

ESTAÇÃO ELEVATÓRIA E TÚNEL DE RESTITUIÇÃO DOS SOCORRIDOS

THE SOCORRIDOS PUMPING STATION AND WATER STORAGE TUNNEL

Ambrósio, António, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, aambrosio@cenorgeo.pt*
Brito, J. Mateus, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, mbrito@cenorgeo.pt*
Rosa, Sérgio, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, srosa@cenorgeo.pt*
Santos, Jaime, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, jsantos@cenorgeo.pt*
Sousa, J. Almeida, *FCTUC, Coimbra, Portugal, jas@dec.uc.pt*
Pedro, António, *FCTUC, Coimbra, Portugal, amgpedro@dec.uc.pt*

RESUMO

A estação elevatória e o túnel dos Socorridos localizam-se na ilha da Madeira, tendo como objectivo o armazenamento de água para produção de energia eléctrica e abastecimento público. Trata-se duma estação subterrânea com 26 m de altura associada a um túnel com 1250 m de comprimento, descrevendo-se neste artigo os principais aspectos das fases de projecto e de obra.

ABSTRACT

The Socorridos pumping station and water storage tunnel are located in Madeira island, with the purpose of electrical power production and public water supply. The facility includes a 26 m high underground cavern and a 1250 m length tunnel. Design and construction aspects are described in this paper.

1. INTRODUÇÃO

O Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos, situado na ilha da Madeira, integra uma vasta rede de reservatórios, túneis, canais e estruturas associadas para produzir energia eléctrica e para o abastecimento de água à região, incluindo à cidade do Funchal. A concepção da estação elevatória e do túnel de restituição dos Socorridos (obras já concluídas) tirou partido da existência da central hidroeléctrica dos Socorridos (Figura 1); esta situa-se na margem direita da ribeira com o mesmo nome e produz energia a partir de caudais turbinados provenientes duma conduta forçada (460 m de queda), também com funções de abastecimento de água ao Funchal.

Actualmente, a água turbinada na central dos Socorridos é devolvida directamente à ribeira, tendo por isso surgido a ideia de a armazenar num túnel com 40000 m³ de capacidade para ser depois elevada por bombagem para montante, à noite, e então novamente turbinada. Assim, concebeu-se um sistema constituído por: i) um túnel de restituição (que armazena a totalidade dos caudais turbinados pela central hidroeléctrica, restituindo-os posteriormente ao sistema); ii) uma estação elevatória subterrânea (albergando quatro bombas de eixo vertical com grande capacidade); iii) um túnel auxiliar (de acesso directo ao túnel de restituição e à parte inferior da estação); iv) uma galeria de restituição (ligando a central hidroeléctrica à estação); v) uma galeria de descarga de areias (associada ao sistema de desarenamento que foi concebido).

É de referir que, face às características da obra, foi dado particular ênfase aos trabalhos de caracterização geológico-geotécnica do maciço [1], bem como à modelação numérica e, por fim, ao sistema de observação implementado no acompanhamento de toda a execução da obra.

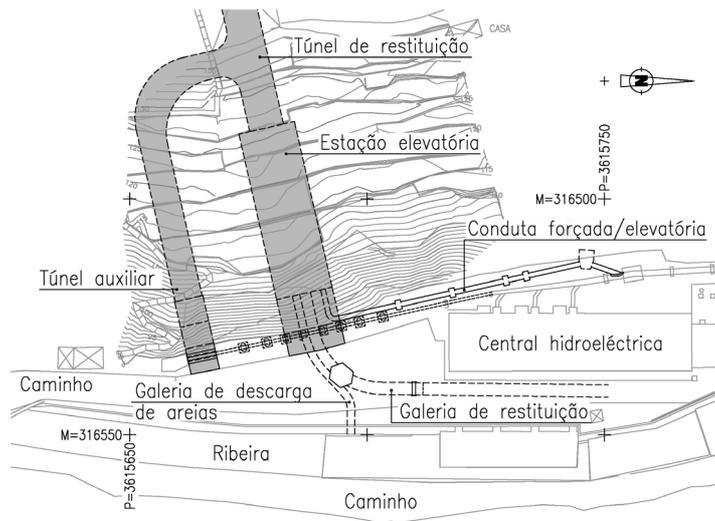


Figura 1 – Planta geral do aproveitamento

Na Figura 2 apresenta-se o alçado dos emboquilhamentos na base da encosta, podendo ver-se o túnel auxiliar e a metade superior da estação elevatória (fotografia de Junho de 2005).

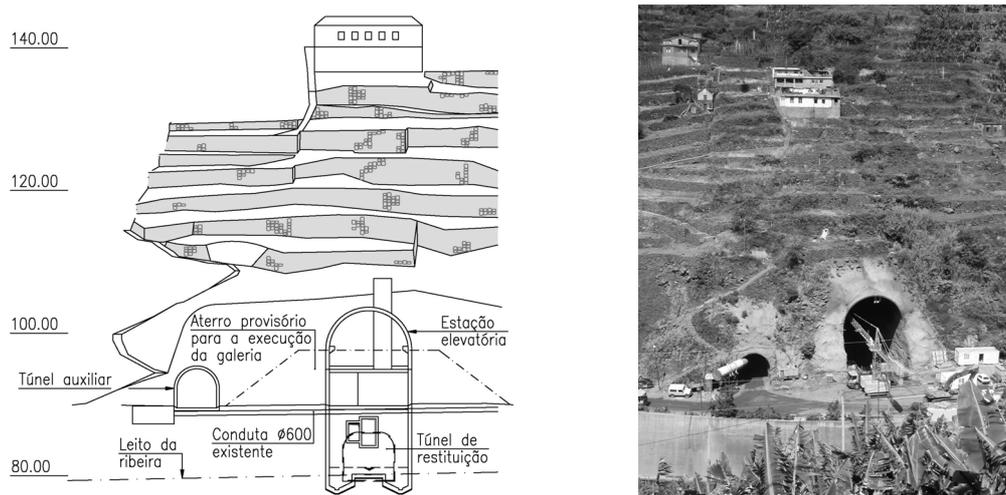


Figura 2 – Alçado dos emboquilhamentos do túnel auxiliar e da estação elevatória

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

A obra insere-se no vale da ribeira dos Socorridos e foi executada a partir da plataforma de aterro onde se localiza a central hidroeléctrica. Para a caracterização geológico-geotécnica dos terrenos implementou-se um programa de prospecção com seis sondagens $\phi 76$ mm à rotação, na zona da estação elevatória, e quatro poços para reconhecer as condições de fundação da conduta de abastecimento de água. Complementarmente, realizaram-se ensaios *in situ* e laboratoriais.

Nas sondagens foram efectuados seis ensaios Lugeon, para caracterização da permeabilidade das formações, e 20 ensaios com dilatómetro (LNEC), para determinar as características de deformabilidade do terreno. Foram ainda recolhidos tarolos de rocha para a realização de 11 ensaios de compressão uniaxial, tendo em vista a determinação das características de resistência do material rochoso (tensão de rotura, módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson), bem como da sua massa volúmica e porosidade (utilizando o material restante dos tarolos).

O zonamento dos maciços interessado pela estação elevatória e pelos túneis foi definido com base no reconhecimento geológico de superfície efectuado, nos resultados da campanha de prospecção e ensaios realizados e ainda pelo conhecimento e pela experiência de outras obras na área. Assim, o zonamento efectuado para a estação envolve duas formações - a superior abrange toda a abóbada e é constituída por formações aluvionares consolidadas; a inferior é constituída por um maciço basáltico/brechóide, de qualidade razoável (Figura 3). Os parâmetros atribuídos a cada zona apresentam-se no Quadro 1 (peso volúmico - γ ; módulo de deformabilidade - E; coeficiente de Poisson - ν ; coesão efectiva - c' ; ângulo de resistência ao corte efectiva - ϕ').

Quadro 1 – Parâmetros adoptados no dimensionamento geotécnico da estação elevatória

Terreno	γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν	c' (kPa)	ϕ' (°)
Formações aluvionares	21	1,0	0,38	60	32
Maciço rochoso	22	1,5	0,38	80	36

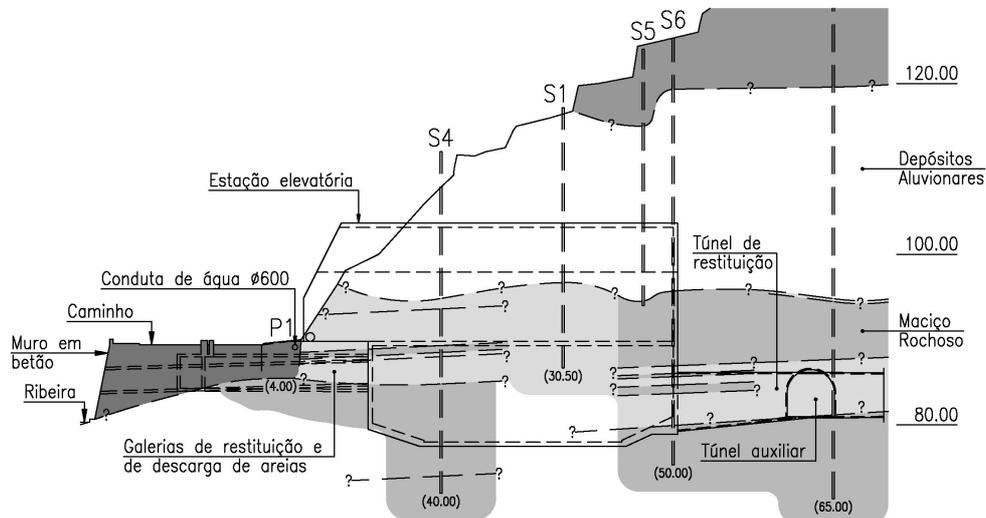


Figura 3 – Perfil geológico-geotécnico ao eixo da estação elevatória

Para ambos os túneis foi considerado um zonamento geotécnico dos maciços abrangendo três classes (ZG1 a ZG3) para efeitos de dimensionamento, de acordo com o exposto no Quadro 2; em obra verificou-se posteriormente um claro predomínio das zonas geotécnicas ZG1 e ZG2.

Quadro 2 – Zonamento geotécnico definido para os túneis

ZG1	Basaltos compactos e brechas compactas
ZG2	Basaltos fracturados, com intercalações de materiais de piores características
ZG3	Brechas desagregadas e tufos compactos

3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA OBRA

3.1 Consolidação da encosta

Face às características geológico-geotécnicas da encosta, em cuja base se inserem os emboquilhamentos da estação elevatória e do túnel auxiliar, foi necessário prever a sua consolidação, simultaneamente com a instalação da totalidade dos equipamentos de observação.

Assim sendo, na zona envolvente da metade superior da estação elevatória foi executada uma auréola com 3,6 m de largura, constituída por betão projectado ($e=0,10$ m) associado a uma malha electrossoldada tipo malhasol AQ50 e pregagens sistemáticas em varão de aço $\phi 32$ (comprimentos de 6 e 8 m), seladas com calda de cimento e dispostas em quincôncio numa malha de 1,2 m x (1,5 a 2,0 m) – Figura 7. Na zona envolvente do emboquilhamento do túnel auxiliar foi aplicado betão projectado em conjunto com uma malha electrossoldada tipo AQ50.

3.2 Estação elevatória

Descrição geral:

A estação elevatória é constituída por uma caverna com cerca de 26 m de altura, 12 m de largura e 44 m de comprimento (Figura 4 e Figura 5), tendo o emboquilhamento localizado na plataforma de aterro existente na base da encosta, junto à central hidroeléctrica. A geometria da estação foi condicionada pela dimensão das quatro bombas de eixo vertical a instalar no seu interior (cada uma com 16 m de altura total), bem como pela altura necessária para as operações com a ponte rolante, que cobre toda a estação - é de referir que as bombas permitirão elevar 40000 m^3 , vencendo um desnível de 460 m em 6 horas, recorrendo à conduta forçada existente.

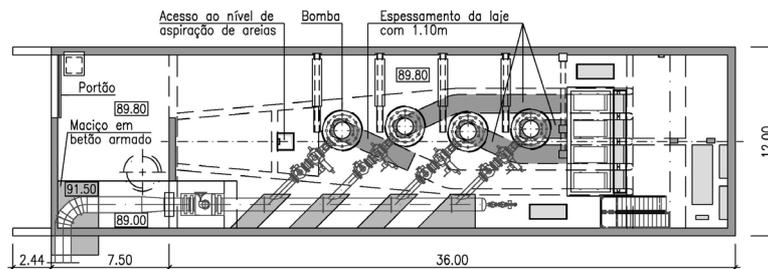


Figura 4 – Planta do piso térreo da estação elevatória

A estação divide-se numa parte inferior, que acomoda as flutuações do nível da água e incorpora o sistema de desarenamento, e uma superior, destinada à parte operacional dos equipamentos, nomeadamente para acesso à sala de comando e aos motores das bombas (Figura 5). É de referir que o piso térreo está à cota da plataforma exterior, permitindo o acesso a veículos pesados.

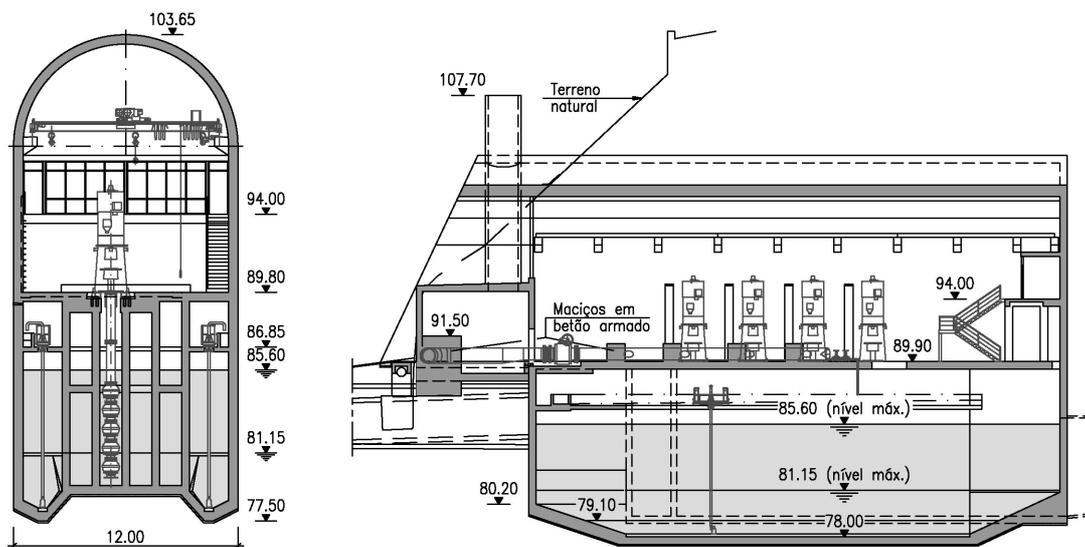


Figura 5 – Cortes transversal e ao eixo da estação elevatória

Tendo por objectivo reter as areias e as partículas finas provenientes dos caudais turbinados pela central hidroeléctrica, evitando a danificação das bombas, foram concebidos dois canais desarenadores que, após receberem a água da central, descarregam-na já sem partículas finas na zona entre a estação elevatória e o túnel de restituição; cada um tem 36 m de comprimento e uma secção de 2 m x 3 m. As partículas são depois aspiradas para caleiras localizadas a cotas mais altas (Figura 5) e então conduzidas para a ribeira através da galeria de descarga de areias.

Atendendo às características hidrogeológicas do maciço, previu-se um sistema de drenagem e impermeabilização do contorno exterior, em todo o desenvolvimento da parte superior da estação elevatória, constituído por uma geomembrana em PVC ($e=2$ mm) sobre um geotêxtil (500 g/m^2) com funções drenantes. A água recolhida é conduzida por gravidade a drenos geocompósitos tipo Stabidrain ($0,30 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}$) que se desenvolvem ao longo de todo o perímetro da estação, sendo finalmente conduzida ao interior da estação, para a zona de armazenagem, através de bueiros $\text{Ø}90$ em tubo de PVC, dispostos com um afastamento de 3 m.

Faseamento executivo da estação:

Para executar a zona superior da estação elevatória construiu-se um aterro com 8 m de altura, que permitiu também a realização dos tratamentos de consolidação da encosta. Este foi definido com taludes inclinados a 1H/1V para manter o acesso à central hidroeléctrica e ao túnel auxiliar, tendo-se aplicado sobretudo materiais provenientes da escavação do túnel auxiliar (obra em curso nessa altura). Uma vez executado o aterro e consolidada a encosta, a escavação da estação realizou-se de cima para baixo, por patamares, tendo-se imposto limitações aos avanços das frentes, em função das características geotécnicas ocorrentes; na zona superior da abóbada, a secção transversal foi parcializada (Figura 6), tendo-se executado avanços de 1 m e desfasado as frentes de 12 m entre si; nos patamares inferiores permitiram-se avanços de 3 m. É de salientar que, em virtude da abóbada se encontrar integralmente em depósitos aluvionares, foi executado um túnel piloto ao longo de toda a estação, o que permitiu aferir o comportamento do terreno.

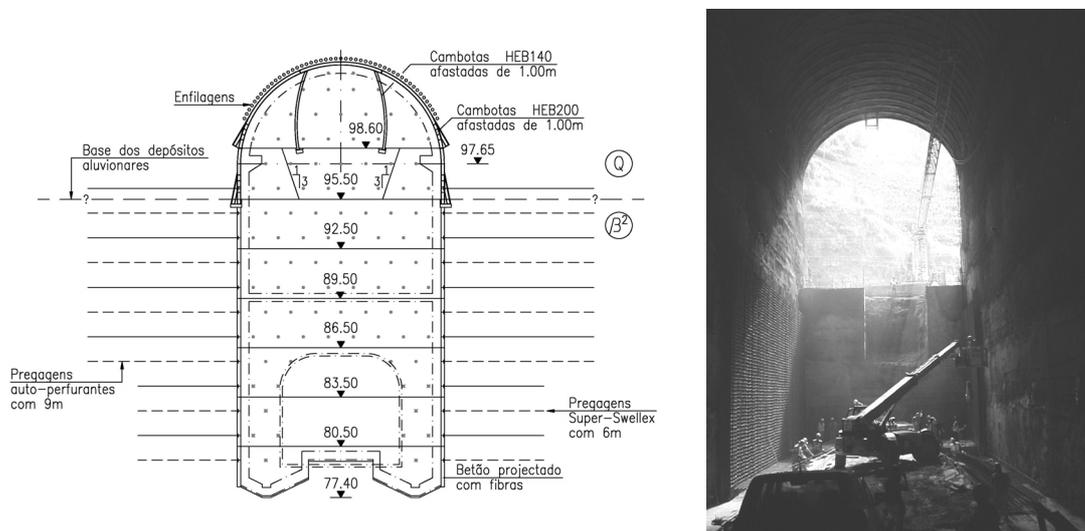


Figura 6 – Faseamento executivo e sustimentos. Secção transversal da estação elevatória

Sustimentos adoptados na estação:

Tendo em conta o comportamento traduzido pelas análises numéricas efectuadas, contemplando as várias fases executivas, definiu-se para a secção transversal e para as paredes de topo um sustimento sistemático constituído por betão projectado e fibras metálicas ($e=0,20$ m) e com cambotas ou pregagens (em função do tipo de terreno), conforme se descreve de seguida.

Tendo em vista evitar a descompressão dos depósitos, realizaram-se três chapéus de enfilagens (Figura 7) no perímetro exterior da abóbada (tubos $\phi 73$ mm SCH40 // 0,30 m), cada uma com comprimento de 12 m e manchetes afastadas de 1 m (técnica IRS). Ao abrigo destas foram colocadas cambotas HEB200 afastadas de 1 m no perímetro exterior e travadas na base por pregagens auto-perfurantes (9 m de comprimento) tipo Atlas Copco MAI SDA R38N, afastadas de 1,50 m. No túnel piloto colocaram-se cambotas HEB140 afastadas de 1 m, tendo-se adoptado uma espessura de 0,15 m para o betão projectado com fibras, em conjunto com malhasol CQ30.

No maciço brechóide (zona central da estação, com maiores descompressões) adoptaram-se pregagens auto-perfurantes (malha de 1,5 m x 2,0 m). Na base da estação executaram-se pregagens Super Swellex (6 m de comprimento) numa malha igual à das auto-perfurantes.

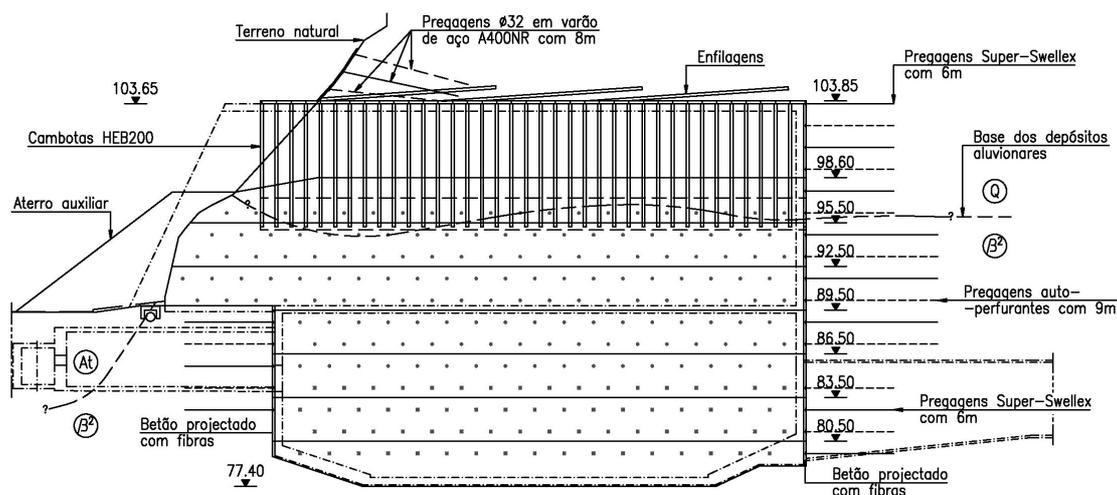


Figura 7 – Faseamento executivo e sustimentos. Perfil ao eixo da estação elevatória

Revestimento definitivo da estação:

A escolha da classe do betão utilizado no revestimento definitivo e nas estruturas internas da estação (C30/37) foi determinada pelos valores de pH da água (5,5 a 6,5), de acordo com análises físico-químicas efectuadas em vários locais do Aproveitamento dos Socorridos.

O revestimento definitivo da estação é constituído por paredes em betão armado ($e=0,50$ m), encimadas por uma abóbada semi-circular ($e=0,50$ m) com raio interior de 5,50 m. A altura total é de cerca de 26 m, havendo a referir a existência de um travamento a meio, materializado pela laje do piso térreo. Na metade inferior da estação, apesar das importantes pressões exteriores, o facto do sistema de aspiração de areias percorrer toda a estação impossibilitou o travamento das paredes. No entanto, colocaram-se dois níveis de bueiros (PVC $\phi 90$ afastados de 3 m), para limitar a subida de água no exterior e para a drenagem dos caudais do sistema perimetral.

É ainda de referir que a parede de fundo, para além de estar sujeita a pressões longitudinais significativas do terreno, apresenta também vãos significativos, sobretudo na zona superior; de facto, na zona inferior, a parede beneficia da existência do túnel de restituição.

Estruturas internas:

A zona de apoio das bombas é maciça, em betão armado, desenvolvendo-se entre o fundo da estação e a laje do piso térreo; quanto aos canais de alimentação das bombas, estes são constituídos por paredes em betão armado ($e=0,40$ m). Para os canais, a situação mais gravosa

de dimensionamento ocorre quando um deles é fechado para manutenção (através de segmentos de ensecadeira), ficando apenas com água no exterior – assim, para reduzir o vão livre das paredes, efectuou-se o travamento dos canais através de troços de laje ($e=0,40$ m).

A laje do piso térreo ($e=0,50$ m) é condicionada por diversas aberturas, a maior com uma secção de $3,80$ m x $1,30$ m; estas são necessárias para a passagem de cabos, para a passagem do carrinho de aspiração de areias, para acesso ao piso inferior ao térreo (onde se recebem as areias aspiradas) e para acesso do guincho da ponte rolante às ensecadeiras dos canais das bombas.

Das estruturas internas salientam-se ainda os maciços de amarração das condutas $\phi 800$ e $\phi 1000$, o piso de comando (elevado face ao piso térreo), as caleiras de recolha de areias, os apoios da ponte rolante e a chaminé com $12,60$ m de altura e um diâmetro de $2,40$ m ($e=0,20$ m).

3.3 Túnel de restituição e túnel auxiliar

O túnel de restituição tem 1250 m de comprimento e uma secção transversal de 7 m x 5 m, por forma a permitir o armazenamento pretendido (40000 m³). A inclinação do túnel é de cerca de 10% no troço entre a estação e a intersecção com o túnel auxiliar, e de $0,1\%$ daí em diante. O traçado do túnel foi definido em fase de execução, procurando as formações de melhores características geológico-geotécnicas em termos de estabilidade e de estanquidade, reduzindo ainda os custos associados; assim, foram efectuadas várias ramificações, facilitando a circulação dos veículos no seu interior e permitindo a criação de múltiplas frentes de obra (Figura 8).

O túnel auxiliar tem como função permitir o acesso ao túnel de restituição e à estação elevatória, para a realização de trabalhos de inspecção e manutenção, tendo também sido utilizado como acesso em fase de obra. Tem 73 m de comprimento e uma secção transversal de $5,5$ m x $5,5$ m, sendo horizontal nos 10 m iniciais e depois inclinado a $13,5\%$ até ao túnel de restituição.

Os sustimentos foram definidos em todo o perímetro, servindo também como revestimento definitivo – no Quadro 3 definem-se as soluções adoptadas, apresentando-se na Figura 9 as secções correspondentes apenas à zona ZG2. Quanto ao faseamento executivo, a zona ZG1 foi escavada em secção plena (em zonas de piores características efectuaram-se avanços de 10 m na meia secção superior), ao passo que nas zonas ZG2 e ZG3 se procedeu primeiro à execução da meia secção superior e só depois à da meia secção inferior – nestas zonas adoptaram-se avanços de 2 m para ZG2 e de 1 m para ZG3, mantendo uma distância de 20 m à frente de escavação.

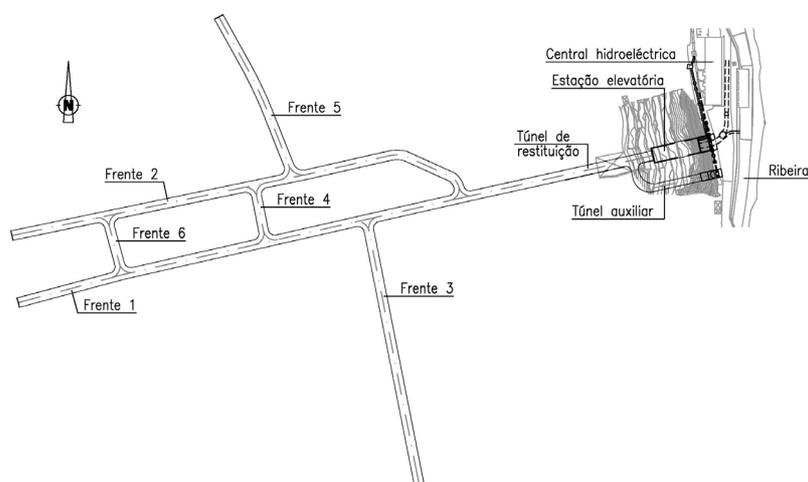


Figura 8 – Traçado dos túneis, em planta

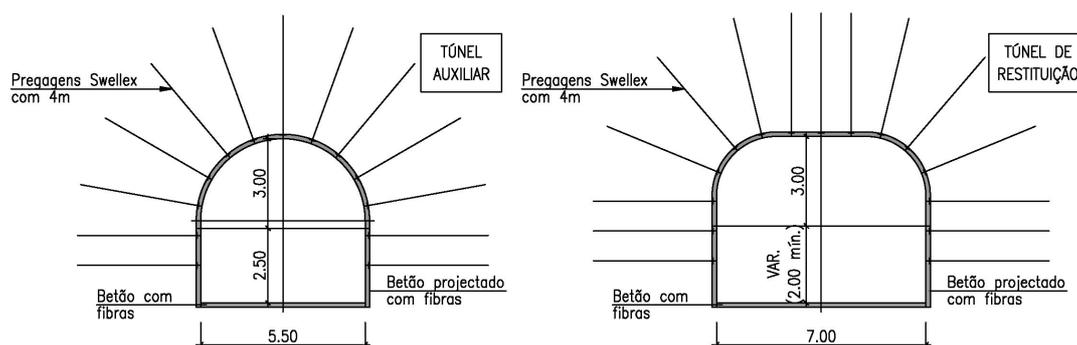


Figura 9 – Revestimentos tipo dos túneis para a zona ZG2

Quadro 3 – Sustimentos / revestimentos dos túneis

ZG1	Bp com fibras metálicas (0,15 m) + Pregagens Swellex (4 m), pontuais na abóbada
ZG2	Bp com fibras metálicas (0,15 m) + Pregagens Swellex (4 m), sistemáticas na abóbada (malha de 2 m x 2 m) e pontuais nos hasteais
ZG3	Bp com fibras metálicas (0,20 m nos hasteais e na abóbada do túnel de restituição; 0,15 m nos restantes casos) + Cambotas HEB160 afastadas de 1 m

3.4 Galerias de restituição e de descarga de areias

Os caudais turbinados pela central hidroeléctrica são conduzidos pela galeria de restituição até à estação elevatória; esta galeria, cujo desenvolvimento é de cerca de 37 m, tem uma secção transversal de 2 m x 4 m. A galeria é subterrânea, em betão armado ($e=0,30$ m), com uma inclinação de 0,3%, e tem um recobrimento de cerca de 1,20 m de aterro sobre a laje de topo.

A galeria de descarga de areias, em betão armado ($e=0,30$ m), é adjacente à galeria de restituição em cerca de dois terços do seu desenvolvimento, tendo como principal função a descarga das areias provenientes do sistema de desarenamento da estação, conduzindo-as até à ribeira; a galeria ficou com a saída directamente no muro que suporta os aterros da plataforma. O seu comprimento total é de cerca de 33 m, tendo uma secção transversal de 1 m x 2,50 m.

No trecho em que as galerias são adjacentes, a parede que lhes é comum foi dotada de quatro janelas de descarga (secção de 2,50 m x 0,80 m), que funcionam como descarregadores de emergência na eventualidade do nível da água subir excessivamente no interior da estação. Para o controlo operacional previram-se os seguintes equipamentos: i) uma comporta-ensecadeira junto à central hidroeléctrica, que permite colocar ambas as galerias a seco; ii) uma comporta de controlo entre as galerias; iii) uma comporta de seccionamento da galeria de restituição, colocada imediatamente a jusante da comporta referida no ponto ii.

3.5 Fundação e protecção da conduta de abastecimento de água existente

A conduta de abastecimento de água ao Funchal, enterrada junto à encosta na plataforma da central hidroeléctrica, revelou-se o principal condicionamento “externo” à execução das obras. De facto, sendo os aterros de fundação da conduta deformáveis, verificou-se que esta não possuía resistência estrutural suficiente para fazer face aos assentamentos induzidos na plataforma pelo aterro de 8 m a construir para permitir a execução da zona superior da estação. Por outro lado, a conduta também não estava preparada para a passagem de veículos pesados (para entrar na estação e no túnel auxiliar), quer em fase de obra, quer em fase definitiva.

Assim sendo, e uma vez que não seria admissível interromper o abastecimento de água ao Funchal, foi necessário dotar a conduta de condições de fundação adequadas no maciço rochoso (pegões em betão afastados de cerca de 4 m), para além desta ter sido protegida com elementos estruturais amovíveis nas zonas de passagem de veículos (vigas em betão armado com secção em “U” invertido, apoiadas nos pegões, num comprimento total de 18 m). É de salientar que esta conduta, de diâmetro $\phi 600$, está submetida a pressões internas muito elevadas (4600 kPa).

4. DIMENSIONAMENTO

Para além da estação ficar inserida na base da encosta, o comportamento dos depósitos aluvionares ao nível da abóbada suscitou na fase de projecto muitas dúvidas, tendo-se considerado crucial a modelação dos sustimentos, em conjunto com o faseamento executivo a adoptar. Assim, recorreu-se a um programa de elementos finitos para modelar o comportamento da estrutura em interacção com o terreno (Plaxis), o que permitiu avaliar as deformações e o estado de tensão (fortemente condicionados pelo relevo, neste caso), bem como os esforços em todos os elementos estruturais de sustimento, ao longo das várias fases construtivas da obra; considerou-se uma lei de comportamento elástico perfeitamente plástico obedecendo ao critério de rotura de Mohr-Coulomb. Utilizaram-se modelos de cálculo 3D (Figura 10), complementados por modelos 2D, tendo-se realizado estudos paramétricos para avaliar a influência dos vários parâmetros na estabilidade global e na eficiência dos sustimentos.

As análises efectuadas permitiram definir soluções compatíveis com a resistência das formações ocorrentes e dos elementos estruturais, para além de se terem limitado as plastificações e as deformações a valores aceitáveis (distorções máximas de 0,1% e deslocamentos verticais e horizontais máximos de 6 a 8 mm). É ainda de referir que, apesar dos esforços não serem muito elevados nas pregagens, estas desempenharam um papel preponderante na estabilidade do conjunto, evitando a descompressão excessiva do maciço e a ocorrência de instabilidades importantes, face aos níveis de tensão envolvidos, que são razoáveis.

Para a modelação do revestimento definitivo da estação recorreu-se ao método das reacções hiperestáticas, utilizando o programa Portic, tendo-se modelado a interacção com o terreno através de apoios elásticos sem resistência à tracção. Quanto às acções verticais, considerou-se que, face ao reduzido recobrimento da caverna, todo o maciço seria solicitado, numa altura média de 12 m; admitiu-se uma transmissão de 70% da carga ao revestimento definitivo, por efeito de arco, tendo as pressões horizontais sido determinadas através dum coeficiente de impulso “próximo” do activo, contando apenas com a componente atrítica do terreno. É de referir que os cálculos foram complementados com análises tipo tensão-deformação.

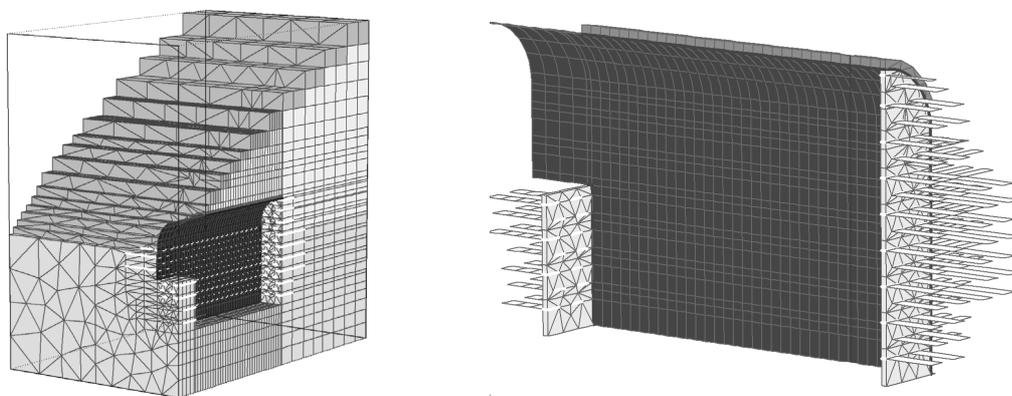


Figura 10 – Modelação através do método dos elementos finitos

Do dimensionamento das estruturas internas da estação há a salientar o facto das armaduras das paredes dos canais de alimentação das bombas terem sido condicionadas pela verificação ao estado limite de utilização relativo à fendilhação, tendo-se limitado a abertura de fendas a um valor característico de 0,2 mm, em face dos resultados disponíveis das análises da água.

Quanto ao maciço de amarração mais importante (conduta $\phi 1016$, na curva a 90° à entrada da estação), a força de dimensionamento máxima é de 7375 kN, o que implicou a execução de ferrolhos em varão $\phi 32$ na base (malha de 1,00 m x 0,75 m) para ligação ao maciço rochoso.

O dimensionamento dos sustimentos/revestimentos dos túneis efectuou-se com base em análises com o método das reacções hiperestáticas, tendo em conta as regras associadas à classificação geomecânica de maciços rochosos para túneis de Bieniawski e as recomendações da AFTES, mas tendo sempre presentes as particularidades das formações vulcânicas ocorrentes.

5. OBSERVAÇÃO DA OBRA

Tendo em conta as características dos terrenos em que se insere o aproveitamento, que tem a particularidade de ser subterrâneo, e de ser também condicionado pelo efeito de encosta sobretudo no que à estação elevatória diz respeito, foi definido um plano de observação que procurou dar resposta às principais preocupações na fase de obra, resultantes do projecto. É de referir que este plano foi implementado escrupulosamente, o que permitiu validar os modelos de cálculo e otimizar em obra alguns aspectos do projecto, reduzindo custos e prazos de execução.

A instrumentação na estação foi distribuída em seis perfis transversais, afastados de 7 m, para medição das seguintes grandezas: i) assentamentos à superfície (24 marcas topográficas, nos seis perfis); ii) deslocamentos verticais no maciço sobre a abóbada (seis extensómetros de varas, cada um com dois pontos de leitura, em dois perfis); iii) deslocamentos horizontais no maciço, na zona adjacente às paredes laterais (quatro extensómetros horizontais, cada um com três pontos de leitura, e quatro inclinómetros, em dois perfis); iv) convergências (três alvos no túnel piloto, acrescidos de outros quatro na abóbada da estação, e ainda mais dez alvos nos seis patamares de escavação da estação, distribuídos em cinco perfis).

Nos túneis previu-se apenas a medição de convergências, dispondo cada secção de cinco alvos (três na abóbada e dois na base dos hasteais); no túnel auxiliar instalaram-se três secções, ao passo que no túnel de restituição foram instaladas secções nas zonas de piores características do maciço, com afastamentos da ordem de 75 m – exceptuou-se a zona de ligação ao túnel auxiliar, onde se consideraram duas secções, uma a montante e outra a jusante da ligação. Foi ainda prevista a instalação duma secção de medição de convergências, com cinco alvos, junto à zona de ligação do túnel de restituição com a estação elevatória.

Complementarmente às leituras dos instrumentos de observação, foram efectuadas inspecções visuais diárias em toda a obra, para detectar eventuais anomalias de comportamento entre zonas instrumentadas e, ocasionalmente, verificar a validade de valores de observação inesperados.

A periodicidade das leituras de todos os dispositivos de observação foi definida como diária até à conclusão dos sustimentos da estação elevatória e em dias alternados até à conclusão do revestimento definitivo, passando depois a semanal. Posteriormente, a frequência foi sendo ajustada até ao final da obra em função da evolução dos deslocamentos observados.

Embora a evolução das observações ao longo do tempo constitua o mais importante indicador do comportamento das obras, definiram-se limites de atenção e alarme com base nos resultados

das análises numéricas, para se dispor de valores de referência para a interpretação das leituras, estabelecendo também a ligação aos cálculos efectuados. Assim, definiu-se como limite de atenção um valor de 9 mm para os deslocamentos (horizontais e verticais), considerando-se que, até este valor, o comportamento da estação estaria dentro do expectável; ao limite de alarme atribuiu-se o valor de 18 mm que, a ser atingido, implicaria a adopção de medidas apropriadas.

Na prática verificou-se que os deslocamentos registados nunca foram superiores a 7 mm, apresentando-se na Figura 11 os resultados de dois dos extensómetros verticais, ao longo da execução da obra (pontos B e C). Em comparação com as previsões do projecto, obtidas através das análises efectuadas com o método dos elementos finitos (3D e 2D), e tendo em conta que houve alguns ajustamentos introduzidos em obra ao faseamento executivo, considera-se que os valores reais não sofreram desvios muito significativos face ao que se esperava.

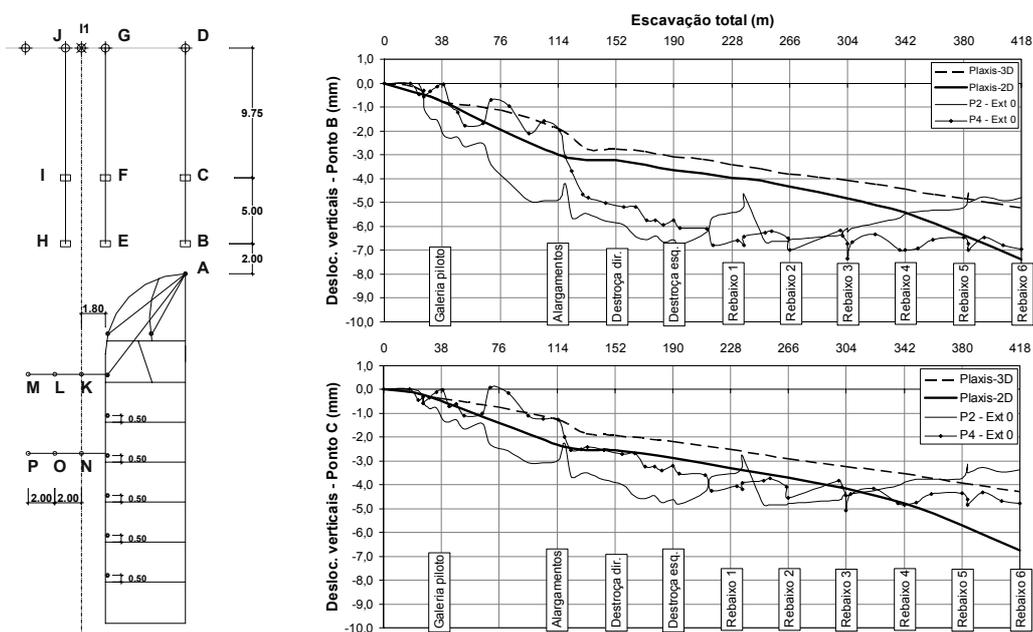


Figura 11 – Resultados dos extensómetros verticais ao longo da execução da obra

É ainda de referir que, face à proximidade da estação elevatória relativamente à central hidroeléctrica, que tem em funcionamento no seu interior equipamentos com alguma sensibilidade a vibrações, a utilização de explosivos para a escavação subterrânea da estação e dos túneis foi limitada, tendo-se controlado as vibrações com sismógrafos colocados na central.

6. CONCLUSÕES

A estação elevatória e o túnel de restituição dos Socorridos integram o Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos, na ilha da Madeira, tratando-se duma obra subterrânea com particularidades interessantes, não só face às dimensões da estação elevatória, que tem uma altura total de cerca de 26 m, mas também pelos muitos condicionamentos associados, quer em fase de projecto, quer em fase de obra, dos quais se destacam os seguintes:

- As condições topográficas em que se insere a estação, na base duma encosta, induzem efeitos tridimensionais importantes, que levaram à realização de análises 3D da estação;
- As condições geológico-geotécnicas no local são delicadas, dado que, na totalidade da abóbada, a estação insere-se num depósito aluvionar muito espesso, o que obrigou a

prever um faseamento executivo complexo e exigente, associado a sustimentos pesados, tendo em vista evitar a descompressão dos depósitos e a instabilização do terreno;

- A condução de abastecimento de água ao Funchal existente no local não podia desactivar-se sequer temporariamente, pelo que teve de ser devidamente fundada e protegida para permitir a realização das obras, nomeadamente para a construção dum aterro provisório com 8 m de altura, e para permitir a passagem de veículos pesados na fase definitiva;
- Foram estabelecidos prazos de execução da empreitada exigentes, tendo o projecto sido elaborado com o Empreiteiro já em obra; a totalidade das obras de construção civil decorreu sensivelmente entre finais de Dezembro de 2004 e finais de Dezembro de 2005.

Salienta-se ainda o facto da caracterização geológico-geotécnica ter incluído a realização de ensaios dilatométricos, para determinar as características de deformabilidade dos depósitos aluvionares e do maciço brechóide, o que se considera ter sido fundamental para a modelação numérica que se efectuou no projecto, e que veio a revelar-se ajustada na fase de obra. Com efeito, para o dimensionamento da estação foram efectuadas diversas análises 3D, complementadas por análises 2D, tendo-se para o efeito recorrido ao programa de elementos finitos Plaxis. O faseamento executivo foi minuciosamente considerado (142 fases por cada cálculo 3D), simulando os trabalhos de escavação e de aplicação dos sustimentos.

É ainda de referir que a rigorosa implementação do plano de observação definido, com o tratamento das leituras em tempo útil, permitiu introduzir algumas adaptações em obra, apesar de, em termos gerais, se ter registado um bom ajustamento às previsões do projecto.

7. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Empresa de Electricidade da Madeira (Dono de Obra) a gentileza de permitir a publicação deste artigo, sendo de referir que a construção da obra esteve a cargo da Construtora do Tâmega e o projecto de construção civil foi desenvolvido pela Cenorgeo (vertentes geológica, geotécnica e estrutural [1][2]) e pela Proceso1 (vertente hidráulica).

É ainda de referir que os trabalhos de prospecção e de instalação da instrumentação foram realizados pela TecnasolFGE, tendo ficado a cargo do LNEC os ensaios laboratoriais e os ensaios dilatométricos.

Quanto ao projecto e colocação em obra dos equipamentos hidromecânicos e eléctricos, estes foram da responsabilidade da Energetus.

A fiscalização da obra foi levada a cabo pela EEM, pela Consulgal e pela Planege.

8. REFERÊNCIAS

[1] Cenorgeo (2005). *Aproveitamento de fins múltiplos de Socorridos. Estação elevatória e túnel de restituição dos Socorridos. Estudo geológico-geotécnico.*

[2] Cenorgeo (2005). *Aproveitamento de fins múltiplos de Socorridos. Estação elevatória e túnel de restituição dos Socorridos. Obras de construção civil. Projecto de execução.*