

José Manuel
Viegas,
Jean-Pierre
Gonçalves,
Área
Departamental de
Eng^a Civil da
EST/UAlg

Controlo de Construção da Barragem da Caroucha. Principais Aspectos de Natureza Geotécnica

RESUMO

Descrevem-se os principais aspectos de natureza geotécnica surgidos durante a fase de construção da barragem da Caroucha, cujo controlo de construção foi assessorado pela Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve (EST/UAlg), ao abrigo de um contrato de prestação de serviços celebrado com a Direcção Regional de Agricultura do Algarve (DRAALG).

1. Introdução

A barragem da Caroucha (*vd.* Fotografias 1 e 2) localiza-se na ribeira da Caroucha, a montante da povoação da Junqueira, no concelho de Castro Marim. Trata-se de uma barragem de aterro com 18.8 m de altura, medida a partir da cota mínima da fundação (15.42 m) até à cota do coroamento (34.22 m), tendo este último um desenvolvimento de 150 m e a albufeira uma capacidade de armazenamento de 600 000 m³.

2. Implantação da barragem

Face à especificidade da topografia do local de implantação da barragem e ao facto da implantação de projecto não apresentar nenhuma coordenada de referência, surgiram algumas dificuldades na implantação do corpo da barragem.

De facto, após se ter procedido à desmatagem e ao saneamento da zona de fundação e iniciado a execução do aterro da barragem, verificou-se que o encastramento do paramento de montante da barragem no encontro esquerdo não era possível de ser executado em conformidade com o previsto, em resultado da topografia do terreno ser significativamente diferente da considerada no projecto de execução, situação que iria implicar um acréscimo considerável do volume de aterro junto do encontro esquerdo, bem como da área do paramento de montante a proteger com enrocamento tipo *rip-rap* (*vd.* Desenho 1).

Para além da quantidade de trabalhos a mais em causa ter algum significado, também se verificou que pelo facto da inclinação do encontro esquerdo ser elevada poderia existir o risco da zona de contacto aterro/fundação vir a constituir uma superfície potencial de deslizamento e que, por outro lado, a vala corta-águas iria ficar implantada numa zona onde o maciço rochoso de fundação se apresentava bastante descomprimido, não garantindo as condições de estanqueidade necessárias.

Face aos factos apontados, foi necessário alterar o alinhamento do eixo da barragem junto do encontro esquerdo (*vd.* Desenho

2). A solução executada mantém a inclinação do talude de montante, reduz o volume de aterro e evita que a superfície de contacto aterro/fundação, onde o recobrimento de aterro sobre a zona inclinada do encontro era da ordem de 1.0 a 1.5 metros, viesse a constituir uma superfície potencial de deslizamento e de instabilidade da barragem.

3. Condições geológicas e geotécnicas do maciço de fundação

A barragem está fundada no maciço rochoso xisto-grauváquico ocorrente no local, o qual é constituído essencialmente por bancadas alternantes de xistos e grauvaques, embora estes últimos ocorram com maior frequência e em bancadas mais espessas.

Regra geral, a zona superficial do maciço encontrava-se, predominantemente, muito alterada e fracturada, com diaclases abertas, contínuas e apresentando superfícies oxidadas, reveladoras da existência de percolação de água. Apresentava, frequentemente, zonas de esmagamento do maciço, correspondentes a falhas locais e a charneiras de dobras, em particular na base do encontro esquerdo da barragem, onde ocorreu uma zona de esmagamento ao longo da qual se observaram pequenas ressurgências de água.

A espessura da zona superficial do maciço, na qual este se apresentava muito alterado a decomposto, é reduzida ao longo leito da ribeira, apresentando-se medianamente a pouco alterado e com diaclases fechadas a partir de profundidades que variam entre 2.0 a 2.5 metros. Assim, nesta zona, a profundidade máxima de escavação para a implantação da vala corta-águas variou, regra geral, entre os 2.0 e 2.5 metros.

O horizonte muito alterado a decomposto do maciço de fundação apresentou uma maior espessura na metade superior de ambos os encontros da barragem, podendo atingir profundidades da ordem de 5 a 6 metros no encontro esquerdo, onde a profundidade de escavação para implantação da vala-corta águas foi superior a 3.5 metros.

No encontro direito, ao longo do desenvolvimento da vala corta águas e a montante desta, o maciço apresentava um carácter acentuadamente argiloso e com superfícies de descontinuidade fechadas ou preenchidas por material argiloso, permitindo perspectivar que esta zona do maciço pode vir a apresentar um comportamento aceitável relativamente ao controlo da

percolação, apesar de na zona de fundação a jusante da vala corta águas ocorrerem bancadas de grauvaque muito descomprimidas e com descontinuidades muito abertas e contínuas, extremamente favoráveis à percolação de água.

Os trabalhos de prospecção mecânica executados aquando do início da obra, considerados indispensáveis para uma caracterização geotécnica mais pormenorizada do maciço de fundação da barragem, demonstraram que o maciço rochoso ocorrente é bastante heterogéneo e anisotrópico, tendo revelado que, em termos gerais, é de muito fraca qualidade (RQD<25%) até profundidades que variam entre os 0.5 e 3.5 metros. Para profundidades superiores apresenta, regra geral, fraca qualidade (25%<RQD<50%), embora tenham ocorrido pontualmente zonas de qualidade razoável a boa.

Quanto às características hidráulicas do maciço de fundação, que foi possível deduzir a partir dos ensaios de permeabilidade tipo Lugeon efectuados ao longo das 3 sondagens de prospecção mecânica executadas na fase inicial de construção (vd. Desenho 3), pode-se dizer que:

- a) A permeabilidade do maciço nos troços ensaiados varia entre 0.5 e 4.55 U. L. (Unidades Lugeon), conforme os resultados apresentados no Quadro 1.
- b) As absorções de água obtidas através dos ensaios Lugeon efectuados na sondagem 1 são inferiores a 3 U.L. para profundidades superiores a 2.0 metros (profundidade abaixo da qual está fundada a vala corta águas da barragem), valor que não pode ser considerado elevado tendo em conta a altura da barragem e as tensões neutras que serão induzidas no maciço aquando do enchimento da albufeira.
- c) Relativamente à sondagem 3, executada no encontro esquerdo da barragem, obtiveram-se absorções totais até à profundidade de 6.0 metros, absorções relativamente elevadas (4.55 U.L. $\approx 4.7 \times 10^{-7}$ m/s) para profundidades entre 6.0 e 9.0 metros, e absorções que se podem considerar intermédias (2.75 U.L. $\approx 2.9 \times 10^{-7}$ m/s) a baixas (0.88 U.L. $\approx 9.2 \times 10^{-8}$ m/s) para profundidades de 9-12 m e 12-15 m, respectivamente. Importará ter em conta, no entanto, que a carga hidráulica no encontro esquerdo será reduzida, mesmo em situações de pleno armazenamento.

Quadro 1 – Permeabilidade do maciço rochoso de fundação da barragem

Sondagens	Profundidade (m)	Absorção (Lugeons)	K (m/s) ^[1]
Sond 1	2.0 – 5.0	2.4	$\approx 2.4 \times 10^{-7}$
	5.0 – 8.0	0.52	$\approx 5.5 \times 10^{-8}$
	8.0 – 11.0	1.06	$\approx 1.1 \times 10^{-7}$
Sond 2	2.0 – 5.5	A.T. ^[2]	?
	5.5 – 8.5	0.5	$\approx 5.2 \times 10^{-8}$
Sond 3	3.0 – 6.0	A.T.	?
	6.0 – 9.0	4.55	$\approx 4.7 \times 10^{-7}$
	9.0 – 12.0	2.75	$\approx 2.9 \times 10^{-7}$
	12.0 – 15.0	0.88	$\approx 9.2 \times 10^{-8}$

[1] - Coeficiente de permeabilidade do maciço, admitindo que este constitui um meio poroso, homogéneo e isotrópico.

[2] - Absorção total ou não obturação do troço ensaiado.

- d) Na sondagem 2 obtiveram-se absorções totais para profundidades entre os 2.0 e 5.5 metros, apesar do maciço rochoso se apresentar são a partir dos 2.10 metros e medianamente fracturado para profundidades superiores a 3.5 metros. Tendo em conta os resultados obtidos e a observação do maciço efectuada a quando da abertura da vala corta águas, trata-se de uma zona que pode vir a apresentar um comportamento deficiente relativamente ao controlo da percolação. Nesta zona, a profundidade de saneamento do maciço foi de aproximadamente 3.7 metros, tendo sido colocado um piezómetro para observação do

maciço 1.5 metros abaixo da cota de fundação da vala corta águas.

Face às características hidráulicas do maciço de fundação, que foi possível deduzir a partir dos ensaios de permeabilidade tipo Lugeon e da observação da zona de implantação da vala corta-águas, considerou-se ser prematuro proceder de imediato ao tratamento da fundação da barragem, sem avaliar previamente o provável caudal de percolação através de vários perfis representativos, designadamente para o perfil tipo de maior altura, bem como as subpressões admissíveis na base do corpo da barragem.

Entendeu-se que, sendo o caudal de percolação aceitável e estando verificadas as condições de segurança, em benefício do custo final da empreitada não deveria ser executado qualquer tipo de intervenção até ser possível observar o comportamento da barragem durante o seu primeiro enchimento. Isto porque, a execução de uma cortina de injeção iria acarretar significativos atrasos no prazo de execução da obra e, por outro lado, caso a observação do seu comportamento durante o primeiro enchimento venha a demonstrar que é necessário proceder ao tratamento do maciço de fundação, este poderá ser efectuado sem dificuldades acrescidas, visto se tratar de uma barragem de aterro homogéneo, onde não existe o risco de se produzirem danos nos drenos e nos filtros com a execução da cortina.

4. Corpo da barragem

Trata-se de uma barragem que foi projectada como sendo de aterro homogéneo, constituída por solos do tipo SC e SM.

No entanto, com o início da exploração dos solos de empréstimo verificou-se não ser possível construir uma barragem de aterro com um perfil completamente homogéneo, devido ao reduzido volume de solos de empréstimo disponível na área expropriada da albufeira e à grande heterogeneidade das características físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais ocorrentes.

Assim, em conformidade com as orientações transmitidas pelo Projectista, os solos de empréstimo com uma percentagem de finos mais elevada e de maior plasticidade ($IP > 10\%$) foram utilizados na compactação da vala corta águas e na zona central do aterro da barragem, de forma a constituir um “pseudo-núcleo” central, enquanto que nas zonas a montante e a jusante foram utilizados materiais de granulometria mais grosseira e com finos de baixa plasticidade, provenientes da ripagem da zona mais alterada e decomposta do maciço rochoso xisto-grauváquico.

Do ponto de vista estrutural, a barragem tem a seguinte constituição:

- Uma zona central, constituída por solos aluvionares e de alteração residual, classificados como GC e SC segundo a Classificação Unificada, com um índice de plasticidade superior a 10% e uma percentagem de finos compreendida entre 20 e 25%; o coeficiente de permeabilidade, determinado em laboratório através da execução de ensaios de carga variável, é da ordem de 10^{-5} a 10^{-6} cm/s; os seus parâmetros de resistência ao corte, determinados através de ensaios consolidados não drenados, é da ordem de $c_{cu} = 1.2$ kgf/cm² e $35^\circ \leq \phi_{cu} \leq 38^\circ$.
- Uma zona a montante da zona central (“maciço estabilizador de montante”), constituída por materiais provenientes da ripagem da zona mais alterada e decomposta do maciço rochoso xisto-grauváquico, classificados como GC-GM, com índice de plasticidade inferior a 10%, uma percentagem de finos da ordem dos 20%, e que, após compactação apresentavam uma percentagem de finos da ordem dos 40%; os seus

parâmetros de resistência ao corte, determinados através de ensaios consolidados não drenados, é da ordem de $c_{cu} = 0.3$ kgf/cm² e $\phi_{cu} = 42^\circ$.

- Uma zona a jusante da zona central (“maciço estabilizador de jusante”), constituída por materiais provenientes da ripagem da zona mais alterada e decomposta do maciço rochoso xisto-grauváquico, classificados como GC-GM e GP-GC, com granulometria extensa, índice de plasticidade inferior a 10%, uma percentagem de finos inferior a 10%, e que, após compactação apresentavam uma percentagem de finos da ordem de 15 a 20%.

O tipo de solução adoptada exigiu, portanto, uma gestão criteriosa dos solos de empréstimo a utilizar e implicou alguns atrasos no programa de trabalhos da obra, tendo havido a rejeição de camadas com alguma frequência, pelo facto da granulometria do material aplicado não estar em conformidade com o estabelecido.

Embora o aterro da barragem não tenha um perfil perfeitamente homogéneo, não foram aplicados filtros nas zonas de transição entre os materiais aplicados na zona central do corpo da barragem e os aplicados a montante e a jusante desta, pelo facto de após compactação as curvas granulométricas dos materiais serem muito próximas.

4.1. Sistema de drenagem

O sistema de drenagem da barragem é constituído por um tapete drenante, protegido superior e inferiormente por um filtro de areia, com um dreno de pé de talude no seu extremo de jusante (vd. Desenhos 2 e 3).

No encontro direito, a jusante da vala corta águas, o maciço rochoso xisto-grauváquico apresentava-se bastante descomprimido e com uma disposição em bancadas da qual resultava uma superfície de escavação muito irregular após o saneamento, facto que aliado à elevada inclinação do encontro não permitia a adequada colocação e execução do tapete drenante. Por este motivo, e por se entender que a utilização de um filtro geotextil na zona em causa não irá aumentar o risco de erosão de finos e de colmatação do dreno, foi aprovada a colocação de um filtro geotextil com a gramagem de 400g/m² e de porometria adequada, em substituição do filtro natural previsto. Exceptuando de zona em causa, o filtro do sistema de drenagem da barragem foi executado conforme previsto.

O material aplicado no dreno foi calcário britado, proveniente de uma pedra de concelho de Loulé. Para o filtro, foi utilizada uma mistura de duas areias de um fornecedor espanhol.

O fuso granulométrico do filtro foi determinado com base na granulometria do material que constitui o aterro após compactação e no fuso granulométrico definido para o dreno, tendo em conta os critérios explicitados no Projecto.

4.2. Protecção do talude de montante da barragem

No enrocamento de protecção do talude de montante da barragem foram aplicados materiais com dois fusos granulométricos distintos, os quais foram definidos recorrendo aos métodos propostos pela ASCE e pelo USGS.

Acima da cota do volume morto da albufeira o *rip-rap* de protecção do talude de montante é constituído por blocos de material apresentando $D_{30}=0.185$ m, $D_{50}=0.22$ m e $D_{90}=0.268$ m.

Abaixo da cota do volume morto da albufeira foi aplicado material com uma granulometria ligeiramente mais grosseira ($D_{50}=0.3$ m), tendo a camada de protecção 0.53 m de espessura. Este fuso granulométrico foi seleccionado com o objectivo de otimizar a utilização dos materiais disponíveis.

Dado o risco de erosão interna do aterro da barragem poder ser considerado negligenciável abaixo da cota do volume morto da albufeira, no sentido de reduzir a quantidade de trabalhos a mais da empreitada, o filtro de transição entre o aterro e o *rip-rap* só foi aplicado acima da cota 22.5 m, correspondente à cota do volume morto menos 1 metro.

4.3. Protecção do talude de jusante

Estava previsto que o pé de talude de jusante da barragem fosse executado integralmente com o material granular que constitui o tapete drenante da barragem, situação que, a longo prazo, poderia por em risco a sua estabilidade, uma vez que se trata de um material susceptível de vir a sofrer erosão pela linha de água natural adjacente e, sobretudo, pelo caudal resultante de eventuais descargas de fundo.

Face ao risco de erosão do pé de talude, foi colocada uma camada de enrocamento de protecção sobre este, com 40 cm de espessura, onde foram aplicados blocos de enrocamento grauváquico com um fuso granulométrico igual ao do enrocamento de protecção do talude de montante da barragem.

5. Controlo de compactação do corpo da barragem

Os aterros foram executados com um cilindro vibrador de rasto liso do tipo Dynapac 310 D. Este tipo de cilindro desenvolveu um trabalho adequado na compactação dos materiais mais grosseiros provenientes da ripagem da zona mais alterada a decomposta do maciço xisto-grauváquico, empregues nas zonas de montante e de jusante do corpo da barragem, embora tenha apresentado algumas limitações na execução da zona central, onde foram aplicados solos finos com um $IP \geq 10\%$.

As condições de compactação foram estabelecidas com base nos resultados de um aterro experimental executado a montante da vala corta-águas, o qual foi incluído no corpo da barragem, tendo permitido definir os seguintes parâmetros: espessura máxima das camadas antes da compactação = 40 cm; número mínimo de passagens do cilindro com vibração = 6; teor em água de compactação do material a aplicar na zona central da barragem = 10.5 a 11.5%.

O controlo da compactação (γ_d e w) dos aterros foi efectuado com um gama-densímetro (*troxler*), o qual foi calibrado através da execução de ensaios com a garrafa de areia, tendo o teor em água sido também controlado através da garrafa de Speedy. Os ensaios de compactação de laboratório utilizados como referência foram o Proctor normal.

Embora o gama-densímetro não seja o método de controlo de compactação mais adequado a este tipo de obra, fornece resultados praticamente instantâneos que serviram, fundamentalmente, para o autocontrolo da construção dos aterros por parte do empreiteiro.

6. Condução da descarga de fundo

A análise do perfil longitudinal e dos perfis transversais do terreno de fundação demonstrou que o alinhamento definido para a implantação da condução da descarga de fundo não constituía a solução mais favorável, uma vez que grande parte desta não se encontrava apoiada sobre o maciço rochoso de fundação, mas sim sobre o aterro da barragem. Por sua vez, no seu troço final, entre a zona de implantação da barragem e a bacia de dissipação, a geratriz inferior da condução encontrava-se acima do terreno natural, requerendo um elevado volume de betão de enchimento para facultar o seu apoio.

As razões apontadas levaram à alteração do alinhamento da implantação da condução da descarga de fundo, de forma a esta ficar apoiada sobre o maciço rochoso de fundação.

Por proposta apresentada pelo Empreiteiro, em substituição dos tubos de fibro-cimento previstos, na condução da descarga de fundo foram aplicados tubos de ferro fundido dúctil da “Pont-a-Mousson”, de 700 mm de diâmetro. Esta solução foi aprovada por permitir um melhor comportamento mecânico da condução e uma maior fiabilidade em termos de estanqueidade.

7. Bacia de dissipação da descarga de fundo e canal de descarga

O canal de descarga foi executado através do desmonte e regularização do sopé da margem direita da Ribeira da Caroucha, no troço a jusante da zona de implantação da bacia de dissipação.

Para testar o comportamento do canal de restituição, foi efectuado um ensaio com o nível de água na albufeira à cota 24.5 m (correspondente à cota do nível morto mais 1.0 metro), o qual permitiu verificar que, para as condições de ensaio, o caudal de descarga não atingia o pé de talude de jusante da barragem de forma a provocar a erosão e arrastamento de material. De futuro, será necessário efectuar um novo ensaio com o nível de água na albufeira próximo da cota de pleno armazenamento, de forma a avaliar o comportamento do canal de restituição para o caudal máximo e velocidade máxima de descarga.

8. Sistema de observação da barragem

Conforme definido no Projecto, o sistema de observação da barragem é constituído por 3 piezómetros hidráulicos de tubo aberto, que têm por objectivo observar o comportamento

hidráulico da barragem, por marcas superficiais para medição de deformações superficiais do aterro e por um medidor do caudal de percolação conectado ao sistema de drenagem do corpo da barragem.

8.1. Observação do comportamento hidráulico

Face às características do maciço rochoso de fundação e ao tipo de material utilizado na execução do aterro do corpo da barragem, foi necessário alterar a localização do sistema de observação do seu comportamento hidráulico, o qual é constituído por (vd. Desenho 3):

- 1 piezómetro hidráulico instalado no maciço rochoso de fundação, a jusante da vala corta-águas (piezómetro N° 1);
- 2 piezómetros hidráulicos instalados no aterro do corpo da barragem (piezómetros N° 2 e N° 3).

O piezómetro N° 1 foi instalado a partir do coroamento, tendo por objectivo medir as tensões neutras no maciço rochoso de fundação, numa zona onde este apresentava um grau de fracturação elevado e ressurgências de água ao longo das superfícies de descontinuidade, embora de caudal reduzido. Assim, irá permitir avaliar o comportamento hidráulico do maciço de fundação abaixo (-1.5 m) da cota da vala corta-águas, bem como a eficácia do comportamento desta no controlo da percolação durante a fase de primeiro enchimento e no período de exploração da barragem.

Foi instalado um segundo piezómetro (N° 2) no aterro da barragem, com o objectivo de confirmar a evolução da linha de saturação do aterro com o enchimento da albufeira. A sua localização justifica-se pelo facto de no aterro do corpo da barragem terem sido utilizados materiais provenientes da ripagem da zona mais alterada e descomprimida do maciço rochoso xisto-grauváquico, que se admite poderem vir a apresentar alguma heterogeneidade relativamente à sua permeabilidade ($k_H > k_V$) e, conseqüentemente, vir a alterar o traçado da linha de saturação. Este piezómetro foi instalado a

partir do talude de jusante da barragem, a meia altura entre a banquetta e o coroamento.

O terceiro piezómetro (N° 3) foi instalado com o objectivo de medir as tensões neutras sobre o tapete drenante horizontal, junto do dreno de pé de talude, de forma a avaliar o comportamento do sistema de drenagem em situações de pleno armazenamento.

Todos os piezómetros foram instalados na fase final da construção da barragem, em furos abertos com um martelo de fundo de furo, com cerca de 5.5" (± 14 cm) de diâmetro. No Desenho 3 apresenta-se um esquema com a localização dos 3 piezómetros instalados na barragem.

8.2. Observação de deformações superficiais

Os deslocamentos superficiais que se pretendem vir a medir são verticais e horizontais, tendo-se procurado referenciar os deslocamentos de marcas superficiais a pontos fixos de confiança (marcos de observação).

No total, foram instaladas 8 marcas superficiais no aterro do corpo da barragem (5 no coroamento e 3 sobre a banquetta do talude de jusante) e 3 marcos de observação (vd. Desenho 2).

Os 3 marcos de observação foram implantados de forma a serem visíveis entre si e a possibilitar a execução de intersecções inversas, aumentando assim o rigor e a correcção dos erros de leitura.

9. Considerações finais

Pretendeu-se com o presente artigo salientar a importância que o controlo de construção pode ter na garantia de qualidade e na segurança de barragens de aterro, permitindo ainda, por outro lado, minimizar eventuais trabalhos a mais, que neste tipo de obras tendem a ocorrer com alguma frequência.

É ainda importante referir que um maior investimento em estudos geotécnicos na fase de projecto, para este tipo de obras, nomeadamente na avaliação dos parâmetros geotécnicos do maciço de fundação e na caracterização das manchas de empréstimo, traduz-se sempre numa diminuição de custos durante a fase de execução e num aumento da qualidade da obra.



Fotografia 1 – Vista geral da fundação da barragem



Fotografia 2 – Vista geral da barragem concluída

