

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE RIBEIRADIO - SOLUÇÃO EM BETÃO COMPACTADO COM CILINDRO

GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF THE RIBEIRADIO DAM ROCK MASS FOUNDATION - ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) SOLUTION

Oliveira, Ricardo, *COBA, SA e FCT/UNL, Lisboa, Portugal, ricardo.oliveira@coba.pt*

Morgado, António, *COBA, SA, Lisboa, Portugal, am@coba.pt*

Portugal Ferreira, Martim, *FCT/UC, Coimbra, Portugal, martimportugal@oninet.pt*

RESUMO

O local de implantação da barragem de Ribeiradio exigiu um vasto programa de caracterização geológica e geotécnica, que foi sendo desenvolvido ao longo de várias fases, com o objectivo de estudar o maciço rochoso de fundação. Da análise dos resultados obtidos ressaltam contrastes significativos de deformabilidade, não só entre as duas margens, privilegiando claramente a margem esquerda, mas também entre os distintos litotipos ocorrentes. O estudo geológico realizado assumiu um papel fundamental ao colocar em evidência os processos tectonometamórficos responsáveis pelo complexo cenário geotécnico encontrado. A solução do projecto de fundação consistiu no saneamento das zonas de maciço de piores características geotécnicas, o que se traduz em escavações que atingem cerca de 30 m na margem direita, e na execução de um tratamento da fundação englobando injeções de consolidação e cortinas de impermeabilização e drenagem do maciço de fundação.

ABSTRACT

Following the selection of the Ribeiradio dam site, a vast and staged geological and geotechnical reconnaissance program was carried out in order to study its rock mass foundation characteristics. Results showed not only significant contrasts involving the deformability modulus of both margins but also between the occurring lithotypes. The role of the geological studies must be emphasized as they led to the understanding of the tectonic and metamorphic processes behind the site's complex geotechnical frame. The design solution considered the removal of a significant part of the weak rock material - leading to excavations down to 30 m on the right bank - and the treatment of the rock mass using consolidating grouting, cut off grouting and drainage curtains.

1. INTRODUÇÃO

A barragem de Ribeiradio, com altura máxima prevista de 76 m, situa-se no curso médio-baixo do rio Vouga, cerca de 8 quilómetros a montante de Sever do Vouga. A obra insere-se num empreendimento destinado a regularizar, nos períodos mais secos, as afluências de uma bacia hidrográfica com uma área da ordem dos 940 km², prevendo-se ainda a exploração futura do significativo potencial hidroeléctrico criado pela albufeira do aproveitamento que à cota do NPA (110) tem uma capacidade total de 128,5 hm³. O projecto da barragem de Ribeiradio é o primeiro em Portugal onde se considerou uma solução de barragem com corpo integralmente constituído por betão compactado com cilindro (BCC).

O domínio que suportará a barragem poderia ser sumariamente apresentado como um maciço de rochas cristalinas que fica no contacto entre granitos hercínicos e um Soco com micaxistos do Complexo xisto-grauváquico onde existem migmatitos de injeção em vez das clássicas rochas de metamorfismo de contacto - corneanas e xistos mosqueados.

O local de Ribeiradio foi objecto dos estudos de planeamento da bacia do Vouga realizados pela COBA em 1975 [1], sob a tutela da D.G.S.H. (Direcção Geral dos Serviços Hidráulicos, tendo posteriormente adoptado a designação INAG - Instituto da Água). Na sequência dos estudos de 1975 chegaram a ser realizados trabalhos de prospecção geológico-geotécnica sobre um alinhamento situado um quilómetro a jusante do eixo actual, que incluíram perfis sísmicos, sondagens mecânicas e abertura de galerias de prospecção.

Em 1995, o Estudo Prévio do aproveitamento de Ribeiradio [2] - que se concentrou em dois eixos alternativos, anteriormente identificados pela COBA - incluiu, para além do reconhecimento geológico de superfície, a execução de 20 perfis sísmicos de refração sobre a solução, à altura designada de montante, correspondente ao alinhamento posteriormente seleccionado, pelo INAG, para a barragem. Convirá aqui sublinhar que o estudo comparativo realizado pela COBA mostrava claramente que este local exhibia características geológicas e geotécnicas significativamente inferiores ao local de jusante, anteriormente estudado.

Em 1999 elaborou-se uma terceira fase de estudo, centrada no alinhamento de montante e designada por “Solução de Referência” [3], que veio a servir de base ao lançamento do concurso concepção-construção. Os estudos, então orientados para uma solução de betão gravidade, incluíram sondagens mecânicas à rotação acompanhadas de ensaios de absorção de água e perfis sísmicos de refração adicionais.

A entrega, por parte do consórcio MOTA-SOMAGUE-ENGIL, do Projecto Base para Concurso, marcou o fim da quarta fase de estudo, já em 2000 [4]. A natureza do concurso recomendou a execução de uma campanha de prospecção complementar, muito condicionada pelos prazos disponíveis. Para a caracterização preliminar do maciço recorreu-se a um detalhamento da cartografia geológica de superfície, e a uma campanha de trabalhos de prospecção mecânica e geofísica complementares, bem como à realização de ensaios “in situ” e em laboratório para investigação das características mecânicas dos materiais rochosos ocorrentes na fundação.

Na sequência de o consórcio referido ter sido o adjudicatário do projecto de concepção-construção da barragem de Ribeiradio, avançou-se para a quinta e última fase de estudo, designada de Projecto, e entregue em finais de 2002 [5]. A complexidade da obra e a heterogeneidade geológica encontrada na zona prevista para a fundação tornaram indispensável, nesta fase, a elaboração de uma cartografia geológico-estrutural de pormenor, sustentada e complementada pela investigação directa do interior do maciço, realizada através da abertura de 5 galerias de prospecção. Os trabalhos de prospecção e ensaios executados nesta fase visaram fundamentalmente complementar a informação existente sobre o maciço de fundação da barragem e colmatar algumas lacunas remanescentes de fases anteriores.

No presente artigo descrevem-se os estudos geológicos e geotécnicos conduzidos ao longo das diversas fases de estudo sobre o alinhamento escolhido pelo INAG, analisam-se as características mecânicas e hidráulicas do maciço de fundação e apresenta-se o respectivo zonamento geotécnico. Expõe-se ainda a solução encontrada para o projecto de fundação da barragem tendo em atenção o complexo cenário geotécnico ocorrente.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO GERAL

A albufeira a criar com o enchimento de barragem irá recobrir terrenos do granito de Lafões, um granito hercínico sin-tectónico tardio, de grão médio, moscovítico-biotítico, no qual são frequentes os “pendant roofs” de micaxistos biotíticos, metagrauvaques e migmatitos arteríticos e veníticos, com filiação no Complexo xisto-grauváquico ante-Ordovícico, e de anfibolitos e granitos hercínicos mais precoces.

No local previsto para a implantação da barragem o rio Vouga corre ao longo de um tramo com orientação ENE-WSW. Num corte transversal ao vale nesta zona, as margens apresentam-se, grosso modo, simétricas, com um ângulo de abertura de 115°, sendo a pendente da margem esquerda 30° e da margem direita 35°.

Os trabalhos de cartografia estrutural permitiram ainda documentar claramente que o traçado do rio Vouga na zona da barragem é condicionado por um feixe de falhas, com andamento ENE-WSW e movimentação dextrógiro em regime frágil.

O perfil geológico apresentado na Figura 1 mostra a sucessão de litotipos ao longo do alinhamento previsto para o eixo da barragem.

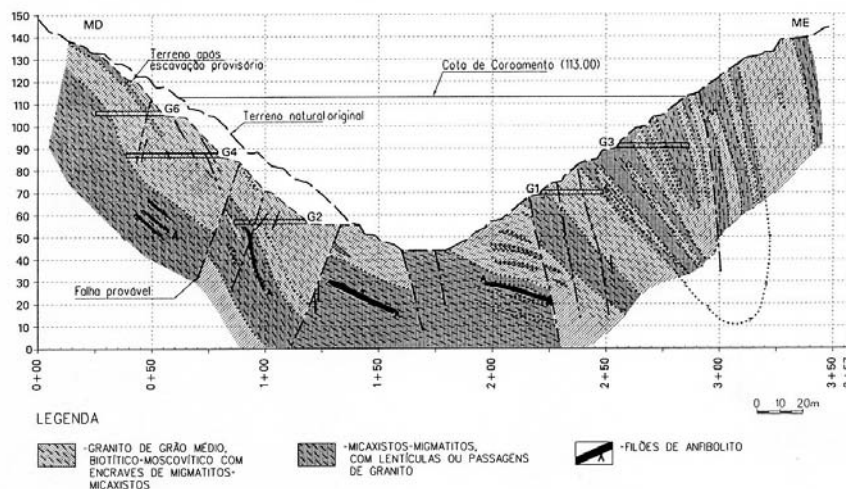


Figura 1 - Perfil geológico na zona do eixo da barragem

O complexo cenário geológico ocorrente obrigou a um detalhado levantamento das características geológicas e estruturais da zona de implantação da barragem, bem como da sua envolvente. Esta tarefa permitiu cartografar e individualizar as unidades litoestratigráficas e estruturais que, de forma resumida, seguidamente se descrevem. Previamente, convém ainda referir que os níveis mais superficiais correspondem a aluviões de muito reduzida expressão e a formações coluvionares com ampla representação na escala 1:10000, para além de aterros recentes associados à obra propriamente dita.

2.1 Quartzitos, Micaxistos e Migmatitos do Ordovícico

No sector de Ribeiradio (margem esquerda) assiste-se à substituição dos migmatitos arteríticos e veníticos, aflorantes a ocidente de Vilarinho (margem direita), por um discretizado pequeno plutão de granitos “aloctonizados”, i.e., como expressão de um domínio em que a fusão dos micaxistos foi suficiente para que o migma pudesse ser movimentado para dar origem a um corpo intrusivo de granito, ainda concordante com a estrutura, mas já suficientemente espesso

para cristalizar sem foliação nas zonas internas. Os quartzitos ocorrentes são brancos, bem cristalinos, com contactos absolutamente claros com as bancadas de micaxistos sobrepostas e apresentam-se densamente fracturados. De realçar o facto de os micaxistos do Ordovícico apresentarem características resistentes inferiores às dos micaxistos do Complexo xisto-grauváquico, o que resulta, em grande parte, das pequenas intercalações de xistos carbonosos, ftanitos e quartzitos que apresentam.

2.2 Micaxistos, Migmatitos e Anfibolitos do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG)

Estas rochas, geradas na 1ª fase hercínica e regeneradas durante a 2ª fase, foram sujeitas a uma 3ª fase de reorganização que deu origem às estruturas tectónicas de maior dimensão - megadobramentos em sinformas e antiformas com plano axial subvertical, que são as que têm expressão cartográfica. Na região de Ribeiradio - Vilarinho, a cartografia evidencia a existência de dois membros no CXG:

- Membro superior: com micaxistos, alguns deles quase são quartzitos xistosos, metagrauvaques e migmatitos, predominantemente de injeção. Este membro aflora nas partes ocidentais de Ribeiradio e de Vilarinho, por baixo dos flancos do sinclinal do Ordovícico;
- Membro inferior: com micaxistos, migmatitos, mais arteríticos do que no membro superior, e anfibolitos, em feixes de soleiras que se repetem.

Em termos litológicos, interessa realçar a presença de dois tipos fundamentais de micaxistos: uns, com paragénese ricas em quartzo e micas, apresentam-se muito resistentes à alteração química e mecânica; os outros, ao apresentarem duas foliações ou indícios de anatexia parcial, vêm a sua resistência diminuir acentuadamente devido à hidrólise dos feldspatos recém-formados.

No que se refere aos anfibolitos, caracterizam-se pela continuidade das suas soleiras, com 0,2 a 2,5 m de espessura, e pela grande variabilidade dos estados de alteração que exibem (W_1 a W_5), ocorrendo apenas a montante do eixo projectado para a barragem.

É de salientar ainda a presença de granitos de grão médio a fino, biotítico-moscovíticos, intrinsecamente intercalados no Complexo xisto-grauváquico e no Ordovícico sob a forma de soleiras conformes à xistosidade S_1 , identificados como granitos hercínicos precoces, exibindo espessuras visíveis compreendidas entre menos de 1 m e 30 m. Nas soleiras de menor espessura são evidentes os sinais de estiramento e é mais marcada a foliação tectónica, podendo ainda reconhecer-se um carácter gnaissóide.

A existência da clivagem xistosa e de diaclasamento denso favorecem a infiltração da água até às profundidades dos aquíferos, na ordem dos 100 m. Contudo, do ponto de vista geotécnico, a infiltração aqui mais influente, porque propicia a degradação dos granitos para os estádios W_4 e W_5 , faz-se sentir até aos 40 m, que é uma profundidade pouco corrente. E é tão evidente o controlo pelas diaclases que, no fundo das galerias abertas a cotas mais baixas, há ocorrências de granito W_5 separadas de granito W_2 por diaclases - porque os W_5 estão a muro de diaclases inclinadas, confirmando-se, ainda, que a meteorização progride “per descensum”.

Finalmente, refere-se o Granito de Couto de Esteves - um plutão de grão médio a grosseiro moscovítico-biotítico -, concordante com a estruturação hercínica ($N20^{\circ}W$) impressa no CXG. Apresenta uma foliação moderadamente penetrativa, por vezes sublinhada por micaxistos

biotíticos com configurações peliculares e que podem mesmo tornar-se lensoidais. A tecto do plutão, são frequentes os “pendant roofs” de micaxistos e de anfibolitos.

2.3 Estrutura

As dobras mesoscópicas e macroscópicas, geradas durante as fases hercínicas compressivas F1 e F2 são irrelevantes para o comportamento geotécnico do maciço. Importantes e activas são as foliações S1 (ca. N20°W, 90±10°) e S2 (ca. N40°W, 90±10°), que são clivagens de plano axial daquelas dobras. Estes elementos tectónicos são essenciais para explicar, entre outras coisas, a infiltração da água e a conseqüente meteorização em profundidade do maciço rochoso. Refira-se que as dobras com eficácia no comportamento são as mais tardias (D3), pois vêm solicitar foliações tectónicas prévias.

Na zona da fundação da barragem destaca-se o sinclinal e os planos de falha que constituem a Falha do Vouga. O sinclinal, que tem a largura de 120 a 200 m e plano axial quase vertical, tem na parte superior micaxistos e também migmatitos (na zona de Vilarinho, na margem direita); o flanco leste está estirado, sendo esta deformação presumidamente associável à migmatização.

Notar que, na vertente da margem esquerda, a estrutura dobrada repete-se, mas com uma translação de cerca de 70 m para jusante. Este facto justifica uma importante observação: a alteração mais intensa e mais penetrativa encontrada na zona do eixo projectado, na vertente da margem direita, reflectirá, sobretudo, o facto de se estar sobre a charneira do sinclinal e serem mais abundantes os granitos do que os micaxistos. Na vertente contrária, a relação granito/micaxisto favorece os segundos, sendo que a fundação apenas interessa obliquamente a charneira do sinclinal. A maior resistência à meteorização do micaxisto resulta deste ser mais rico em quartzo e moscovite-biotite e conter menos feldspato, que é a fase mais degradável.

2.4 Fracturas

A perspectiva que fica é a da possibilidade de identificar como mais significativas as seguintes famílias de diaclases:

I - N65±5°E; 80±10°E (as falhas desta família são as do rio Vouga); II - N30°W; 90±10° (estas diaclases são responsáveis pelas discontinuidades encontradas nos estados de alteração em profundidade, como sejam as passagens W₂ a W₄, conforme se pode verificar nas galerias de prospecção); III - N-S a N10°E; subverticais; IV - N75±5°W; 60°S (e 70°N); V - N35±5°E; 70°E (claramente conhecidas à escala regional, para ocidente e para oriente, constituem demonstradamente percursos para diques de granitos de Couto de Esteves); VI - Subhorizontais - (ampliadas e abertas pela descompressão associada à remoção erosiva).

São raros os casos de preenchimento das diaclases por argilas, mas foram detectadas ilite e caulinite, em caixas que raramente atingem a dimensão centimétrica.

2.5 Falhas

As principais famílias de falhas detectadas são a seguir apresentadas, cuidando de marcar as diferenças entre as situações encontradas nos maciços das margens direita e esquerda:

I - N60°E; 60°N - no lado norte (margem direita) dão expressão à Falha do rio Vouga; N65°E; 70°S - no lado sul, são as equivalentes. Apesar de apresentarem rejeitos de expressão

cartográfica, estas falhas têm caixas pouco relevantes (inferiores a 1 m), passíveis de fácil saneamento. **II** - N20°W; subverticais. **III** - N-S a N5°E; subverticais; **III.i** - N40°E; subverticais - pouco expressivas; N20°E; subverticais - são as equivalentes no bloco da margem esquerda. **IV** - N60°W; 80°S e N60°W, na margem direita; 60°N N80°W; 80°S - são as equivalentes do lado esquerdo. **V** - N35°E; 90±20° - família bem representada a norte.

3. TRABALHOS DE PROSPECÇÃO E ENSAIOS REALIZADOS

Até à fase de Projecto, o maciço de fundação da barragem tinha já sido investigado através da realização de 12 sondagens mecânicas à rotação (7 na margem direita e 5 na esquerda) acompanhadas de ensaios de absorção de água tipo Lugeon em troços de 5 m, de 27 perfis sísmicos de refração de comprimento variável entre 60 e 120 m e de um rectângulo de resistividades aparentes, executado na zona do encontro direito, com dimensões aproximadas de 35 x 60 m, e AB igual a 120 m. Foi ainda executado um programa de ensaios dilatométricos cobrindo ambas as margens e um programa de ensaios laboratoriais sobre provetes de rocha, destinado a avaliar propriedades índice dos materiais interessados.

Dos resultados obtidos foi possível tirar conclusões sobre as características geológicas e de permeabilidade do maciço, bem como sobre as condições geotécnicas encontradas, nomeadamente, no que se refere ao importante aspecto da espessura do perfil de alteração que, na margem direita apresenta invulgar desenvolvimento em profundidade.

A campanha de estudo posterior, visando detalhar o conhecimento do maciço [6], deu particular relevância à caracterização do cenário da margem direita através da realização de trabalhos de prospecção e ensaios complementares, de natureza semelhante aos já realizados, tendo-se, no entanto, acrescentado a abertura de 5 galerias de prospecção onde se realizaram ensaios “in situ” com macacos planos de grande área (LFJ) e leques sísmicos entre galerias e entre as galerias e a superfície. Todas as galerias foram cuidadosamente estudadas, mostrando-se na Figura 2 a cartografia geológica detalhada da galeria G4. No Quadro 1, apresentam-se as quantidades totais de trabalhos realizados.

Acresce que nesta fase o Consórcio procedeu à escavação de um volume significativo de terras (cerca de 55000 m³), cuja remoção já estava prevista, em especial na margem direita, permitindo desse modo um reconhecimento geológico muito pormenorizado do maciço na zona da fundação da barragem.

Quadro 1 – Trabalhos de prospecção geológico-geotécnica. Quantidades realizadas

Tipos de trabalho de prospecção	Quantidades unitárias	Quantidades totais
Perfis sísmicos de refração e leques sísmicos	Perfis Sísmicos – 33 Leques Sísmicos – 11	528 medições de V ₁
Sondagens à rotação	m.d. – 14 m.e. – 11	1 173,5 m
Galerias de prospecção	m.d. – 3 m.e. – 2	196 m
Ensaio de absorção de água tipo Lugeon	m.d. – 86 m.e. – 80	166
Ensaio dilatométrico	m.d. – 24 m.e. – 17	41
Ensaio LFJ	m.d. - 2	2

Legenda: m.e. - margem esquerda; m.d. - margem direita

Os ensaios LFI realizados nas galerias G4 e G2 situadas, respectivamente, nas cotas intermédias e nas cotas baixas da margem direita, tiveram as suas ranhuras orientadas perpendicularmente à direcção principal da resultante do esforço compressivo induzido pela barragem uma vez atingido o nível de pleno armazenamento na albufeira. Procurando reduzir-se a influência das muitas heterogeneidades pontuais ocorrentes sobre o valor da deformabilidade medido, aumentou-se o volume de maciço interessado em cada ensaio através da utilização de duas almofadas contíguas (2,3 m² de área útil), tendo os ensaios sido localizados em zonas do maciço situadas a cotas inferiores às de superfície de escavação da fundação. Na galeria G4, aberta em granitos de grão médio, obteve-se um módulo de deformabilidade médio de 0,9 GPa, para uma pressão máxima de ensaio de 1 GPa. Nos micaxistos da galeria G2 considerou-se representativo o valor de 6 GPa para o módulo de deformabilidade do maciço, para uma pressão máxima de 4 MPa.

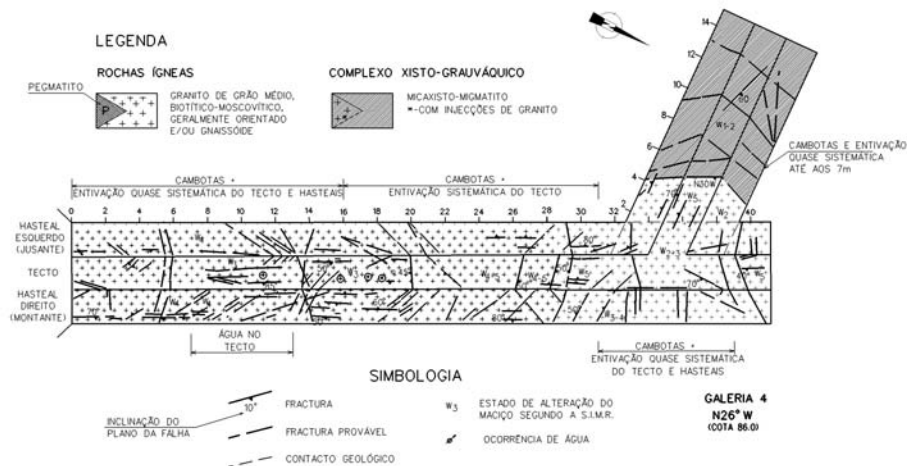


Figura 2 - Cartografia geológica da galeria G4

O interior dos furos de sondagem foi aproveitado para a realização de ensaios com dilatómetro, cuja dispersão de resultados vem contribuir para reforçar as evidências geológicas já referidas no que respeita à elevada heterogeneidade e anisotropia encontrada no maciço de fundação. Na margem direita, a profundidades da ordem dos 40 - 50 m, os módulos dilatométricos (E_d) médios obtidos estão compreendidos entre 2,0 a 3,0 GPa, enquanto que nas cotas mais elevadas desta margem se admite que os valores característicos possam ser ligeiramente inferiores. Na margem esquerda os módulos dilatométricos médios obtidos revelam um maciço com características de deformabilidade ligeiramente superiores, parecendo o intervalo compreendido entre 2,0 a 4,0 GPa o que melhor representa o maciço rochoso nas cotas mais elevadas. Em profundidade, pode dizer-se que o valor médio do módulo dilatométrico evolui para 4,0 GPa. No pé de jusante da barragem, na margem direita, os módulos dilatométricos situam-se frequentemente nos intervalos 1,5 a 3,0 GPa e 3,0 a 5,0 GPa, iniciando melhorias na qualidade do maciço rochoso desde o eixo até à sensível zona do pé de jusante da barragem.

A análise dos resultados das sondagens mecânicas evidenciou a existência de um acentuado contraste na qualidade do maciço rochoso, não só entre as duas margens, mas também entre os granitos e os micaxistos, beneficiando estes últimos. De facto, enquanto a capa de alteração, com passagens saibrosas, atinge em várias sondagens realizadas nas cotas intermédias/superiores da margem direita espessuras da ordem dos 25-30 m, frequentemente sem recuperação de testemunho, na margem esquerda o perfil de alteração é limitado inferiormente por profundidades que rondam genericamente os 10-15 m. Ambas as profundidades indicadas tendem a diminuir ligeiramente na direcção do fundo do vale. Este cenário é inteiramente corroborado pelos resultados da prospecção geofísica, caracterizados por

baixas gamas de valores de velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais, da ordem dos 1200 m/s a 1400 m/s, até cerca dos 30 m de profundidade nas cotas superiores da margem direita.

As características hidrogeológicas, evidenciam, embora com excepções localizadas, uma diminuição progressiva da absorção com o aumento da qualidade do maciço em profundidade, associado geralmente à fracturação menos intensa e à colmatação das fracturas existentes. Na margem direita foram encontrados valores relativamente reduzidos de absorção que deverão ser consequência da argilificação dos feldspatos presentes nos granitos. Salienta-se, no entanto, que em ambas as margens existem zonas singulares com absorções superiores ao que seria expectável em maciços desta natureza onde o limite impermeável não foi atingido até aos 60 m de profundidade.

O programa de ensaios laboratoriais incluiu, para além de ensaios de deslizamento de diaclases, determinações da massa volúmica seca, da velocidade de propagação de ultra-sons e ensaios de compressão uniaxial.

Os valores do módulo de deformabilidade (E) e da tensão de rotura (σ_r) obtidos nos ensaios de compressão uniaxial mostraram grande dispersão que, mais uma vez, se considera reflexo da variabilidade dos litotipos e dos estados de alteração encontrados, sendo de salientar a tendência sistemática para valores mais elevados na margem esquerda e nos micaxistos. Em profundidade os valores obtidos aumentam consideravelmente evidenciando a presença de um maciço com boas características geotécnicas. Este cenário é também validado pelos valores das velocidades de propagação de ultra-sons medidos em provetes de rocha.

Os ensaios de deslizamento de diaclases são dos mais relevantes ensaios de laboratório executados, tendo procurado seleccionar-se, a partir de tarolos de sondagem, diaclases consideradas representativas. Neste ponto em particular nota-se que os materiais de natureza granitóide apresentam melhores características (C_a entre 0,0 e 0,44 MPa, com valor médio de 0,25 MPa, e ϕ compreendido entre 26 e 42°, com valor médio de 33°) que os micaxistos-migmatitos (C_a entre 0,06 e 0,20 MPa, com valor médio de 0,13 MPa, e ϕ compreendido entre 21 e 33°, com valor médio de 26°), facto que pode ser explicado por estes últimos apresentarem textura foliada. Relativamente às gamas de valores, interessa salientar, uma vez mais, a grande amplitude dos intervalos obtidos, evidenciando a influência do efeito das rugosidades das diaclases, que acaba por se esbater nos provetes mais alterados.

Embora fora do âmbito da presente comunicação, justifica-se uma breve referência ao estudo paralelo que, durante o desenvolvimento das diversas fases do projecto, incidiu inicialmente sobre a procura de locais de empréstimo situados no interior do perímetro inundado e, posteriormente, sobre a caracterização detalhada das duas manchas de empréstimo consideradas mais aptas a fornecer os cerca de 300 000 m³ de inertes previstos utilizar no fabrico do betão compactado que constituirá o corpo da barragem.

4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJECTO DE FUNDAÇÃO DA BARRAGEM

4.1 Zonamento Geotécnico

Nas Figuras 3 e 4 apresenta-se o tratamento proposto para a fundação da barragem em perfil longitudinal pelo eixo e em perfil transversal onde, para além dos limites do tratamento de consolidação, se apresenta a geometria adoptada para o corpo da barragem face às condicionantes de deformabilidade evidenciadas pelo maciço de fundação.

Com base no vasto leque de resultados de trabalhos de campo e de laboratório reunido, ensaiou-se o zonamento geotécnico do maciço rochoso tendo em atenção o tipo de barragem e respectivas exigências ao nível da fundação. Utilizando-se adequados intervalos de variação das características físicas, mecânicas e hidráulicas do maciço rochoso foi possível contornar os efeitos da dispersão de resultados, organizando-os em zonas com comportamento geotécnico semelhante.

Quadro 2 - Zonamento geotécnico

Zona	Estado de alteração	Grau de fracturação	Absorção (U.Lugeon)	% Rec.	RQD (%)	E (GPa)	V ₁ (m/s)
ZG3	W ₄ – W ₅	F ₄ – F ₅	> 10	0 – 100	0 – 70	< 1	< 1200
ZG2	W ₃ (eventual W ₄)	F ₄ (eventual F ₅)	2 – 10	0 – 100	0 – 80	1 – 3	1200 – 2200
ZG1	W ₂	F ₃	< 3	> 80	> 70	> 3 GPa	> 2500

4.2 Classificação Geomecânica

Embora seja discutível a aplicação das classificações geomecânicas a maciços rochosos de fundação de barragens de qualquer tipo, considerou-se pertinente fazer esse exercício neste caso, tendo-se decidido calcular os valores de RMR (Rock Mass Rating) associados aos parâmetros fornecidos pelas sondagens à rotação, pela abertura de galerias e pelos ensaios de compressão uniaxial. No caso do maciço rochoso de fundação de barragem de Ribeiradio foram calculados, em ambas as margens, mais de uma centena de valores de RMR distribuídos por diferentes profundidades ao longo de todo o maciço interessado.

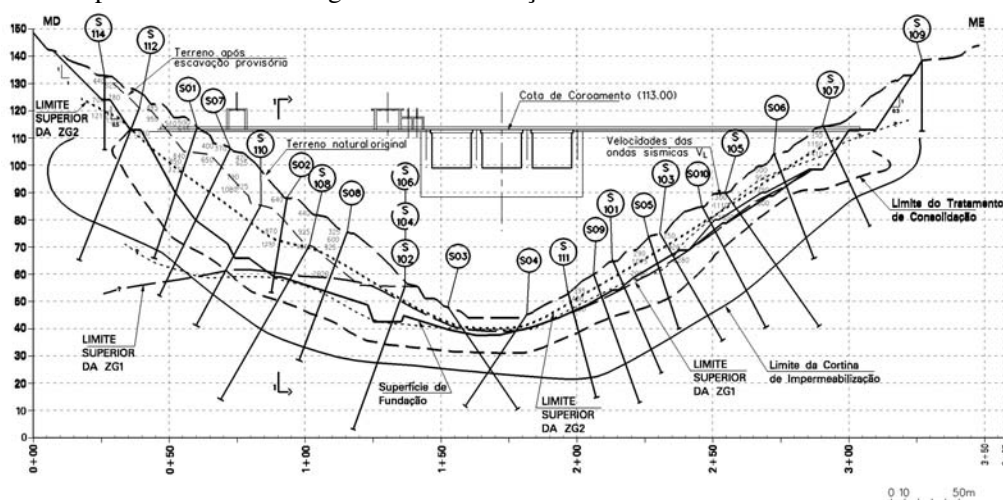


Figura 3 - Zonamento geotécnico da zona da barragem. Condições de fundação

Sobrepondo os valores obtidos ao zonamento geotécnico atrás descrito, pode concluir-se que a zona geotécnica ZG3 (com excepção dos depósitos de cobertura) se enquadra na classe IV - maciço de fraca qualidade (RMR entre 20 e 40), que a zona ZG2 deverá ser classificada como classe III - maciço de qualidade razoável (RMR entre 40 e 60) e que a zona ZG1 poderá ser englobada na classe II - maciço de qualidade boa (RMR entre 60 e 80), com subzonas pertencentes à classe III. À classe IV corresponderão coesões da ordem de 0,1 a 0,2 MPa e ângulos de atrito entre 15° e 25°, à classe III, coesões da ordem de 0,2 a 0,3 MPa e ângulos de atrito entre 25° e 35°, e à classe II, coesões compreendidas entre de 0,3 a 0,4 MPa e ângulos de atrito entre 35° e 45°.

4.3 Superfície de Fundação

Para a definição da superfície de fundação foi assim possível entrar em linha de conta, por um lado, com a interpretação fornecida pelo zonamento geotécnico e, por outro, com a classificação geomecânica das zonas definidas. Foi também essencial limitar a profundidade da escavação, em especial na margem direita, a valores compatíveis com a altura da própria obra, tendo presente a especificidade associada ao facto de se tratar de uma barragem de betão compactado com juntas, na qual a influência da elevada deformabilidade da fundação no comportamento é menor do que em barragens de betão convencional [7].

A primeira alternativa consistiria na escavação apenas do horizonte mais descomprimido, correspondente aos níveis com $V_1 < 1000$ m/s. Esta solução foi abandonada, já que o maciço subjacente exhibe ainda características tão modestas que qualquer tratamento dificilmente lograria atingir uma melhoria sensível das características de deformabilidade e de resistência até valores adequados, mesmo recorrendo a métodos não convencionais de tratamento de maciços rochosos.

A solução escolhida contempla uma escavação mais profunda, particularmente na margem direita, destinada a remover uma parte significativa de maciço rochoso muito alterado e descomprimido, deixando como fundação um horizonte cujas propriedades relevantes, em especial nas massas graníticas, deverão ser melhoradas com recurso a tratamento por métodos convencionais. Em favor desta solução contabilizam-se alguns aspectos positivos, como sejam:

- o facto de não terem sido detectadas, em especial nas cotas inferiores do vale, descontinuidades subhorizontais contínuas e de baixa resistência ao deslizamento, cuja presença teria influenciado fortemente a definição das condições de fundação da barragem; refira-se, a propósito, que as famílias de diaclases com atitude menos favorável apresentam inclinações para jusante da ordem de 10° a 12° para o interior da margem direita e de 50° a 60° para o interior da margem esquerda;
- a circunstância de, apesar do intenso tectonismo que afectou a zona da fundação da barragem, mesmo as falhas com expressão cartográfica reconhecidas materializarem apenas zonas onde é mais intensa a fracturação do maciço e/ou ocorrem caixas de material degradado, de espessura centimétrica;
- a geometria da barragem, verificando-se que em grande parte da extensão do seu alinhamento a largura da respectiva fundação tem uma dimensão (entre 40 e 80 m) que lhe permite interessar alternâncias de rochas mais deformáveis e menos resistentes (na zona do eixo propriamente dito) e de rochas de melhores características geotécnicas (migmatitos e micaxistos), estas ocorrendo em boa parte da área de contacto do betão com o maciço rochoso, quer como intercalações das zonas mais fracas, quer de forma mais consistente na direcção do pé da barragem, e que promovem a redistribuição de esforços.

Nestas condições, considerou-se um saneamento de 5 a 6 m de espessura na zona central do vale, de cerca de 7 a 10 m de espessura ao longo da margem esquerda, e de 25 a 30 m de espessura na margem direita, acima da cota (55), que se reduz progressivamente em direcção às cotas mais elevadas, onde a altura da barragem decresce significativamente. Nesta margem, mesmo após a excepcional escavação atrás referida, ocorrerão alinhamentos rochosos predominantemente granitóides, ainda bastante degradados, que deverão ser alvo de sobreescavação e substituição por betão de enchimento. Estima-se que o volume total de terreno a escavar nas margens e no fundo do vale deverá rondar os $200\,000\text{ m}^3$, para além do volume já escavado no início da construção.

4.4 Tratamento da fundação

Apesar da significativa escavação preconizada para a margem direita, o maciço rochoso que constituirá a fundação nas cotas mais elevadas (a partir da cota (60)) situar-se-á na fronteira das zonas geotécnicas ZG2 e ZG3, o que, apesar de se ter procedido ao alargamento da base da barragem visando diminuir os níveis de tensões transmitidas à fundação, implicou considerar um tratamento de consolidação sistemático, visando melhorar as condições de deformabilidade e de resistência do maciço e, conseqüentemente, o comportamento funcional da fundação da barragem. Este tratamento, constituído essencialmente por injeções de caldas de cimento, promoverá uma redução da deformabilidade do terreno (no mínimo, duplicando-se o respectivo módulo de deformabilidade), compatibilizando-se, tanto quanto possível, os módulos de deformabilidade do terreno de fundação e do betão compactado, um aumento da resistência ao corte do maciço rochoso, através do preenchimento das descontinuidades abertas ou com preenchimentos erodíveis e, por último, uma melhoria da estanqueidade na zona de interface barragem / maciço de fundação.

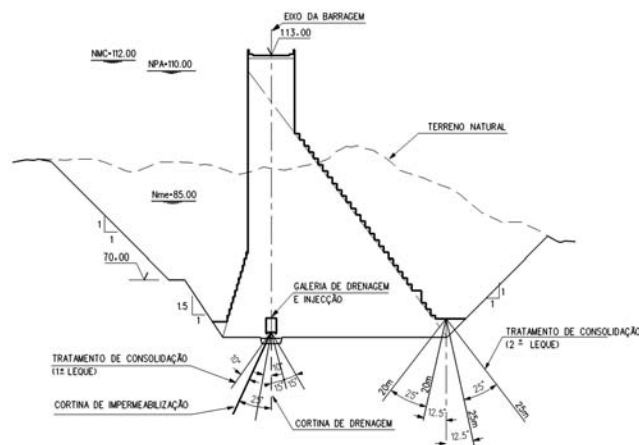


Figura 4 - Perfil 1 - superfície de fundação e tratamento do maciço

Devido às agressivas pendentes preconizadas para os taludes de escavação nas zonas de cotas mais elevadas do eixo da barragem, foi necessário considerar a execução do tratamento de consolidação a partir de duas zonas diferenciadas, conforme indicado na Figura 4: uma primeira, a partir da galeria de injeções situada no corpo da barragem e das galerias de drenagem situadas na margem direita, apresentando 4 furos dispostos em leque inclinando para montante e para jusante, constituindo-se perfis de tratamento espaçados de 4 m, até profundidades médias da ordem de 10 m medidos a partir da superfície de saneamento; uma segunda, a partir do exterior, localizada na zona do pé de jusante da barragem, com a particularidade de possuir 2 furos para montante com 20 m de comprimento, e 2 furos para jusante, com comprimento ligeiramente superior (25 m) devido ao prolongamento neste sentido do bolbo das solicitações compressivas e de corte impostas ao maciço. Além do mais, este segundo leque permite diminuir o risco de deslizamento da fundação da barragem para jusante potenciado pela existência de eventuais cunhas rochosas formadas pela intersecção de vários sistemas de diaclases desfavoráveis.

A eficácia deste tratamento será beneficiada pela intersecção das diversas famílias de diaclases ocorrentes, e conseqüente intercomunicabilidade, que promove um significativo aumento das zonas abrangidas pela injeção de caldas, considerando-se que o comportamento global do maciço de fundação da barragem sofrerá um melhoramento apreciável.

Atendendo a que os ensaios de absorção de água executados no interior dos furos de sondagem mostraram evidências de percolação fácil no maciço até profundidades de algumas dezenas de

metros em ambas as margens, considerou-se um tratamento de impermeabilização recorrendo à execução de uma cortina de injeções de caldas cimentíceas efectuada a partir da galeria incorporada na barragem e, parcialmente, através das galerias de drenagem do maciço da margem direita. Nesta margem e no fundo do vale prevê-se que a cortina de tratamento atinja cerca de 20 a 25 m abaixo da cota de fundação, enquanto na margem esquerda se estimam profundidades de tratamento de 25 a 30 m abaixo da superfície de fundação. A cortina de impermeabilização será materializada por uma fiada de furos cujo espaçamento genérico final, salvo excepções, deverá ser de 4 m.

Há que referir, no entanto, a ocorrência, abaixo da linha de tratamento preconizada, de alguns trechos com grandes absorções, correspondentes a zonas de maciço com diaclases abertas que se considera poderem ser tratadas por acesso gravítico das caldas injectadas nos trechos inferiores dos furos da cortina; as que porventura não forem tratadas ficam já a profundidades significativas sob a barragem, podendo-lhes corresponder alguma percolação, consequência, no entanto, de gradientes pouco importantes.

Foi também prevista a execução de uma cortina de drenagem, não só para se controlar a percolação residual sob a fundação após a execução dos tratamentos de consolidação e de impermeabilização, mas também para se reduzir a eventual instalação de subpressões na base da barragem. Esta cortina será constituída por uma fiada de furos verticais de comprimento um pouco inferior ao dos furos da cortina de impermeabilização e também com afastamento de 4 m entre si.

Atendendo às características do maciço rochoso que servirá de fundação acima da cota (80) na margem direita considerou-se indispensável assegurar uma drenagem mais eficiente do terreno através da execução de 3 galerias de drenagem, duas situadas acima daquela cota e uma terceira próxima da cota (60), aproveitando-se para o efeito a extensão possível das galerias de prospecção que foram entretanto executadas e adaptando-as para o efeito. Essas galerias constituem um importante órgão de segurança da barragem, permitindo o controlo da percolação à medida que se verifica o enchimento da albufeira, a instalação de piezómetros e de outros equipamentos de observação e o eventual reforço do sistema de drenagem, através de furos adicionais executados a partir do seu interior.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INAG e ao Consórcio Mota-Somague-Engil a autorização concedida para a publicação do presente artigo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] COBA, S.A. Plano Geral do aproveitamento da bacia do rio Vouga (1975)
- [2] COBA, S.A. Aproveitamento de Ribeiradio. Estudo Prévio (1995)
- [3] COBA, S.A. Aproveitamento de Ribeiradio. Solução de Referência (1999)
- [4] COBA, S.A. Empreitada de construção da barragem de Ribeiradio e acessos. Projecto Base (2000)
- [5] COBA, S.A. Empreitada de construção da barragem de Ribeiradio e acessos. Projecto (2002)
- [6] Oliveira, R. “Geologia de engenharia e mecânica das rochas. Conceitos fundamentais. Metodologia de estudo de maciços rochosos”, II Simpósio Sul-Americano de Mecânica das Rochas. Brasil (1986)
- [7] Romana, M., “DMR (Dam Mass Rating), a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR”, Int. Symp. on RCC Dams. Madrid (2003)