

TRATAMENTO PARA CONTROLO DA PERCOLAÇÃO PELO MACIÇO DA MARGEM DIREITA DA BARRAGEM DA QUIMINHA, ANGOLA

TREATMENT FOR THE SEEPAGE CONTROL AT THE RIGHT BANK OF QUIMINHA DAM, ANGOLA

Guedes de Melo, Pedro; *CONSULGEO/FCT-UNL, Lisboa, Portugal, consulgeo@mail.telepac.pt*
Molares de Abril, Manuel; *Laboratório de Engenharia de Angola, Luanda, Angola*
Guedes de Melo, Fernando; *CONSULGEO, Lisboa, Portugal, consulgeo@mail.telepac.pt*
Costa Pereira, Alberto; *CÊGÊ, Lisboa, Portugal, geral@cege.pt*
Costa Pereira, João Pedro; *CÊGÊ, Lisboa, Portugal, geral@cege.pt*

RESUMO

As inspeções visuais que foram sendo realizadas a partir do final dos anos 90 na barragem da Quiminha, em Angola (barragem construída em 1975) evidenciaram sinais de marcada percolação através do maciço do encontro da margem direita, dando origem a significativos afluxos de água junto ao pé de jusante. Neste trabalho, e após um enquadramento geológico do local de implantação da barragem, é apresentado o programa de prospecção levado a cabo para avaliação desse fenómeno de percolação. Em seguida é descrita a solução que foi considerada como mais adequada para o tratamento do maciço, a qual consistiu no preenchimento, ao longo de diversos alinhamentos, das descontinuidades e vazios responsáveis pelo referido comportamento e no reforço da cortina de estanqueidade existente mediante a injeção de um conjunto de furos na sua zona de contacto com o maciço rochoso.

ABSTRACT

Visual inspections that have been carried from the late 90s on the Quiminha dam, in Angola (dam built in 1975) showed signs of seepage through the right bank, leading to significant water inflows at the base of the downstream slope of the dam. The geological environment of the dam site and the geological and geotechnical survey carried out to evaluate the seepage phenomenon are presented. Then the solution that was regarded as most suitable for the treatment of the involved rock mass is described, which consisted of the filling, over several alignments, of the discontinuities and voids responsible for the observed behaviour and strengthening of existing sealing curtain with a set of injection holes in its zone of contact with the rock mass.

1 - INTRODUÇÃO

A barragem da Quiminha, cuja construção foi concluída no início de 1975, situa-se no rio Bengo a cerca de 60 km da cidade de Luanda (Figura 1). Trata-se duma barragem de terra, com uma altura máxima de cerca de 40 m e uma capacidade de armazenamento de 1560×10^6 m³. Alguns anos após a entrada em serviço, inspeções visuais realizadas à obra, por técnicos do Laboratório de Engenharia de Angola (LEA) e do Laboratório de Engenharia Civil (LNEC), detectaram a existência de significativos afluxos de água junto ao pé de jusante.



Figura 1 – Vista geral da Barragem da Quiminha

Na sequência dessa constatação, o LEA solicitou à CONSULGEO a realização de um estudo visando a definição dum modelo conceptual da percolação responsável por esses afluxos (CONSULGEO, 2005). Na sequência desse estudo foi considerado indispensável, para assegurar as necessárias condições de

segurança da obra, promover a realização de trabalhos visando a eliminação da percolação existente.

De seguida é apresentado o enquadramento geológico do local e indicadas as características gerais da barragem. Posteriormente são referidos os trabalhos de prospecção levados a cabo para apoio aos estudos da percolação pelo encontro direito e é descrita a solução desenvolvida no âmbito do tratamento da barragem por injecções de calda de cimento.

2 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DO LOCAL

Nos estudos de carácter geológico-geotécnico levados a cabo para o Projecto da barragem (Palma Carlos, 1964) foram identificadas no local de implantação da barragem as seguintes formações geológicas:

"Aluviões quaternárias

- *Terra vegetal argilosa ou argila arenosa de possança variável, mas por vezes muito espessa;*
- *Areias de granulometria diversa e mais ou menos lenticulares, formando o actual subleito menor do rio Bengo, com uma possança máxima da ordem de 7,3 m;*
- *Argilas cinzentas escuras, por vezes amareladas, formando lentilhas, ora arenosas ora não arenosas, intercalando com outras lentilhas de areias lodosas, de lodos e de lodos arenosos;*
- *Areias lodosas muito possantes, englobando algumas lentilhas de lodos arenosos e de argilas cinzentas; encontram-se sobrecarregadas com burgaus disseminados a partir de profundidades da ordem dos 30 m e repousam no terciário calcário por intermédio de uma argila aluvionar, de fraca possança.*

Formações terciárias

- *Calcários margosos cinzentos-claros, por vezes arenosos finos. Estas camadas devem alternar com outras de cré, margas e grés piritosos, constituindo uma formação muito espessa, que pode atingir possanças da ordem dos 150 m".*

Relativamente às aluviões referia-se ainda:

"As formações aluvionares são recentes, dominando as arenosas inferiormente, e as argilosas, superiormente. Formam um enchimento quaternário dum vale de erosão da mesma Era, mais antigo, cavado em formações terciárias provavelmente eocénicas. O talvegue fóssil do vale de erosão encontra-se a uma profundidade da ordem dos 45 m. As aluviões são bastante heterogéneas, sobretudo na sua parte superior, tanto em natureza, como em compacidade (argilas e lodos) ou em densidade (areias). No seu conjunto devem ser consideradas como bastante permeáveis".

No que respeita ao maciço rochoso de base, e que aflora nos encontros da barragem, eram apresentadas as seguintes características:

"Segundo a carta geológica da região, as rochas do local pertencem a formações terciárias do Eocénico e o enchimento parcial do vale cavado pela erosão é composto por aluviões da Era Quaternária. As rochas são calcários, variáveis, mais ou menos argilosos e porosos. Há camadas em que, quando a amostra seca, abre em camadinhas de poucos milímetros. Alternando com estas há camadas de calcário duro, outras de calcário poroso do género de um cré e ainda umas outras com estrutura de grés calcário, em geral de grão médio e muito compacto. Os bancos de pedra dura têm o carácter gresoso mais acentuado. Também se notou o aparecimento de nódulos de sílex, nas camadas porosas. Às vezes há ainda veios horizontais ou verticais de calcitas, com espessuras entre poucos milímetros e até 2 centímetros. Há duas colorações distintas nas rochas. As primeiras camadas, em média até 30,00 m da superfície, são claras, entre branco e amarelo. Depois são acinzentadas escuras. Pelas amostras extraídas vê-se que esta diferença de cor é proveniente de alteração, visto não haver descontinuidade e depois de algum tempo sob os agentes atmosféricos, as cinzentas vão-se tornando claras. Enquanto a rocha é clara tem grande permeabilidade, passando repentinamente a impermeável quando é cinzenta escura. O calcário das camadas porosas é mais leve do que o das gresosas compactas. De aspecto lembra as areolas da região de Lisboa, o calcário gresoso de fraca compacidade e de grão fino. A estratificação é sensivelmente horizontal. Na fracturação há dois sistemas de diaclases predominantes, um paralelo e o outro transversal ao vale, ambos mais ou menos verticais".

3 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BARRAGEM

O perfil tipo adoptado para a barragem foi um perfil zonado (ver Figura 2), sendo a estanqueidade da obra, ao nível dos aterros, assegurada por um núcleo argiloso e, ao nível da fundação, por um elemento estanque, situado no prolongamento do núcleo, cortando todo o preenchimento aluvionar do vale. Quando da concepção do perfil tipo houve a preocupação de minimizar os efeitos dos previsíveis elevados valores de assentamentos do preenchimento aluvionar na funcionalidade do núcleo, o que levou a que este fosse definido com uma marcada inclinação para montante. Este núcleo argiloso é protegido do lado de jusante por um filtro, o qual se prolonga até ao pé de jusante por um tapete drenante horizontal.

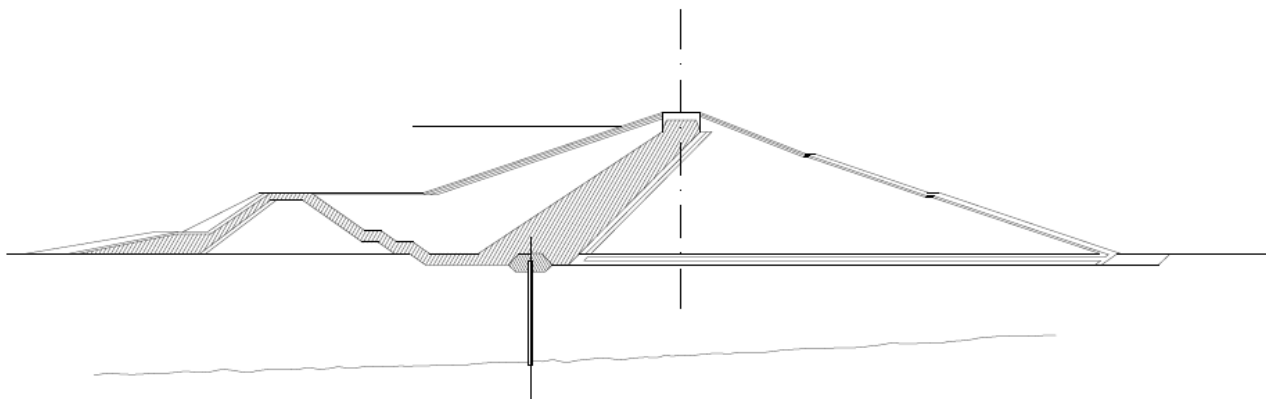


Figura 2 – Perfil esquemático tipo da barragem, constituído por um núcleo argiloso inclinado para montante (a sombreado), interligado com o recobrimento de uma ensecadeira a montante. Na base do núcleo é visível a parede moldada executada para intersecção da camada aluvionar

Para o maciço estabilizador de jusante foi adoptada a inclinação de 3H:1V com a introdução de duas banquetas. Para a sua protecção recorreu-se a uma camada de calhau rolado extraído de diversas burgaleiras existentes na zona.

O talude do maciço estabilizador de montante, com a inclinação de 3H:1V, desenvolve-se até à cota correspondente ao coroamento duma ensecadeira constituída por um maciço de enrocamento a granel, cujo eixo se encontra deslocado cerca de 100 m para montante relativamente ao eixo da barragem (Figura 2). A impermeabilização do maciço de enrocamento a granel que constitui esta ensecadeira foi materializada por um tapete de material argiloso recobrindo o seu paramento de montante, o coroamento e o talude de jusante, ligado ao núcleo da barragem. Para o paramento de montante da barragem foi prevista a execução de uma protecção de enrocamento sobre duas camadas de transição.

Ao nível da fundação da barragem, as formações quaternárias apresentam características bastante desfavoráveis pois contêm, simultaneamente, zonas arenosas de elevada permeabilidade e zonas argilosas, constituindo bolsadas de elevada espessura, de materiais de considerável deformabilidade, sujeitas por isso a grandes assentamentos. O tipo de solução adoptada para fazer face a esta situação consistiu numa cortina de estanqueidade cortando todo o preenchimento quaternário do vale, sendo essa cortina materializada por uma parede moldada, com 0,80 m de espessura, constituída por um material cuja composição foi estudada de forma a assegurar uma baixa permeabilidade e uma deformabilidade suficientemente elevada para permitir suportar deformações localizadas devidas a assentamentos não uniformes sem que ocorressem fenómenos de fissuração. Além disso, ainda dentro dos condicionamentos relativos a deformações, era necessário que a sua deformabilidade se aproximasse, tanto quanto possível, da das deformações das formações quaternárias, de modo a evitar fenómenos de punçoamento do aterro. De notar que as estimativas de Projecto quanto a assentamentos apontavam para valores que, em alguns pontos, eram da ordem de 2 m.

Visando assegurar a estanqueidade da obra foram realizados diversos tratamentos por injecção de caldas de cimento, designadamente: tratamento do contacto da parede moldada com o substrato rochoso; tratamento das margens; tratamento do contacto núcleo-rocha; tratamento de ligação ao maciço do revestimento da tomada de água, incluindo a torre.

4 - TRABALHOS DE PROSPECÇÃO REALIZADOS PARA APOIO AO PROJECTO DA REPARAÇÃO

No início dos anos 90, visando o esclarecimento da forma como se vinha processando a percolação no encontro direito da barragem, foi estabelecido um programa de trabalhos de prospecção que incluía: reconhecimento geológico de superfície; execução de 9 sondagens; realização de ensaios de absorção de água nas sondagens; realização de ensaios de admissão de água nas sondagens; ensaios com traçadores;

ensaios em laboratório sobre amostras colhidas nas sondagens.

Dificuldades de vária ordem apenas permitiram a realização de 3 das 9 sondagens previstas, o que, naturalmente, limitou o volume de informação que se pensava obter. Apesar disso, a informação obtida, juntamente com a de outras proveniências que foi possível reunir (informações resultantes do Projecto, da fase construtiva, da exploração do sistema de observação instalado e das inspecções que foram sendo realizadas desde a entrada em serviço da obra) permitiram tirar as conclusões que seguidamente se referem.

- A prospecção realizada nesta fase confirmou as conclusões do estudo inicial do local segundo as quais o maciço que constitui o encontro da margem direita da barragem era constituído por uma formação margo-calcária, que até cerca de 25 a 30 m de profundidade se apresentava esbranquiçada, passando a acinzentada em profundidade, com atitude sub-horizontal, inclinando ligeiramente para jusante.
- Essa mesma prospecção confirmou também as conclusões do Projecto inicial, segundo as quais a zona superficial do maciço, de cor esbranquiçada, exibia uma permeabilidade bastante superior à da zona, de cor acinzentada, situada inferiormente.
- Estudos laboratoriais sobre amostras destes dois tipos de materiais indicaram não existir marcadas diferenças nas suas constituições mineralógicas (compreendendo fundamentalmente calcite) e apresentando praticamente o mesmo comportamento no que se refere à expansibilidade e ao resíduo insolúvel.
- Estes trabalhos confirmaram as conclusões do estudo inicial, segundo as quais ao maciço constituído pelas margas esbranquiçadas estavam associadas elevadas permeabilidades, mesmo com vestígios de carsificação, enquanto, numa forma bem contrastante, as margas calcárias acinzentadas se apresentavam praticamente impermeáveis.
- Os valores das permeabilidades determinadas ao longo dos furos realizados evidenciaram um muito marcado contraste com os obtidos na fase de estudo da barragem. Pareceu, assim, confirmar-se a perspectiva já apontada no Projecto inicial da barragem, segundo a qual o maciço apresentava características que faziam prever a possibilidade de ocorrerem fenómenos de dissolução associados à percolação de água.
- O nível freático a montante do eixo da barragem e, portanto, da cortina de impermeabilização da fundação do núcleo, situava-se a cerca de 1 a 2 m abaixo do nível da albufeira, evidenciando a existência de circulação de água com pequenas perdas de carga nessa zona.
- O nível freático a jusante do eixo da barragem e, portanto, da cortina de impermeabilização da fundação do núcleo, situava-se a cerca de 20 m abaixo do nível da albufeira, evidenciando um marcado contraste em termos de perdas de carga a montante e a jusante do eixo da barragem e, portanto, da cortina de impermeabilização da fundação do núcleo.
- Tendo em conta os aspectos referidos nos dois pontos anteriores, o tratamento de impermeabilização executado quando da construção da barragem teria atingido os objectivos então definidos e teria mantido uma apreciável eficiência ao longo do tempo.
- Foi confirmada a existência de cavidades na zona a montante do encontro direito da barragem junto das quais vinha sendo possível ouvir o ruído de infiltração de água da albufeira quando o nível de armazenamento atingia determinadas cotas (Figura 3). De notar que uma dessas cavidades foi utilizada para lançamento da solução salina utilizada como traçador quando da realização dos ensaios.
- Foi confirmada a existência de afluxos de água que, com origem no interior do maciço do encontro da margem direita, afluíam junto à zona da interface do dreno de pé de jusante.
- Foi observado que o caudal afluente ao trecho do rio a jusante da barragem era muito superior ao que se verificava nos anos 80.

Tendo em conta os diversos aspectos que acabam de ser referidos, importava idealizar um modelo dentro do qual todos eles pudessem ser enquadrados, modelo esse que, posteriormente pudesse ser testado e que, em caso de confirmação, pudesse servir de base para as intervenções tendentes a normalizar a situação da obra. Neste sentido, apresenta-se, seguidamente, o modelo que se considerou como mais plausível para a explicação dos observáveis.

Quando do armazenamento de água na albufeira, a pressão da água foi originando a sua percolação no interior do maciço, tendendo, assim, a instalar-se um nível freático condicionado, por um lado, pela cota

de armazenamento da albufeira, e, por outro pelas condições de fronteira inerentes ao próprio maciço.

Quando da elaboração do Projecto da barragem, para assegurar uma adequada ligação do núcleo ao maciço do encontro, foi prevista e executada uma cortina de impermeabilização por meio de injeções de calda de cimento. Essa cortina passou a constituir uma parte das referidas condições de fronteira. Admitindo que a sua eficiência era muito elevada, isso significava que na zona por ela interessada a percolação deveria ser praticamente nula, justificando-se, assim, a marcada diferença entre as cotas do nível freático a montante e a jusante dessa cortina.



Figura 3 – Vista do maciço calcário do encontro da margem direita da barragem, sendo possível observar a existência de uma cavidade de significativas dimensões

Um outro elemento determinante das condições de fronteira da percolação estava associado à existência da galeria de tomada de água, localizada no maciço do encontro, com orientação aproximadamente idêntica à do eixo da barragem (ver localização da torre de tomada de água na Figura 1 e implantação da galeria na Figura 4). Apesar de todo um conjunto de medidas adoptadas, quer em Projecto quer na construção, a escavação para a sua instalação introduziu uma singularidade no maciço que passou a constituir uma condição de fronteira à percolação na zona mais permeável do maciço. A persistência dos fluxos assim estabelecidos, associada às características próprias do maciço, determinou o estabelecimento de percursos de percolação com perdas de carga sucessivamente menores ao longo do tempo. Esses percursos acabaram por encontrar saída junto ao pé de jusante da barragem, zona onde se passaram a registar significativos afluxos de água. Tendo em conta o tipo de formação geológica em questão, era de admitir uma evolução desfavorável da situação, não só devido a arrastamento de partículas do maciço como também pela potencial propensão da dissolução da parte rochosa do maciço. Estava-se, assim, perante uma situação em que, para além da perda de significativos volumes de água da albufeira, a própria segurança da barragem estava ameaçada. Nestas condições foi tomada a decisão de levar a cabo uma intervenção visando a normalização da situação existente.

Do ponto de vista da segurança havia que ter em conta que se estava perante grandes fluxos de água, ao longo de caminhos de percolação de baixa perda de carga, os quais já atingiam zonas do aterro junto ao pé de jusante da barragem e que poderiam, em prazo imprevisível, estender-se a outras eventualmente até mais sensíveis, designadamente, a do contacto do núcleo com o maciço do encontro. Até ao momento não tinham sido detectados quaisquer sinais de arrastamento de materiais do aterro, o que, contudo, não permitia afirmar que um qualquer processo de erosão não estivesse em desenvolvimento ou que, dentro dum prazo mais ou menos longo, não viesse a desenvolver-se.

Da análise dos elementos disponíveis sobre a situação da barragem foi possível concluir, sem margem para dúvidas, que o maciço do encontro direito estava a ser submetido a intensa percolação de água proveniente da albufeira. As características próprias desse mesmo maciço, associadas a tratamentos de impermeabilização realizados quando da construção da barragem tornaram particularmente difícil a definição, com pormenor, da forma como essa percolação se vinha processando. Havia, contudo, evidências de que existiam percursos de percolação com reduzida perda de carga através dos quais a água da albufeira, circulando no interior do maciço, acabava por encontrar saídas nas zonas de contacto do aterro com o maciço, nas imediações do pé de jusante da barragem. Dada a natureza do maciço do encontro era previsível que os

caudais percolados tivessem tendência para aumentar, podendo, assim, atingir mais intensamente e de forma mais generalizada os aterros da barragem.

5 - TRABALHOS DE PROSPECÇÃO COMPLEMENTARES PREVISTOS PARA A FASE DE OBRA

O tratamento por injeção do maciço da margem direita da barragem para controlo da percolação anormalmente elevada que vinha sendo observada incluiu, como será descrito adiante, a execução de uma Cortina de Impermeabilização, materializada através de um conjunto de injeções a realizar ao longo de diversos alinhamentos interligados (ver Figura 4).

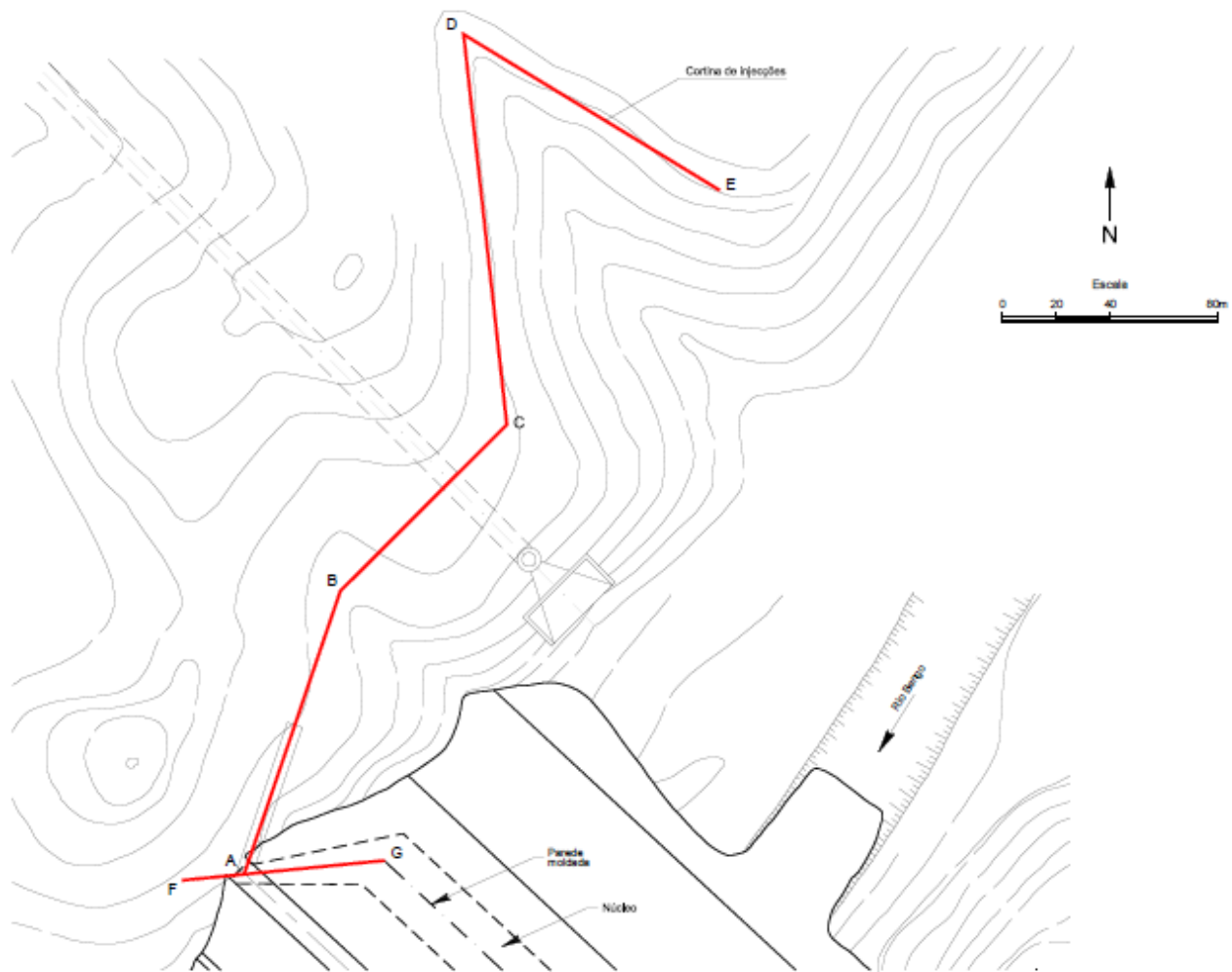


Figura 4 - Planta parcial da barragem e do encontro direito, com localização a vermelho dos alinhamentos de injeções associados ao tratamento. O alinhamento FG foi executado de modo a intersectar a base do núcleo da barragem; os restantes alinhamentos correspondem a injeções directamente no maciço rochoso aflorante

O Projecto dessa cortina foi desenvolvido com base nos elementos à data disponíveis, os quais foram considerados insuficientes. Nesse sentido, esse Projecto começava por referir a necessidade dos trabalhos associados à execução do tratamento se iniciarem por uma campanha de prospecção complementar, já em fase de obra, a decorrer no período de montagem de estaleiro, permitindo assim a adaptação do Projecto a novas condições que porventura pudessem vir a ser reveladas.

Esses trabalhos de prospecção correspondiam à realização de um conjunto de furos ao longo do alinhamento previsto para as injeções associadas à Cortina de Impermeabilização, de forma a identificar a posição do contacto entre as duas formações margosas, confirmar o carácter impermeável da formação mais profunda e definir a geometria da cortina. Esses furos seriam espaçados cerca de 72 m e seriam integrados na Cortina de Impermeabilização, fazendo parte daqueles que adiante serão designados por Furos Exploratórios. Nesses furos, a executar à rotação, por trechos descendentes e recuperação contínua de amostra, seriam realizados ensaios de admissão e/ou de absorção de água. O comprimento desses furos foi definido em função da litologia e dos resultados dos ensaios de água. Assim, um furo só deveria ser

dado por terminado após penetrar 5 m nas formações margosas cinzento escuras e de se obterem absorções da ordem ou inferiores a 0,5 Unidades de Absorção (UA), definindo-se como 1 Unidade de Absorção (1 UA) a absorção pelo maciço de 1 litro de água por minuto e metro de furo, por Kg/cm² de pressão.

6 - CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

6.1 - Características gerais

O tratamento preconizado consistiu na execução duma Cortina de Impermeabilização visando o preenchimento, ao longo dos alinhamentos indicados na planta da Figura 4, das discontinuidades e vazios responsáveis pelo referido comportamento e ao reforço da cortina de impermeabilização já instalada.

Assim, o Projecto compreendeu a execução de furos e a injeccção de suspensões de cimento, de cimento com adição de bentonite ou de cimento com argila (este tipo calda foi utilizada na injeccção realizada na fase de construção da obra) e, quando as permeabilidades atingissem valores muito elevados, com injeccção de argamassas de cimento, bentonite e areia. Os traços das caldas e das argamassas eram fixados em função dos resultados obtidos em obra relativos à viscosidade, decantação, peso específico e resistência à compressão aos 7 dias de idade. Este trabalho seria executado entre o Nível de Máxima Cheia (NMC) e, em princípio, 5 m abaixo da cota do contacto entre as formações calcárias margosas acinzentadas e esbranquiçadas.

A utilização das caldas ou argamassas acima referidas, ou de outras que viessem a ser consideradas (por exemplo, misturas betuminosas injectadas a quente), dependeria das disponibilidades existentes no local e dos resultados de ensaios preliminares a realizar.

O Projecto previa que o método da diminuição sucessiva da distância entre furos (*split spacing method*), por fases, deveria ser o adoptado. Segundo esse método, executa-se um furo a meia distância entre dois furos contíguos previamente injectados. Os furos de injeccção seriam designados, de acordo com a ordem pela qual vão sendo executados, como exploratórios, primários, secundários, terciários, etc.

Os resultados das sondagens e dos ensaios de permeabilidade disponíveis à data, embora insuficientes, permitiram determinar, com a aproximação possível, o comprimento da Cortina de impermeabilização que se pretendia executar, e que correspondia, aproximadamente, ao limite entre as margas esbranquiçadas e as margas acinzentadas, com um acréscimo de 5 m.

Previamente à realização, em contínuo, da Cortina de Impermeabilização, seria efectuado um bloco de ensaio, limitado por dois furos exploratórios contíguos, no qual seria ensaiada a metodologia de injeccção envolvendo nomeadamente os diferentes tipos de calda e a sua utilização sucessiva, as pressões de injeccção e os critérios de "nega".

A cortina de injeccção prevista incluiu 5 trechos designados na planta da Figura 4 por AB, BC, CD, DE e FG.

Os quatro primeiros trechos tinham como objectivo impedir a perda de água pela encosta da margem direita, e consistem na execução de furos exploratórios, primários e secundários, obtendo um espaçamento final de 3 m entre furos. No final, previa-se a execução de furos de verificação para confirmação das premissas de Projecto, no que dizia respeito à redução de permeabilidade do maciço rochoso.

O trecho complementar da cortina (FG), tinha como objectivo efectuar um reforço da cortina de impermeabilização instalada na barragem quando da sua construção, na zona entre a parede moldada da fundação da barragem e o encontro direito. Deste modo, e para se assegurar uma ligação à parede moldada, o Projecto previa que a Cortina se iniciasse no ponto F, prolongando-se a mesma pelo maciço do encontro, de forma a providenciar uma correcta ligação ao trecho da cortina AB. Para facilitar a localização dos furos de modo a garantir que estes atingiam em profundidade a zona da cortina antiga, estes furos deveriam ser executados na vertical, garantindo assim também uma ligação adequada ao alinhamento já criado pela parede moldada plástica. Para execução deste trecho da cortina haveria necessidade de retirar uma faixa do enrocamento de protecção do paramento de montante da barragem, que depois teria de ser devidamente repostos.

De modo a permitir a execução da cortina de injeccções às pressões predefinidas, e sem ocorrerem perdas de calda para a superfície, previa-se a realização de um tapete em betão ao longo do alinhamento, designado como "Plataforma de Trabalho", bem como uma Cortina de Contenção.

6.2 - Tapete em Betão (Plataforma de Trabalho)

Ao longo do alinhamento previsto para a Cortina de Impermeabilização, isto é entre os pontos A e E e entre A e F na planta da Figura 4, deveria ser executada uma vala com 0,5 a 1 m de profundidade e 6 m de

largura. No fundo desta vala deveria ser colocado um tapete em betão com 0,2 m de espessura.

6.3 - Cortinas de Contenção

Nos trechos onde o terreno de cobertura da Cortina de Impermeabilização tinha pouca espessura, o Projecto previa a prévia execução de duas Cortinas de Contenção (segundo dois alinhamentos paralelos delimitando a Cortina de Impermeabilização), correspondentes a um tratamento superficial através de injeções de caldas ou de argamassas, em furos curtos, a partir da superfície da Plataforma de Trabalho. Estas Cortinas seriam executadas em zonas onde o Limite Superior de Injecção (LSI) se situasse a menos de 5 m da cota da plataforma de trabalho. As injeções seriam executadas, inicialmente, em furos com 5 m de profundidade, distanciados 3 m, injectando os 5 m de uma só vez.

Estas Cortinas de Contenção, para além do tratamento do horizonte superior do maciço rochoso, mais fracturado, possibilitariam ainda o estabelecimento de um tecto de contenção à calda a injectar posteriormente na Cortina de Impermeabilização, minimizando eventuais ressurgências à superfície. Complementarmente, as duas fiadas de contenção materializariam ainda duas paredes de contenção, dificultando assim o movimento da calda a injectar na fiada da Cortina de Impermeabilização para o seu exterior. A existência deste trecho superficial viabilizaria ainda a aplicação das pressões estabelecidas no trecho inicial dos furos da Cortina de Impermeabilização.

A injeção destes furos deveria ser realizada em grupos, o que significa que, aquando da injeção de um furo, deveriam estar abertos os dois furos adjacentes, os quais, se comunicados, deveriam ser injectados de seguida. Com este procedimento, para além das vantagens em termos de programação, tinha-se a possibilidade de observar o comportamento da injeção.

Nos furos das Cortinas de Contenção deveriam ser adoptadas pressões de injeção entre os 2 (quando a espessura da cobertura fosse inferior a 3 m) e os 3 kg/cm² (nos casos restantes). A metodologia da injeção destes furos seria estabelecida em função dos resultados obtidos num trecho de ensaio, envolvendo uma distância entre os furos extremos de 12 m (estes só seriam contudo injectados numa fase posterior, com os furos adjacentes já abertos).

6.4 - Injecções para a impermeabilização

6.4.1 - Furos Exploratórios.

Os furos exploratórios seriam realizados com um espaçamento de 24 m e deveriam ser executados com recurso a sonda rotativa, com capacidade de execução de furos com diâmetro até 101 mm, sendo executados preferencialmente com os diâmetros de 86 mm a 66 mm. A sonda deveria utilizar amostradores de parede dupla, coroas diamantadas apropriadas ao terreno a perfurar, com velocidade de rotação e pressão adequados à finalidade de se obter o máximo de quantidade e qualidade de amostras.

A profundidade média prevista para os furos era de 40 m, sendo esta definida pelos resultados de ensaios de permeabilidade. Estes furos exploratórios deveriam penetrar 5 m nas margas mais impermeáveis. Esta impermeabilidade deveria ser confirmada pela execução de um ensaio de permeabilidade do tipo Lugeon, nesse trecho. Caso este ensaio desse resultados superiores a 0,5 UA, o furo deveria ser prolongado mais 5 m, efectuando-se novo ensaio Lugeon nesse trecho.

6.4.2 - Furos Primários, Secundários, Terciários e de Verificação

Os furos primários e secundários deveriam ter um diâmetro mínimo de 50 mm, e seriam executados sem recuperação de amostra, podendo por conseguinte ser abertos à rotopercussão. Os furos deveriam ser executados até atingir a profundidade fixada após o que deveriam ser limpos em todo o seu comprimento, com injeções sucessivas de ar e água. A lavagem deveria prosseguir até que a água de retorno viesse limpa.

Como atrás se disse, o método da diminuição da distância entre furos, por fases, deveria ser adoptado. Deste modo, após a execução de dois furos exploratórios sequenciais, deveria proceder-se à realização dos primários, de tal forma que, após a sua execução, todos os furos se situassem a 12 m de distância dos furos adjacentes. No final, seriam executados os furos secundários entre dois furos e depois os terciários, garantindo deste modo, um espaçamento final de 3 m entre furos da cortina. No caso de, pontualmente, os valores de permeabilidade do maciço não serem atingidos, deveriam ser executados furos quaternários a meia distância entre dois furos adjacentes da cortina.

Após a conclusão dos trabalhos da Cortina de Impermeabilização, deveriam ser efectuados furos de verificação, com execução de ensaios Lugeon em todo o seu comprimento, e em locais a definir em função dos valores de absorção obtidos.

6.4.3 - Ensaio de Permeabilidade

Como forma de quantificar a permeabilidade do maciço antes e durante a execução dos trabalhos, previa-se a execução de ensaios de permeabilidade do tipo "Lugeon" cujos resultados seriam expressos pela absorção de água, calculada em litros por minuto e metro de furo e por kg/cm² de pressão de injeção, correspondendo a absorção de 1l/min/m à pressão de 1 kg/cm² a uma Unidade de Absorção (1 UA).

Considerava-se que um furo teria atingido o maciço "impermeável" quando os ensaios dessem valores da ordem de 0,5 UA, o que corresponderia a uma absorção de 5 litros de água por minuto e metro de furo e por kg/cm².

No caso dos furos exploratórios, os ensaios de permeabilidade deveriam ser executados por trechos descendentes de 5 m, excepto no comprimento entre o NMC e o nível da albufeira no momento dos ensaios em que seria seguida uma metodologia análoga à dos furos exploratórios integrados na prospecção complementar.

Nos furos primários, secundários e terciários, os ensaios poderiam ser executados por trechos ascendentes, após a execução da perfuração, sendo os trechos limitados pelo topo do trecho anteriormente injectado e pelo obturador com a base colocada no topo do novo trecho a injectar. O comprimento dos trechos a ensaiar seria de 5 m excepto no comprimento entre o NMC e a cota da albufeira no momento do ensaio.

Os ensaios Lugeon seriam executados:

- na totalidade do comprimento dos furos exploratórios abaixo do LSI;
- nos últimos 5 m dos furos primários, como forma de confirmação da penetração deste na zona impermeável do maciço rochoso; no caso do valor dos ensaios ser superior a 0,5 UA, o furo deveria ser prolongado mais 5 m, repetindo-se os ensaios até se confirmar a entrada em zona impermeável;
- na totalidade do comprimento dos furos secundários abaixo do LSI;
- na totalidade do comprimento dos furos terciários abaixo do LSI;
- na totalidade do comprimento dos furos de verificação abaixo do LSI.

6.4.4 - Caldas de Injeção

Previo-se que as caldas a injectar seriam em princípio à base de água e cimento, com possível adição de bentonite na ordem de 2 a 3% do peso do cimento, para eliminar eventual decantação da calda, devendo a sua composição ser estabelecida a partir dos ensaios prévios de injectabilidade a realizar no bloco de ensaio.

Era aconselhada a análise da água do rio para avaliar a sua agressividade ao cimento. A preparação das suspensões seria feita inicialmente numa misturadora de alta turbulência, passando em seguida para um agitador de dois recipientes, para doseamento e conservação da calda, e daí para um injector munido com os necessários meios de controlo dos caudais e das pressões.

Caso se verificassem elevadas absorções durante a injeção, nas quais houvesse aumento de pressão, aconselhava-se o progressivo aumento da viscosidade das caldas, por diminuição do aditivo ou pelo aumento da relação C/A. Desta forma, limitar-se-ia o raio de acção à zona interessada pela Cortina. Alternativamente poder-se-ia proceder à adição de areia fina.

Durante a execução dos furos exploratórios deveriam ser ensaiadas várias caldas, com viscosidade diferentes, devendo ser efectuados em obra os seguintes ensaios: viscosidade de Marsh; decantação; peso específico. Após a análise dos resultados deveriam ser seleccionados os produtos a injectar, para os quais seriam definidas as características que serviriam de referência para o respectivo controlo de qualidade.

Durante a obra deveriam ser efectuados ensaios, os quais deveriam ser realizados no início de cada turno de trabalho, após qualquer paragem na central de fabrico ou sempre que se efectuasse uma mudança de calda.

6.4.5 - Pressões de injeção

As pressões de injeção a aplicar nas diferentes fases, bem como as metodologias de injeção, deveriam ser definidas face aos resultados do bloco de ensaio. Na generalidade, as pressões a aplicar nas injeções dependeriam essencialmente da profundidade a que estas seriam realizadas, isto é, variando em função da cobertura do terreno existente.

Para a fase inicial eram propostos os seguintes valores: até 5 m pressões de 5,0 kg/cm²; de 5 a 10 m pressões de 10,0 kg/cm²; de 10 a 15 m pressões de 15,0 kg/cm²; para profundidades superiores a 15 m pressões de 20,0 kg/cm². A pressão da injeção seria tanto menor quanto maior fosse o débito de injeção. A pressão máxima deveria ser atingida somente quando o débito de injeção fosse muito baixo.

A "nega" (devolução) teria lugar quando a absorção do trecho submetido à pressão máxima fosse quase nula. A pressão máxima seria então mantida durante 10 minutos e a injeção seria dada por terminada. Contudo, no caso de se verificar saída de calda do furo, quando se retirasse a ligação da injeção (contra pressão), deveria manter-se o mesmo fechado até que ocorresse a dissipação natural da pressão ou que a calda tivesse feito presa suficiente.

Em geral a injeção de cada trecho deveria começar com uma calda cujo traço seria definido em função dos ensaios prévios a realizar, e a mistura deveria engrossar progressivamente, de acordo com a variação do caudal da bomba e da pressão no decurso da injeção. Cada dosagem de calda deveria ser injectada durante, pelo menos, 5 minutos antes de ser engrossada, a menos que se soubesse que o furo intersectou uma cavidade ou fissura larga; nesse caso a calda deveria engrossar mais rapidamente.

A injeção terminaria em cada trecho (na devolução), quando a aceitação da calda num período de 10 minutos não fosse superior a 2,5 litros por metro linear no trecho injectado.

Tendo-se iniciado a injeção de um trecho, deveria continuar-se sem interrupção na medida do razoável, até se alcançar a devolução. Se fosse necessário interromper uma injeção antes de a completar (por exemplo, no caso de avaria), cerca de 500 litros de água limpa deveriam ser introduzidos no furo antes de este ficar em repouso.

Os processos de injeção poderiam ser alternados em conformidade com as condições encontradas.

Se, em vista da abertura e continuidade das fracturas, fosse impossível alcançar a pressão estipulada depois de bombear um volume razoável de calda à dosagem de água e cimento mínima apropriada para a operação, deveria reduzir-se a velocidade de bombagem. Se, durante a injeção de um furo, se verificasse que, dos furos próximos escorreria calda em quantidade suficiente para interferir seriamente com a operação ou, para ocasionar perdas de calda significativas, os furos poderiam ser tapados temporariamente. Quando a cobertura do furo não fosse essencial, os furos não injectados poderiam ser deixados abertos para facilitar a saída de ar e água, enquanto a calda fosse injectada nos furos, mas deveriam ser cobertos para evitar entrada de fragmentos e derramamentos. Antes da presa da calda, a bomba deveria ser ligada a furos próximos cobertos e a outros furos de que tivesse saído calda e a injeção de todos esses furos deveria prosseguir. Após conclusão da injeção de cada trecho de um furo, deveria manter-se a pressão por meio de uma válvula ou outro dispositivo adequado, até que a presa da calda fosse tal que esta permanecesse no furo.

As injeções deveriam ser executadas com recurso a um controlo e registo contínuo dos parâmetros, nomeadamente pressão, volume e caudal. O controlo de pressão nunca poderia ser efectuado com diferenças de cota superiores a 5 m, devendo este valor, em qualquer dos casos, ser corrigido no próprio equipamento. Estas injeções seriam executadas normalmente pelo método ascendente, por trechos de 5 m, devendo ser precedidas, sempre que assim estivesse definido, de ensaios de absorção de água.

A sequência das injeções da Cortina de Impermeabilização seria a seguinte:

- Execução dos furos exploratórios, espaçados de 24 m, até à profundidade máxima estabelecida, com realização de ensaios de absorção da água e de ensaios de injectabilidade;
- Execução dos furos primários, distanciados 12 m dos furos exploratórios adjacentes;
- Execução dos furos secundários distanciados 6 m dos furos adjacentes, ensaios e injeção;
- Execução de furos terciários distanciados 3 m os furos adjacentes, ensaios e injeção.
- Execução eventual de furos terciários distanciados 1,5 m dos furos adjacentes, ensaios e injeção.

Com este esquema poderia resultar, em alguns casos, um afastamento final de 1,5 m entre os furos.

7 - LEQUE AUREOLAR

Tendo como objectivo integrar o "leque aureolar" de tratamento da galeria de tomada de água (executado na fase de construção da barragem), de forma a reduzir as hipóteses de percolação de água por esta zona preferencial, foi preconizado no Projecto a execução de um reforço desse leque aureolar na zona de intersecção da Cortina de Impermeabilização.

Este reforço consistiu na realização de três fiadas de 8 furos, cada um com 10 m de comprimento, que seriam executados com os mesmos critérios dos furos primários da cortina. Em caso de absorções significativas poderia proceder-se à execução de furos secundários.

Para que estes furos ficassem devidamente englobados na Cortina de Impermeabilização teriam uma sobreposição de 3 a 5 m com os furos da Cortina realizados à superfície, garantindo-se deste modo uma perfeita interligação entre a barreira impermeável executada da superfície e a barreira impermeável executada do interior da galeria de tomada de água.

8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Projecto para controlo da percolação através do maciço do encontro da margem direita da Barragem da Quiminha que acaba de ser apresentado foi entretanto executado, tendo os trabalhos de construção da Cortina de Impermeabilização sido confiados à Empresa TecnasOLFGE (Figura 5).



Figura 5 – Equipamentos utilizados na execução das injeções

Estes trabalhos depararam com diversas dificuldades, associadas fundamentalmente à existência de zonas caracterizadas pela existência de vazios de apreciáveis dimensões onde a circulação de água se processava com velocidades que muito dificultavam a fixação das caldas de injeção. Por este motivo houve necessidade de experimentar diversas metodologias de injeção e diversos tipos de caldas.

Com o Projecto referido neste trabalho foi ainda definido e instalado um sistema de observação visando a monitorização do comportamento da barragem, em particular no que se refere aos trabalhos de impermeabilização do maciço do encontro da margem direita.

Apesar de dificuldades surgidas ao longo de todo o processo, o trabalho executado conduziu a resultados que, tanto quanto é possível ajuizar pelo comportamento observável, parece ter atingido os objectivos para que foi programado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Engenharia de Angola a autorização para a apresentação do estudo.

REFERÊNCIAS

CONSULGEO (2005). Barragem da Quiminha - Análise do problema da percolação que vem sendo registada junto ao encontro da margem direita. Relatório, Abril.

Palma Carlos, A. (1964). Aproveitamento hidroagrícola da Quiminha - Projecto da Barragem e órgãos de descarga e segurança da albufeira. Lisboa.