

REVISÃO E ATUALIZAÇÃO DO PROJETO GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DE SAÏDA

REVISION AND UPDATE OF SAÏDA DAM GEOTECHNICAL PROJECT

Antunes, Joana; *AQUALOGUS, Lisboa, Portugal, jantunes@aqualogus.pt*
Pimenta, Lurdes; *AQUALOGUS, Lisboa, Portugal, lpimenta@aqualogus.pt*
Roque, Magda; *AQUALOGUS, Lisboa, Portugal, mroque@aqualogus.pt*
Sardinha, Ricardo; *AQUALOGUS, Lisboa, Portugal, rsardinha@aqualogus.pt*
Rosa, Alexandra; *AQUALOGUS, Lisboa, Portugal, arosa@aqualogus.pt*

RESUMO

A barragem de Saïda localiza-se no norte da Tunísia, cerca de 12 km a oeste de Tunes. O Projeto original, objeto de revisão e atualização pelo consórcio Aqualogus/Concept, data de 1999. Trata-se de uma barragem de aterro com 48 m de altura máxima e cerca de 2500 m de desenvolvimento à cota de coroamento, a que corresponde um volume armazenado de cerca de 45 hm³. No âmbito dos estudos em curso, identificaram-se situações geotécnicas complexas, no que respeita às condições de fundação e aos materiais de construção, com repercussões importantes nas condições de segurança e funcionalidade das obras. No presente artigo resume-se a análise crítica dos elementos geológico-geotécnicos de base, da conceção e do arranjo geral da solução do projeto original; e apresentam-se o programa de prospeção complementar definido, as alterações conceptuais do corpo da barragem e do tratamento da fundação e os respetivos cálculos justificativos.

ABSTRACT

Saïda dam is located in the north of Tunisia, about 12 km west of Tunis. The original project, which is being reviewed and updated by the consortium Aqualogus/Concept, is dated from 1999. It comprises an embankment dam with 48 m height, 2 500 m of crest length and a storage capacity of about 45 hm³. Under the scope the studies, complex geotechnical situations were identified concerning both foundation conditions and construction materials, that may lead to important safety and functionality consequences to the dam. This article summarizes the critical analysis of the initial geological data and geotechnical elements, so as the design and the general arrangement of the original project. It also presents the proposed complementary site investigations plan, the introduced conceptual changes to the embankment and to the foundation treatment solution and the respective supporting calculations.

1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A barragem de Saïda localiza-se no norte da Tunísia, numa secção do rio El Melah pertencente à bacia hidrográfica de Medjerdah, cerca de 12 km a oeste da cidade de Tunes (Figura 1).

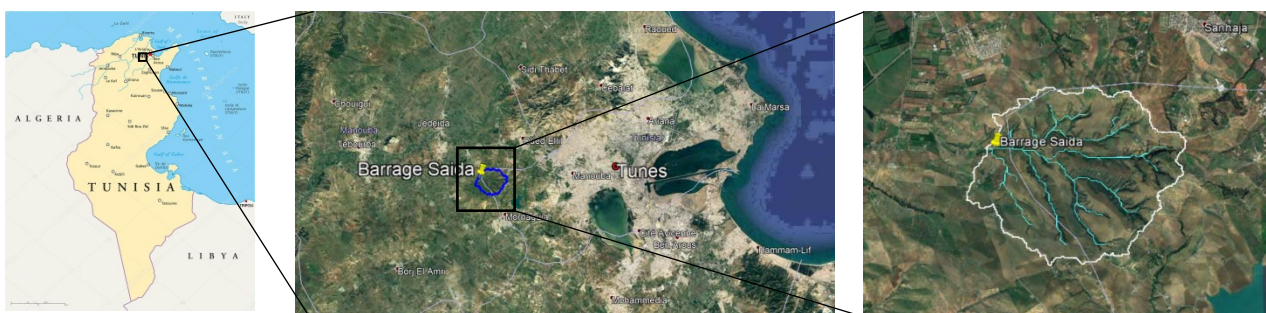


Figura 1 – Localização da barragem de Saïda (Fonte: Google Earth)

Esta barragem é parte integrante do *Sistema Geral de Aproveitamento das Águas do Norte da Tunísia*, constituído por sete zonas: zona 1 – Extremo Norte, até à estação de Béjaoua; zona 2 – Bacia do rio Medjerdah; Zona 3 – Barragens de Ben Métir e de Kasseb; zona 4 – Grande Tunes; zona 5 – Cap Bon; zona 6 – Sahel e Kairouan; e zona 7 – Sfax e Sidi Bouzid.

O objetivo principal deste aproveitamento é a regularização sazonal dos recursos hídricos excedentários das barragens da zona 1, prevendo-se o enchimento da albufeira durante o inverno e a sua exploração essencialmente nos meses de verão, de maior consumo.

O projeto original data de 1999 e foi elaborado pela empresa Selkhozpromexport, e previa as seguintes características para barragem:

- Coroamento: cota (103,5)
- NPA: cota (100,5)
- NMC: cota (101,8)
- Volume armazenado: 45 hm³
- Volume útil: 41 hm³
- Tipo de barragem: terra zonada (1 barragem principal e duas portelas)
- Volume total do aterro: 4 200 000 m³
- Altura máxima acima do terreno: 48 m
- Comprimento à cota de coroamento: 2500 m (1 100 m correspondentes à barragem principal)
- Largura do coroamento: 8 m
- Inclinação do paramento de montante: variável de 1:3 (V:H) a 1:4, com berma estabilizadora
- Inclinação do paramento de jusante: 1:3 (V:H), com berma estabilizadora

No âmbito dos estudos de revisão e de atualização do projeto original, que se encontra em curso e a cargo do Consorcio Aqualogus/Concept, foram identificadas diversas condicionantes geotécnicas relacionadas quer com as condições de fundação da barragem, quer com os materiais de construção previstos, as quais poderiam colocar em causa a segurança e a funcionalidade das obras projetadas.

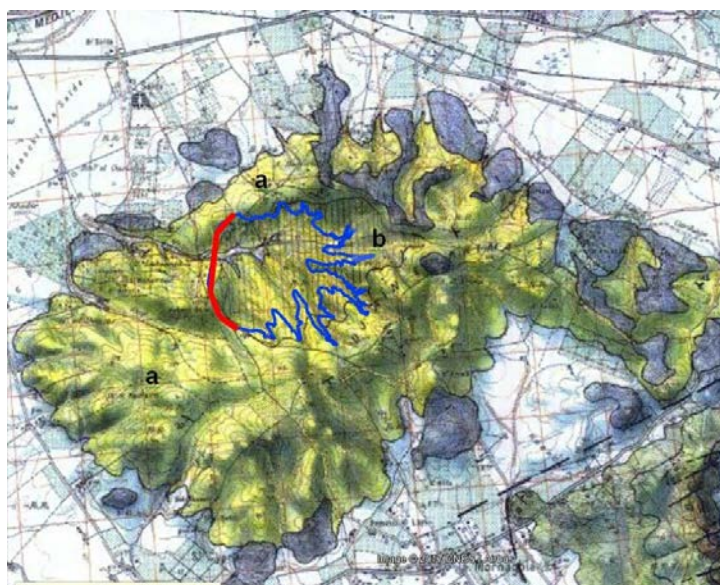
No seguimento dos problemas identificados foram realizados trabalhos de prospeção adicionais e procedeu-se à atualização do modelo geológico-geotécnico dos terrenos de fundação e à reformulação do perfil tipo da barragem e do respetivo tratamento da fundação.

No presente artigo resume-se a análise crítica dos elementos geológico-geotécnicos de base e do arranjo geral da solução do projeto original. São apresentadas as alterações conceptuais do corpo da barragem e do tratamento da fundação, bem como o programa de prospeção complementar a realizar antes da construção da barragem.

2 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO GERAL E LOCAL

No local de implantação da barragem de Saída ocorrem essencialmente grés e margas atribuídos a uma grande unidade flúvio-deltaica de idade pliocénica, que ocupa extensões importantes a oeste da cidade de Tunes. Trata-se de um conjunto de afloramentos com orientação geral NE-SW, cujas principais estruturas são a de Ariana-Belvédère e a de Jebel Ain Krima, onde se localiza a barragem.

Na Figura 2 apresenta-se um extrato da Carta Geológica de Tunes à escala 1/50 000, com a localização da barragem e da respetiva albufeira. Importa salientar que esta corresponde a uma carta provisória e ainda em fase de revisão.



GEOLOGIA

Quaternário recente

- - Aluviões recentes
- - Incrustações calcárias

Pliocénico

- - Unidade flúvio-deltaica
 - a: Margas cinzentas;
 - b: Areias e grés amarelos.

OUTRA SIMBOLOGIA

- ☞ - Eixo e albufeira da barragem

Figura 2 - Extrato da Carta geológica de Tunes à escala 1:50 000 (versão provisória)

O afloramento Jebel Ain Krima é uma estrutura do tipo sinclinal, onde se pode identificar a série detrítica pliocénica completa, reconhecendo-se, da base para o topo, as seguintes unidades:

- a: Margas cinzentas (Formação de Raf): com cerca de 200 m de espessura, é uma unidade composta essencialmente por margas gipsíferas cinzentas, com inúmeras intercalações gresosas contendo, por vezes, níveis métricos de conglomerados.
- b - Areias e grés amarelos (Formação Porto Farina): com cerca de 100 m de espessura, é uma unidade formada principalmente por bancos métricos de grés, maioritariamente grosseiros e por areias com algumas intercalações de argila esverdeadas.

No local da barragem, o substrato é composto por alternâncias areno-gresosas e argilo-margosas, dispostas em monoclinal segundo a direção N60-80°E com pendor de 15-20° NE (Figura 3).

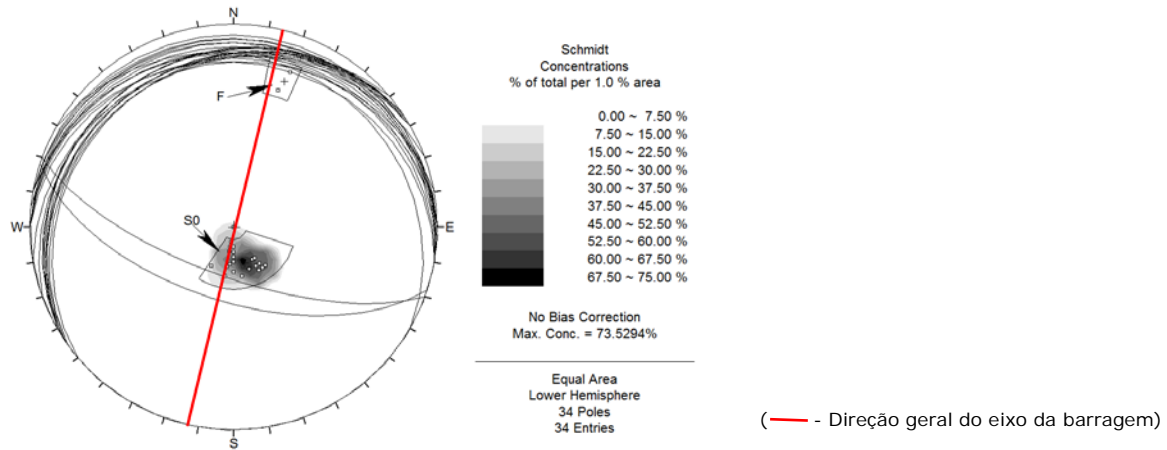


Figura 3 – Diagrama de fracturação do maciço rochoso

O eixo da barragem é praticamente perpendicular à direção das camadas, o que é favorável à ocorrência de percolações montante-jusante.

O substrato pliocénico encontra-se coberto em quase toda a área de implantação da barragem e da respetiva albufeira por depósitos de cobertura quaternários. Nas encostas dominam coluviões argilo-siltosos, com variável fração arenosa ou mesmo cascalhenta. No leito das linhas de água, sobretudo do rio El Melah, encontram-se depósitos aluvionares areno-argilosos, por vezes cascalhentos.

Devido à presença de solos de cobertura, não existem muitos afloramentos rochosos expostos à superfície. No eixo da barragem, os afloramentos argilo-margosos ocorrem sobretudo nas cotas superiores e ocupam extensões mais ou menos significativas. Os afloramentos gessosos são pouco contínuos e de possanças reduzidas, localizando-se sobretudo na margem direita do rio, no local do eixo e a jusante deste, quase sempre abaixo da cota (85).

Na Figura 4 apresenta-se o esboço da cartografia geológica de superfície do local da barragem e da respetiva albufeira.

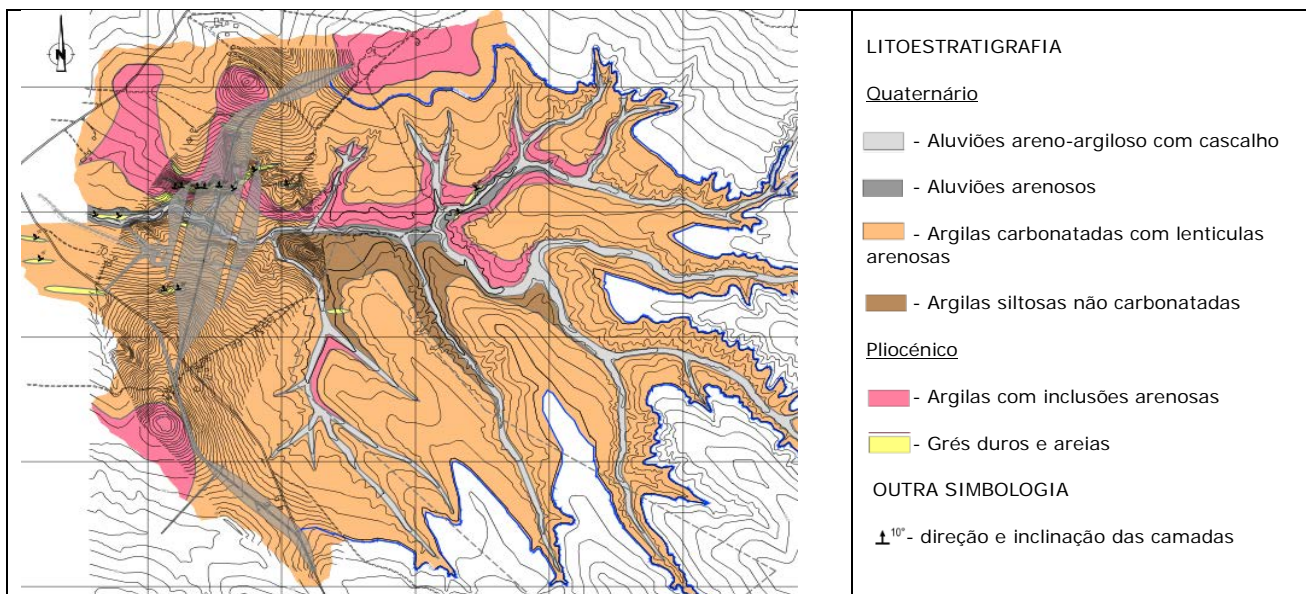


Figura 4 – Cartografia de superfície do local da barragem e da respetiva albufeira

3 - ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

3.1 - Elementos de base e condicionantes geotécnicas

A barragem de Saida foi objeto de diversos estudos e trabalhos anteriores, nomeadamente, *Estudo de Viabilidade*, datado de 1982 e o *Anteprojecto*, de 1999. A revisão e atualização do projeto foram realizadas pelo consórcio Aquilogus/Concept, em 2017.

De acordo com informações fornecidas pela DGBGTH - *Direction Generale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques*, na fase de *Estudo de Viabilidade* foram realizados trabalhos de prospeção geológico-geotécnica no local de implantação da barragem e numa mancha de empréstimo, localizada na margem esquerda da futura albufeira. Contudo, só foi possível recuperar parte dos dados correspondentes aos ensaios laboratoriais da mancha de empréstimo.

Na fase de Anteprojecto foram realizados novos trabalhos de prospeção no local da barragem e numa mancha de empréstimo na margem direita da albufeira.

No local da barragem foram realizadas 26 sondagens com ensaios Lugeon e Lefranc e com recolha de amostras, 10 ensaios pressiométricos, 2 ensaios de penetração estática (CPT) e 2 ensaios de penetração SPT (não associados às sondagens) e 2 ensaios de bombagem. As amostras recolhidas foram submetidas a ensaios de identificação, ensaios edométricos, de expansão livre e a ensaios de corte direto.

No local da mancha de empréstimo, foram realizados 13 poços de reconhecimento com recolha de amostras, as quais foram submetidas aos mesmos ensaios que as amostras do local da barragem.

Foram ainda realizadas análises químicas das águas subterrâneas.

Em relação aos trabalhos realizados no eixo da barragem, verificou-se que apesar do elevado número de sondagens realizadas, estas não produziram informação geotécnica útil, dado que não foram determinados parâmetros como os graus de alteração e de fracturação, a % de recuperação ou o RQD. Além disso, os resultados dos ensaios Lefranc e Lugeon terão sido afetados pelo uso de bentonite durante a furação das sondagens, sobretudo no caso dos níveis arenosos. Esta situação comprova-se pelo facto dos coeficientes de permeabilidade (k) calculados não estarem coerentes com as características dos materiais ensaiados (por exemplo: solos arenosos com percentagem finos de 7% com $k = 10^{-8}$ m/s).

A permeabilidade dos níveis areno-gresosos terá sido estimada a partir de ensaios de bombagem, mas sobre os quais não foi fornecida qualquer informação. Foram estimados valores de k médios de cerca de 4×10^{-5} a 2×10^{-4} m/s, o que se afigura de acordo com as características dos materiais, a que correspondem transmissividade de 10 a 100 m²/dia. Para os níveis argilosos, estimaram-se valores de k de 7×10^{-8} à 6×10^{-10} m/s.

Em relação aos resultados dos ensaios laboratoriais dos terrenos de fundação da barragem e dos materiais de empréstimo, verificou-se que apenas os ensaios de identificação terão permitido a obtenção de resultados válidos. Os ensaios edométricos apresentam anomalias várias e os ensaios de corte direto (realizados apenas as argilas) foram do tipo UU ou CU com rápida velocidade de corte, o que não permite determinar os parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas.

Dos ensaios de identificação concluiu-se que os solos arenosos apresentam em regra % de finos < 20 % e IP < 18%.

Os solos argilosos, apresentam geralmente % de finos > 40-50 %, com IP e LL (limites de liquidez) variáveis. Nalguns casos, os IP são superiores 40% ou 50%, com LL superiores a 60%, sendo as amostras classificadas como CH de acordo com a Classificação Unificada de Solos. Noutros casos, as amostras têm IP < 35%, LL < 50 e são classificadas como CL segundo a Classificação Unificada de Solos. As argilas de alta plasticidade têm expansibilidade livre que atingiu valores de cerca de 14%, e pressões de expansão nula de 1 a 3 kg/cm², por vezes de 4 a 5 kg/cm². Algumas amostras apresentam importantes teores em sulfatos e gesso.

Importa ainda referir que as análises químicas das águas indicam um potencial dispersivo dos solos argilosos, o que carecerá de confirmação, mediante a realização de ensaios de dispersividade dos solos.

Apesar das limitações dos dados de base, foi possível retirar algumas considerações sobre os terrenos de fundação e sobre os materiais de empréstimo estudados, e ainda identificar os potenciais problemas geotécnicos associados.

No que se refere às condições de fundação, verificou-se que os terrenos são constituídos níveis argilo-margosos, de baixa permeabilidade, por vezes muito plásticos, expansivos e eventualmente dispersivos, intercalados com níveis areno-gresosos, de elevada permeabilidade. A estrutura geológica em monoclinial

apresenta direção praticamente perpendicular ao eixo da barragem, o que é favorável à ocorrência de percolações montante-jusante, através dos níveis arenosos de elevada permeabilidade. Acresce que, se por um lado os níveis arenosos podem resultar em problemas de estanqueidade da fundação e também de segurança para o conjunto barragem-fundação, a presença de argilas expansivas e eventualmente dispersivas na fundação poderá colocar em causa a estabilidade global da obra.

Ficou clara a necessidade de complementar a caracterização dos terrenos de fundação. Por um lado, importava determinar a continuidade espacial dos níveis arenosos para o interior da albufeira e estimar a sua permeabilidade, de forma a avaliar o impacto das percolações montante-jusante. Por outro lado, importava determinar as características geotécnicas dos terrenos, sobretudo dos níveis argilo-margosos.

No que se refere aos materiais de empréstimo, embora sem informação fiável sobre os parâmetros de resistência e deformabilidade, foi possível verificar que dentro da albufeira existem materiais com adequadas características para a construção da barragem, como é o caso dos solos argilosos (de cobertura e de alteração do substrato pliocénico) de baixa plasticidade (CL) e os solos argilo-arenosos. No entanto, a distribuição espacial e em profundidade destes materiais não é clara, coexistindo com solos finos de alta plasticidade, de difícil trabalhabilidade e compactação. Por esclarecer permaneciam também questões relacionadas com as suas características mineralógicas, potencial de dispersividade e de expansibilidade.

Face ao cenário apresentado, o consórcio Aqualogus/Concept realizou uma campanha de prospeção adicional, composta pelos seguintes trabalhos:

Local da barragem:

- 5 sondagens geotécnicas (3 no eixo e 2 a montante) com ensaios tipo SPT e Lefranc e recolha de amostras;
- 13 poços de reconhecimento e 8 valas (no eixo, a montante e a jusante), com recolha de amostras;
- Ensaios de caracterização laboratorial de amostras de solo: ensaios de identificação, ensaios de determinação do teor de carbonatos, de gesso e de sulfato, ensaios triaxiais do tipo CU+U (consolidado não drenado com medição das pressões intersticiais) e ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade;

Manchas de empréstimo (em ambas as margens da albufeira):

- 10 poços de reconhecimento, com recolha de amostras;
- Ensaios de caracterização laboratorial de amostras de solo: ensaios de identificação e ensaios de compactação do tipo Proctor Normal.

Importa referir que a campanha realizada, embora insuficiente para a caracterização do problema, foi possível, dado tratar-se de uma revisão de projeto, para a qual não estavam previstos quaisquer trabalhos de prospeção. A campanha cumpriu os objetivos para a qual foi proposta, nomeadamente: i) localizar as camadas arenosas do eixo, avaliar a sua continuidade para montante e estimar a sua permeabilidade; ii) proceder à caracterização preliminar da resistência e deformabilidade das margas/argilas e das areias/grés da fundação e dos materiais de empréstimo.

3.2 - Modelo geológico-geotécnico dos terrenos de fundação

Com base na análise dos dados das campanhas de prospeção realizadas e nos reconhecimentos de superfície procedeu-se à atualização do modelo geológico-geotécnico dos terrenos de fundação da barragem.

À superfície, o local caracteriza-se pela presença de solos de cobertura, que incluem as aluviões arenosos do fundo do vale do rio El Melah e dos seus afluentes, bem como os coluviões argilosos que cobrem as encostas da albufeira.

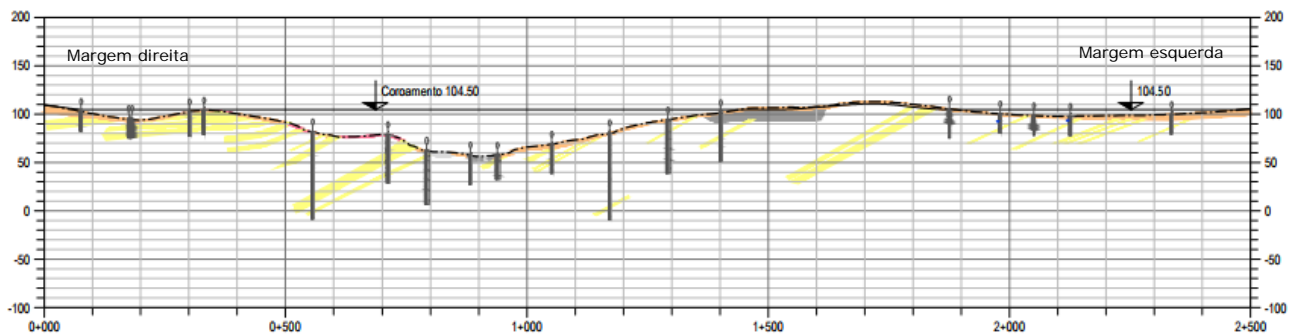
O substrato pliocénico subjacente é composto por camadas argilo-margosas com intercalações arenogresosas, dispostas em monoclinal com ligeiro pendor (10-15°) para NE, ou seja praticamente perpendiculares à direção geral do eixo da barragem, o que é favorável à ocorrência de percolações montante-jusante.

Os níveis argilo-margosos apresentam baixa permeabilidade, com k da ordem de 7×10^{-8} a 6×10^{-10} m/s e dividem-se em dois grupos: as argilas de baixa plasticidade; e as de alta plasticidade, expansivas e potencialmente dispersivas. Os ensaios laboratoriais realizados apontam para as argilas de baixa

plasticidade (CL), ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') de 24° e coesão efetiva (c') de 50 KPa, enquanto para as argilas de elevada plasticidade (CH), se estima ϕ' de 20° e c' de 65-75 kPa.

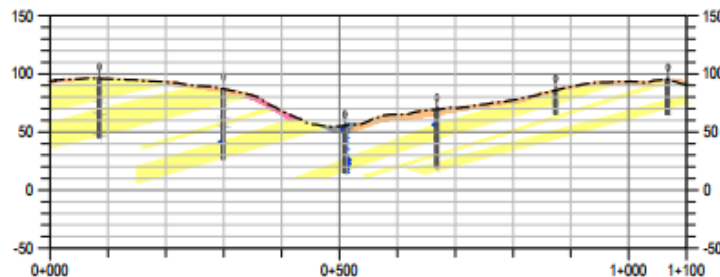
Os níveis areno-gresosos apresentam permeabilidades elevadas, da ordem de 4×10^{-5} a 2×10^{-4} m/s, a que correspondem transmissividades de 10 a 100 m²/dia. Apresentam baixo teor em finos (em regra, inferiores a 20%).

No que respeita ao modelo geológico dos terrenos em profundidade, verifica-se que as intercalações argilo-margosas são mais representativas que as areno-gresosas, sendo mais espessas e comuns. No eixo da barragem, estas últimas tendem a ocorrer preferencialmente na margem direita (Figura 5). A jusante do eixo, as acamadas arenosas ocorrem igualmente de forma mais persistente na margem direita, mas também nas cotas mais baixas da margem esquerda (Figura 6).



Legenda:
 ■ - Aluviões (Quaternário); ■ - Coluviões (Quaternário); ■ - Níveis areno-gresosos (Pliocénico), □ - Níveis argilo-margosos (Pliocénico)

Figura 5 – Modelo geológico simplificados dos terrenos ao longo do eixo da barragem.



Legenda:
 ■ - Aluviões (Quaternário); ■ - Coluviões (Quaternário); ■ - Níveis areno-gresosos (Pliocénico), □ - Níveis argilo-margosos (Pliocénico)

Figura 6 – Modelo geológico simplificados dos terrenos segundo um alinhamento paralelo ao eixo da barragem, a jusante

Além da maior persistência das camadas areno-gresosas na margem direita (eixo e jusante), verificou-se que estas são mais grosseiras que as restantes intercalações e foi para as quais se estimaram permeabilidades e transmissividades mais elevadas.

Os trabalhos realizados recentemente permitiram confirmar que as camadas areno-gresosas da margem direita se estendem para montante do eixo, pelo que este local acarreta potenciais problemas para a estanqueidade da fundação e para a segurança da obra.

Pelo contrário, as camadas areno-gresosas existentes a jusante do eixo nas cotas mais baixas da margem esquerda não parecem estender-se para montante em direção ao eixo e à albufeira. Porém, fica a ressalva da necessidade de prospeção adicional nesta margem, dado o reduzido número de trabalhos disponíveis à data.

3.3 - Materiais de empréstimo

A pesquisa de solos finos para o corpo da barragem foi realizada dentro da área da futura albufeira, nas várias fases de estudos. A caracterização preliminar dos solos indica que na área ocorrem essencialmente solos finos, que podem ser agrupados em dois tipos, de acordo com as suas percentagens de finos e plasticidade

- Tipo 1 - Solos com % de finos > 60%, LL > 60% e IP > 35%;
- Tipo 2 - Solos com % entre 40 e 85%, LL <60% IP<35%.

Os solos do tipo 1, com IP e LL mais elevados, colocando problemas de trabalhabilidade, são mais comuns na margem direita da albufeira.

Os solos tipo 2 são frequentes em ambas as margens e apresentam IP e LL mais baixos e mais adequados à construção dos aterros do corpo da barragem.

Concluiu-se que na área da albufeira é possível obter os solos finos necessários à construção da barragem, no entanto, a sua distribuição espacial não é totalmente clara, estando os mesmos intercalados com solos de alta plasticidade. A utilização destes materiais requererá a sua exploração seletiva e com recurso a depósitos provisórios.

Continuam a subsistir dúvidas em relação às características de resistência e deformabilidade destes materiais. Acresce a importância de despistar o potencial dispersivo destes solos, bem como o teor em gesso (ou outros minerais solúveis) e o teor em sulfatos.

Em relação a outros materiais, como enrocamento de proteção, filtros, drenos e rip-rap, estes devem ser obtidos a partir de pedreiras ativas na região.

3.4 - Campanha de prospeção adicional

Da análise conjunta dos resultados dos trabalhos de prospeção *in situ* e dos ensaios laboratoriais, foi possível atualizar o modelo geológico-geotécnico dos terrenos de fundação da barragem e avaliar as características preliminares dos materiais de construção existentes na área da albufeira.

Identificaram-se, porém, questões importantes relacionadas com os terrenos de fundação e com os materiais de empréstimo, que careciam de caracterização complementar, de forma a ratificar ou retificar a conceção e o arranjo geral da solução definida quer para a barragem quer para o tratamento da fundação.

No caso da fundação, importa por um lado determinar a permeabilidade real dos níveis areno-gresosos e, por outro lado determinar as características de deformabilidade, o potencial dispersivo e o teor em minerais solúveis dos níveis argilo-margosos. Importa também confirmar a inexistência de camadas areno-gresosas, na margem esquerda do rio, o que teria forte impacto nomeadamente na extensão do tratamento de impermeabilização da fundação.

No caso dos materiais de empréstimo, importa identificar a distribuição espacial e em profundidade dos solos finos de baixa plasticidade e determinar as suas características mecânicas, de deformabilidade, de permeabilidade e químicas (mineralogia, teor em minerais solúveis e potencial dispersivo).

Desta forma, foi proposto um programa de prospeção complementar, a ser realizado antes do Projeto de Execução e do início da empreitada de construção, o qual inclui trabalhos de prospeção *in situ* e ensaios de caracterização laboratorial.

Para caracterização dos terrenos de fundação, preconizam-se os seguintes trabalhos:

- 19 sondagens mecânicas à rotação (sem uso de lamas ou outros aditivos durante a furação), com ensaios SPT, Lefranc e/ou Lugeon, instalação de piezômetros e recolha de amostras do maciço e de águas freáticas. As sondagens localizam-se ao longo do eixo da barragem e a montante e no local dos órgãos hidráulicos;
- 10 poços de reconhecimentos, com recolha de amostras.
- 2 ensaios de bombagem, instalados em níveis areno-gresosos identificados, com medição dos níveis de água nas sondagens vizinhas;
- Ensaios laboratoriais sobre as amostras de maciço recolhidas: ensaios de identificação, ensaios de permeabilidade, ensaios triaxiais CU+U, ensaios edométricos, ensaios de expansibilidade com medição da pressão de expansão nula, análises mineralógicas, ensaios de dispersividade das argilas, ensaios de determinação do teor em sulfatos, minerais solúveis e gesso.
- Análise química das águas freáticas: Determinação do pH, condutividade elétrica, temperatura, total de sólidos dissolvidos e identificação da composição em iões maiores.

Para caracterização dos solos finos de empréstimo dentro da área da albufeira, dando-se preferência à margem esquerda do rio, preconizam-se os seguintes trabalhos:

- 35 poços de reconhecimento, com recolha de amostras;

- Ensaios laboratoriais sobre as amostras de maciço e de solo recolhidas: ensaios de identificação, ensaios de permeabilidade, ensaios triaxiais CU+U, ensaios edométricos, ensaios de expansibilidade com medição da pressão de expansão nula, ensaios de compactação Proctor Normal, análise mineralógica, ensaios de dispersividade das argilas, ensaios de determinação do teor em sulfatos, minerais solúveis e gesso.

Importa referir que caso os materiais disponíveis dentro da área da albufeira não reunirem características adequadas ou não perfaçam os volumes necessários, se prevê um conjunto de trabalhos *in situ* e de ensaios laboratoriais adicionais, a realizar noutros locais de empréstimo.

4 - PROJETO GEOTÉCNICO

4.1 - Conceção estrutural

A barragem principal implanta-se essencialmente segundo um alinhamento retilíneo de orientação NNE-SSW e, nas cotas superiores do encontro direito, segundo um alinhamento curvo com 235 m de raio que faz a transição para o alinhamento retilíneo da portela da margem direita. Na margem esquerda, a uma distância de cerca de 500 m do encontro esquerdo da barragem existe uma pequena portela com cerca de 610 m de comprimento (Figura 7).



Figura 7 – Planta geral da barragem e portelas

O vale de implantação da barragem é um vale aberto, com uma relação corda-altura (no vale principal) de cerca de 23.

O comprimento total do eixo do coroamento é cerca de 2 490 m, dos quais 335 m correspondem à portela da margem direita, 1 100 m à barragem principal, 445 m ao trecho de escavação e 610 m à portela da margem esquerda.

A altura máxima (acima do terreno natural) da barragem principal é de 48,5 m e as alturas máximas das portelas de 11 e 7 m, respetivamente, portela da margem direita e portela da margem esquerda.

4.2 - Perfil tipo e materiais de construção

4.2.1 – Solução inicial

O perfil tipo da barragem de Saída do projeto original (Figura 8) era, no essencial, um perfil de terra homogénea com pé de jusante em enrocamento. No que se refere à geometria exterior, o coroamento foi definido com 8 m de largura, à cota 103,5, e o paramento de montante com inclinação de 1:4 e 1:3 (V:H), respetivamente, abaixo e acima da cota da banquetta estabilizadora, cota 80, com 15 m de largura. O paramento de jusante tinha uma inclinação de 1:3 (V:H) acima da cota do coroamento do pé de jusante em enrocamento, cota 75, e de 1:2 (V:H) abaixo desta cota.

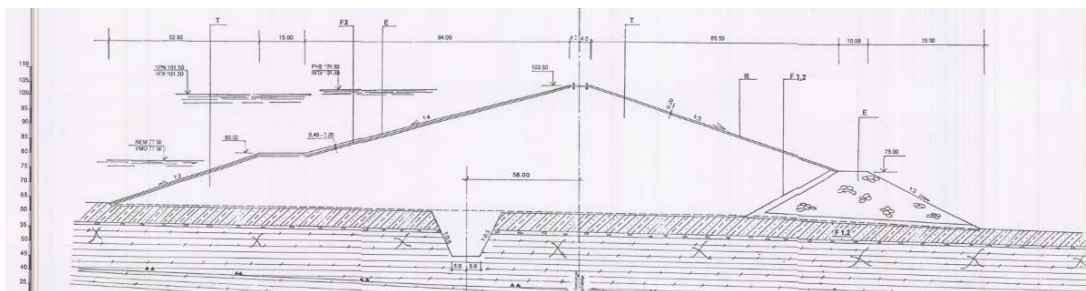


Figura 8 – Perfil tipo da barragem Saída (projeto original)

Na fundação, havia sido prevista a execução de uma vala corta-águas para interseccionar as camadas arenosas superficiais, com 10 m de largura da base, taludes inclinados a 1:0,5 (V:H) e uma profundidade máxima de 15 m.

O volume de aterro foi avaliado em cerca de 3,5 milhões de m³, sendo os materiais granulares e os enrocamentos provenientes de pedra e os materiais finos argilosos de exploração na área da futura albufeira.

4.2.2 – Solução revista

Na fase de revisão do projeto, o perfil tipo foi alterado para um perfil de aterro zonado, atentas as características dos materiais de empréstimo, as condições de fundação e a sismicidade local. As alterações visaram, no essencial, melhorar as condições de trabalhabilidade e a resposta dinâmica do corpo da barragem, tendo sido introduzidas zonas interiores e exteriores de materiais granulares com o objetivo de promoverem uma mais fácil dissipação das pressões intersticiais. No que se refere aos materiais finos, foi limitado o seu índice de plasticidade a um valor máximo de 35%. A Figura 9 mostra o perfil tipo revisto da barragem de Saída.

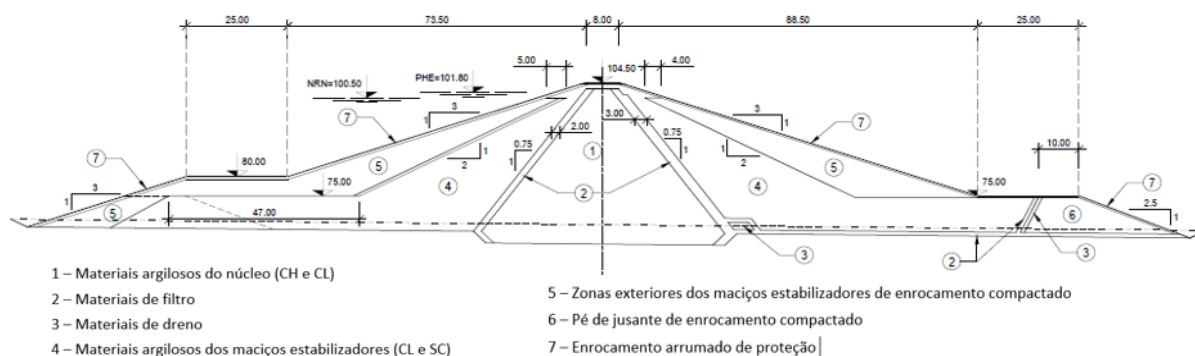


Figura 9 – Perfil tipo da barragem Saída (projeto revisto)

No que se refere à geometria exterior, foi estimada a cota do coroamento (104,5), definida com base nos estudos da folga e condicionada pela combinação de ações correspondente à ocorrência simultânea do NMC e de um vento habitual. O coroamento tem uma largura de 8 m.

A inclinação do paramento de montante é de 1:3 (V:H), acima e abaixo da cota da berma estabilizadora de 25 m de largura (cota 80). A inclinação do talude de jusante é de 1:3 (V:H) e 1:2,5, respetivamente, acima e abaixo da cota do coroamento do pé de jusante em enrocamento (cota 75 m) que se prolonga numa berma estabilizadora também com 25 m.

No que se refere ao zonamento interno, o perfil tipo integra um núcleo central simétrico, com taludes a montante e a jusante inclinados a 1:0,75 (V:H), coroamento à cota 102,8 e 4 m de largura. A jusante do núcleo existe um filtro chaminé com largura de 3 m. O filtro prolonga-se sob o maciço estabilizador de jusante, no contacto com a fundação, até ao pé da barragem. A água percolada pelo filtro chaminé é recolhida por uma vala drenante longitudinal que a conduz, juntamente com a água percolada pela fundação da barragem, até às valas de drenagem transversais de perfil misto (filtro-dreno-filtro) e, posteriormente, até ao pé de jusante da barragem. O talude de montante do núcleo é também protegido por um filtro com 2 m de largura.

As zonas internas dos maciços estabilizadores de montante e de jusante são constituídas por materiais finos, nomeadamente, por argilas de baixo e de alta plasticidade, argilas arenosas ou areias-argilosas. As zonas exteriores são constituídas por enrocamento compactado de granulometria extensa e os respetivos paramentos protegidos por enrocamento arrumado.

No Quadro 1, apresentam-se suas principais características dos materiais de construção do aterro e na Figura 10, os fusos granulométricos definidos.

Quadro 1 – Características dos materiais de aterro

Materiais	% finos	IP (%)	LL (%)	ϕ' (°)	c' (kPa)
1	≥70	15-35	30-65	22	10
2	≤5	-	-	35	-
3	-	-	-	35	-
4	35-80	10-25	25-45	25	5
5	≤5	-	-	45	-
6	≤3	-	-	45	-

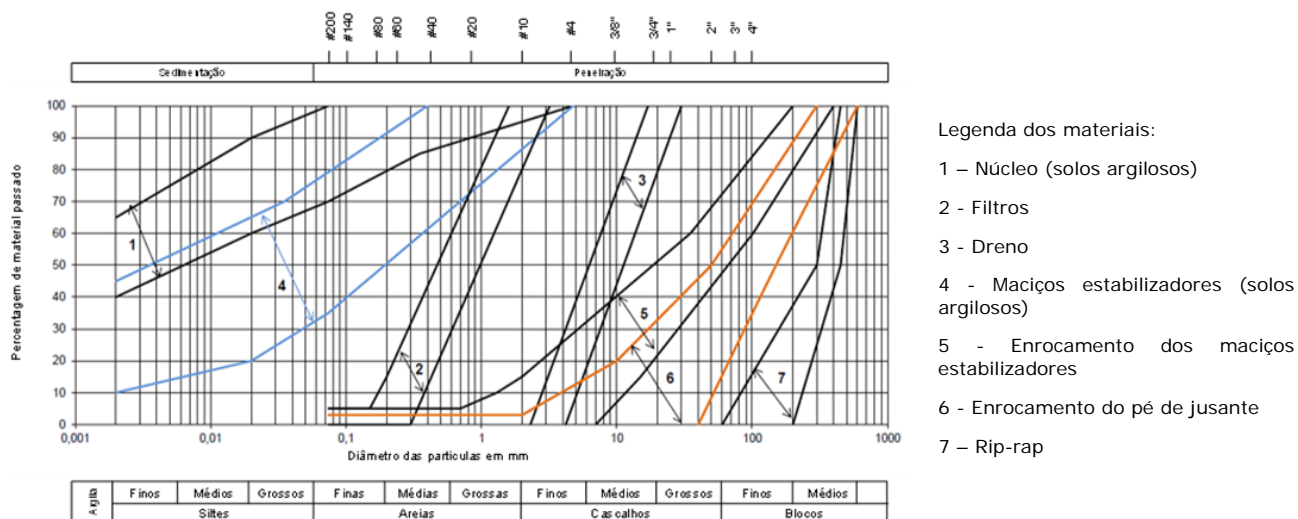


Figura 10 - Fusos granulométricos dos materiais da obra de aterro da Barragem de Saída

Os materiais argilosos, solos 1 e 4, serão, em princípio, provenientes das manchas de empréstimo localizadas no interior da área da futura albufeira, tendo sido previsto um programa de prospeção complementar a executar antes do início da obra (dentro e fora da área da futura albufeira).

Os solos argilosos ocorrem na área da futura albufeira em quantidade que se estima superabundante, não obstante, a sua exploração seletiva, de modo a excluir os materiais de elevada plasticidade e expansibilidade dos materiais que se pretende utilizar, afigura-se, à partida, difícil, em particular na margem direita.

4.3 - Tratamento da fundação

A solução de tratamento proposta consiste numa parede moldada, de betão plástico, com uma espessura de 0,80 m e uma profundidade variável, com um valor máximo de cerca de 25 m. A parede moldada desenvolve-se ao longo de 714 m, sob a fundação das cotas superiores do encontro direito da barragem principal e da portela da margem direita, interessando as zonas onde as camadas gresosas e arenosas de elevada permeabilidade têm mais expressão e continuidade montante-jusante.

A parede moldada será de betão plástico com a 0,80 m de espessura e executada por painéis primários e secundários, construídos alternadamente. O comprimento preconizado para os painéis primários é 2,80 m e o espaçamento entre painéis primários igual ou inferior a 1,40 m, podendo ser ajustada de acordo com o equipamento disponível.

4.4 - Estudos de dimensionamento e verificação

A barragem de Saída foi objeto de verificações de segurança relativas aos estados limites últimos e aos estados limites de utilização condicionantes do dimensionamento deste tipo de soluções.

No que se refere aos estados limite últimos, procedeu-se às verificações de segurança afins aos seguintes modos de rotura:

- erosão externa por galgamento;
- erosão interna por arrastamento mecânico;
- perda de estabilidade global.

A verificação da segurança à erosão externa por galgamento fez-se por intermédio de uma adequada fixação da folga, em relação ao NPA e em relação ao NMC, que serviu de base à fixação da cota do coroamento.

A cota do coroamento (104,50) foi, assim, estabelecida tendo por base um determinado nível de água na albufeira – NPA e NMC – que se combinou com a ocorrência de ventos atuantes sobre a albufeira e os seus efeitos (sobre-elevação da maré e ondulação com espraiamento sobre o paramento de montante da barragem) e com a ocorrência dos assentamentos de longo prazo da barragem.

A verificação da segurança à erosão interna por arrastamento mecânico fez-se, no que se refere aos materiais finos do núcleo, por intermédio do adequado dimensionamento do filtro chaminé (recorrendo

aos critérios de filtro e relações granulométricas definidas pelo US Army Corps of Engineers, bem como, pelo USBR), pela verificação da segurança à erosão interna da fundação, por intermédio da comparação entre os gradientes hidráulicos de saída e os gradientes hidráulicos críticos.

Os gradientes hidráulicos na fundação foram avaliados por intermédio dos estudos de fluxo realizados pelo programa SEEP/W que utiliza o método dos elementos finitos.

A verificação de segurança à perda de estabilidade global fez-se através de métodos de equilíbrio limite que avaliam os coeficientes de segurança de superfícies de rotura por insuficiente resistência ao corte, em situação estática e sísmica.

As verificações de segurança ao colapso por perda de estabilidade global foram realizadas para os perfis transversais considerados representativos da altura e geometria da barragem e das condições de fundação. Para estes perfis, foram estudadas as seguintes situações de cálculo:

- Fase de construção, paramento de montante;
- Fase de construção, paramento de jusante;
- Pleno armazenamento, paramento de jusante;
- Esvaziamento rápido, paramento de montante.

Para a análise sísmica da barragem, pela metodologia pseudo-estática, foi considerada uma aceleração máxima na fundação de 255 cm/s^2 para a situação de pleno armazenamento. A aceleração máxima de cálculo foi definida no estudo sísmológico realizado, tendo por base o método probabilístico, e correspondendo a um período de retorno de 1000 anos.

Na Figura 11 apresenta-se alguns exemplos ilustrativos dos cálculos realizados.

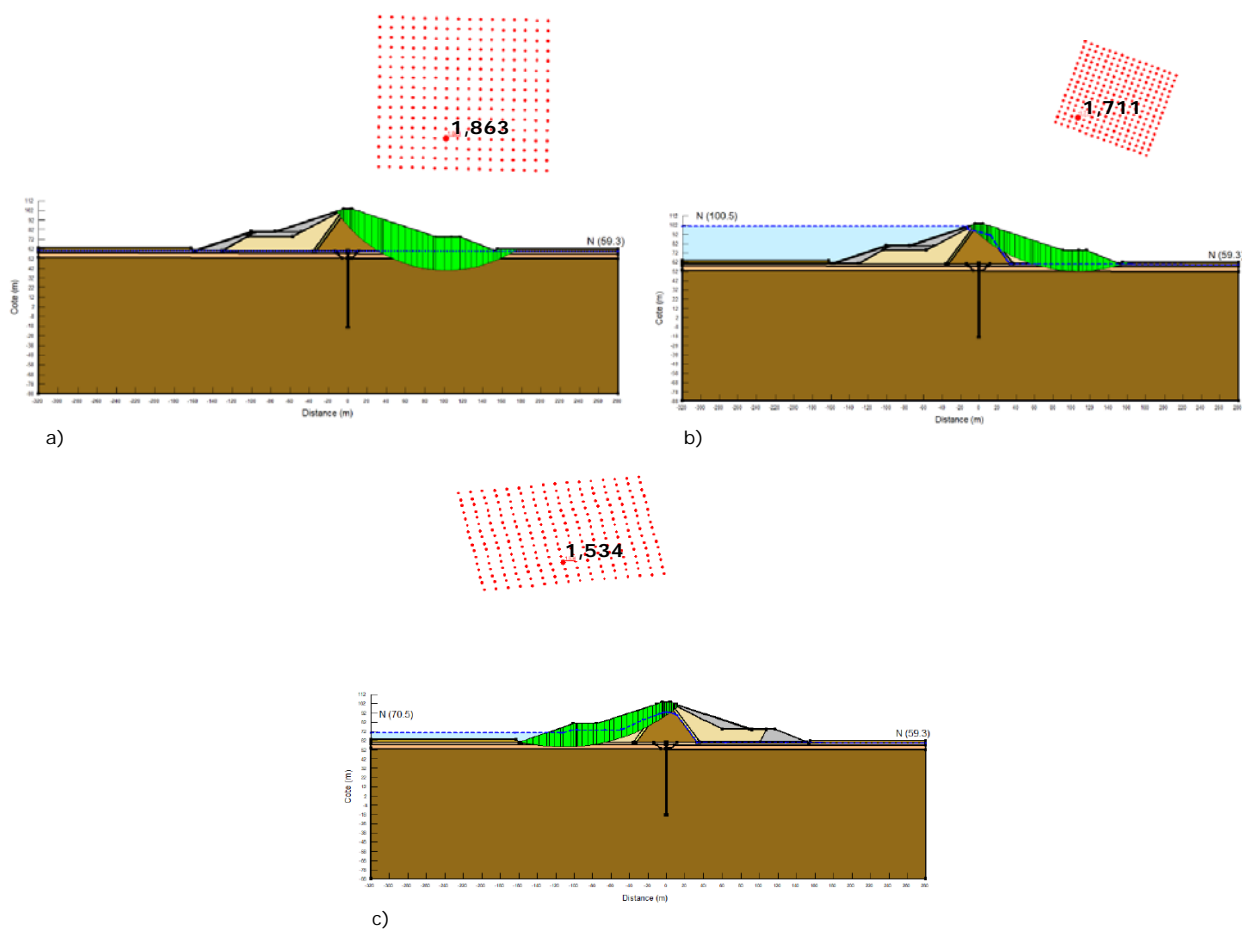


Figura 11 – Verificação de segurança ao colapso por perda de estabilidade global. Situação estática. a) Fase de construção. Talude de jusante. FS = 1,863; b) Pleno armazenamento. Talude de jusante. FS = 1,711; c) Esvaziamento rápido. Talude de montante. FS = 1,534

5 - CONCLUSÕES

No presente artigo sumarizou-se a análise crítica dos elementos geológico-geotécnicos de base e da conceção e arranjo geral da solução do projeto original.

O modelo geológico-geotécnico desenvolvido no âmbito da revisão de projeto identificou a presença de camadas arenosas de elevada permeabilidade, com continuidade montante-jusante na margem direita do vale, zona onde foi definido um tratamento com recurso a parede moldada de betão plástico.

Relativamente aos materiais de construção, existem na área da futura albufeira disponibilidades superabundantes, pese embora o elevado volume de materiais em questão. Não obstante, a ocorrência de argilas muito plásticas (de difícil trabalhabilidade, expansivas e com indicadores de dispersividade) intercaladas com argilas de baixa plasticidade e atividade e com solos areno-argilosos, dificultará os trabalhos de exploração seletiva dos materiais de aterro. Por este motivo restringiu-se, à partida, a exploração dos materiais finos à margem esquerda da albufeira, onde se afigura mais fácil a sua exploração seletiva.

Os estudos de revisão do projeto não contemplavam a realização de trabalhos de prospeção complementar. No entanto, as incertezas associadas quer às complexas condições de fundação da barragem quer aos materiais de construção fundamentaram a realização de um programa de prospeção complementar implementado em duas fases: i. uma primeira acompanhando os estudos de revisão, já concluída, e que permitiu reduzir significativamente as incertezas relativas às zonas de percolação preferencial pela fundação da barragem e aos materiais de construção e ii. uma segunda, a realizar antes do início da obra e do projeto de execução, para ratificação ou retificação dos modelos e soluções do projeto geotécnico adotados.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à DGBGTH, pela autorização de divulgação dos dados e dos trabalhos efetuados no âmbito do Projeto Base da Barragem de Saida.

REFERÊNCIAS

Aqualogus, (2017) - Barrage Saida et ses Ouvrages de Transfert. Actualisation de l'Avant-Projet Detaille.