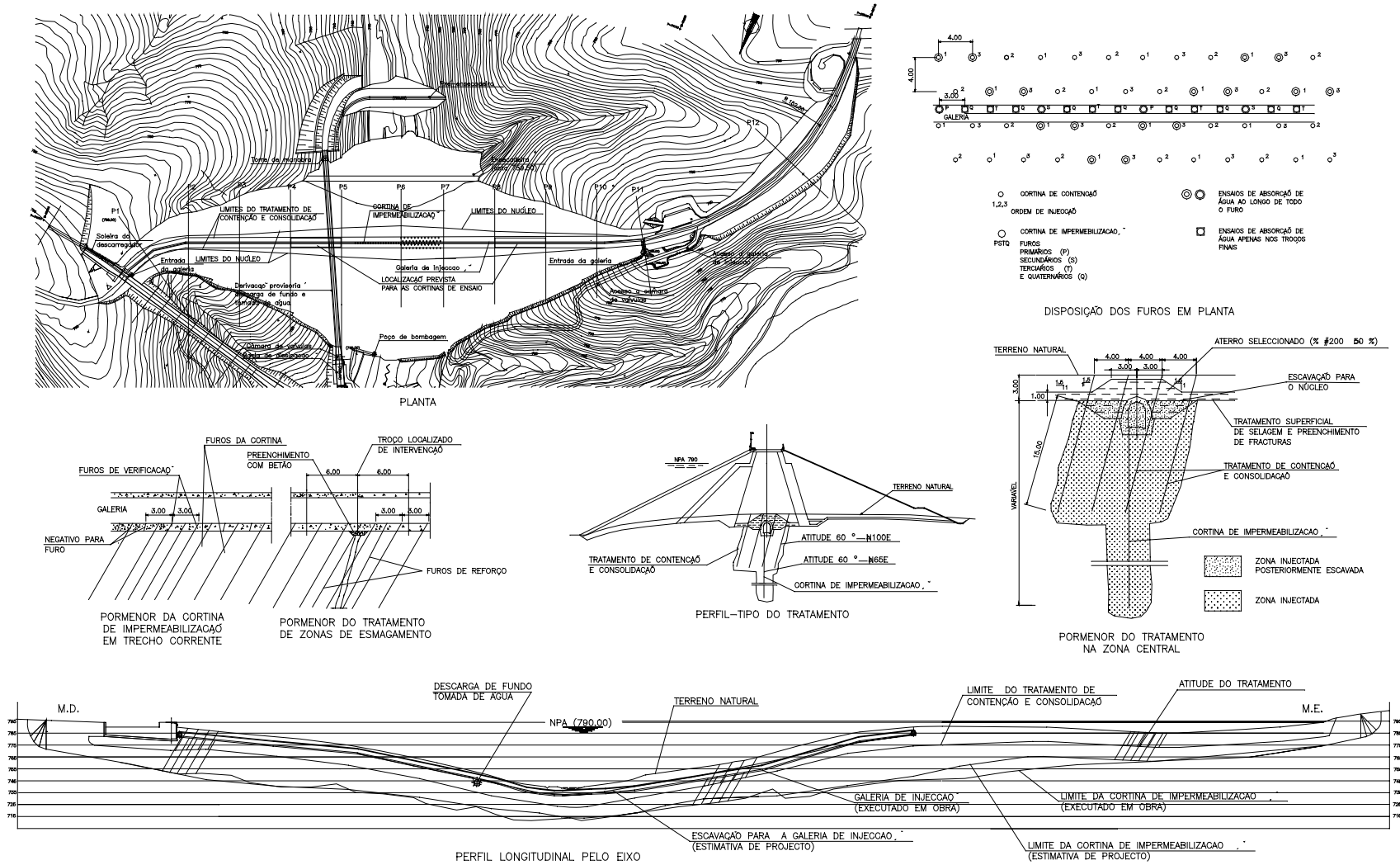


Figura 1 –Barragem do Sabugal. Tratamento da fundação

alteração é relativamente homogéneo, apresentando um espesso manto de alteração, que cresce do centro do vale em direcção às encostas. O maciço são encontra-se a cerca de 20m de profundidade no centro do vale, progredindo até aos 15 a 20m na margem direita e 30 a 40m na margem esquerda. Apresenta-se muito fracturado até grandes profundidades e o padrão de fracturação é caracterizado pela ocorrência de 6 famílias de fracturas, das quais 3 principais. Destas, 2 famílias são relevantes para a percolação da água: a primeira, coplanar com a foliação, inclinando entre 65° e 85° para a margem esquerda e para jusante e a segunda, inclinando 30° a 50° para jusante. Até aos 20 m de profundidade no vale central e 40m nos encontros, as diaclases de ambas as famílias definem alinhamentos, são persistentes, próximas a muito próximas, planares e rugosas, apresentando-se abertas ou com enchimentos argilosos, geralmente moles e erodíveis. São frequentes nesta zona, os vestígios de circulação de águas subterrâneas, traduzidos designadamente pela ocorrência de depósitos de óxidos e hidróxidos de ferro (geralmente pirolusite) bem como de calcite espicular, nas paredes das diaclases. A partir destas profundidades, as diaclases apresentam-se rugosas, medianamente afastadas, sendo pouco persistentes e fechadas, com as superfícies pouco alteradas. Um aspecto relevante desta fundação consiste ainda na ocorrência de várias zonas de esmagamento, algumas de espessura superior a 2 m, na maioria subverticais, e promovendo a percolação de montante para jusante.

Quadro 1. Barragem do Sabugal - Zonamento Geotécnico

| Zonas Geotécnicas | VL (m/s) | Alter. (W) | Fract. (F) | RQD (%) | | Absorção (Lugeon) | | Depósitos de óxidos e hidróxidos de ferro |
|-------------------|-----------|------------|------------|---------|---------|-------------------|---------|---|
| | | | | médio | + freq. | média | + freq. | |
| ZG 5* | < 1 500 | W4-5 | F5 | 0 | 0 | >500 | A.T** | muito abundantes |
| ZG 4 | 1000-2800 | W4 | F4-5 | 15 | 0-30 | 50 | 30-A.T | median. abundantes |
| ZG 3 | 1500-2800 | W3/4 | F4-5 | 40 | 30-50 | 10 | 5-20 | pouco abundantes |
| ZG 2 | 2800-4000 | W3 | F4 | 60 | 50-75 | 8 | 2-15 | raros |
| ZG 1 | > 4000 | W1-2 | F3 | 80 | > 75 | < 1 | 0-2 | muito raros |

* Zona superficial de solo residual e depósitos recentes; A.T. ** Absorção total

Os ensaios Lugeon permitiram zonar hidraulicamente o maciço, observando-se o seguinte: elevadas absorções nas zonas mais superficiais (ZG5 e ZG4) até aos 10 a 15 m de profundidade; absorções intermédias até aos 20 a 40 m, nas zonas ZG3 e ZG2 e absorções muito baixas a nulas a partir destas profundidades. Além deste zonamento em profundidade, foi possível distinguir a existência de singularidades com absorções totais até grandes profundidades, relacionadas com zonas de esmagamento. No conjunto dos ensaios realizados, observou-se predominância dos regimes laminar e intermédio, não se tendo reconhecido ocorrência de fenómenos de contra-pressão. Em alguns ensaios em que se tentou levar o maciço à rotura hidráulica, verificou-se que o fenómeno foi um pouco atenuado pelo seu intenso estado de fracturação. Notou-se uma evolução da predominância dos regimes turbulento e anormal por grande variação da absorção, nas zonas mais superficiais, para predomínio dos regimes laminar e anormal por pequena variação da absorção, nas zonas mais profundas, enquanto que o regime intermédio não mostrou variação sensível com a profundidade. A análise do comportamento das fracturas com a profundidade demonstrou, por outro lado, uma tendência, na zona superficial, para a desobstrução franca, mesmo a baixas pressões, seguida de comportamento elástico a médias profundidades e finalmente, na zona menos permeável, uma clara predominância de casos de colmatção. Estes fenómenos foram mais evidentes em alguns ensaios de permeabilidade de maior duração.

Com base no cenário descrito, realizaram-se estudos de percolação para vários perfis representativos da barragem, designadamente para o perfil-tipo de maior altura, recorrendo ao programa de elementos finitos "SEEPW". A permeabilidade considerada para cada zona da barragem e da fundação é apresentada, de forma sintética, no Quadro 2. Saliente-se que os coeficientes de permeabilidade assumidos para cada zona da fundação, considerados para efeitos dos cálculos de percolação, foram ponderados conservativamente a partir dos resultados dos ensaios de permeabilidade.

Os cálculos para o pleno armazenamento foram executados para 2 situações de referência: fundação com tratamento e sem tratamento, conduzindo aos seguintes caudais específicos percolados:

Fundação sem tratamento = $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$; Fundação com tratamento = $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

De acordo com estes estudos, observou-se uma redução sensível do caudal percolado pela fundação na zona de influência da cortina, cuja eficiência é de cerca de 70%. Verificou-se ainda que o gradiente hidráulico se reduz significativamente, cerca de 1,5 vezes, com a introdução da cortina de injeções. Todas estas considerações levaram a considerar necessária a implementação do controlo da percolação através da fundação da barragem, traduzido nas seguintes soluções de projecto:

a) execução de uma cortina de injeções de calda de cimento, de consolidação e contenção, ao longo da superfície de referência da barragem, com comprimento de 10 a 15 m, constituída por 4 fiadas de furos na zona da galeria de injeção e por 2 fiadas na zona da portela, dispostas em quincôncio e afastadas de 4m. Preconizou-se que a cortina fosse realizada partir da plataforma de escavação para o núcleo da barragem, sendo sobreescavada na zona de implantação da galeria de injeções (Fig. 1). Definiram-se injeções pelo método ascendente, em trechos de 5m. Pretendeu-se garantir, deste modo, o tratamento eficaz da zona mais superficial do maciço, promovendo um aumento da resistência e uma diminuição da deformabilidade do terreno, bem como uma melhoria da estanqueidade da interface núcleo/fundação, aumentando significativamente o caminho de percolação na zona superficial. A adopção desta solução permitiu ainda considerar algum efeito de sobrecarga e confinamento da zona a tratar com a cortina profunda;

b) execução de uma galeria de injeção, após a realização do tratamento de contenção/consolidação, construída a céu aberto, ao longo da superfície de referência da barragem, sob o núcleo e encastrada no maciço rochoso pertencente à ZG3, saneando-se os terrenos pertencentes às zonas ZG5 e ZG4, de fracas características geotécnicas. Preconizou-se a construção desta galeria em duas fases: viga de injeção na primeira fase e secção de fecho quando considerado mais oportuno (Fig. 1), de forma a facilitar a execução do tratamento a partir do seu interior;

c) execução de uma cortina de injeções de calda de cimento, com funções de estanqueidade, materializada por uma fiada de furos de injeção, a eixo do tratamento de contenção/consolidação (Fig. 1). Estipulou-se um modo de execução da cortina com furos primários, secundários, terciários e quaternários, com afastamentos de 24, 12, 6 e 3m respectivamente. Como para a cortina de contenção e consolidação, a injeção foi definida, essencialmente, pelo método ascendente e em trechos de 5m. O comprimento dos furos foi definido de forma a garantir uma penetração de cerca de 5m (1 trecho) no maciço com absorções inferiores a 1 Lugeon, na zona de maior altura de água, correspondente a um comprimento da ordem dos 20 a 35m. Refira-se que neste caso particular, a exigência inicial de projecto, de atingir o maciço com absorções inferiores a 1 Lugeon como limite do tratamento, critério um pouco severo face à dimensão da obra e à carga hidráulica envolvida, radicou no facto de os dados disponíveis à altura indicarem que essas condições eram atingidas a profundidades relativamente reduzidas - comprimento de cerca de um terço da altura da barragem - o que levou a considerar qualquer outra solução, que envolvesse menor comprimento do tratamento, como menos interessante do ponto de vista técnico-económico.

O modo de execução assim definido, valorizou o conhecimento progressivo das características hidráulicas e, por inerência, geológico-geotécnicas do maciço. Assim, em primeiro lugar, previu-se a execução de duas cortinas experimentais (ou blocos de ensaio) em zonas chave do maciço, consideradas representativas das condições de realização do tratamento. Essas cortinas, uma em cada encontro permitiram, designadamente, aferir as composições de calda mais eficazes e as pressões mais adequadas para as diferentes zonas a tratar, bem como avaliar a penetrabilidade das caldas injectadas.

Quadro 2 - Permeabilidade dos materiais da barragem e da fundação

| Zonas | kh (m/s) | kv (m/s) |
|---|--|----------------------|
| Núcleo | 5×10^{-8} | 2.5×10^{-8} |
| Maciço montante em Enrocamento grauvaque | $kh = kv = 1 \times 10^{-5}$ | |
| Maciços jusante e montante em xisto ripável | 5×10^{-7} | 2.5×10^{-7} |
| Fundação Zona superficial Zona profunda | $kh = kv = 1 \times 10^{-5}$ $kh = kv = 1 \times 10^{-8}$ | |
| Cortina de injeções | $kh = kv = 1 \times 10^{-7}$ | |

Para além das cortinas experimentais, preconizaram-se, como rotina, ensaios de absorção de água antes e após a execução do tratamento, sugerindo-se a seguinte metodologia para a cortina de contenção/consolidação: execução de ensaios Lugeon em pelo menos, 1 furo cada 6m de desenvolvimento longitudinal da cortina, das fiadas da série 1 e 3 (Fig.1). O método de execução dos ensaios foi concebido de forma a não só avaliar as características de permeabilidade do maciço (série 1), mas também aferir a eficácia do tratamento já executado (série 3), ensaiando-se cerca de 1/3 dos furos. Os ensaios foram descendentes, acompanhando a furação, ao longo de todo o comprimento dos furos, em trechos de 5 m e com 3 patamares de pressão, utilizando um obturador simples.

Quanto à cortina de estanqueidade e pelas mesmas razões, preconizou-se a execução de ensaios de permeabilidade ao longo do comprimento total dos furos primários e secundários, igualmente acompanhando a furação, em trechos de 5 m e com 3 patamares de pressão, utilizando obturador simples. Já para os furos terciários e quaternários, recomendou-se furação sem realização prévia de ensaios Lugeon, à excepção do trecho antecedendo a profundidade estimada para o tratamento, executando-se apenas um ensaio neste trecho final, para avaliar da necessidade, ou não, de aprofundamento da cortina. Recomendou-se ainda a recuperação de testemunho em cerca de metade dos furos primários, para observação das características do maciço. Finalmente, preconizou-se a realização de furos de verificação intermédios, com ensaios de absorção de água do tipo Lugeon sistemáticos, no final dos trabalhos.

2 - EXECUÇÃO

A execução do tratamento da barragem do Sabugal iniciou-se em Setembro de 1997, fazendo-se a implantação inicial com base nos desenhos de Projecto de Concurso, designado abreviadamente por Projecto. O Projecto de Execução do tratamento foi desenvolvido durante a realização da obra, elaborando-se os respectivos Desenhos de Execução e Notas Técnicas. Deu-se assim início às primeiras fiadas da contenção e consolidação, na margem direita. Previamente, foi instalada a central de preparação de caldas e iniciaram-se os estudos das caldas de injeção, preparando-se diversas suspensões de cimento-água com e sem bentonite e aditivo superfluidificante (Melcret 222). Elaboraram-se as respectivas curvas de isoviscosidade e isodecantação, tendo-se adoptado na fase de arranque por 2 caldas ricas, com relação cimento:água de 1,2:1, 0,5% de aditivo e sem bentonite

Quadro 3 - Pressões de injeção

| Trechos de injeção | Baixa absorção | Alta absorção | Baixa absorção | Alta absorção |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|
| | Sol. inicial (MPa) | Sol. inicial (MPa) | Sol. final (MPa) | Sol. Final (MPa) |
| Superior (S) | 0.05 | 0.03 | 0.25 | 0.15 |
| Médio (M) | 0.75 | 0.05 | 0.50 | 0.30 |
| Inferior (I) | 1.00 | 0.75 | 0.75 | 0.60 |

(**calda Ia**) ou com 1% de bentonite (**calda Ib**). Para estas caldas as viscosidades e as decantações obtidas foram, respectivamente, de 30 segundos e de 5%. A injeção dos primeiros furos da consolidação foi assim efectuada com caldas espessas, de elevada densidade

($d=1,53$). A calda Ib foi adoptada sempre que as absorções fossem superiores a 100kg/m de cimento. Para estas caldas foram adoptadas pressões de injeção crescentes com a profundidade e variáveis em função da absorção de acordo com o Quadro 3 - Solução inicial. Na sequência dos primeiros resultados, evoluiu-se para 3 tipos de caldas - **Ia**, **Ib** e **Ic** - começando por uma calda mais fluída (**calda Ia**) com uma relação cimento:água de 1:1,8 e 2% de bentonite, seguindo-se uma calda semi-densa (**calda Ib**) com relação C:A de 1,2:1, sem bentonite e com 0.4% de aditivo e finalmente uma calda densa (**calda Ic**) apresentando uma relação C:A idêntica à anterior, mas com 1% de bentonite. A adopção destas caldas mais fluídas permitiu o emprego de pressões de injeção um pouco mais baixas, que constam igualmente do Quadro 3 - Solução final. Os critérios de utilização de cada tipo de calda obedeceram ao seguinte: aplicação da **calda Ia** inicialmente, mantendo-se desde que a 0.2 MPa o consumo fosse inferior a 200 kg de cimento e se, com um consumo de 1 ton., a pressão se

mantivesse nos 0.4 MPa; passagem para a **calda IIb** sempre que se observasse um consumo de cimento superior a 200kg (a pressão inferior a 0.2 MPa) ou superior a 1 ton. a pressões superiores a 0.3MPa; passagem para a **calda IIc** cada vez que o consumo de cimento, a pressões menores que 0.3 MPa, fosse superior a 1 ton..

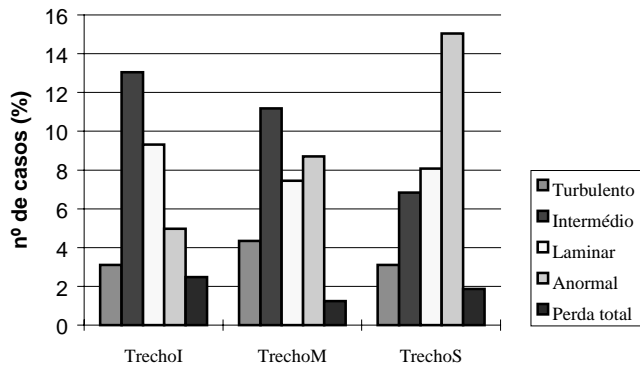


Fig. 2 - Regime de escoamento por trecho

inferior (I). Esta ocorrência, cuja importância não fora detectada na fase de projecto, deve-se à provavelmente ao maior grau de alteração do maciço no trecho superficial, cujo preenchimento das fracturas terá um efeito de colmatação, para os ensaios realizados a baixa pressão. Os ensaios executados permitiram ainda detectar algumas singularidades muito expressivas, traduzindo-se em absorções de água muito elevadas, das quais se destaca a ocorrência numa extensa zona muito perturbada, cerca do PK380 a 500. Destaca-se ainda o trecho adjacente ao PK150, em que as permeabilidades observadas na fase de projecto foram significativamente superiores às registadas nesta fase.

Por outro lado, a análise dos regimes de escoamento permitiu retirar algumas conclusões acerca das características das fracturas. Assim, na generalidade, pode dizer-se que o regime predominante no trecho mais superficial (S) é anormal, enquanto que os regimes intermédio e laminar predominam nos trechos médio e inferior (M e I). Já o regime turbulento, conforme se pode observar na Fig. 2, ocorre em percentagem relativamente baixa. Note-se ainda que os ensaios em regime intermédio apresentam uma tendência laminar mais frequente. A predominância deste tipo de regimes poderá indicar que a maioria das fracturas do maciço, sobretudo na zona inferior, são finas ou apresentam enchimento de calibre fino e a sua secção tem tendência a variar como resultado de fenómenos de deformação (elástica ou não) ou fenómenos de colmatação/desobstrução. O regime turbulento, sobretudo característico de fracturas abertas de grande secção, eventualmente com enchimentos grosseiros e erodíveis, ocorre em pequena percentagem.

O tratamento de contenção/consolidação envolveu a execução de 16 000m de furação, com um consumo total de cimento da ordem das 950 ton., correspondendo a um consumo médio específico de 60kg/m. Apesar de, como é geralmente aceite, não existir uma relação directa entre a absorção de água e de calda de cimento, dado o seu comportamento reológico diverso, foi notório o maior consumo de cimento do trecho inferior (I) com cerca de metade da absorção, contra 30% do trecho médio (M) e 20% do trecho superior (S). Observou-se ainda um consumo específico que, no trecho inferior, foi maior que 120kg/m, enquanto que no trecho médio se cifrou em cerca de 90kg/m e no trecho superior foi menor que 50kg/m.

A atitude do tratamento definida no projecto - $60^\circ \Rightarrow N100E$ - foi mantida para a contenção/consolidação, considerando-se que constituía o melhor compromisso no que respeita a intersecção, nas melhores condições, do maior número de famílias de fracturas. Note-se a este propósito, que as famílias mais relevantes para a percolação apresentam forte inclinação e direcção

Os ensaios de permeabilidade realizados nos furos da contenção/consolidação, permitiram confirmar, na generalidade, os resultados obtidos na fase de projecto, quer em termos de absorção de água, quer no que respeita ao comportamento hidráulico das fracturas. Verificou-se que o maciço se apresentava permeável nos trechos mais próximos da superfície (até cerca dos 15 a 20m) com absorção de água bastante elevada, da ordem dos 10 a 40 Lugeon. Os valores de absorção de água no trecho superior (S) foram numa maneira geral inferiores aos observados nos trechos médio (M) e

montante/jusante, cortando oblíquamente o eixo da barragem. Esta circunstância, como se discutirá adiante, condicionará provavelmente a circulação da calda no interior do maciço, presumindo-se que o preenchimento das fracturas se fará sobretudo segundo uma orientação montante/jusante e não transversalmente, como é habitual. Esta será, provavelmente, uma das razões que justifica que os consumos de cimento não diminuam significativamente dos furos primários para os terciários, apresentando antes uma variação nítida em função do grau de fracturação do maciço.

Enquanto decorriam os trabalhos da contenção/consolidação, executaram-se os furos exploratórios, ao longo do eixo da barragem, carotados e com ensaios de permeabilidade em toda a sua extensão, permitindo reconhecer em profundidade a natureza e as características de permeabilidade do maciço e aferir os dados e soluções de projecto. O espaçamento de princípio adoptado foi de 48m (1 exploratório em cada 2 primários) variando-se este espaçamento em função dos resultados que iam sendo obtidos. Os critérios para a definição da profundidade dos furos exploratórios, foram definidos de acordo com os requisitos de fecho do tratamento de impermeabilização (encastramento no maciço com permeabilidade inferior a 1 a 2 Lugeon). Assim os furos exploratórios prolongaram-se até se atingirem 2 ensaios consecutivos com absorções inferiores a 2 Lugeon. Estes furos confirmaram, na generalidade, os valores obtidos no projecto, a menos de situações pontuais relativas a falhas/zonas de esmagamento, com permeabilidades contrastantes e objecto de tratamento específico. Estes furos foram ainda de importância primordial para a caracterização detalhada e em profundidade da zona da portela. Na fase de projecto presumia-se a existência duma zona de permeabilidade contrastante na portela, não se dispondo no entanto de informação suficiente para a definir em pormenor. De facto, foi possível observar a ocorrência de um contacto entre o xisto/filádio alterado e o grauvaque/metagrés são a pouco alterado, cerca dos 40 a 50m de profundidade, com absorções elevadas (10 a >100 Lugeon). Nesta zona, como adiante se verá, o comprimento da cortina foi incrementado entre 4 e 12m, numa extensão de 200m.

Decidiu-se, para facilitar a execução do tratamento de impermeabilização no interior da galeria de injeção, modificar a orientação dos furos, passando estes a orientar-se segundo o eixo da barragem (N65E) na zona da galeria, mantendo-se no entanto a inclinação de 60°. Trata-se duma alteração de pormenor sem consequências para a qualidade do tratamento mas que permitiu, não obstante, uma melhoria sensível do rendimento dos trabalhos de furação e injeção, facilitando a operação dos equipamentos em espaço confinado.

Deu-se também início à execução dos blocos de ensaio, um em cada margem, aos PK 121-143 (margem direita) e PK 470-494 (margem esquerda) limitados por 2 furos primários consecutivos. A injeção dos furos foi executada com os 3 tipos de caldas usados na consolidação/contenção e com as pressões especificadas no Caderno de Encargos, atingindo-se pressões máximas da ordem de 1MPa. Nos blocos de ensaio conseguiu-se uma redução sensível da permeabilidade, depois de injectados os furos terciários, não sendo contudo tão nítida a redução de permeabilidade para os quaternários, validando as caldas e pressões preconizadas.

No decorrer da escavação para a galeria de injeção e para a galeria de derivação (esta apenas na margem direita) foi possível observar directamente o maciço de fundação, designadamente as características das fracturas - extensão, rugosidade, abertura, enchimento, etc. - bem como o estado de alteração do maciço rochoso e a ocorrência e atitude de estruturas planares tais como falhas e zonas de esmagamento, espessura dos depósitos de cobertura, etc.

Na margem esquerda, a cotas baixas, a observação visual da escavação para a fundação da galeria, permitiu constatar as características geotécnicas deficientes do maciço rochoso, fruto da ocorrência duma linha de água oblíqua ao vale principal, que se estende por cerca de 100m, dando lugar a acentuada assimetria no perfil transversal da galeria, traduzindo-se numa diferença significativa de cotas, a montante e a jusante do eixo. Acresce que o perfil de alteração, em profundidade, acompanhando grosseiramente o andamento da topografia, reflectiu essa assimetria nas condições geotécnicas do maciço de fundação. Esta situação justificou portanto, o aprofundamento da escavação da galeria, afim de garantir maior homogeneidade nas condições de fundação e melhorar as suas

condições de encastramento, tirando partido do facto de que o seu aprofundamento significa menor comprimento do tratamento e, sobretudo, o corte do maciço rochoso permeável com um elemento estanque, em betão, num nível superficial muito descomprimido e com fracturas abertas.

A cortina de impermeabilização envolveu a execução de cerca de 14 000m de furação, com um consumo de cimento da ordem das 700 ton., a que corresponde um consumo médio específico de 50kg/m. Este baixo consumo traduz bem a natureza fina e fechada da rede de diaclases, tendo-se optado por um tratamento de impermeabilização que induzisse a mínima perturbação no meio envolvente. As caldas utilizadas, começando por suspensões mais fluídas e evoluindo para caldas densas apenas nas situações de elevados consumos, a altas pressões, parecem as mais adequadas a esta metodologia de selagem. Apenas nas singularidades correspondentes a zonas esmagadas, falhas ou charneiras de dobras, isto é, na generalidade das zonas perturbadas, se verificou um consumo mais elevado de cimento, muito contrastante com o panorama geral, atingindo nestes casos, valores superiores a 2 000kg/m. Algumas destas zonas foram aliás objecto da execução de furos quinquenários de reforço (cerca de uma trintena de furos) com profundidades variáveis entre 15 e 35m.

Um dos aspectos relevantes da execução da cortina de impermeabilização prende-se com a redução sensível dos consumos de cimento no trecho da consolidação/contenção, isto é, nos primeiros 3 trechos de 5m da cortina. Na verdade, comparando os valores de absorção iniciais da contenção/consolidação, com os obtidos posteriormente na cortina, observa-se uma redução da ordem dos 70%, podendo atingir em alguns casos os 90%, mas também, embora em menor número, os 20%. Acresce que nas zonas muito perturbadas identificadas na consolidação, os consumos de cimento da cortina de impermeabilização foram na generalidade bastante elevados, mesmo nos trechos já tratados pela consolidação/contenção, traduzindo a importância destas perturbações e o seu prolongamento em profundidade.

Na maior parte da cortina de impermeabilização foi possível fazer o encastramento no maciço pouco permeável. No entanto, na zona da portela, apesar do seu incremento em cerca de 4 a 12m, num trecho de cerca de 200m de extensão, o contacto xisto/grauvaque mais profundo (aos 45 a 50m) não foi objecto de tratamento. Na verdade, face ao custo inerente ao aprofundamento suplementar do tratamento, ponderando o longo caminho de percolação envolvido em eventuais passagens de água para jusante, através dos trechos permeáveis no contacto xistos/grauvaques, foi decidido não executar este trabalho. Esta situação será objecto de acompanhamento detalhado, particularmente na fase de primeiro enchimento.

Na margem direita ocorreram igualmente algumas situações anómalas, tendo alguns furos quinquenários apresentado valores de absorção de água residuais superiores a 5 Lugeon, a baixas profundidades, próximo da fundação da galeria. Também na fase de primeiro enchimento o comportamento desta zona será objecto de acompanhamento detalhado.

Alguns aspectos representativos do tratamento da fundação da barragem do Sabugal, apresentam-se no final desta comunicação, em fotografias da fase de obra, interessando respectivamente:

FOTO 1 - Vista aérea da obra, a partir de jusante;

FOTO 2 - Aspecto da fase de execução da galeria de injeção, visto a partir da margem direita;

FOTO 3 - Detalhe do maciço na zona de implantação da galeria, destacando-se as características das diaclases e o padrão de fracturação do maciço. Note-se, no canto inferior direito da fotografia, um negativo do tratamento de contenção/consolidação;

FOTO 4 - Detalhe do talude da escavação da galeria, destacando-se uma diaclase preenchida com calda de cimento.

3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento da barragem do Sabugal correspondeu na generalidade ao previsto no Projecto, quer do ponto de vista da execução técnica, quer no que concerne às quantidades trabalho. Para a furação os

valores previstos no projecto foram ultrapassados em cerca de 5%, enquanto que o consumo de cimento foi cerca de 80% do previsto. Os principais objectivos definidos no projecto parecem ter sido atingidos, designadamente:

- i. o tratamento de contenção/consolidação permitiu garantir uma selagem efectiva da zona mais superficial e descomprimida do maciço, assegurando o aumento de espessura do tratamento nas zonas com valores mais elevados de absorção de água e sujeitas a um gradiente hidráulico mais elevado; este tratamento conduziu ainda ao confinamento eficaz da zona a tratar com a cortina de impermeabilização, cujos consumos de cimento foram significativamente inferiores aos observados para o tratamento de contenção/consolidação em trechos contíguos;
- ii. a execução da galeria de injeção possibilitou a recolha de valiosa informação acerca das características geológicas e geotécnicas dos terrenos de fundação, confirmando a natureza do maciço e permitindo a visualização de algumas zonas já tratadas com o tratamento de contenção/consolidação; o seu aprofundamento nas zonas mais descomprimidas e alteradas da fundação, a cotas baixas, em particular na margem esquerda, permitiu sanear trechos de maciço de fraca qualidade, de difícil tratamento e que poderiam induzir futuros comportamentos deficientes da fundação da barragem, em zonas sujeitas a elevada carga hidráulica; por outro lado, a rede de piezómetros instalada no seu interior, permitirá o acompanhamento adequado do primeiro enchimento da albufeira, facilitando a observação do comportamento da fundação;
- iii. o tratamento de impermeabilização permitiu a selagem do maciço ao longo da superfície de referência da barragem, observando-se, na maioria dos casos, uma redução aparente do consumo de cimento dos furos primários para os terciários e quaternários; a execução de alguns furos quinquenários, utilizados como furos de controlo, permitiu constatar que, na sua maior parte, o tratamento promoveu uma redução sensível da permeabilidade, para valores da ordem dos estimados no projecto.

Refira-se finalmente que a intervenção do Projectista na fase de obra, incidiu essencialmente no detalhe e adaptação das soluções de projecto às condições realmente encontradas em obra, que no caso presente, não implicaram alterações profundas ou de concepção, conduzindo antes à integração de dados complementares no modelo conceptual de projecto, adaptando-o em conformidade. O diálogo frutuoso entre as entidades envolvidas na execução da obra, designadamente Dono de Obra e Fiscalização, Empreiteiro e Projectista, permitiu a execução do tratamento com economia e elevada qualidade, cuja eficiência será testada durante a fase de primeiro enchimento da barragem. Saliente-se aliás que em obras desta natureza, a colaboração com o Dono de Obra e Fiscalização joga um papel particularmente importante, na permanente adaptação das soluções de projecto às condições da obra, optando pelas soluções que, sem por em causa a filosofia do projecto, melhor se adaptem às necessidades de programação e gestão da obra, nem sempre coincidentes com as condições técnicas ideais de execução. Por outro lado, em obras especiais com esta dimensão e complexidade, só um empreiteiro especializado poderá responder eficazmente às solicitações da obra, garantindo, não só a execução em boas condições técnicas das soluções preconizadas no projecto, mas contribuindo também com a sua experiência em obras congéneres, sugerindo metodologias e soluções alternativas que contribuam para execução da obra com maior economia e qualidade.

4 - AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Dono de Obra, Instituto de Hidráulica e Engenharia Rural e Ambiente (IHERA), à Fiscalização, CENOR, SA, e ao Empreiteiro, Agrupamento Sabugal, SA constituído pelas empresas ENGIL, SA, Adrianos, SA, EDIFER, SA, Cerejo dos Santos, SA e Tecnasol FGE (Subempreiteiro) o apoio e colaboração prestados.



Foto 1



Foto 2



Foto 3

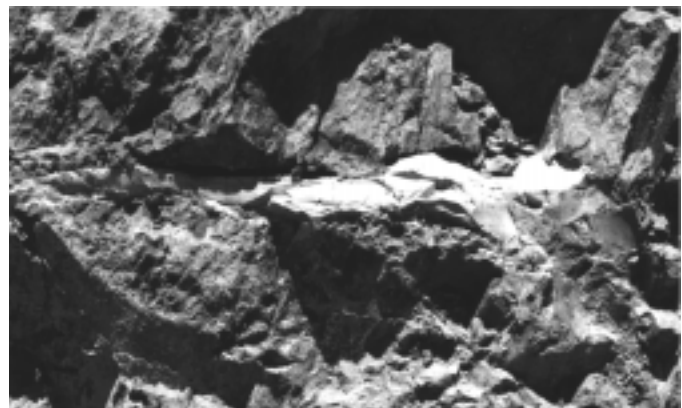


Foto 4

