

GEOTECNIA DO CONTRA-EMBALSE DO APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DO BAIXO SABOR

GEOTECHNICS OF THE FLOOD CONTROL DAM FROM THE BAIXO SABOR HYDROELECTRIC POWERPLANT

Ferreira, Fernando - *Engenheiro Geólogo - Hidrorumo, Projecto e Gestão, SA*
Cotelo Neiva, J. M. - *Geólogo - Consultor da Hidrorumo, Projecto e Gestão, SA*
Lima, Celso - *Engenheiro Civil - Hidrorumo, Projecto e Gestão, SA*

RESUMO

A jusante do Escalão Principal do aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor, prevê-se a construção de uma barragem de contra-embalse, que poderá incluir uma central equipada com grupos reversíveis. A caracterização geológica e geotécnica das fundações das estruturas foi analisada no âmbito do Estudo Prévio e serviu de orientação à definição geral da obra a implantar.

ABSTRACT

A dam with a powerhouse and reversible groups may be built at downstream of the Baixo Sabor hydroelectric powerplant main dam. The geological and geotechnical characterization of the rock mass foundation were carried out and helped to define the conditions to build the dam.

1 - LOCALIZAÇÃO E GEOMORFOLOGIA

Na concepção actual do aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor, empreendimento que a CPPE - Companhia Portuguesa de Electricidade, SA se propõe vir a construir e explorar, está prevista a realização de um contra-embalse localizado a jusante da barragem principal do aproveitamento. O volume armazenado pelo contra-embalse irá possibilitar que a central junto à barragem principal possa funcionar de modo reversível, em turbinamento e em bombagem.

O local situa-se no vale do rio Sabor, a cerca de 500 m a montante da confluência deste com a ribeira da Vilarça (Fig. 1), numa zona onde se faz sentir o efeito do regolfo da albufeira da barragem da Valeira, esta localizada no rio Douro.

No âmbito do Estudo Prévio, elaborado pela Hidrorumo, Projecto e Gestão, SA, foram realizados os estudos e trabalhos de caracterização geológica e geotécnica do local do contra-embalse, onde se projectou a construção de uma barragem com 38 m de altura máxima acima do leito do rio, e se admite vir, também, a construir uma central com funcionamento reversível. Para a central foram estudadas duas concepções distintas, uma com os circuitos hidráulicos em galeria implantados na margem direita, e outra junto ao pé de jusante da barragem, igualmente na margem direita, e com os circuitos hidráulicos atravessando o corpo desta.

Morfologicamente, o local da barragem insere-se num vale largo, de fundo achatado, sendo adequado à construção de uma barragem com perfil gravidade, de betão ou de aterro. No caso presente, foi unicamente considerada a solução de betão, já que uma solução em aterro resultaria de difícil execução e economicamente menos competitiva, não só devido aos níveis de água a montante e a jusante (influência do regolfo da Valeira), mas também em resultado da dificuldade e custo da inserção de uma estrutura de descarga dos caudais de cheia, cuja dimensão transversal é da ordem de grandeza da largura do leito principal do rio.



Figura 1 – Planta de localização geral do aproveitamento.

A montante do local da barragem, os tramos NNE-SSW e WNW-ESE do rio Sabor foram escavados ao longo de prováveis falhas, encontrando-se o local previsto para implantação das obras situado num meandro largo de disposição geral NE-SW, com deposição activa de sedimentos na parte interna, e onde o encaixe do rio foi facilitado pela atitude da xistosidade ENE-WSW, 45°SSE (Fig.2). A jusante do local da barragem, após ter ultrapassado o cavalgamento em formações do Câmbrico ENE-WSW, o traçado do rio Sabor sofreu captura pelo *graben* da Vilarica e inflectiu para NNE-SSW, confluindo no rio Douro próximo da povoação de Foz do Sabor.

No local da barragem, o vale tem abertura média de cerca de 140°. A vertente direita pende 20° do fundo do vale até à cota (130) e 15° desta até à cota (140). A vertente esquerda apresenta-se mais irregular, com pendor de 23° desde o fundo do vale até à cota (130) e 13° até à (140). O corpo da barragem intersecta a estrada EN 325 na margem esquerda (Fig. 2 e 3), à cota (134). O fundo do vale é achatado e corresponde a uma plataforma de 84 m de largura. O ponto mais baixo do *bed-rock* xistente encontra-se junto à margem esquerda, onde se observa um pequeno encaixe do rio à cota (101). O leito de cheia atinge a cota (110) e tem 120 m de largura.

A morfologia plana do fundo do vale fluvial explica-se pela possível remoção dos depósitos detríticos por acção do gelo. Na região existem testemunhos de que, durante os períodos mais importantes das glaciações dos Würm III e Dryas, o glaciário ocuparia a zona vestibular do vale do Sabor e grande parte do *graben* da Vilarica, deixando testemunhos nas acumulações de cascalheiras, arenitos e argilas sobre as arcoses neogénicas do *graben*. No local da barragem, o gelo terá erodido o *bed-rock* xistente e praticamente horizontalizou o fundo do vale. A análise do corte geológico-geotécnico da Fig. 3 permite confirmar a acção recente daquele agente erosivo, testemunhada pela existência de rocha pouco alterada a sã sob a aluvião do leito menor do rio. Apenas sob os sedimentos do leito maior da margem direita se observa maior meteorização do maciço rochoso devido à acentuada variação do nível freático.

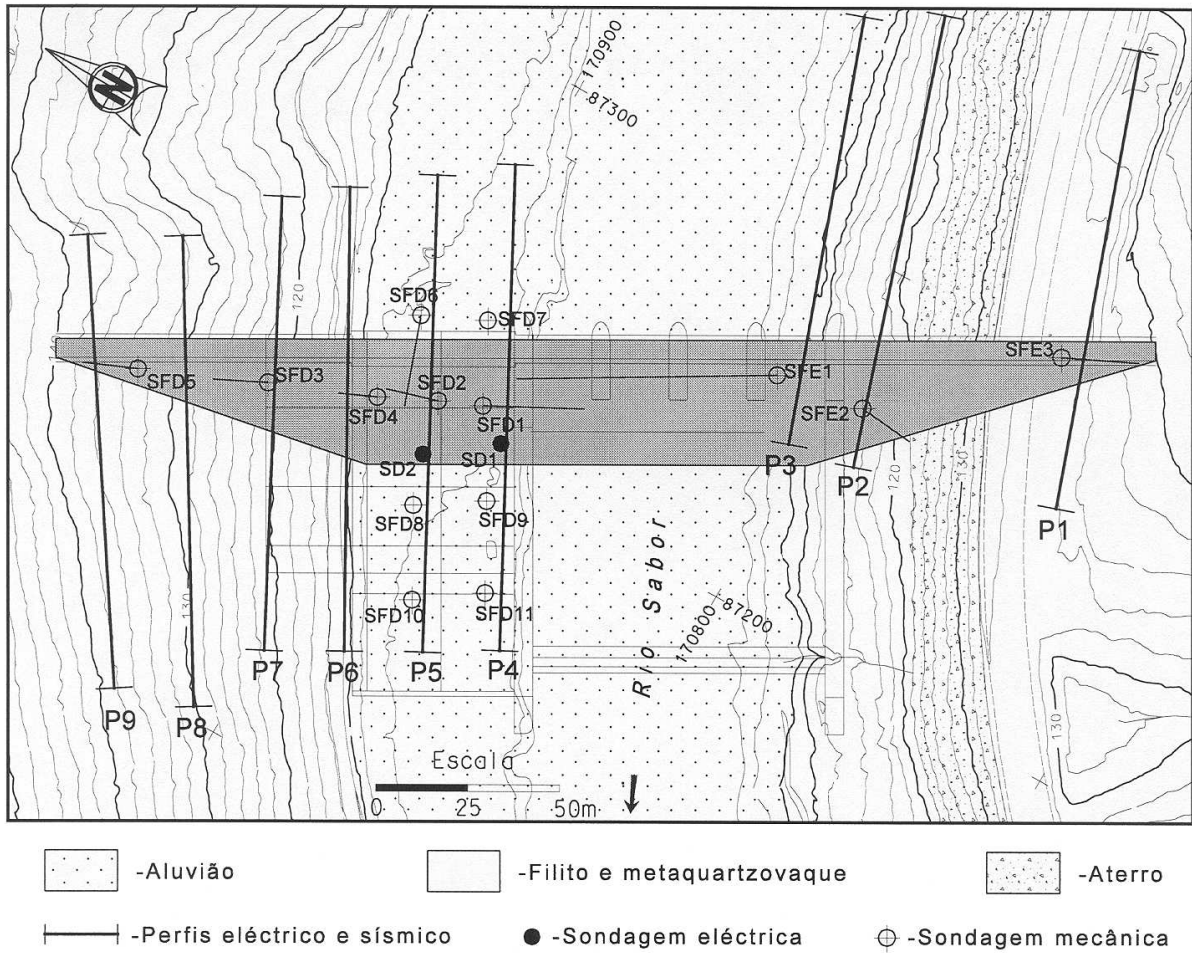


Figura 2 - Geologia e localização dos trabalhos de prospecção.

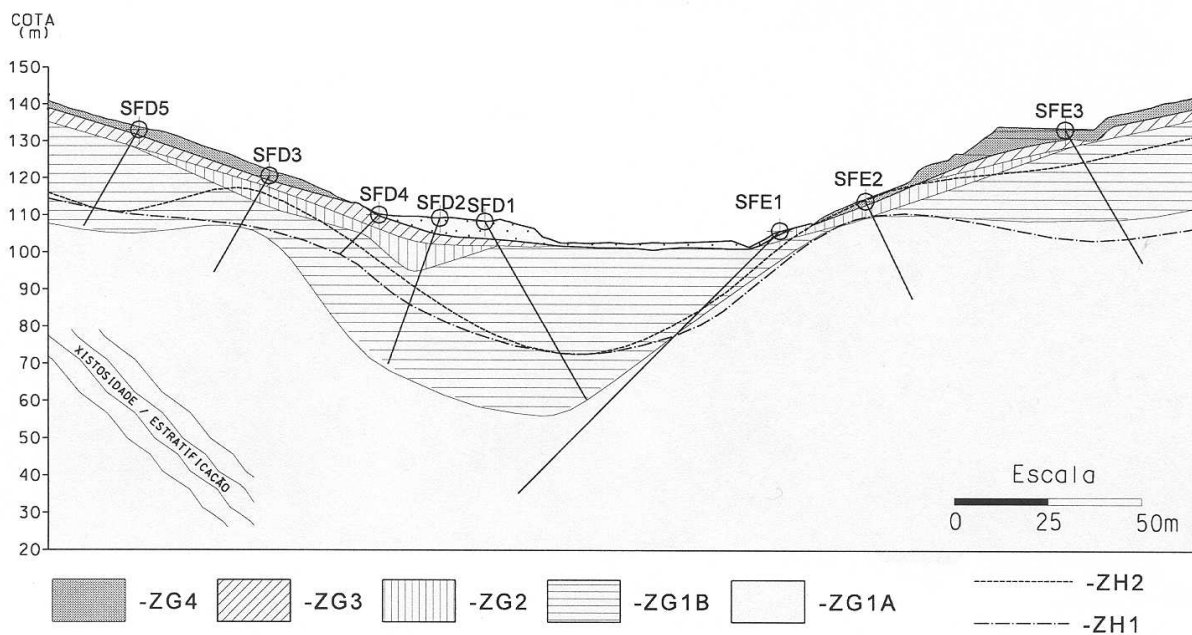


Figura 3 – Corte geológico-geotécnico pela superfície de referência da barragem.

2 – GEOLOGIA

Os depósitos aluvionares (Fig. 2 e 3), que se sobrepõem às rochas xistentas, são constituídos por areias siltosas e lenticulas de calhaus rolados. No seu conjunto têm estrutura lenticular mais ou menos alongada e entrecruzada. Estes depósitos estão bem representados na margem direita e são de fraca expressão na margem esquerda. Na margem direita, a máxima espessura da aluvião é de 5,5 m e corresponde ao leito de cheia. No leito menor, a espessura destes materiais atinge apenas o valor máximo de 2 a 3 m (Fig. 2 e 3). Os depósitos de vertente são pouco espessos e os solos residuais muito pouco representativos.

No local da barragem dominam os filitos, metaquartzozoaques e metaturbiditos, que ocorrem segundo camadas interestratificadas. São rochas mais ou menos grafitosas, com alguma pirite, principalmente os filitos e os metaturbiditos (Fig. 2 e 3). Correspondem a depósitos de tipo *flysh* num geossinclinal e enquadram-se no denominado Complexo Xisto-Grauváquico. Na prática correspondem a sedimentos depositados no Câmbrio, posteriormente modificados por metamorfismo regional pelos movimentos sárdicos e hercínicos e, localmente, por metamorfismo de contacto granítico. Microscopicamente, a rocha é um filito clorítico com biotite, de textura pórfiro-grano-lepidoblástica. A composição mineralógica principal é quartzo+sericite+clorite+biotite, sendo os granoblastos de quartzo, as fâculas de sericite, os lepidoblastos de clorite e biotite e os porfiroblastos de biotite. Como minerais acessórios identificaram-se albite, apatite, magnetite, grafite, zircão e turmalina.

As camadas xistentas estão intensamente dobradas, com as dobras mais pronunciadas quase isoclinais de charneiras ENE-WSW. A xistosidade é bem marcada e de atitude N70°-90°E, 38°-52°SSE. Para além da xistosidade, a compartimentação do maciço rochoso é devida à presença de três famílias principais de diaclases (Quadro 1).

Quadro 1- Principais famílias de diaclases

Famílias	Atitude	Características
J1	N70°-90°E, 38°-52°SSE	paralelas à xistosidade, extensas e pouco rugosas
J2	N5°W-N10°E, 70° W-90°-76°E	extensas, planas a pouco onduladas
J3	N60°-90°W, 40°-70°NNE	pouco extensas e onduladas

3 – SISMICIDADE

O local da barragem insere-se numa região de sismicidade moderada a baixa (Mendes, 1971), com intensidade dos sismos entre os graus IV e V da escala internacional (período 1902-1972). O sismo máximo expectável (SME) foi assumido como tendo epicentro nas falhas activas que originaram o grabben da Vilariça e estimado por via determinística. Com base em critérios essencialmente geométricos e geomorfológicos, estimou-se um comprimento de rotura sísmica superficial dessas falhas da ordem dos 30 km. Com base em modelos de regressão empíricos, que relacionam a magnitude e o comprimento de rotura (Wells e Coppersmith, 1994), estimou-se uma magnitude de 6,8 para o SME. Utilizando a lei de atenuação da aceleração máxima com a distância proposta por Oliveira (1977), obteve-se o valor de 130 cm.s⁻² para a aceleração no local da barragem. O sismo máximo de projecto (SMP) foi considerado como tendo magnitude igual ao SME, enquanto para a determinação do sismo base de projecto (SBP) seguiu-se a via probabilística, tendo-se obtido, para um período de retorno de 1000 anos, valores máximos de 75 a 100 cm.s⁻² para a aceleração (Oliveira, 1977).

4 - TRABALHOS DE PROSPECÇÃO

Após o reconhecimento geológico-estrutural de superfície, efectuado pela HIDRORUMO à escala 1:1000, procedeu-se à realização de uma campanha de prospecção mecânica (Tecnasol-FGE, 1997) e geofísica (LNEC, 1997 e 1998) dos locais previstos para implantação da barragem e da eventual central (Fig. 2).

4.1 - Prospecção mecânica

Efectuaram-se 11 sondagens rotativas, com diâmetro mínimo de 76 mm, tendo-se utilizado amostradores duplos que permitiram a recolha contínua de amostra. As orientações das sondagens foram condicionadas pelas características geológico-estruturais locais e pela necessidade de assegurar que os furos permitiriam a posterior realização de ensaios no seu interior, nomeadamente para caracterização geomecânica do maciço (tomografia sísmica e dilatómetro). No total realizaram-se 451 metros de furação.

A espessura máxima da aluvião reconhecida é de 5,5 m no leito maior do rio, situado na margem direita, e cerca de metade deste valor no leito menor.

A classificação das amostras obtidas permitiu confirmar a pouca representatividade dos solos residuais de cobertura e dos níveis de rocha mais alterada. As zonas de maciço rochosos W_{4-5} e W_3 estão no geral acima de 6 m de profundidade. No que respeita à tectónica local, não foram identificadas falhas com expressão significativa no local da barragem.

Os níveis piezométricos foram determinados no início de cada dia de trabalho. Genericamente, verificou-se que havia concordância entre a cota piezométrica na aluvião da margem direita e a cota do nível de água do rio. No interior dos furos de sondagem foram realizados 75 ensaios de injeção de água do tipo Lugeon, em troços consecutivos de 5 m. Utilizaram-se obturadores pneumáticos simples, que permitiram mobilizar as seguintes pressões de injeção: 0,25-0,5-1,0-0,5-0,25 MPa.

4.2 - Prospecção geofísica

Numa primeira fase, que antecedeu a realização da prospecção mecânica, foram elaborados seis perfis geoelectricos de que resultou uma carta de resistividades eléctricas aparentes da margem direita. Complementarmente, foram efectuadas duas sondagens eléctricas (Fig. 2). Da análise global da informação geoelectrica, reconhece-se que existe franco contraste entre a aluvião e os filitos; há relativa irregularidade das rochas xistentas mais alteradas e a provável inexistência de estruturas tectónicas importantes. Os perfis geoelectricos da margem direita indicaram uma espessura de 7 a 8,5 m para a aluvião do leito maior do rio.

Segundo os alinhamentos geoelectricos, foram realizados 6 perfis sísmicos de refração na margem direita e 3 na margem esquerda (Fig. 2), que permitiram estimar cerca de 7m para a espessura máxima da aluvião.

A espessura da aluvião obtida por meios geofísicos foi superior à efectivamente reconhecida pelas sondagens mecânicas, justificando-se tal situação com a provável similitude de resposta geofísica entre a aluvião saturada e o horizonte mais alterado/fracturado do maciço xistente que lhe é subjacente, no leito maior da margem direita.

Na sequência da conclusão dos trabalhos de prospecção mecânica, foram efectuados 6 leques sísmicos entre furos e 8 leques entre furos e a superfície. A tomografia sísmica obtida permitiu o zonamento do maciço em termos de velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais (V_L), conduzindo à definição de zonas bem distintas na margem direita, em oposição à variabilidade de valores obtidos no fundo do vale e margem esquerda.

Numa análise comparativa entre a geometria dos limites entre os diferentes graus de alteração e fracturação do maciço rochoso, obtidos através da classificação das amostras de sondagem, e as profundidades dos distintos horizontes sísmicos, verifica-se que existe alguma discrepância. Na margem direita, a definição do substrato sísmico $3200 < V_L < 4600$ m/s ultrapassa um a dois metros a zona de W_2, F_{2-4} . Já sob a aluvião do leito maior desta margem coincide com a transição de maciço

W₃, F₃₋₅ para W₂, F₂₋₄. Por sua vez, na margem esquerda, ocupa a metade superior da zona W₂, F₂₋₄, enquanto às cotas mais altas desce 3m abaixo do limite entre as zonas de W₃, F₃₋₅ e W₁₋₂, F₁₋₃.

Por reflexão sísmica obtiveram-se 13 perfis sísmicos interpretativos entre o local da barragem e a foz do rio Sabor. A sua principal finalidade foi o conhecimento, em profundidade, da geometria do leito do rio e da disposição dos depósitos fluviais. Esses perfis permitiram reconhecer a presença de possíveis estruturas geológicas que atravessam, indiferenciadamente, o *bed-rock* e os sedimentos que preenchem a fossa tectónica, nomeadamente na sua margem esquerda.

O interesse do reconhecimento geológico do leito do rio Sabor deve-se à possibilidade do contra-embalse vir a ser equipado com uma central hidroeléctrica, para a qual haverá necessidade de rebaixar o leito do rio, a jusante da restituição, para próximo da cota (100). O canal que resultar desse rebaixamento será efectuado à custa da dragagem e/ou desmonte de parte do leito do rio Sabor cuja maior ou menor dificuldade de operação depende sobremaneira da natureza das formações geológicas interessadas. Por questões de natureza ambiental, o canal será escavado na zona central do rio e com geometria transversal que minimize o mais possível os impactes ambientais induzidos nas margens.

Prevê-se que o rebaixamento se desenvolva até próximo da foz do Sabor e que os materiais a remover tenham espessura entre 1,5 e 4 m. Estima-se um volume de 480000 m³ de escavação, dos quais 75 a 80% poderão ser escavados por dragagem, pois os depósitos sedimentares são constituídos por areias, siltes, argilas, cascalheiras, arenitos e arcoses que assentam sobre o Complexo Xisto-Grauváquico e formações graníticas.

5 - ZONAMENTO GEOMECÂNICO DO MACIÇO XISTENTO

A análise das condições geológicas locais, a classificação das amostras de sondagens, nomeadamente quanto aos estados de alteração e fracturação e RQD que as rochas apresentam, e as variações de velocidade das ondas sísmicas longitudinais (V_L) com a profundidade permitiram estabelecer quatro zonas geomecânicas no maciço xistento (Fig.3), sintetizadas no Quadro 3 e na Fig. 3.

Quadro 3 - Zonamento geomecânico do maciço xistento

ZONA		Alteração (ISRM)	Fracturação (ISRM)	RQD (%)	V _L (m.s ⁻¹)
ZG4		W ₄₋₅	F ₄₋₅	< 20	950-1300
ZG3		W ₃	F ₃ a F ₅	20-60	1300-1800
ZG2		W ₂	F ₂ a F ₄	60-90	2200-3800
ZG1	ZG1B	W ₁₋₂	F ₁ a F ₃	> 90	> 4000
	ZG1A	W ₁	F ₁ a F ₃		

A zona ZG3 encontra-se sob a zona ZG4 e na margem direita desce sob o leito maior até à cota (102), não excedendo 5 m de espessura. Na margem esquerda desce até à cota (120) e não ultrapassa 4 m de possança. A zona ZG2 ocorre na margem direita com espessura até 7 m, enquanto na margem esquerda, com geometria lenticular, não excede 5 m. A zona ZG1 ocorre, regra geral, sob as zonas ZG3 e ZG2, enquanto no fundo do vale se encontra sob a aluvião do leito menor.

A parametrização geotécnica de cada uma das zonas geomecânicas do Quadro 2 será conseguida mediante a realização de diversos ensaios *in situ* e de laboratório que permitam caracterizar convenientemente o modelo de comportamento do maciço quando solicitado em fase de serviço. Para o efeito, serão efectuados ensaios com dilatómetro no interior dos furos, para avaliação da deformabilidade de volumes representativos de maciço rochoso, e ensaios de laboratório que permitam a determinação das propriedades índice, a deformabilidade e a resistência mecânica característica dos

diferentes estados de alteração do material rochoso (à data da elaboração da presente comunicação, os resultados destes ensaios estão em fase de publicação pelo LNEC).

6 - ZONAMENTO HIDRÁULICO DO MACIÇO XISTENTO

Os pouco espessos solos residuais e os depósitos de vertente e aluvionares têm permeabilidade intergranular, típica dos meios porosos. As rochas xistentas das vertentes e fundo do vale têm permeabilidade fissural que, naturalmente, diminui com o fecho das fracturas em profundidade. Na zonas de maciço mais descomprimido e alterado (W_{4-5} , F_{4-5}), a permeabilidade fissural quase equivale à permeabilidade intergranular. Contudo, a argilificação das rochas e o conseqüente preenchimento das descontinuidades por argila íltica pode contribuir significativamente para a menor permeabilidade das zonas mais superficiais do maciço.

Os resultados obtidos com os ensaios de injeção de água encontram-se sintetizados no Quadro 3 e permitiram concluir que:

- a) Na margem esquerda (SFE2 e SFE3, fazendo com a estratificação ângulos de 15° - 20°), dominam os casos de absorção nula (42%) e de fracturas pouco abertas (33%). Os casos de aumento de secção apenas têm significado até cerca dos 10 m e devem estar relacionados com a abertura das fracturas por acção da pressão de injeção. Em profundidade, o maciço torna-se naturalmente mais fechado e compacto, conforme se depreende das frequentes situações de absorção nula.
- b) No fundo do vale, observa-se que em profundidade as fracturas são pouco abertas e de fácil tendência para a colmatagem durante o ensaio (38%). Cerca de 17% dos casos respeitam àqueles onde a injeção de água se deu essencialmente por fracturas sujeitas a lavagem/abertura com o incremento da pressão de ensaio.

A alternância verificada ao longo do furo SFE1 entre os casos característicos do aumento de secção, intermédio, laminar e diminuição de secção reflectirá a perpendicularidade deste com a xistosidade/estratificação. Nos níveis mais elevados, onde a cobertura de maciço rochoso ainda permite a abertura das fracturas com o incremento da pressão de ensaio, observou-se predominância do aumento da secção de escoamento.

O facto da sondagem SFD1 intersectar a xistosidade/estratificação segundo ângulo de 20° , facilitando a abertura lateral das fracturas mais próximas da parede do furo, justifica a predominância do regime turbulento e do aumento da secção de escoamento.

- c) Na margem direita, a representatividade dos casos de percolação segundo fracturas pouco abertas, colmatagem e absorção nula é da ordem dos 30%. Semelhante percentagem é obtida para o somatório dos casos de aumento de secção (23%), de fendas limpas (6%) e dos que não atingiram a pressão máxima (3%). Os regimes de escoamento entre laminar e turbulento assumem alguma relevância (23%).

A apreciável dispersão dos resultados obtidos dever-se-á à diversa orientação das sondagens e à reduzida profundidade atingida com os furos, não sendo possível uma avaliação global das características hidráulicas do maciço rochoso.

O maciço rochoso de fundação da barragem foi zonado em termos de permeabilidade de acordo com o indicado no Quadro 4 e na Fig. 3.

A curva de 4 UL ocorre a maior profundidade na margem esquerda e fundo do vale do que na margem direita. Nesta última margem, apresenta-se a profundidades que variam entre 4 e 12 m. No fundo do vale, a curva é achatada e situa-se próximo da cota (79). Na margem esquerda, a curva tem profundidade que oscila entre 9 e 19 m. A curva de 2 UL apresenta, face à curva anterior, alguma irregularidade. Na margem direita ocorre com profundidade entre 17 e 24 m. No fundo do vale pode

atingir profundidades da ordem dos 35 m, enquanto na margem esquerda a profundidade varia entre 21 e 30 m.

Quadro 3 - Regime de escoamento e tendência das fracturas

Regime de escoamento e tendência das fracturas	% de casos registados			
	Total	M. Direita	Fundo do vale	M. Esquerda
Absorção nula	11	9	—	42
Absorção total	2	3	—	
Laminar	18	9	24	33
Intermédio	17	23	17	—
Turbulento	9	6	17	—
Abertura da secção de escoamento	20	23	17	17
Diminuição da secção de escoamento	11	12	14	—
Ensaio anómalo	12	15	11	8

Quadro 4 - Zonamento hidráulico da fundação da barragem

Zona	Permeabilidade (UL)	% de ensaios característicos			
		Total	M. Direita	Leito do rio	M. Esquerda
ZH3	> 4	22	34	5	8
ZH2	2 a 4	30	34	11	42
ZH1	< 2	48	32	84	50

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos de reconhecimento geológico e de caracterização geotécnica, realizados no âmbito do aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor, foram conduzidos no sentido de validar a viabilidade de construção da barragem e de qualquer uma das soluções de central analisadas.

De acordo com as condições geomecânicas observadas, para fundação de uma barragem gravidade será suficiente mobilizar o maciço existente são a pouco alterado (W_1 a W_2). Para o efeito será adequado que as cotas de escavação interessem o topo da zona geotécnica ZG2. Não se prevê que seja necessário recorrer a um extensivo tratamento de consolidação, entendendo-se apenas necessário proceder a injeções de ligação/consolidação nos níveis mais superficiais do maciço rochoso e na zona de contacto betão/rocha. De acordo com a informação disponível, os furos da cortina de estanqueidade deverão ultrapassar a curva de 2 UL (ZH1) e ser orientados em função da atitude média das principais famílias de discontinuidades que compartimentam o maciço.

Tendo em consideração que as cotas de fundação da central de pé de barragem interessarão, essencialmente, a zona ZG2 e ZG1, não se prevê a ocorrência de condicionantes de ordem geotécnica à implantação da central.

Na solução de central em poço, prevê-se que a tomada de água e parte da restituição envolva a realização de escavações a céu aberto com taludes que podem atingir alturas da ordem dos 35 m. A galeria do circuito hidráulico, com 250 m de comprimento máximo, interessará predominantemente maciço são a pouco alterado (ZG1 a ZG2), enquanto a escavação do poço da central, com 5 m de diâmetro e 50 m de profundidade máxima, interessará, de acordo com os resultados da prospecção geofísica, uma espessura de cerca de 10 m de maciço rochoso com pior qualidade geomecânica.

BIBLIOGRAFIA

Hidrorumo (1998) - Estudo Prévio do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor. Porto.

LNEC (1998) - Prospecção sísmica complementar no local do Contra-Embalse (Feiticeiro) do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (relatório 165/98 – NP). Lisboa.

LNEC (1997) - Prospecção geofísica no local do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (relatório 204/97–NP). Lisboa.

LNEC (1997) - Prospecção geofísica por reflexão sísmica no Rio Sabor (relatório 207/97–NP). Lisboa.

Mendes, A. S. (1971) - Seismic zoning map of Portugal. XII Assemblé Generale de la Commission Seismologique Européene. Luxembourg.

Oliveira, C.S. (1986) - A sismicidade histórica e a revisão do Catálogo Sísmico. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Oliveira, C.S.(1977) - Sismologia, sismicidade e risco sísmico. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Serviços Geológicos de Portugal (1995) - Carta neotectónica de Portugal.

Serviços Geológicos de Portugal. (1989) - Carta geológica de Portugal; Folha 11-C (Torre de Moncorvo).

TECNASOL-FGE (1997) - Relatório da prospecção geológico-geotécnica no local do Contra-Embalse. Venda Nova.

Wells, D. L. e Coppersmith, K. J. (1994) - New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area and surface displacement. Seis. Soc. Am. Bull.