

## BARRAGEM DO ARNÓIA

### Aspectos Construtivos - Melhoria da Fundação

**Eduardo Pedro Matos GOMES**

*Eng.º Civil, DGADR, Av. Afonso Costa, 1949-002, Lisboa, +351.21.844.23.67, egomes@dgadr.pt*

#### **RESUMO**

A vila de Óbidos, situada a cerca de 80 km a norte de Lisboa, é rodeada por várzeas muito férteis onde o Ministério da Agricultura reconheceu haver grande necessidade e interesse na intervenção ao nível da melhoria das infra-estruturas hidroagrícolas, decidindo realizar o Aproveitamento Hidroagrícola das Baixas de Óbidos que abrange as freguesias de São Pedro, Santa Maria, Vau, Sobral da Lagoa, Amoreira e Olho Marinho do concelho de Óbidos; Roliça e Pó do concelho de Bombarral.

Obra central do perímetro, a Barragem do Arnóia localiza-se no rio com o mesmo nome, a cerca de 1,5 km a montante da Vila de Óbidos. A albufeira destina-se fundamentalmente a criar uma reserva de água que garanta a rega de uma área com 1 100 ha, de forma a desenvolver uma agricultura mais competitiva e sustentável com base no regadio, particularmente no que respeita às culturas hortícolas e frutícolas, para as quais a região está particularmente vocacionada.

A barragem permite ainda atenuar a acção destruidora das cheias no período chuvoso, bem como criar condições mais favoráveis à exploração agrícola num período significativamente mais alargado.

**PALAVRAS CHAVE:** Barragem, Fundação, Tratamento, Colunas, Vibrosubstituição.

## I - DESCRIÇÃO GERAL

A barragem (Figura 1) tem uma altura máxima acima do terreno natural de 21,00 m, o coroamento está à cota 34,50 m, tem um desenvolvimento de 150,00 m e uma largura de 7,00 m, o Nível de Pleno Armazenamento situa-se à cota 32,50 m, a que corresponde uma área inundada de cerca de 97 ha e uma capacidade útil de  $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , o Nível de Máxima Cheia atinge a cota 33,60 m, para uma cheia com um período de retorno de 5 000 anos.



Figura 1 – Barragem do Arnóia, paramento de jusante.

A barragem é dotada de um tapete impermeável argiloso com 3,00 m de espessura ao qual está ligada uma tela de polietileno de alta densidade com 1,5 mm de espessura, coberta com uma camada de 1,00 m de solo argiloso que se prolonga para o interior da albufeira ao longo de 60 m a toda a largura do vale.

## II - FUNDAÇÃO

A secção do rio Arnóia onde foi construída a barragem, é um vale aberto e sensivelmente simétrico (Figura 2), com um leito menor de cerca de 5 m e um leito de cheia aluvionar, que atinge os 70 m de largura e que possui espessuras variáveis entre 2 e 13 m, constituídas por areias finas e médias, normalmente siltosas ou argilosas, de baixa compactidade, intercaladas por argilas siltosas ou arenosas.



Figura 2 – Secção do vale.

Dadas as características de baixa resistência mecânica do material aluvionar identificado, verificou-se que havia necessidade de um tratamento da fundação de modo a aumentar a sua capacidade de carga e evitar a sua liquefacção no caso de ocorrência de um sismo, pelo que foram estudadas várias hipóteses para solucionar o problema, tais como:

- Escavar totalmente a fundação aluvionar para fundar o corpo do aterro nas formações subjacentes aos depósitos aluvionares de resistência mecânica mais elevada;
- Tratamento por vibrocompactação, sem a adição de material granular;
- Inclusão de material granular por vibrosubstituição.

Em face da elevada percentagem das aluviões, com uma percentagem de finos entre 26% e 45%, da sua baixa resistência mecânica, do nível freático situado praticamente à superfície e da própria dimensão da barragem, verificou-se que o tratamento da fundação por vibrosubstituição com a inclusão de colunas de brita, através da utilização de vibradores em profundidade, seria a solução que técnica e economicamente se afigurava mais adequada.

Com este método consegue-se um aumento do módulo de deformabilidade e do ângulo de atrito do “novo solo” de fundação, melhorando assim as suas características mecânicas com a diminuição dos assentamentos e diminuindo o risco de liquefacção em caso de ocorrência de um sismo. Por outro lado, este modo de tratamento da fundação por vibrosubstituição provoca também um aumento da sua permeabilidade.

As colunas de brita, com comprimentos entre os 13,00 m, na zona central do vale, e os 3,00 m, junto às margens, têm 0,80 m de diâmetro e foram distribuídas segundo uma malha triangular com espaçamento de 2,00 m entre os eixos (Figura 3).

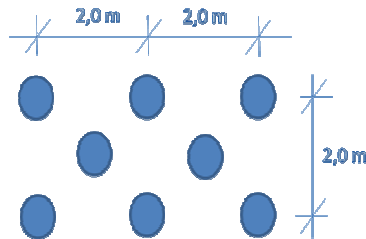


Figura 3 – Distribuição das colunas de brita, planta.

Antes do início do trabalho foi realizado um bloco de ensaio, onde foram feitos ensaios de penetração estática (CPT), tendo-se verificado que o valor de  $R_p = 7$  MPa, para o qual se considerava eficiente o tratamento, era atingido, na maior parte dos ensaios, entre os 7 a 8 metros de profundidade, enquanto que no primeiro metro, aquele valor, se situava entre 0 e 5 MPa. Perante estes valores o projectista, no âmbito da assistência técnica à obra, considerou que a malha prevista atingia os objectivos pretendidos.

Para a execução das colunas foi utilizada, na maior parte da área tratada, a via húmida em que a “consolidação” é conseguida com o auxílio de um vibrador em forma de tubo cilíndrico, com cerca de 3,0 m de comprimento e 0,40 m de diâmetro, suspenso numa grua (Figura 4).



Figura 4 – Grua e vibrador.

No seu interior, um motor eléctrico movimenta várias massas excêntricas que produzem as vibrações necessárias à destruição da estrutura do solo e à consequente execução do furo. Jactos de água sob pressão são injectados através de vários orifícios existentes na ponta do vibrador, de modo a facilitar o aprofundamento do mesmo no terreno (Figura 5).

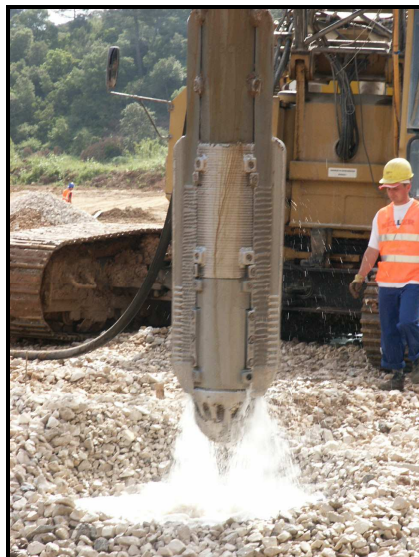


Figura 5 – Pormenor da ponta do vibrador.

Para se alcançar a profundidade necessária à consolidação são acoplados ao vibrador vários tubos de suspensão.

A profundidade atingida pelo vibrador é controlada externamente por intermédio de uma escala inscrita no corpo do vibrador e nas extensões a ele acopladas, sendo igualmente registada automaticamente por um computador que regista também a compactação atingida pela brita, como adiante se descreve.

O vibrador suspenso, penetra no solo pela acção conjunta do seu peso próprio, cerca de 80 kN, e da injeção de água que sai pelos orifícios do elemento cónico da sua extremidade e, ainda, das vibrações originadas pelo movimento das massas excêntricas. O furo assim realizado mantém-se aberto pela carga hidráulica existente no interior.

Após se ter atingido a profundidade máxima, o vibrador é, de uma forma alternada, completamente retirado e recolocado dentro do furo 2 ou 3 vezes, a fim de alargar o espaço anelar entre o vibrador e as suas paredes. É então lançada para o seu interior, a partir da superfície da



cavidade aberta pelo vibrador, brita com  $D_{max} = 7$  cm, que, por gravidade, o vai preenchendo a partir do fundo, substituindo assim localmente o material arenoso original pelo material britado.

Simultaneamente o vibrador vai sendo elevado cerca de 0,50 m de cada vez, e após a queda da brita, torna a ser descido, sendo assim a mesma compactada e embutida nas paredes do furo por intermédio da vibração e do peso próprio do equipamento. À medida que o vibrador perde o seu “grau de liberdade” durante a compactação, exigirá uma maior potência eléctrica, traduzindo-se isto num aumento directo da intensidade da corrente necessária ( $I=P/U$ ), uma vez que a tensão  $U$  se mantém constante. Este processo que é controlado através da leitura directa de um amperímetro, localizado junto ao operador, é também registado automaticamente por um computador ligado a este amperímetro. Assim que a intensidade da corrente aumenta e atinge um determinado valor, o vibrador é elevado, lançando-se novamente brita para o interior do furo. Inicia-se assim um novo estágio de compactação, e todo este procedimento é repetido até se completar a coluna de brita.

O controlo do diâmetro médio de cada coluna é aferido indirectamente através da quantidade de brita consumida em cada furo.

O tratamento efectuado abrangeu uma área total de  $70,0 \times 250,0$  m<sup>2</sup>, com mais de 4.000 colunas de 0,80 m de diâmetro, executadas até profundidades máximas da ordem de 13,0 m, o que representa um comprimento total de colunas de brita de cerca de 50 km.

Ao tratamento seguiu-se o saneamento da fundação, de modo a prepará-la para início da execução das primeiras camadas de aterro. Embora o projecto previsse uma escavação média de 3,0 m, verificou-se no local que, após o primeiro metro, as colunas estavam perfeitamente definidas, não se justificando aprofundar essa escavação (Figura 6).



Figura 6 – Aspecto das colunas após saneamento.

Após o tratamento foram realizados ensaios de permeabilidade “in situ” (Figura 7), de modo a aferir se as premissas de projecto relativas à permeabilidade se confirmavam ou não. Caso os valores fossem muito elevados ponderava-se então a construção de uma cortina de impermeabilização, encastrada no substrato jurássico mais compacto, numa faixa de 8,0 m de largura, onde não tinha sido ainda sido realizado o tratamento.



Figura 7 – Ensaio de permeabilidade.

Os ensaios de permeabilidade confirmaram os elevados valores previstos após o tratamento com colunas de brita, sendo inclusivamente o coeficiente de permeabilidade horizontal (fundamentalmente a componente da permeabilidade que é medida nos ensaios de bombagem) 2 a 3 vezes superior ao adoptado no projecto, ou seja, da ordem dos  $3 \times 10^{-4}$  m/s.

Perante este resultado, foi feita uma nova avaliação dos caudais percolados através da barragem e fundação e da respectiva segurança hidráulica, tendo por base um modelo hidráulico mais detalhado e tendo em atenção a informação entretanto obtida já na fase de obra. Nesta avaliação estimou-se um caudal total da ordem de 11 l/s, que em termos práticos e tendo em atenção as simplificações inerentes ao modelo considerado, os caudais percolados são da mesma ordem de grandeza dos obtidos no projecto que eram de cerca de 8 l/s.

Mesmo assim foi ainda estudada a hipótese de se prolongar o tapete impermeável de polietileno de alta densidade para montante, por mais 30,0 m, passando este a ter um comprimento de 90,0 m, verificando-se no entanto que a melhoria não seria muito significativa, passando o caudal total de 11 l/s para 8 l/s (valor estimado no projecto), pelo que se considerou que a solução de tratamento da fundação e construção do tapete impermeabilizante, inicialmente preconizada no projecto, era adequada do ponto de vista da segurança e para o controlo da percolação na barragem e fundação.

No entanto, e por segurança, optou-se mesmo assim pela construção de uma plataforma no maciço de montante, a uma cota superior à do nível mínimo de exploração, permitindo a construção de uma cortina de impermeabilização, caso, eventualmente, na fase de exploração, se vier a verificar que os caudais percolados e as pressões intersticiais excedem largamente o previsto.

### III - ATERRO

O corpo da barragem é do tipo "aterro zonado" (Figura 8), com um núcleo central argiloso e filtro chaminé inclinado, os maciços estabilizadores de montante e jusante, são constituídos por solo arenoso protegido por geotêxtil/enrocamento e cobertura vegetal, respectivamente (Figura 9). O núcleo prolonga-se para montante, sob o maciço estabilizador de montante, até ligar ao tapete impermeável (Figura 10).

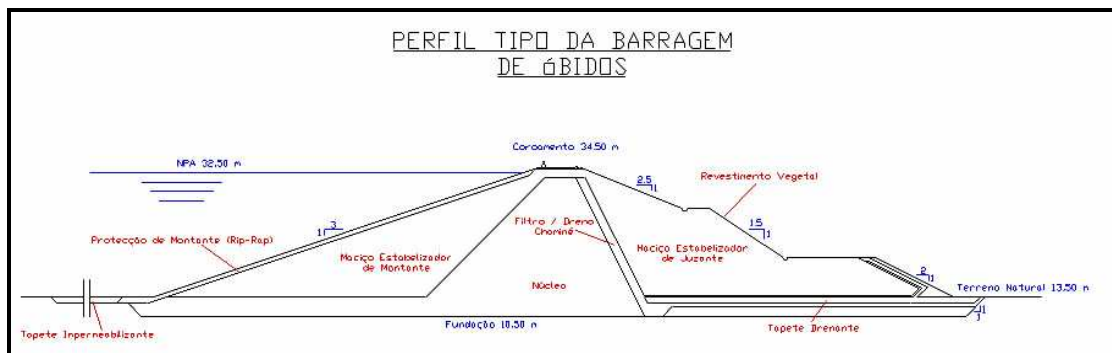


Figura 8 – Perfil tipo.

O volume do corpo da barragem, incluindo o filtro chaminé em areia e o tapete drenante de brita, é de cerca de 163 000 m<sup>3</sup>.



Figura 9 – Aterro, maciço de montante e núcleo. Figura 10 – Protecção do tapete impermeável.



#### IV - DESCARREGADOR DE CHEIAS

O descarregador de cheias permite o escoamento de um caudal de 609 m<sup>3</sup>/s, está implantado na margem direita (Figura 11), é do tipo frontal e tem dois vãos equipados com comportas de segmento com 9,00 m de largura por 6,00 m de altura. O seu accionamento é automático, quer hidráulicamente por um sistema de flutuador e contrapeso, quer electricamente através motores comandados por um autómato que recebe informação de dois sensores de nível redundantes.

A energia eléctrica para os motores é proveniente de duas fontes distintas, a rede pública e um grupo gerador diesel local. Em caso de emergência, e numa situação em que todos os sistemas de accionamento falhem, as comportas podem ainda ser actuadas manualmente por uma manivela que é acoplada aos motores eléctricos.



Figura 11 – Descarregador de cheias montante.

#### V - TOMADA DE ÁGUA E DESCARGA DE FUNDO

A tomada de água e a descarga de fundo é feita através de uma torre situada junto à margem esquerda, e liga a esta por um passadiço, com 19,00 m de altura e 2,00 m de diâmetro, com entradas de água a dois níveis, equipadas com grades e comportas de vagão, accionadas por dois guinchos eléctricos de cremalheira e comandados localmente a partir do topo da torre ou à distância a partir do posto de comando na margem direita junto ao descarregador de cheias, o caudal de dimensionamento da tomada de água é de 1,11 m<sup>3</sup>/s (Figura 12). No topo da torre está situada uma estação meteorológica, que comunica em tempo real com a sede da DGADR.

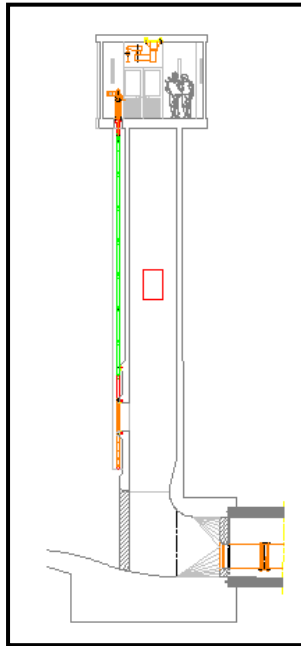


Figura 12 – Tomada de água

A água para rega é conduzida a uma futura Estação Elevatória, através de uma conduta em aço de 1,00 m de diâmetro, instalada numa galeria circular em betão armado sob o aterro com início na base da torre.

A descarga de fundo é realizada pela mesma conduta de tomada de água através de uma válvula de jacto oco com 0,80 m de diâmetro (Figura 13).



Figura 13 – Descarga de fundo, válvula de jacto oco.

## VI - CONCLUSÃO

A Barragem do Arnóia surgiu como uma necessidade de aumentar e regularizar ao longo do ano a disponibilidade de água para rega, minimizando assim a variabilidade das condições climatéricas, tornando-se deste modo, após a construção da futura Estação Elevatória e da respectiva Rede de Rega, como um elemento capaz de alterar positivamente a actividade agrícola, bem como o desenvolvimento económico, social e as condições de vida da região.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Eng.º Maria Manuela MATOS, co-autora com Eduardo Matos GOMES, da versão original do texto “*Barragem do Arnóia - Tratamento da Fundação por Vibrosubstituição*”, na qual se baseou a presente comunicação.

## BIBLIOGRAFIA

CENOR – CONSULTORES, LDA – Empreitada de Execução da Barragem de Óbidos - Relatórios Mensais

CENOR – CONSULTORES, LDA – Empreitada de Execução da Barragem de Óbidos - Boletins Informativos

FCC - CONSTRUCCION, S.A., Barragem de Óbidos, Proposta, Setembro de 2001

FCC - CONSTRUCCION, S.A., Barragem de Óbidos, Vibrosubstituição / Colunas de Brita – Processo de Execução, Março de 2003

HIDROPROJECTO ENGENHERIA E GESTÃO, S.A., Aproveitamento Hidroagrícola das Baixas de Óbidos – Barragem, Projecto de Execução (Versão Reformulada), Maio de 2001

HIDROPROJECTO ENGENHERIA E GESTÃO, S.A., Assistência Técnica para a Empreitada de Execução da Barragem de Óbidos, Nota Técnica n.º 6 – Caracterização dos Terrenos de Fundação. Captação de Pesquisa e Ensaio de Caudal, Janeiro de 2004

HIDROPROJECTO ENGENHERIA E GESTÃO, S.A., Assistência Técnica para a Empreitada de Execução da Barragem de Óbidos, Nota Técnica n.º 7 – Estudo de Percolação. Controlo dos Caudais Percolados, Janeiro de 2004

KELLER GRUNDBAU GmbH– Barragem de Óbidos, Vibrosubstituição / Colunas de Brita – Execução de Colunas de Brita Trecho Experimental, Março 2003

KELLER GRUNDBAU GmbH – Barragem de Óbidos, Vibrosubstituição / Colunas de Brita – Relatório Final, Março de 2004

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – Barragem de Óbidos, Plano de Observação, Versão Actualizada, Julho de 2004