

A EXTENSÃO DOS ESTUDOS GEOTÉCNICOS PARA FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE TERRA DO EMPREENDIMENTO DE FINS MÚLTIPLOS DO ALQUEVA (EFMA)

THE EXTENSION OF GEOTECHNICAL STUDIES FOR THE FOUNDATIONS OF EARTH DAMS OF THE MULTIPORPOSE ALQUEVA PROJECT (EFMA)

Rodrigues-Carvalho, J. A.; *Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, rc@fct.unl.pt*
Carvalho, Alexandra Braga de; *Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva (EDIA), Beja, Portugal, acarvalho@edia.pt*

RESUMO

No presente artigo abordam-se os trabalhos de prospeção para o estudo dos terrenos de fundação de nove das novas barragens de terra que integram o Empreendimento de Fins Múltiplos do Alqueva (EFMA) construídas entre 2005 e 2012. São apresentados sumariamente as características geotécnicas de cada sítio, os custos dos estudos, as quantidades de trabalho relativas aos métodos de prospeção e ensaio utilizados e aborda-se a relação custo dos estudos/custo da construção. Tecem-se ainda algumas considerações com base em comparação dos resultados obtidos com informação de idêntica natureza obtida para outros projetos do mesmo tipo.

ABSTRACT

This paper deals with the geotechnical site investigation carried out for the study of the foundations of nine of the new earth dams that integrate the Multipurpose Alqueva Project (EFMA) constructed during the period 2005 - 2012. The authors present a summary of the geotechnical conditions at each site, the costs of the studies as well as the amounts of the exploration works and tests performed and give attention to the ratio cost of studies/cost of construction. Some considerations are also drawn to the comparison of the results with similar information obtained for other projects of same type.

1 - O EMPREENDIMENTO DE FINS MÚLTIPLOS DA ALQUEVA

A EDIA - Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva, S.A. foi constituída em 1995 (Dec.- Lei 32/95), sucedendo à Comissão Instaladora da Empresa do Alqueva criada em 1993.

A sua missão é conceber, executar, construir e explorar o Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA), contribuindo para a promoção do desenvolvimento económico e social da sua área de intervenção, a que correspondem 20 concelhos dos distritos de Beja, Évora, Portalegre e Setúbal.

O Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva traça os caminhos para a água: caminhos que seguem para o abastecimento público, com o reforço a 5 barragens que abastecem cerca de 200 000 habitantes, para a agricultura, com uma área equipada de regadio de cerca de 120 000 hectares, para a indústria, para produção de energia limpa e para o turismo.

Este empreendimento tem como origem de água a barragem do Alqueva, que deu origem ao maior lago artificial da Europa. As obras iniciaram-se em 1976 (ensecadeiras e túnel de desvio) mas viriam a ser interrompidas em 1978 seguindo-se um longo período de novos estudos, até que em 1993 foi decidido retomar a construção. O primeiro enchimento da Albufeira do Alqueva iniciou-se em 8 de fevereiro de 2002, tendo atingido o pleno armazenamento em 12 de janeiro de 2010. Nesta barragem estão instaladas duas centrais hidrelétricas equipadas com 520 Mw.

Entre as novas obras que integram o EFMA, contam-se 68 Barragens/Reservatórios de regularização nas quais se incluem a barragem de Alqueva e a barragem de Pedrógão, uma rede primária de adução composta por canais, tuneis e condutas com 380 Km, 5 centrais minihídricas, 15 Estações Elevatórias principais e 37 Estações Elevatórias secundárias, 1577 km de redes secundárias (condutas enterradas).

Desde 1995, ano de constituição da EDIA, e até ao final de 2012, os investimentos atingiram já 2.300 Milhões de Euros.

2 - OS PROJETOS ESTUDADOS

Foram compulsados os estudos geotécnicos bem como os projetos de nove das 15 novas barragens que integram o EFMA, a saber: Álamos I, Álamos II, Álamos III, Loureiro, Penedrão, Pisão, Amoreira, Brinches e São Pedro. Todos estes projectos dizem respeito a barragens de terra cujas fundações assentam em maciços rochosos.

Investigaram-se os aspetos relativos aos trabalhos de prospeção e ensaios *in situ* e em laboratório por forma a verificar os métodos utilizados e os seus custos, tendo-se obtido ainda o custo previsto para a construção da obra. Os trabalhos de prospeção e ensaios realizados para avaliar a quantidade e qualidade dos materiais de construção situam-se fora do âmbito do presente estudo e, por isso, não foram aqui considerados.

No Quadro 1 indicam-se os projetos objeto de estudo bem como as suas características principais.

Como pode verificar-se todos os projetos se enquadram no grupo das grandes barragens segundo os critérios da Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD).

Quadro 1 - Principais características dos projetos estudados

Barragem	Local	Altura (m)	Coroam. (m)	Volume da barragem ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	Volume armazen. (hm^3)	Área da albuf. (ha)	Data Estudo Geotéc.	Data do Projeto	Fim da Constr.
Álamos I	Rib ^a das Veladas, Mte Trigo, Portel	35	234	277	17,6 (3)	200 (4)	1980 + 2000	2000	2005
Álamos II	Afl. Rib ^a das Veladas, Mte Trigo, Portel	40	295 (1)	392	17,6 (3)	200 (4)	1980 + 2000	2000	2005
Álamos III	Rib ^a da Espinheira, Mte Trigo, Portel	36,5	259	274	17,6 (3)	200 (4)	2000	2000	2005
Loureiro	Rib ^a do Loureiro, Mte Trigo, Portel	30	1.175	343	6,98	91,9	1999 + 2000	2000	2005
Penedrão	Rib ^a de Canhestros, Ervideira, F ^a Alentejo	26	385	320	5,2	88	2006	2007	2010
Pisão	Rib ^o de Pisão, Beringel, Beja	15	454	144	8,23	202	1998 + 1999	2003	2007
Amoreira	Rib ^a de Amoreira, Pias, Serpa	26	792	570	9,0	173	2004	2005	2009
Brinches	Rib ^a de Pias, Brinches, Serpa	34	550 (2)	513,4	10,9	141	2004	2006	2009
S. Pedro	Rib ^a de São Pedro, Beja	24,1	733	400	10,8	183	2007	2008	2012

(1) O projeto de Álamos II englobou o fecho de uma portela na margem direita com altura máxima de 17 m e coroamento de 108 m. Os respetivos custos encontram-se incluídos nos custos da barragem.
(2) O Projeto de Brinches englobou o fecho de uma portela na margem direita, com altura máxima de 5 m e comprimento de 425 m.
(3), (4) Álamos I, Álamos II, e Álamos III criam uma única albufeira. Só Álamos II dispõe de descarregador.

3 - CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS SUMÁRIAS

Apresenta-se em seguida, de modo muito sumário, uma resenha do dispositivo geotécnico de cada um dos locais de construção das barragens estudadas.

3.1 - Álamos I

LITOLOGIA: filádios acinzentados, ou acastanhados por alteração, do Complexo Cristalofílico. Cobertura de solos de alteração inferior a 20 cm. Aluviões silto-argilosas no fundo do vale, com largura entre 15 m junto ao eixo e 50 m, e espessura estimada de 2-3 m. Depósitos de vertente de pequena expressão, a montante do eixo, na margem direita, com espessura até 2 m.

ALTERAÇÃO: o maciço de fundação muito alterado até profundidades de 8,5 a 14 m, correspondendo as maiores profundidades à margem direita e à zona de uma falha que foi identificada no local, junto ao centro do vale.

ESTRUTURA: fraturas próximas a muito próximas até grande profundidades, podendo ultrapassar 36 m. Os filádios encontram-se fortemente dobrados, ocorrendo duas famílias principais de descontinuidades, uma delas coincidente com a xistosidade.

PERMEABILIDADE: o limite do maciço pouco permeável, cujos resultados dos ensaios de absorção de água foram, em geral inferiores a 3 Unidades Lugeon (U. L.), ocorre a profundidades da ordem dos 5 m no centro do vale e de 8 a 5 m nas margens.

3.2 - Álamos II

LITOLOGIA: filádios acinzentados a esverdeados passando a acastanhados e avermelhados quando alterados, do Complexo Cristalofílico. Maciço parcialmente recoberto por solos de alteração cuja espessura não ultrapassa 0,20 m.

ALTERAÇÃO: maciço muito alterado até profundidades de 10 m a 22 m, correspondendo as maiores profundidades à margem esquerda.

ESTRUTURA: o maciço encontra-se muito dobrado e diaclasado em profundidade, ocorrendo duas famílias principais de descontinuidades. É cortado por alguns filões de espessura menor que 20 cm e massas de quartzo, muitas vezes dobrado e fragmentado

PERMEABILIDADE: o maciço pouco permeável, com absorções em geral inferiores a 3 U. L., ocorre a partir de profundidades de cerca de 10 m na margem direita e 5 a 10 m na margem esquerda.

3.3 - Álamos III

LITOLOGIA: dominam xistos sericíticos de baixo grau de metamorfismo (Câmbrico?), com veios de quartzo. Cobertura de terra vegetal, solos residuais e, por vezes, depósitos de vertente, com espessura menor que 0,80-0,90 m. Na ribeira ocorrem aluviões argilo-siltosas com fragmentos de xisto e quartzo.

ALTERAÇÃO: maciço decomposto até profundidades que podem atingir 1,5 m (margem direita) e 7,5 m (margem esquerda). Subjacentemente ocorre maciço medianamente alterado a muito alterado até profundidades entre 5 m (leito da ribeira) e 21 m (margem esquerda).

ESTRUTURA: maciço bastante diaclasado, com fracturas oscilando de próximas a muito próximas até profundidades entre 5 m (leito da ribeira) e 21 m (margem esquerda) sendo medianamente afastadas em algumas zonas.

PERMEABILIDADE: absorções inferiores a 3 U. L. encontra-se a profundidades de cerca de 10 m na margem direita, e 10 a 5 m na esquerda. A profundidades da ordem dos 8 m no centro do vale e de 10 a 8 m nas margens as absorções foram inferiores a 1 U. L..

3.4 - Loureiro

LITOLOGIA: no local da barragem bem como na área da albufeira ocorrem micaxistos muito metamorfizados, com intercalações de quartzo de exsudação. No fundo do vale, que tem apresenta larguras de cerca de 2 m e 10 m respetivamente, para o leito menor e leito maior, ocorrem depósitos colúvio-aluvionares areno-siltosos ou silto-arenosos, com espessura máxima de 1,5 m.

ALTERAÇÃO: na margem direita o micaxisto apresenta-se pouco alterado enquanto na margem esquerda ocorre medianamente alterado a muito alterado e, por vezes, descomprimido. No fundo do vale o estado de alteração é idêntico até profundidade da ordem de 4 m.

ESTRUTURA: na margem direita o micaxisto apresenta fraturas próximas. Na margem esquerda, fraturas medianamente afastadas. Reconheceram-se, no maciço, cinco famílias de diaclases não se notando diferenças de atitudes entre as margens. Não foram identificados acidentes tectónicos com importância.

PERMEABILIDADE: a profundidade com absorções superiores a 3 U. L. é de 5 a 15 m no fundo do vale e encostas. A partir de 20 m de profundidade os ensaios forneceram valores da ordem de 1 a 2 U.L..

3.5 - Penedrão

LITOLOGIA: xistos grauvacóides devónicos exceto numa zona do encontro esquerdo onde ocorrem conglomerados miocénicos de matriz areno-siltosa, outros areno-siltosos com clastos de quartzo e xistentos. As duas formações contactam por falha. Vale com preenchimento aluvionar de espessura até 0,30 m, ocorrendo também um terraço aluvionar na margem esquerda, com idêntica espessura.

ALTERAÇÃO: o horizonte de terra vegetal não ultrapassa 0,30 m nos xistos e nos depósitos miocénicos. Maciço xistento muito alterado e decomposto até 3 m de profundidade, medianamente alterado e muito fracturado, até cerca de 15 m, e pouco alterado abaixo desta profundidade.

ESTRUTURA: falha subvertical, caixa de 2 m de xisto esmagado, rejeito vertical superior a 20 m com os xistos cavalgando a brecha. O xisto é decomposto 50-60 m para cada lado, originando argila arenosa cinzenta, e passagens areno-argilosas, por vezes seixo e calhau quartzoso. Xistosidade subvertical subparalela à falha, na margem direita. Fracturação irregular, moderada e, localmente, intensa.

PERMEABILIDADE: nos materiais terciários foram registadas absorções da ordem de 1 U. L. ou inferiores. Nos xistos, os ensaios Lefranc conduziram a valores de k entre 10^{-4} e 4×10^{-4} cm.s⁻¹, equivalentes a uma areia média a grossa. Os ensaios tipo Lugeon apresentaram absorções não superiores a 1 U. L..

3.6 - Pisão

LITOLOGIA: metavulcanitos básicos e gabros (gabros de Beja), estes na zona da albufeira. No fundo do vale ocorre aluvião argilo-siltoso e argilo-arenoso, com espessura máxima de 3,5 m. Eluvião de matriz argilosa e espessura até 4 m na margem esquerda, 1 a 2 m sob o depósito aluvionar, e 4 a 6 m na margem direita.

ALTERAÇÃO: as sondagens revelaram maciço muito alterado a decomposto com percentagens de recuperação muito frequentemente inferiores a 50% e, através delas, a litologia mal se identifica até à profundidade de perto de 30 m. O substrato apresenta-se fortemente argilificado e ferruginizado. Na margem direita a profundidade de alteração é superior à da margem esquerda.

ESTRUTURA: a zona é de uma tectónica complexa, muito afetada pela falha ativa da Messejana que atravessa o local e condiciona as características geotécnicas do maciço. Detetadas duas famílias principais de fraturas, que se apresentam próximas a muito próximas. Dificuldades na execução das sondagens devidas à alteração e brechificação do maciço.

PERMEABILIDADE: identificadas 4 nascentes na área da albufeira. Ensaio tipo Lugeon de difícil execução e interpretação devido às condições do maciço. As absorções foram, em regra, menores do que 3 U. L., raramente excedendo 10 U. L.. Pouca variação do maciço em termos de comportamento hidráulico.

3.7 - Amoreira

LITOLOGIA: depósitos mais ou menos consolidados de conglomerados, arenitos, siltitos e níveis argilosos, miocénicos, espessura de 15 m na margem direita e 10 m na esquerda, sobre substrato granítico que aflora, localmente, na margem esquerda. Vale de vertentes suaves, fundo aplanado com 200 m de largura, preenchido por aluvião quaternária e recente, com espessura inferior a 2 m.

ALTERAÇÃO: fundação da barragem sobre as aluviões recentes e quaternárias no fundo do vale e sobre os depósitos miocénicos nas encostas. Substrato granítico decomposto, passando a medianamente alterado e são em profundidade.

ESTRUTURA: após ultrapassar em profundidade a zona de granito decomposto, o maciço apresenta raras fraturas e, por vezes, indícios de falhamento considerados irrelevantes. A rede de fracturação é muito aberta, chegando a exibir afastamentos entre fraturas superiores a 2 m.

PERMEABILIDADE: toalha freática nas aluviões do fundo do vale enquanto nas vertentes se situava nos depósitos miocénicos, não se tendo detetado no maciço granítico. Resultados dos ensaios Lefranc, na aluvião do fundo do vale e nos sedimentos miocénicos das vertentes inferiores a $6,6 \times 10^{-7}$ m.s⁻¹. No substrato granítico, os ensaios tipo Lugeon deram absorções nulas em todos os horizontes de alteração.

3.8 - Brinches

LITOLOGIA: granito calco-alcálico (granito de Pias), leptinitos e, localmente, granitos orientados ou gnaisses, na margem esquerda. Na direita, formação argilo-carbonatada, paleogénica e brecha calco-silicatada, de cobertura, de expressão cartográfica reduzida. Aluviões e coluviões não ultrapassando 2,5 m mesmo na ribeira. Solo residual com 9-11 m no topo da margem direita e 1,5-2 m na restante área.

ALTERAÇÃO: maciço muito alterado na margem direita, sendo medianamente alterado a 21 m de profundidade às cotas mais elevadas e a partir de 9-10 m a cotas intermédias. Na esquerda ocorre medianamente alterado a 6 m de profundidade às cotas mais elevadas e a 3 m a cotas intermédias.

ESTRUTURA: falhas da Vidigueira e de Beja-Brinches a 5 km e 3 km de distância do local mas a zona do eixo da barragem não é intersectado por acidentes tectónicos com expressão cartográfica. Identificadas 4 famílias de diaclases nas duas margens. Fraturas próximas a muito próximas nos afloramentos existentes.

PERMEABILIDADE: níveis de água a cerca de 1,5 m de profundidade, junto à linha de água. Os ensaios Lefranc forneceram resultados muito variáveis, entre $1,09^{-7}$ m.s⁻¹ e $1,37^{-5}$ m.s⁻¹, com valores frequentes de 2 a 6×10^{-6} m.s⁻¹. Ensaio tipo Lugeon em geral com absorções nulas após os 17 m de profundidade.

3.9 - S. Pedro

LITOLOGIA: local de estrangulamento do vale, com largura de 21 m. Na margem esquerda, fundo do vale e cotas inferiores da margem direita ocorrem dioritos e quartzo-dioritos. A cotas superiores da margem direita, metavulcanitos básicos. Aluviões areno-argilosas com espessura de 1,5 m no leito maior. No leito menor, areia, seixos e calhaus. Nas vertentes, solos residuais com 0,5 a 3 m de espessura.

ALTERAÇÃO: nas cotas inferiores da margem direita o quartzo-diorito apresenta-se pouco alterado e medianamente alterado. Na margem esquerda, os solos de cobertura coluvionares são dominantes, contendo frequentes calhaus. O substrato aflora em maior extensão, a montante e jusante do eixo e o grau de alteração que exhibe é equivalente ou superior ao observado na margem direita.

ESTRUTURA: a zona da obra com importante rede de falhas que por vezes limitam unidades geológicas tal como na parte superior da margem direita, ou condicionaram linhas de água como o troço retilíneo da Rib.^a de S. Pedro. Na margem direita 4 famílias de fraturas medianamente afastadas ou próximas. Na esquerda são medianamente afastadas ou próximas a muito próximas, ocorrendo mais duas famílias.

PERMEABILIDADE: subjacente ao material aluvionar e coluvionar e numa espessura de maciço que varia entre 7 m na margem direita, 5-6 m no fundo do vale e 2,5 m na margem esquerda, as absorções foram da ordem dos 12-17 U.L.. Inferiormente, absorções em regra muito baixas, inferiores a 1 U. L..

4 - TRABALHOS DE PROSPEÇÃO E ENSAIOS REALIZADOS

O estudo conduzido permite concluir, à partida, que os tipos de trabalhos de prospeção e ensaios realizados para o estudo das fundações destas nove barragens se compaginam com o que é corrente realizar para obras deste tipo em Portugal.

Em todos os casos foram realizados perfis sísmicos de refração e em 30% dos locais foram, ainda, executadas cartas de resistividade elétrica aparente.

A utilização de valas e de poços de prospeção para o estudo das condições de subsuperfície verificou-se em cerca de 45% e de 78% das situações respetivamente. Os dois métodos foram usados conjuntamente em cerca de 45% dos sítios.

Os ensaios *in situ* seguiram o que é usual. Em todos os estudos de sítios em apreço foram realizados ensaios de absorção de água tipo Lugeon, mas em 30% deles foram também realizados ensaios Lefranc. Apenas em um local se executaram SPT's.

Quanto aos ensaios em laboratório, somente em 4 casos foram executados tendo recaído em ensaios de identificação, expansibilidade, Proctor, CBR e teores de humidade.

4.1 - Custos do estudo geotécnico

Os custos dos trabalhos de prospeção e ensaios aqui apresentados foram obtidos com base nas propostas submetidas, para cada um dos projetos, ao Dono da Obra. No caso dos métodos geofísicos utilizados para os locais das Barragens Álamos I, Álamos II e Álamos III, e dada a dificuldade de obtenção desses valores por aquela via, foram usados preços correntes à data em que os trabalhos foram realizados, os quais foram cedidos pela firma Geocontrole - Geotecnia e Estruturas de Fundação, S. A..

Para o cálculo do valor total dos estudos geotécnicos foram consideradas duas parcelas. Uma resultante dos trabalhos acima indicados, ou seja, o que foi efetivamente pago ao(s) empreiteiro(s) que os realizaram e outra respeitante à equipa responsável pelo estudo geotécnico de apoio ao projeto. São atribuições desta equipa a recolha inicial de informação existente e relevante para o estudo a realizar, a execução do reconhecimento geológico de superfície, o planeamento dos programas de prospeção e ensaios bem como o acompanhamento e eventual ajustamento daqueles programas e, finalmente, a avaliação integrada de toda a informação obtida e a produção de relatórios para apoio ao projeto. Os custos relativos a esta equipa são, pois, distintos daqueles que estão associados ao pessoal pertencente ao(s) empreiteiro(s) os quais estão contidos no custo dos trabalhos contratados.

Rodrigues-Carvalho (1981) obteve para esta segunda parcela do estudo geotécnico e para barragens de aterro, valores entre 10% e 20% do custo total do estudo geotécnico. Dado ser inviável calcular este

valor para cada um dos projetos agora estudados, resolveu-se utilizar genericamente o valor de 15% para todos eles. Qualquer variação em torno do valor adotado terá pouco significado quanto a poder influenciar o custo final dos estudos geotécnicos.

No Quadro 2 são apresentados, para cada um dos projetos das barragens os custos do estudo geotécnico, o valor da construção (estimativa de projeto) e o valor da relação Custo do estudo geotécnico / Custo da construção.

4.2 - Custos da construção

Os custos de construção são os indicados na estimativa orçamental contida em cada projeto. Tal como o critério seguido para a prospeção e ensaios, também aqui foram considerados os valores daquela estimativa para a construção do corpo da barragem e dos órgãos de segurança.

Desde há muito que vários autores se têm referido aos valores da relação Custo dos estudos geotécnicos / Custo da construção para diferentes tipos de obras de engenharia, designadamente fundações de barragens, túneis, edifícios. Salienta-se que os custos aqui assumidos são aqueles que respeitam apenas às obras de construção civil. Na bibliografia é frequentemente indicado, para aquela relação, o valor de 3% o que, tirando casos de exceção, deve ser visto mais como um valor limite do que um valor corrente. Valores entre 0,5 e 1,5 %, por exemplo, foram referidos por Attewell e Clark (1980). Para casos portugueses e com base em número significativo de projetos de barragens estudados, Rodrigues-Carvalho (1999) indica intervalos de valores de 0,1 - 1,3 % para túneis, 0,4 - 3,3 % para barragens de betão tipo arco, 0,4 - 0,8% para barragens de betão tipo gravidade e 0,4 - 2,5 % para barragens de aterro. Outros autores (Vallejo, 2002) referem ainda, para avaliação da extensão dos estudos geotécnicos, a relação entre o custo dos estudos e o custo dos respetivos projetos. No entanto esta via parece ser menos adequada e, por isso, menos corrente.

Quadro 2 - Custo do estudo geotécnico, da construção e relação Custo do estudo/Custo da construção

Barragem	Custo da prospeção e ensaios (€)	Custo da equipa estudos geotécnicos (€)	Custo total dos estudo (€)	Custo da construção (€)	Custo dos estudos / Custo da construção (%)
Álamos I	82.887	14.627	97.514	3.029.385	3,22
Álamos II	66.505	11.736	78.241	3.817.085	2,05
Álamos III	46.323	8.175	54.498	2.686.420	2,03
Loureiro	47.680	8.414	56.094	4.555.213	1,23
Penedrão	24.244	4.278	28.522	4.853.984	0,59
Pisão	37.151	6.556	43.707	15.639.001	0,28
Amoreira	22.516	3.973	26.489	7.219.746	0,37
Brinches	44.330	7.823	52.153	6.082.789	0,86
S. Pedro	30.475	5.378	35.853	6.764.242	0,53

Os trabalhos de prospeção e ensaios realizam-se frequentemente em mais do que uma fase, cuja separação temporal pode ser muito dilatada, podendo dar lugar a variações significativas dos custos unitários à data da realização, devido à inflação ou a vários outros condicionalismos de mercado. Por outro lado, entre a(s) data(s) dos estudos geotécnicos realizados para apoio ao projeto de uma dada obra e a execução dessa mesma obra decorrem por vezes períodos apreciáveis, podendo com frequência chegar a alguns anos.

Pelo exposto se conclui que para calcular uma relação entre o custo total do estudo geotécnico e o custo das respetivas construções, em termos percentuais, constituiria um erro grosseiro tomar como custo dos estudos o simples somatório dos valores dos trabalhos quando realizados.

Afigura-se que o método mais adequado para calcular aquela relação será o de utilizar o custo do estudo geotécnico corrigido para a data em que foi apresentada a estimativa orçamental da obra, ou seja, a data do Projeto. Esta foi a via aqui adotada, seguindo o método já utilizado por Rodrigues-Carvalho, op. cit..

Assim, tendo em atenção a data em que foram realizados os estudos de sítios aqui tratados, os respetivos custos foram corrigidos para a data da estimativa orçamental incluída em cada um dos Projetos usando o índice do custo de vida (excluindo habitação) em Portugal continental, do Instituto Nacional de Estatística.

Do Quadro 2 resulta que na relação entre o valor do estudo geotécnico e o valor da construção se destacam claramente dois grupos. Um constituído pelas barragens de Álamos I, Álamos II e Álamos III, com valores entre 3,22 % e 2,03 % e valor médio de 2,43 % e outro, englobando as restantes seis barragens, com valores oscilando entre 0,28 % e 1,23 % e média de 0,64 %.

Rodrigues-Carvalho, op. cit. encontrou para um conjunto de 12 barragens de betão tipo gravidade e barragens de terra valores para aquela relação que se enquadravam entre 0,4 % e 2,5%. No entanto, este valor máximo refere-se a uma barragem com apenas 18 metros de altura e 231 metros de coroamento e, por isso, pode ser considerada uma exceção no conjunto das barragens referidas. Ainda segundo o mesmo autor, à medida que diminui a importância da obra traduzida pela altura, pelo comprimento do coroamento, pelo produto (coroamento x altura) ou, ainda, pelo volume da barragem, o valor daquela relação diminui. Se daquele intervalo se excluir o valor máximo de 2.5 %, o intervalo para as 11 barragens restantes varia entre 0.4 % e 1.4 % com média de 0.74%, valores aos quais são comparáveis os do segundo grupo das barragens agora estudadas.

5 - A UTILIZAÇÃO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE ESTUDO EM CADA SÍTIO

Abordam-se em seguida as quantidades de trabalho referentes a cada um dos métodos de Estudo por forma a tentar avaliar o que terá pesado para valores tão diferenciados para a relação Custo do estudo / Custo da construção entre os dois grupos identificados e que obviamente radicam nos custos da prospeção geotécnica. Não serão abordados, de modo particular, os ensaios em laboratório já que o seu valor não é significativo no quantitativo total do estudo. Por outro lado, subentende-se que às sondagens estão associados os custos dos ensaios de *in situ* para avaliar as condições de permeabilidade, realizados sistematicamente.

5.1 - Valas

Para além de Álamos I, Álamos II e Álamos III, foram realizados estudos através da escavação de valas de prospeção somente para a barragem de Brinches. No Quadro 3 são fornecidos alguns elementos relativos a estas valas.

Quadro 3 - Algumas características das valas

Barragem	Altura (m)	Coroam. (m)	Nº de valas	total de valas (m)	total valas / coroamento
Álamos I	35	234	6	1050	4,5
Álamos II	40 ; 17	295 + 108	6 + 2	1050+350	4,0 ; 3,2
Álamos III	36,5	259	6	750	2,9
Brinches	34	550	2	52	0,1

Nota: No caso de Álamos II, os valores colocados em segundo lugar correspondem à portela da margem direita

Se for avaliada a relação comprimento das valas / comprimento do coroamento, para cada caso em que este meio de prospeção foi usado conclui-se que os comprimentos elevados das valas, no caso das três barragens Álamos se revelam fora do comum, designadamente se relacionados com os comprimentos de coroamento daquelas barragens. Rodrigues-Carvalho (1981) encontrou para aquela relação e para 9 barragens (4 de betão tipo gravidade e 5 de aterro) valores oscilando entre 0,3 e 1,0, apenas com uma exceção de valor 3,5 (barragem de Touvedo - betão, gravidade).

Normalmente será expectável que o comprimento das valas possa atingir a ordem de grandeza do comprimento do coroamento, sendo menor quando ao longo daquele ocorrem afloramentos do maciço. Mas em casos de geologia difícil, designadamente pela ocorrência de contactos litológicos, falhas ou filões, pode haver necessidade utilizar este método de prospeção segundo outros alinhamentos, aumentando assim as respetivas quantidades de trabalho.

5.2 - Métodos geofísicos

A informação do Quadro 4 permite comparar a extensão dos estudos através de métodos geofísicos nos diferentes sítios.

Observa-se claramente do quadro acima que o estudo para as fundações das barragens Álamos I e Álamos II foram, seguidos da barragem de Pisão, os mais extensos no que respeita a prospeção por métodos geofísicos.

Quadro 4 - Quantidades de trabalho de prospeção geofísica em cada sítio.

Barragem	Altura (m)	Coroam. (m)	Cartas de resistividade aparente			Perfis sísmicos de refração	
			nº de cartas	nº de perfis de resistividade	Comprim. total dos perfis (m)	nº de perfis sísmicos	Comprim. total dos perfis (m)
Álamos I	35	234	1	9	2.025	12	720
Álamos II	40	295	1	10	2.000	15	1.260
Álamos III	36,5	259				12	720
Loureiro	30	1.175				13	780
Penedrão	26	385				8	480
Pisão	15	454	1	3	900	10	600
Amoreira	26	792				10	600
Brinches	34	550				12	720
S. Pedro	24,1	733				9	540

5.3 - Sondagens

O Quadro 5 apresenta alguns elementos associados às sondagens realizadas nos diversos sítios estudados, a partir dos quais são tecidas algumas considerações com base na quantidade de trabalho. O gráfico da Fig.1 evidencia que, sendo os coroamentos das três barragens Álamos os mais curtos do conjunto das barragens estudadas, a eles correspondem os menores espaçamentos médios entre sondagens, com um máximo de 43.2 m.

Quadro 5 - Características associadas às sondagens realizadas

Barragem	Altura (m)	Coroam. (m)	Volume (X 10 ³ m ³)	Nº total sond.	Total sond. no eixo	Comp. furação (m)	Volume amostrado (m ³)	Espaçam. de sond. no eixo (m) (*)	Escala de Amostragem E (x 10 ³) (**)
Álamos I	35	234	277	13	13	481,8	1,10	19,5	628
Álamos II	40,0	295	392	11	11	312,3	0,71	29,5	1.371
Álamos III	36,5	259	274	8	7	238,6	0,55	43,2	1.254
Loureiro	30,0	1.175	343	12	12	415,0	0,95	106,8	903
Penedrão	26,0	385	320	4	4	80,0	0,18	128,3	4.369
Pisão	15,0	454	144	10	6	165,0	0,38	90,8	953
Amoreira	26,0	792	570	9	7	160,0	0,37	132,0	3.891
Brinches	34,0	550	513	15	12	264,5	0,61	50,0	2.118
S. Pedro	24,1	733	400	10	7	153,2	0,35	122,2	2.852

(*) Espaçamento de sondagens = Comprim. do coroamento / (nº de sondagens - 1).
(**) Escala de amostragem por sondagens E = 2,5 vol. da barragem / vol. amostrado por sondagens (x 10³).

Constata-se que o espaçamento entre sondagens cresce à medida que aumenta o comprimento do coroamento, mas não de uma forma linear. A curva de tendência desta relação é de tipo logarítmico notando-se que o incremento no espaçamento tende a evanescer para grandes comprimentos de coroamento. Rodrigues-Carvalho (1999) evidenciou este aspeto das relações entre as quantidades de trabalho por sondagens e a importância da obra, quer esta seja definida pelo comprimento do coroamento, pelo produto do coroamento pela altura ou, ainda, pelo volume da barragem.

Na Fig. 2 apresenta-se a relação entre o produto (coroamento x altura) e o comprimento total de sondagens. As barragens Álamos I e Álamos II afastam-se significativamente da curva de tendência, devido ao elevado comprimento total das sondagens realizadas em ambos os casos. Este aspeto é muito mais marcado no caso de Álamos I pelo que esta não foi considerada no cálculo da curva de tendência.

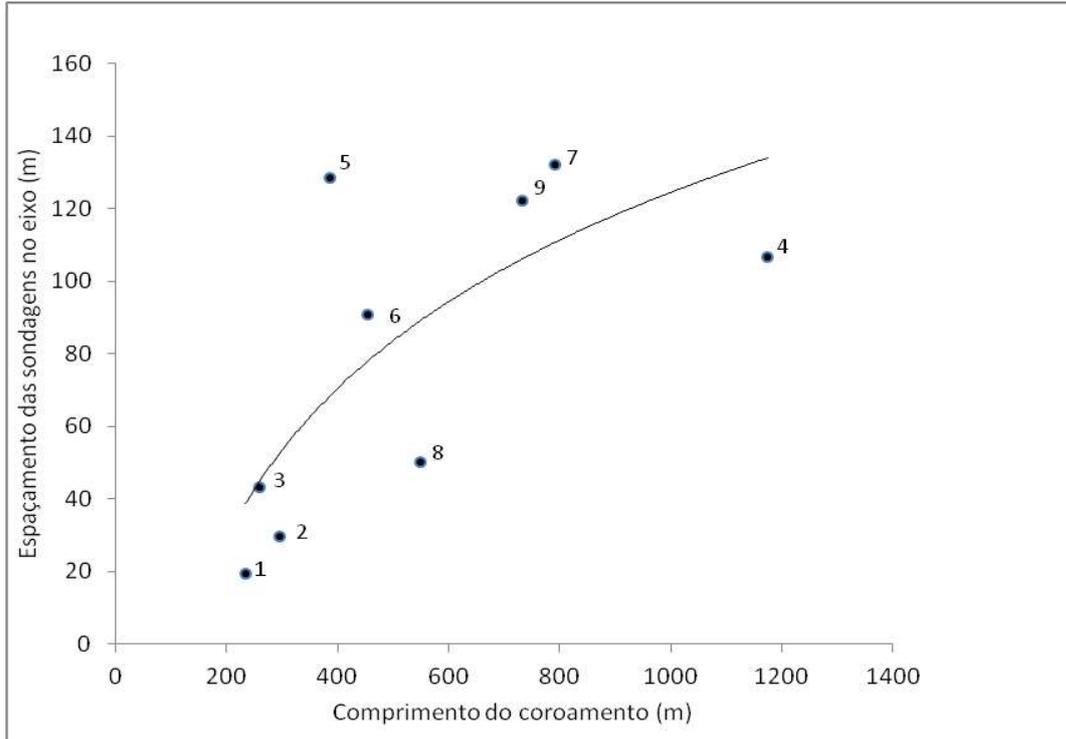


Fig. 1 - Comprimento do coroamento vs. Espaçamento das sondagens (1 – Álamos I, 2 – Álamos II, 3 – Álamos III, 4 – Loureiro, 5 – Penedrão, 6 – Pisão, 7 – Amoreira, 8 – Brinches, 9 – S. Pedro)

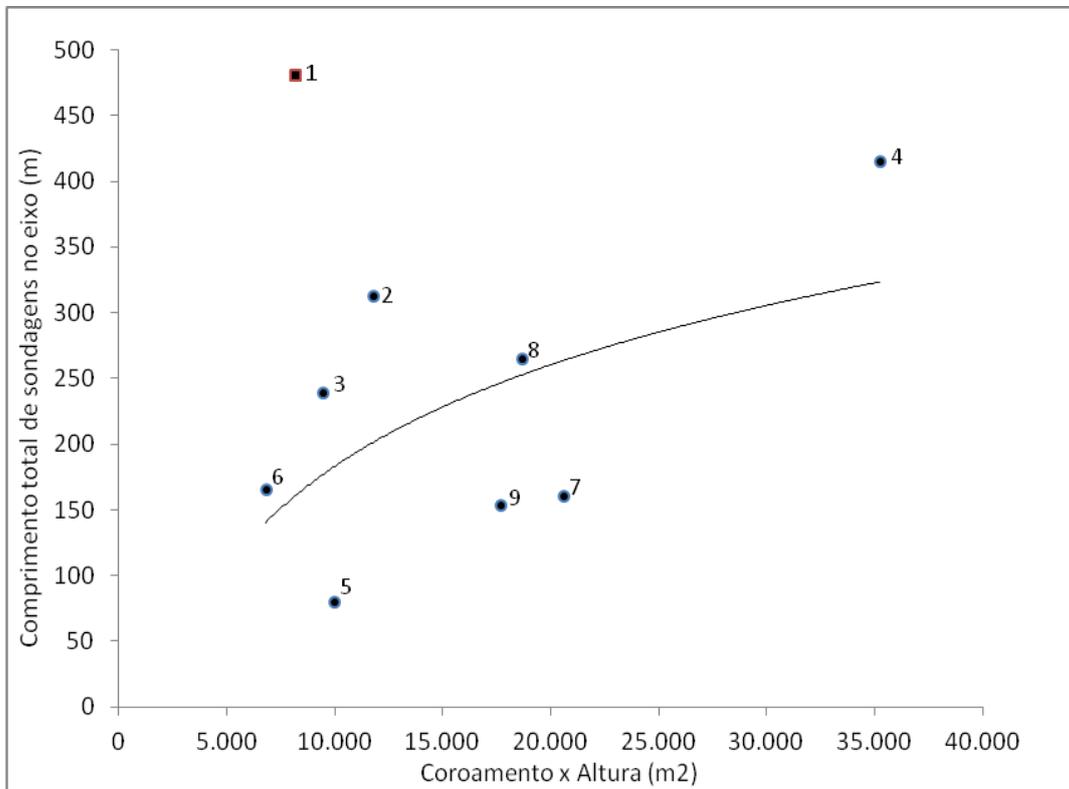


Fig. 2 - Coroamento x Altura vs. Comprimento total de sondagens (1 – Álamos I, 2 – Álamos II, 3 – Álamos III, 4 – Loureiro, 5 – Penedrão, 6 – Pisão, 7 – Amoreira, 8 – Brinches, 9 – S. Pedro)

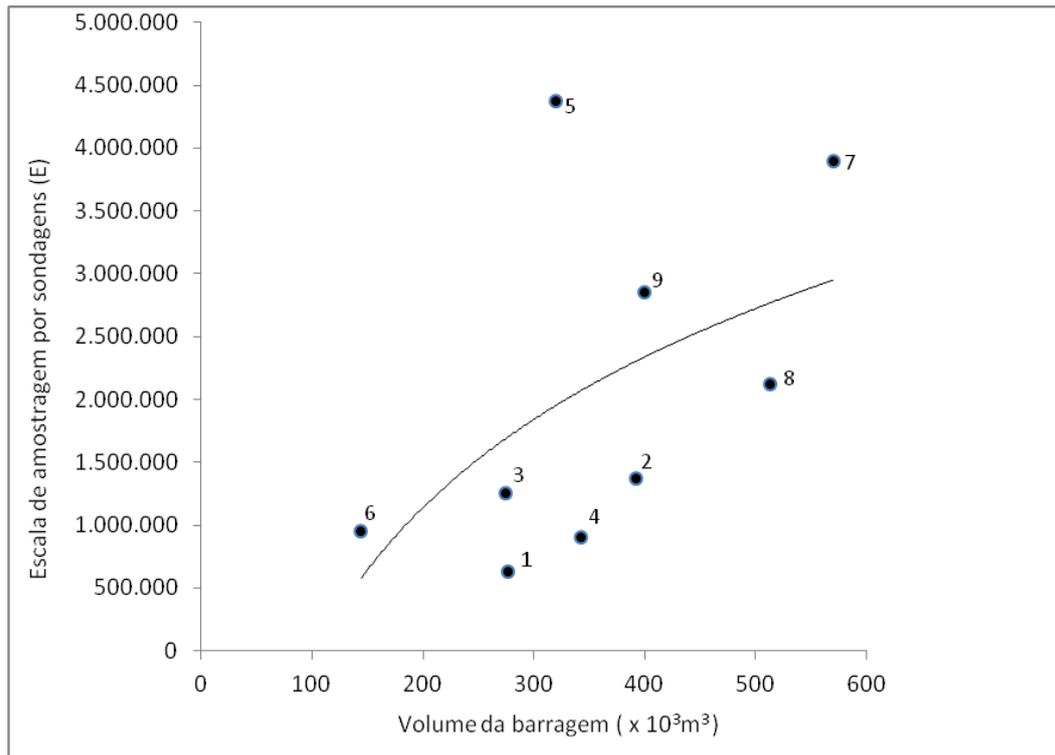


Fig. 3 - Volume da barragem vs. Escala de amostragem por sondagens (1 – Álamos I, 2 – Álamos II, 3 – Álamos III, 4 – Loureiro, 5 – Penedrão, 6 – Pisão, 7 – Amoreira, 8 – Brinches, 9 – S. Pedro.)

A Fig. 3 representa a relação entre o volume da barragem e a escala de amostragem por sondagens, sendo esta definida pela relação entre o volume amostrado e o volume de maciço influenciado pela obra. Para o cálculo do volume amostrado considera-se o comprimento total das sondagens na zona da fundação, usando-se para diâmetro o valor de 54 mm correspondente ao tipo NX, aquele que é mais vulgar e considerado mínimo neste tipo de estudos. Para os volumes aproximados de maciço influenciado pela obra, torna-se necessário aceitar algumas simplificações que, contudo, não desvirtuam os objetivos para os quais são avaliados. Para o caso de barragens de aterro, alguns cálculos simples levam a aceitar que esse volume é cerca de 2,5 vezes o volume da barragem (Rodrigues-Carvalho, 1999). O valor desta relação constitui um indicador do detalhe da investigação das condições de fundação através de sondagens carotadas. Assim, quanto maior for o valor da escala 1/E, melhor será o conhecimento das condições do terreno obtida através de sondagens.

Da figura extrai-se que as três barragens Álamos são, a par de Loureiro e Pisão, aquelas que apresentam melhor escala de amostragem por sondagens. Contrariamente, as barragens de Penedrão e Amoreira apresentam as escalas de amostragem mais baixas. No caso de Penedrão tal deve-se à reduzida quantidade de trabalho por sondagens (apenas 4 sondagens com um total de 80.0 m). No caso de Amoreira verifica-se ser a barragem com maior volume entre as estudadas, onde o espaçamento entre sondagens no eixo foi o maior, e onde o comprimento total de furação foi também dos mais baixos. Para barragens de aterro, e para um conjunto de 19 estudos de sítios, Rodrigues-Carvalho (op. cit.) encontrou Escalas de Amostragem entre 1: 500.000 e cerca de 1: 5.000.000, intervalo onde se situam todas 9 barragens do presente estudo. Já para o caso de barragens de betão tipo arco ou tipo gravidade, o intervalo encontrado foi de 1:100.000 a 1: 500.000.

6 - Conclusões

É consensual que a extensão dos estudos geotécnicos de sítios para determinado tipo de obra e o seu correspondente custo depende da complexidade geológica de cada local. Locais de geologia complexa impõem estudos mais aprofundados e, por isso, mais dispendiosos. Aos responsáveis pelos estudos compete selecionar os métodos de estudo a utilizar e definir as quantidades de trabalho a executar. Por outro lado cabe-lhes decidir, no fim de determinada fase de estudo, pela realização ou não de mais trabalhos tendo por base o custo e a importância da informação que os mesmos podem fornecer, numa perspetiva de benefício /custo que, não sendo quantificável, radica na sua experiência.

Os elementos obtidos durante o presente estudo permitiram conhecer os métodos de prospeção utilizados na avaliação das condições geotécnicas dos nove locais de barragem em apreço e concluir que

os mesmos são os correntemente usados em situações similares. Foram também obtidos os seus custos permitindo chegar ao custo total do estudo geotécnico em cada sítio.

Obtiveram-se os valores dos custos estimados nos projetos para cada uma das barragens, o que permitiu chegar ao valor individual da relação Custo do estudo geotécnico/Custo da construção e os valores encontrados foram comparados com outros relativos a projetos do mesmo tipo. Constatou-se que os valores daquela relação para as três barragens Álamos eram significativamente superiores quer aos das restantes barragens agora estudadas quer aos de outras barragens em que os valores da mesma relação eram conhecidos.

Os estudos geotécnicos para a fundação das barragens Álamos I e Álamos II foram os únicos, do conjunto das 9 barragens estudadas, conduzidos em duas fases distintas - 1980 e 2000. Poderá admitir-se que o facto de ter existido um intervalo de tempo tão dilatado entre as duas fases, que implicou mudança na equipa que conduziu os estudos em cada uma delas, tenha provocado uma perda de informação da primeira fase que terá sido necessário colmatar na segunda. No entanto, esta hipótese não colhe para o caso de Álamos III para a qual só houve uma fase de estudos, em 2000.

Analisaram-se as quantidades de trabalho relativos a cada método de prospeção em cada local, o que habilita a concluir que a extensão dos trabalhos relativos a valas e sondagens, bem como geofísica no caso particular de Álamos I e Álamos II, justificam os valores mais elevados para a relação Custo do estudo/Custo da construção obtidos para as três barragens Álamos. Por outro lado, e considerando a importância das barragens (comprimento do coroamento, altura x coroamento e volume), os sítios das barragens de Penedrão, Amoreira e S. Pedro foram aqueles onde menos se investiu na investigação por sondagens (Figs. 1, 2 e 3).

Considerando o parâmetro Escala de Amostragem por Sondagens, verificou-se que os valores obtidos para os nove locais estudados se situam dentro do intervalo 1:500.000 e 1: 5.000.000 anteriormente encontrado para vários outros estudos de fundações de barragens do mesmo tipo.

O presente estudo permitiu ainda observar que existe relação entre, por um lado as grandezas que definem a importância da obra (comprimento do coroamento, altura x coroamento e volume) e, por outro, as quantidades de trabalho por sondagens (número e comprimento total). Rodrigues-Carvalho (1999) apontou para essas relações uma tendência logarítmica e os resultados agora obtidos aparentam estar em linha com essa tendência, apesar do restrito número de casos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva (EDIA) e ao Sr. Eng. Jorge Vazquez, do Conselho de Administração daquela Empresa, as facilidades e apoio necessários à obtenção dos elementos aqui utilizados bem como a autorização para a sua divulgação. Agradece-se igualmente à Empresa Geocontrole - Geotecnia e Estruturas de Fundação S. A., a indicação dos preços de trabalhos de prospeção geofísica à data de alguns dos estudos.

REFERÊNCIAS

- Attewell, P. B. e Clark, C. R. (1980) - Site investigation - how much should be done? Tunnels and Tunnelling, vol. 12, pp. 11-12.
- Rodrigues-Carvalho, J. A. (1981) - Site investigation. It's cost and benefit in Portugal. Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology, University of London, 2 vol..
- Rodrigues-Carvalho, J. A. (1999) - Sondagens para estudo de fundações de barragens em maciços rochosos - a extensão dos programas na prática portuguesa. Geotecnia nº 86, Lisboa, pp.37-50.
- Vallejo, L. I. G. (2002) - Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid, 715 p..