

SOCIEDADE PORTUGUESA DE GEOTECNIA
PRÉMIO RICARDO ESQUÍVEL TEIXEIRA DUARTE

VENDA NOVA III
REFORÇO DE POTÊNCIA DO APROVEITAMENTO
HIDROELÉTRICO DE VENDA NOVA

Mai 2018

NOTA PRÉVIA

Desde a Antiguidade que é comum associar-se às grandes criações humanas o nome do seu autor e as grandes obras de engenharia, nesta matéria, não são exceção.

No caso do Prémio Ricardo Esquível Teixeira Duarte, promovido pela Sociedade Portuguesa de Geotecnia, afigura-se implícito, no seu regulamento, pretender-se seguir o mesmo princípio de distinguir os "*Autores de soluções de projeto de obras geotécnicas ou de obras com relevante componente geotécnica concluídas no quadriénio 2013-2016.*"

No processo de candidatura do Reforço de Potência de Venda Nova – Venda Nova III à primeira edição deste prémio, colocou-se desde logo a questão da autoria do projeto. Constituído maioritariamente por um vasto conjunto de obras geotécnicas subterrâneas, de onde se destacam pelas suas dimensões as cavernas do complexo da central, as duas chaminés de equilíbrio, os túneis do circuito hidráulico, incluindo um grande desarenador, e os bocais da tomada de água e da restituição, que obrigaram à construção de ensecadeiras provisórias de elevado porte, facilmente se compreende que na conceção e projeto destas obras foi necessário envolver uma vasta equipa multidisciplinar englobando diversas especialidades de engenharia, geologia e arquitetura.

Por outro lado, um projeto desta dimensão passa necessariamente por diversas fases, atendendo ao conjunto de estudos e projetos necessário desenvolver, que vão desde o suporte à tomada de decisão de investimento até à otimização das soluções de engenharia e à confirmação final do comportamento da obra. A este propósito é de relevar o estudo da definição da solução para projeto, concluído em 2008, o projeto para licenciamento e para concurso, concluído em 2009, e o projeto de execução, iniciado nesse mesmo ano e desenvolvido durante a construção, tendo culminado em 2016 com a entrada em operação do aproveitamento.

De modo análogo a outros aproveitamentos hidroelétricos promovidos pela EDP Produção, pese a existência de contribuições de entidades externas nalguns estudos específicos, foram essencialmente os técnicos da Engenharia da EDP Produção, de diferentes gerações, que conceberam, estudaram, projetaram e geriram a realização do Reforço de Potência de Venda Nova III.

Assim, o autor do projeto do Reforço de Potência de Venda Nova – Venda Nova III não pode deixar de ser a equipa multidisciplinar de engenharia, integrada no corpo técnico da EDP Produção. A mim, para além da honra de ter integrado esta equipa, cabe-me o privilégio de, no momento e para o fim em apreço, ser o seu representante.

Ponta Delgada, 27 de maio de 2018

Celso Lima

FICHA TÉCNICA

Dono da Obra	EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.
Projeto	EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. ⁽¹⁾ ⁽¹⁾ Equipa multidisciplinar de Engenharia. Dado o elevado número de técnicos envolvidos referem-se seguidamente apenas os Diretores de Engenharia e os Coordenadores para as fases estudos e de projeto. – Diretores de Engenharia: Maria Clara Maia, Fernando Barbosa Teixeira e Décio Silva – Coordenadores dos estudos e projetos: João Flores, Vítor Ribeiro e Carlos Esteves – Coordenadores de especialidades: Celso Lima, José Dias da Silva, Domingos Silva Matos, Rui Leitão, Eduardo Brás da Silva, Alexandre Ferreira da Silva, Mário Silva, Miguel Patena Forte e Nuno Portal
Direção / Gestão de Obra	EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. ⁽²⁾ ⁽²⁾ Gestor do projeto: Manuel Alberto Oliveira
Fiscalização	Consórcio "FASE/GIBB Portugal" ⁽³⁾ ⁽³⁾ Consórcio composto pelas empresas FASE, Estudos e Projetos, S.A., (líder) e GIBB Portugal – Consultores de Engenharia, Gestão e Ambiente, S.A.
Coordenação de Segurança em Obra	Tabique Engenharia, Lda.
Construção	Reforço de Potência da Barragem de Venda Nova III, ACE ⁽⁴⁾ ⁽⁴⁾ ACE constituído pelas empresas MSF Engenharia SA (líder), SOMAGUE Engenharia, S.A., MOTA-ENGIL Engenharia e Construção, S.A. e SPIE BATIGNOLLES Europe.
Fornecimento dos Equipamentos	Consórcio Voith Hydro GmbH & Co. KG e Siemens Portugal, S.A.

VENDA NOVA III

REFORÇO DE POTÊNCIA DO APROVEITAMENTO DE VENDA NOVA

ÍNDICE

1 -	DESCRIÇÃO TÉCNICA DO PROJETO.....	9
1.1 -	Enquadramento.....	9
1.2 -	Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova.....	9
1.3 -	Reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III	10
2 -	GEOLOGIA, GEOTECNIA E HIDROGEOLOGIA.....	17
2.1 -	Enquadramento geológico.....	17
2.2 -	Caraterização geológico-geotécnica.....	18
2.3 -	Caraterização hidrogeológica.....	20
3 -	ASPETOS DE ELEVADA RELEVÂNCIA GEOTÉCNICA.....	21
3.1 -	Circuito hidráulico.....	21
3.2 -	Central.....	23
3.2.1 -	Faseamento de escavação da central.....	24
3.2.2 -	Modelo numérico tridimensional.....	25
3.2.3 -	Monitorização.....	29
3.3 -	Desarenador superior.....	30
3.4 -	Chaminé de equilíbrio superior.....	33
3.5 -	Rolhão de montante.....	36
3.6 -	Primeiro enchimento do circuito hidráulico. Monitorização.....	40
4 -	ELEMENTOS BIBLIOGRÁFICOS.....	42

ANEXO – Fotografias

1 - DESCRIÇÃO TÉCNICA DO PROJETO

1.1 - Enquadramento

O reforço de potência de Venda Nova III é o segundo reforço de potência do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova. Localiza-se no rio Rabagão, principal afluente da margem esquerda do rio Cávado, é constituído por um novo circuito hidráulico e uma central subterrânea equipada com dois grupos reversíveis, que totalizam uma potência de 781 MW. Este projeto tem como principal finalidade a produção de energia em horas de grande consumo, conseguida quase exclusivamente à custa da utilização de energia armazenada, por bombagem, dos excedentes de produção térmica e eólica. As obras de construção civil iniciaram-se em abril de 2010 e envolveram grandes volumes de escavação, cerca de 1,1 milhões de metros cúbicos, tendo as escavações ficado concluídas em 2015 e os restantes trabalhos de construção em 2016. Com a conclusão do comissionamento dos grupos no final de 2016, passou a ser a central hidroelétrica da EDP com maior potência instalada e a única na Península Ibérica equipada com grupos assíncronos reversíveis de velocidade variável.

1.2 - Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova

Com o propósito de garantir o abastecimento público de eletricidade e dar materialização à Lei de Eletrificação do País, de 1944, iniciou-se em 1945 a construção do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova/Vila Nova, situado no troço final do rio Rabagão, perto da localidade de Venda Nova, concelho de Montalegre, e a cerca de 55 km da cidade de Braga (Figura 1).

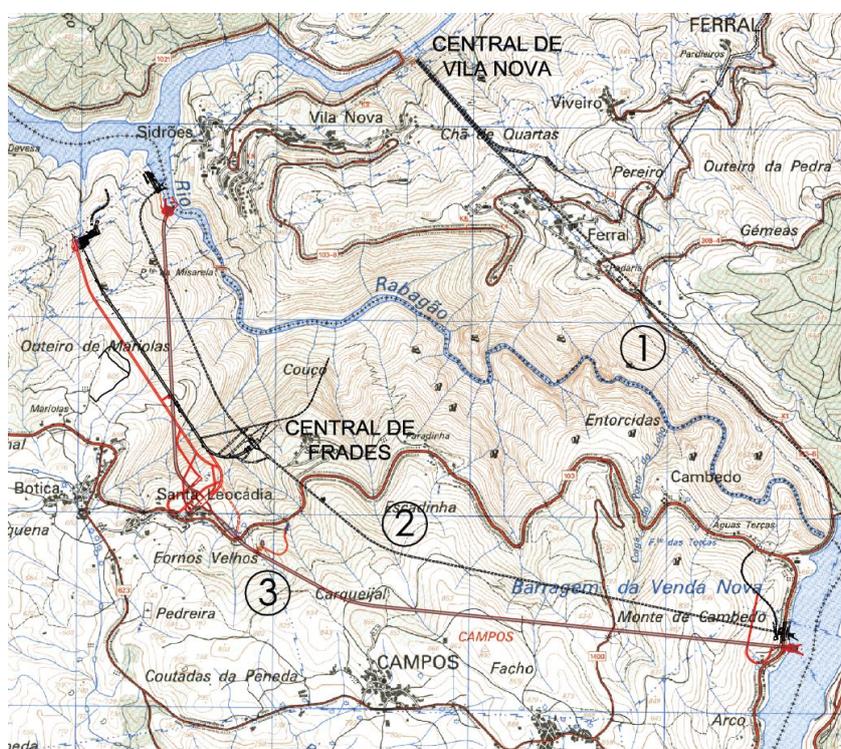


Figura 1 - Aproveitamentos de Venda Nova / Vila Nova. 1: Venda Nova / Vila Nova (1951); 2: Venda Nova II / Frades (2005); 3: Venda Nova III / Frades II (2016)

O escalão de Venda Nova/Vila Nova é constituído por uma barragem equipada com os respetivos órgãos de segurança, circuito hidráulico e central a céu aberto. A barragem, do tipo abóbada espessa de betão, tem 97 m de altura, encontra-se equipada com órgãos de descarga com capacidade para 1100 m³/s, cria uma albufeira com uma capacidade total de 95 hm³ para o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (690,80). A central encontra-se equipada com três grupos Pelton de eixo horizontal, com uma potência de 30 MW cada, sendo o caudal nominal de 30 m³/s.

No final da década de noventa, foi decidido reforçar a potência do aproveitamento original, com novos grupos, mais potentes, mais eficientes e com capacidade para armazenar energia, através da bombagem de água, para posterior utilização na produção de eletricidade nas horas de maior procura, dando origem ao projeto de Venda Nova II. Este escalão – atualmente designado por Central de Frades – que entrou em serviço em 2005, é constituído por um circuito hidráulico e uma central subterrânea, inseridos na encosta da margem esquerda do rio Rabagão. Tira partido das duas albufeiras existentes – Venda Nova, a montante, e Salamonde, a jusante – e da elevada queda de 420 m conseguida num troço do rio de aproximadamente 4,0 km de extensão. A central encontra-se equipada com dois grupos geradores reversíveis, de eixo vertical,

com turbinas tipo Francis, com uma potência de 97,4 MW / 106,4 MVA cada, correspondendo a um caudal turbinado de 25 m³/s e a um caudal de 20 m³/s em modo bomba.

Em abril de 2010, no âmbito da estratégia da EDP de crescimento da capacidade de produção com base em fontes de energia renovável, iniciaram-se os trabalhos relativos à construção do segundo Reforço de Potência do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova – Venda Nova III, também designado abreviadamente por Venda Nova III, que passou a ser designado por Central de Frades II após a sua entrada em serviço. Este reforço, também composto por um circuito hidráulico subterrâneo e uma central em caverna localizados na margem esquerda do rio Rabagão, tem a particularidade do circuito hidráulico ter, em quase toda a sua extensão, revestimento flexível em betão projetado. Está equipado com duas turbinas/bomba assíncronas de velocidade variável, tecnologia utilizada pela primeira vez numa central hidroelétrica da Península Ibérica.

Na Figura 1 apresenta-se a configuração em planta do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova, o qual integra atualmente os seguintes três esquemas existentes: Venda Nova / Vila Nova – 1951, Venda Nova II / Frades – 2005 e Venda Nova III / Frades II - 2016.

1.3 - Reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III

O projeto de Venda Nova III tem, em traços gerais, algumas semelhanças com o primeiro reforço de potência (Venda Nova II), apresentando, contudo, características técnicas e dimensões que o distinguem dos restantes aproveitamentos hidroelétricos existentes em Portugal. Realçam-se a inclinação e extensão do circuito hidráulico, o diâmetro da sua secção transversal, associado ao facto de este ser não revestido numa parte significativa da sua extensão, o elevado valor da pressão hidrostática no interior do circuito hidráulico, a qual pode atingir o máximo de 484 metros de coluna de água no plano médio das espirais para o NPA da albufeira de Venda Nova, as dimensões e profundidade (cerca de 400 m) da caverna da central, a elevada potência e tecnologia utilizada nos grupos reversíveis e a existência de duas chaminés de equilíbrio, uma a montante e outra a jusante da central.

Os principais fatores que, para além dos habituais condicionamentos topográficos e hidráulicos presentes em todos os projetos hidroelétricos, condicionaram o esquema geral adotado foram:

- a existência e proximidade do primeiro reforço de potência de Venda Nova II e a obrigatoriedade de reduzir, na fase de construção, os impactos na exploração dessa central;
- os níveis de vibração admissíveis nos equipamentos instalados em Venda Nova II e as consequentes limitações de vibrações geradas pela utilização de explosivos nas escavações de Venda Nova III;
- a orientação dos túneis face às principais estruturas geológicas existentes, as coberturas laterais dos mesmos e a necessidade de assegurar o afastamento adequado do circuito hidráulico de Venda Nova II;
- a necessidade de interligação entre as centrais de Venda Nova II e de Venda Nova III.

A solução adotada consiste assim num esquema técnico implantado no maciço da margem esquerda do rio Rabagão, constituído pelos seguintes elementos principais (Figura 2):

- um conjunto de túneis utilizados para acesso e ataque às frentes de trabalho;
- um circuito hidráulico integralmente subterrâneo, implantado na margem esquerda do rio Rabagão, com cerca de 4,5 km de comprimento total, tomada de água na albufeira de Venda Nova e restituição na albufeira de Salamonde;
- duas chaminés de equilíbrio com conceções muito diferentes;
- uma central subterrânea, em caverna, equipada com dois grupos reversíveis de velocidade variável, com uma potência nominal de 390,5 MW/420 MVA;
- um posto de corte, um edifício de apoio e um edifício de entrada implantados numa plataforma situada à superfície.

Um dos principais desafios da construção deste projeto consistiu na escavação do novo circuito hidráulico relativamente próximo do existente (Venda Nova II), sob pressão e também não revestido, que foi mantido em exploração durante toda a fase de construção. Este aspeto assumiu particular importância durante a fase de escavações, devido à elevada pressão da água no interior do circuito hidráulico de Venda Nova II.

Para acesso definitivo e ataque às frentes de obra, foi necessário construir um conjunto de túneis de acesso e ataque, perfazendo cerca de 4,5 km de comprimento. À exceção do túnel de ataque à tomada de água (TATA) e do túnel de ataque à chaminé de equilíbrio superior (TACES), todos os restantes túneis se localizam

ou permitem o acesso à zona do complexo da central. Destes últimos, o túnel de acesso à central (TAC) e o túnel de saída de energia e de construção (TSEC) são os únicos com ligação ao exterior. Na envolvente da central existem ainda: o túnel de acesso ao túnel em carga (TATC); o túnel de acesso ao túnel de restituição (TACCTR) e, a partir deste, o túnel de acesso e ventilação (TAV) que permite aceder à câmara dos transformadores; o túnel de saída de energia e ventilação (TSEV), que permite acesso à zona da abóbada da câmara dos transformadores; o túnel de ventilação e construção (TVC), que permite aceder à abóbada da caverna dos grupos.

O circuito hidráulico é composto, de montante para jusante, por uma tomada de água na albufeira de Venda Nova, um túnel em carga com 2806 m de comprimento, uma chaminé de equilíbrio superior, localizada 390 m a montante da central, um desarenador e um troço blindado adjacente à central do lado de montante, um túnel de restituição praticamente horizontal, com 1382 m de comprimento, uma chaminé de equilíbrio inferior, localizada 95 m a jusante da central, um poço de esvaziamento e uma restituição (utilizado como tomada de água em modo bomba) na albufeira de Salamonde. O respetivo perfil longitudinal representa-se na Figura 3.

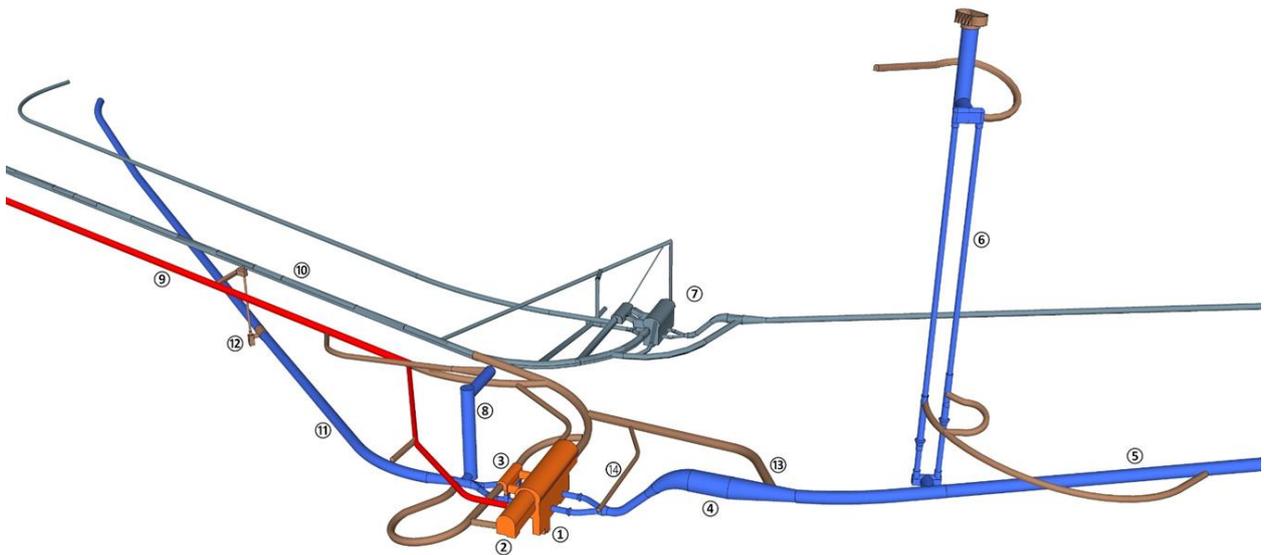


Figura 2 – Perspetiva esquemática da obra subterrânea na zona da central

- | | | |
|----------|------------------------------------|---|
| Legenda: | ① - Central | ⑧ - Chaminé de equilíbrio inferior |
| | ② - Câmara dos transformadores | ⑨ - Túnel de saída de energia |
| | ③ - Câmara das comportas | ⑩ - Túnel de acesso |
| | ④ - Desarenador superior | ⑪ - Túnel de restituição |
| | ⑤ - Túnel em carga | ⑫ - Poço de esvaziamento do circuito hidráulico |
| | ⑥ - Chaminé de equilíbrio superior | ⑬ - Rolhão superior |
| | ⑦ - Venda Nova II | ⑭ - Galeria de drenagem de montante |

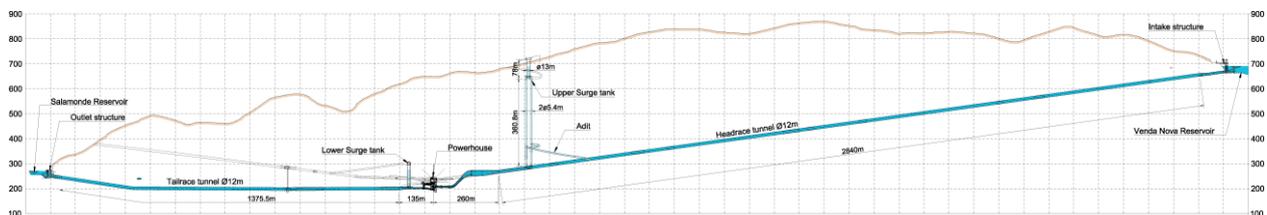


Figura 3 – Perfil longitudinal do circuito hidráulico de Venda Nova III

A tomada de água, constituída por um bocal dotado de uma grade fixa e por uma estrutura destinada ao abrigo e manobra das comportas, está afastada de cerca de 65 m da tomada de água de Venda Nova II.

O bocal apresenta uma secção transversal retangular a que se segue um trecho com secção constante onde se instalaram a comporta ensecadeira do tipo corredeira e a comporta de segurança do tipo vagão, as quais são movimentadas a partir de uma torre de manobra em betão armado sobre a qual estão instalados todos os equipamentos necessários à sua operação e manutenção. Ao trecho retangular segue-se uma transição quadrado – redondo para um trecho de túnel circular, com secção revestida a betão cofrado, que se prolonga por 100 m até à secção corrente não revestida do túnel em carga (Figura 4).

Para a sua construção foi necessário construir uma ensecadeira provisória em abóbada de betão, com 24 m de altura. No final dos trabalhos esta ensecadeira foi demolida, estabelecendo-se assim a comunicação franca com a albufeira.

O túnel em carga tem uma inclinação de cerca de 13,8 %, em toda a sua extensão de 2806 m, e uma secção transversal do tipo circular modificada com diâmetro de 12 m, não revestida, que se desenvolve entre o fim da secção revestida da tomada de água e o início do trecho revestido que faz a transição para o desarenador superior.

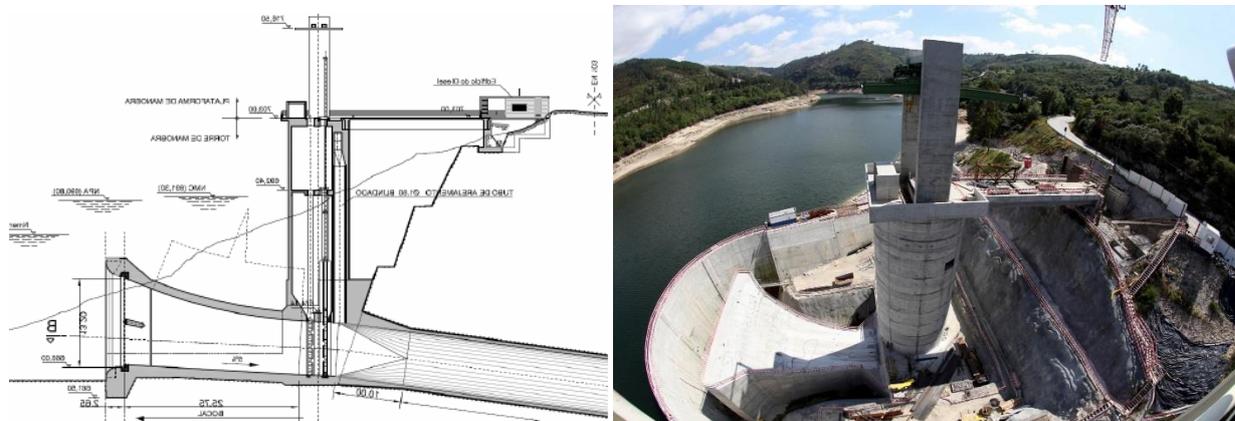


Figura 4 – Tomada de Água ao abrigo da ensecadeira: corte e fotografia aérea

A chaminé de equilíbrio superior localiza-se a cerca de 370 m da caverna da central e é constituída pela zona de ligação ao túnel em carga, por dois poços verticais (CES2 e CES3) com 5,4 m de diâmetro e cerca de 340 m de altura, que estabelecem a ligação entre o túnel em carga e a câmara de alimentação, a câmara de alimentação, o poço vertical da chaminé de equilíbrio propriamente dita, com 13 m de diâmetro e 78 m de altura, e a câmara de expansão localizada à superfície. Na Figura 5 apresenta-se o respetivo perfil longitudinal.

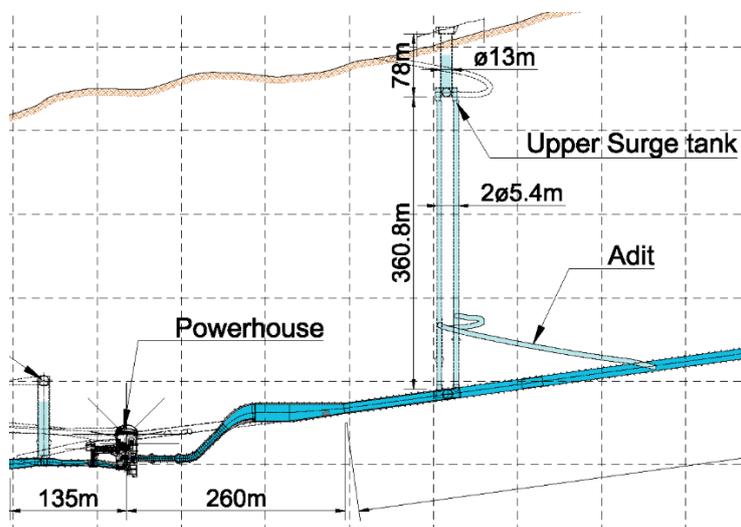


Figura 5 – Chaminé de equilíbrio superior. Perfil longitudinal

O trecho superior da central, imediatamente a montante desta, é constituído pelo desarenador superior, por um troço de transição para o troço blindado e pelo troço blindado propriamente dito, que se prolonga até à central. Toda a extensão do trecho superior não blindado tem revestimento contínuo de betão cofrado, o qual se prolonga pelo túnel em carga ao longo de 138 m, até à zona de inserção da chaminé de equilíbrio superior. O desarenador tem secção transversal circular de grandes dimensões, cujo diâmetro máximo é de 20 m.

O rolhão superior, localizado junto ao desarenador superior, materializa a obturação do túnel de acesso ao túnel de carga (Figura 6). É constituído por oito blocos de betão com 7,5 m de extensão cada um, o que lhe confere um desenvolvimento total de 52,5 m. A extremidade do lado montante (lado do circuito hidráulico) é dotada de uma blindagem com 12,8 m de extensão, à qual está acoplada uma porta estanque de fundo copado que permite acesso ao interior do túnel em carga aquando do esvaziamento do mesmo.

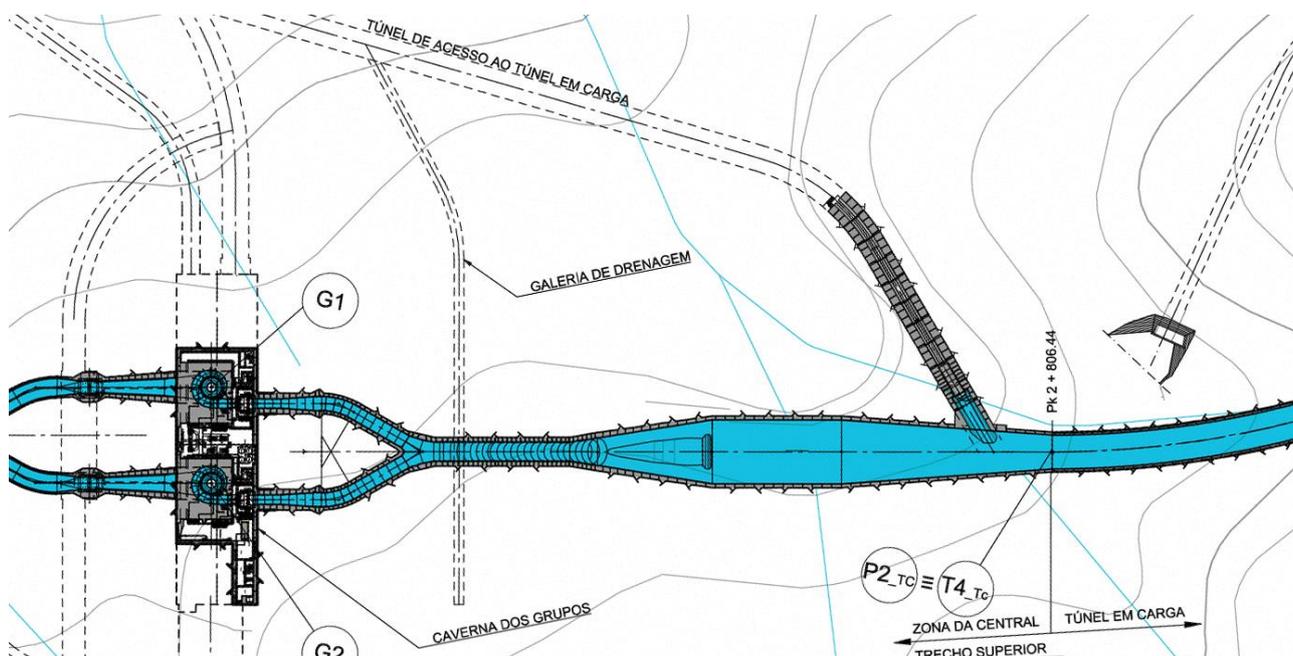


Figura 6 – Desarenador superior e rolhão de montante

O trecho imediatamente a jusante da central (trecho inferior) tem um revestimento contínuo em betão cofrado e desenvolve-se entre a saída dos difusores dos grupos e o final da transição para a secção corrente do túnel de restituição. Nele se inserem os poços das comportas ensecadeiras e a chaminé de equilíbrio inferior.

A chaminé de equilíbrio inferior é constituída por um poço vertical com 13 m de diâmetro e 90 m de altura, revestido a betão cofrado, e por uma câmara de expansão em túnel revestida a betão cofrado na semi-secção inferior, que aproveitou parte do túnel de acesso à zona superior do poço. A implantação da chaminé resultou do traçado dos ramais de restituição a jusante dos grupos e da garantia de um conveniente afastamento às cavernas, câmaras e túneis adjacentes, tendo sempre em mente o interesse em aproximar dos grupos a sua inserção no túnel de restituição (Figura 7).

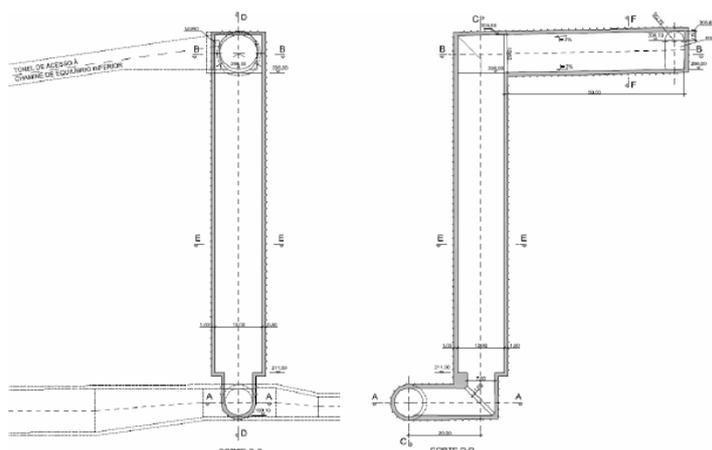


Figura 7 – Chaminé de equilíbrio inferior. Cortes

O rolhão inferior, localizado nas proximidades do local onde se insere a base da chaminé de equilíbrio inferior, materializa a obturação do túnel de acesso ao túnel de restituição. É constituído por dois blocos de betão, que totalizam 12 m de extensão, e a sua extremidade do lado montante (lado do circuito hidráulico) é dotada de uma blindagem com 5,1 m de extensão, à qual está acoplada uma porta estanque de fundo copado que permite acesso ao interior do circuito de restituição aquando do esvaziamento do mesmo.

O túnel de restituição com uma extensão de 1382 m, secção transversal idêntica à do túnel de carga, desenvolve-se entre o trecho inferior da central e o bocal de restituição, tendo o ponto mais baixo numa posição intermédia, de modo a permitir proceder ao seu esvaziamento a partir do poço existente para o

feito. A cerca de 350 m do bocal da restituição o túnel cruza, em planta, o túnel de restituição do aproveitamento de Venda Nova II, passando sob ele a uma distância de cerca de 30 m.

O poço de esvaziamento do circuito hidráulico, situado numa posição intermédia do túnel de restituição, tem uma altura de cerca de 90 m e uma secção circular com 3 m de diâmetro, sendo integralmente revestido a betão cofrado.

A restituição na albufeira de Salamonde encontra-se implantada cerca de 120 m a montante da restituição de Venda Nova II. É constituída por um bocal com ranhuras destinadas à colocação alternativa das grades amovíveis e das comportas ensecadeiras e por uma soleira de controlo do escoamento na sua ligação ao leito do rio Rabagão. A plataforma situada na parte superior da estrutura de restituição destina-se à manobra e manutenção das grades amovíveis e das comportas ensecadeiras. Possui espaços vazios, do lado exterior e contíguos às ranhuras, para servirem de garagem aos elementos das comportas ensecadeiras ou das grades amovíveis, conforme a situação seja de exploração ou de manutenção (Figura 8).

A localização planimétrica e altimétrica da estrutura de restituição foi condicionada pela escavação a realizar no leito do rio Rabagão, tendo sido considerados os constrangimentos topográficos e geológicos, bem como os aspetos associados ao seu adequado funcionamento hidráulico no que respeita às condições de vazão a jusante, em operação normal (turbinação e bombagem) e em situação de cheia.

Para a sua construção foi necessário construir uma ensecadeira provisória em abóbada de betão, com 21 m de altura. No final dos trabalhos, esta ensecadeira foi parcialmente demolida, estabelecendo-se assim a comunicação franca com a albufeira.



Figura 8 – Restituição. Planta geral e vista geral

O canal escavado no leito do rio Rabagão destina-se a garantir as adequadas condições de alimentação em bombagem. O talvegue do canal foi fixado à cota (255,00), tem uma extensão de cerca de 250 m e largura variável entre 32 m e 35 m.

A central de Venda Nova III compreende uma caverna, com cerca de 153 m de comprimento no total, localizada numa posição intermédia do circuito hidráulico, composta por duas câmaras principais: a câmara dos grupos e a câmara dos transformadores (Figura 9). O piso principal encontra-se à cota (223,75), a cerca de 400 m de profundidade.

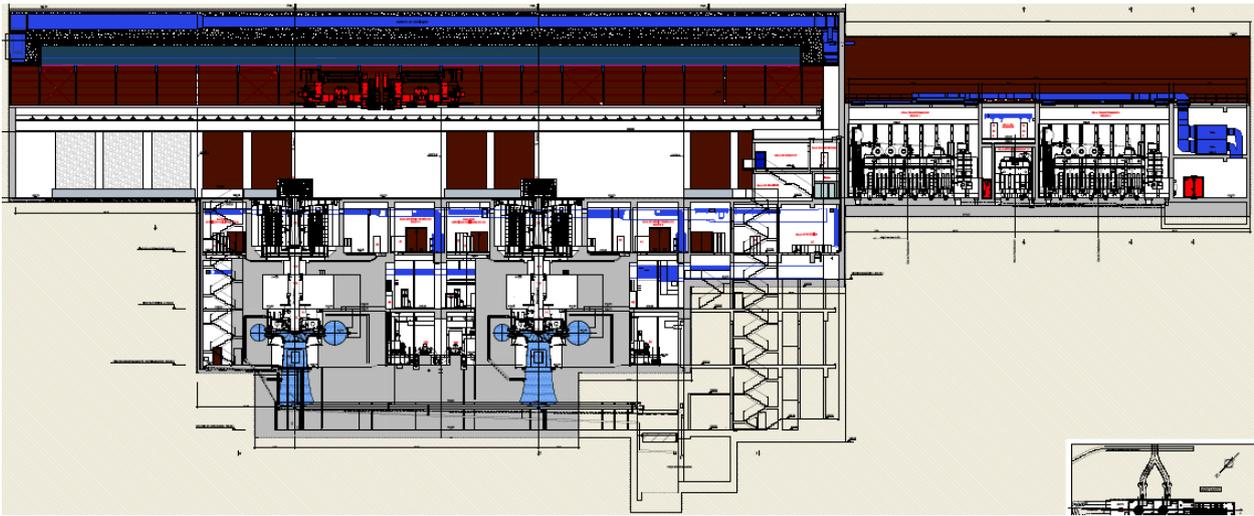


Figura 9 – Central: corte longitudinal

A câmara dos grupos apresenta, em planta, as dimensões úteis de 25,0 m por 103,1 m e uma altura máxima de 62,5 m, na zona do poço geral de drenagem (Figura 10 e Figura 11). É nesta câmara que se encontram instalados os principais equipamentos, tais como os grupos reversíveis de velocidade variável, o comando e controlo, o sistema de refrigeração e as válvulas esféricas.

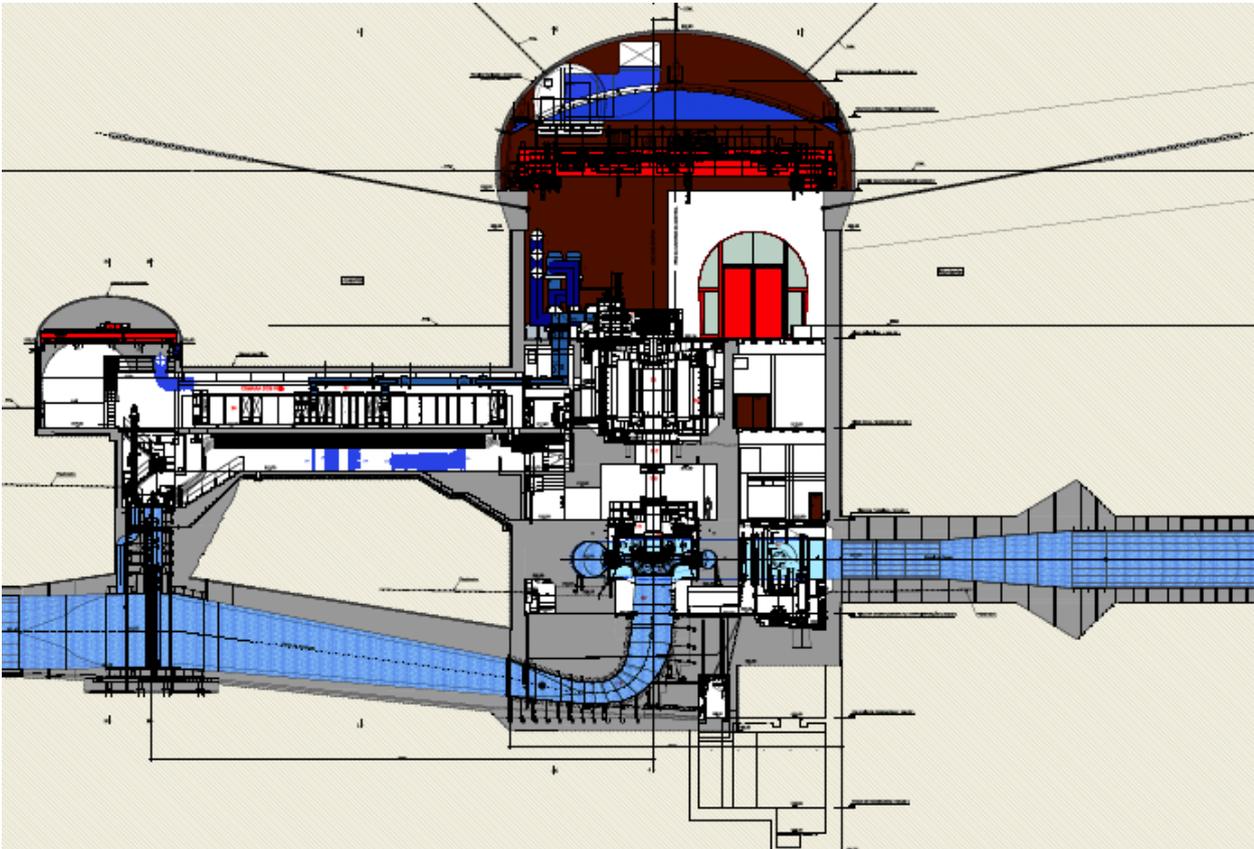


Figura 10 – Central: corte transversal pelo eixo de um grupo



Figura 11 – Central: piso principal

No piso inferior da central encontra-se instalado o sistema de esgoto e drenagem da Central. A partir deste piso garante-se o acesso ao poço geral de drenagem localizado imediatamente abaixo. O caudal proveniente de infiltrações e fugas é conduzido para este poço e daqui elevado e restituído para a chaminé de equilíbrio inferior de Venda Nova II ou, em alternativa, injetado diretamente no circuito hidráulico de jusante.

A câmara dos transformadores, onde se encontram instalados os transformadores principais de 2x465 MVA e os equipamentos elétricos associados, possui uma largura de 19,6 m, um comprimento total de 50 m, uma altura livre de 19,8 m e uma secção constituída por hasteais verticais e abóbada de volta inteira.

Esta câmara é constituída por dois compartimentos, fechados por barreiras corta-fogo e com resistência face a explosão, para acomodação dos transformadores principais (415 kV/21 kV). Numa zona rebaixada da câmara dos transformadores existe uma fossa coletora dos fluidos eventualmente derramados.

As comportas de proteção dos grupos encontram-se instaladas numa câmara, a jusante da central, com 11 m de largura, 43 m de comprimento e 10,4 m de altura. Esta câmara está localizada num túnel que se desenvolve paralelamente à câmara dos grupos (Figura 10).

Todas estas cavernas têm a sua abóbada com revestimentos flexíveis, constituídos por betão projetado com fibras e pregagens de varão selado.

No exterior, junto às entradas dos túneis de acesso às centrais de Venda Nova II e Venda Nova III, estão localizados o posto de corte da central, o parque exterior de linhas a 400 kV, o edifício de apoio e o edifício de entrada, sendo este último comum às duas Centrais (Figura 12). A ligação à Rede Nacional de Transporte (RNT) ao nível de tensão de 400 kV, é estabelecida por meio de uma linha dupla, com comprimento aproximado de 4 km.



Figura 12 – Edifícios exteriores e plataforma de saída de linhas (fotografia aérea)

2 - GEOLOGIA, GEOTECNIA E HIDROGEOLOGIA

2.1 - Enquadramento geológico

A região onde se insere o aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova situa-se no flanco NNE da Serra da Cabreira, entre as povoações de Sidrós a N, Ferral a NNE, Botica a SW e Campo e Lamalonga a S. É atravessada pelo tramo final SE-NW do vale do rio Rabagão, de profundos meandros encaixados, grande parte em tramos de falhas NE-SW, NW-SE, N-S a NNE-SSW e NNW-SSE. A Norte, no rio Cávado, com orientação aproximada EW, encontra-se a albufeira da barragem de Salamonde, onde o Rabagão desagua.

Nesta região, a área mais elevada do maciço granítico culmina na pirâmide de Campos (889 m), localizada na zona que resta do relevo de planalto que é a Serra da Cabreira e vai suavizando para as povoações de Lamalonga (824 – 835 m) a SE e Campo (800 – 825 m) a WSW, onde a erosão criou a vertente NE do tramo SE-NW do Rabagão. Nesta vertente, em direção ao rio Cávado, atingem-se cotas na ordem dos 400 m.

Do ponto de vista geológico a região insere-se num maciço globalmente granítico coberto em diversas áreas por formações xistentas datadas do Silúrico, sendo estas últimas as mais antigas da região. As intrusões graníticas originaram ações de metamorfismo de contacto nestas formações, originalmente sedimentares, que tinham sido já transformadas por metamorfismo regional. No presente estamos perante rochas genericamente metamorfizadas e tectonizadas, por vezes transformadas em corneanas. Os granitos da região fazem parte do grande maciço granítico do Minho. Terá sido a intrusão destes granitos, que ocorreu durante o Hercínico, que também provocou a emersão do território (Figura 13).

Após essa longa fase de fracturação e erosão intensas designada por orogenia Hercínica, foram iniciados os processos geodinâmicos que formaram as atuais manchas aluvionares, de origem fluvial, que se encontram na região. Desta fase detetam-se, no relevo topográfico, algumas falhas relevantes do ponto de vista das obras subterrâneas, entre as quais a falha da Botica com orientação NE-SW.

À superfície, um rico coberto vegetal e de solos protege todas essas formações, sendo, no entanto, possível encontrar bastantes afloramentos, principalmente na proximidade dos rios. Os taludes das estradas e dos caminhos existentes foram fundamentais para identificação das características geológicas.

Simplificadamente, na margem esquerda do rio Rabagão, onde se localiza o circuito hidráulico, o maciço é predominantemente granítico, cortado por filões de aplito, pegmatito e quartzo, falhas e diáclases. A zona de formações metamórficas é significativamente reduzida e os contactos litológicos não apresentam uma orientação desfavorável relativamente ao alinhamento dos circuitos hidráulicos. Do ponto de vista litológico, ao longo do traçado do circuito hidráulico não existem grandes variações, predominando as formações graníticas com filões pegmatíticos e, por vezes, alguns encraves metamórficos. As formações xistentas localizam-se fundamentalmente na zona da estrutura da restituição.

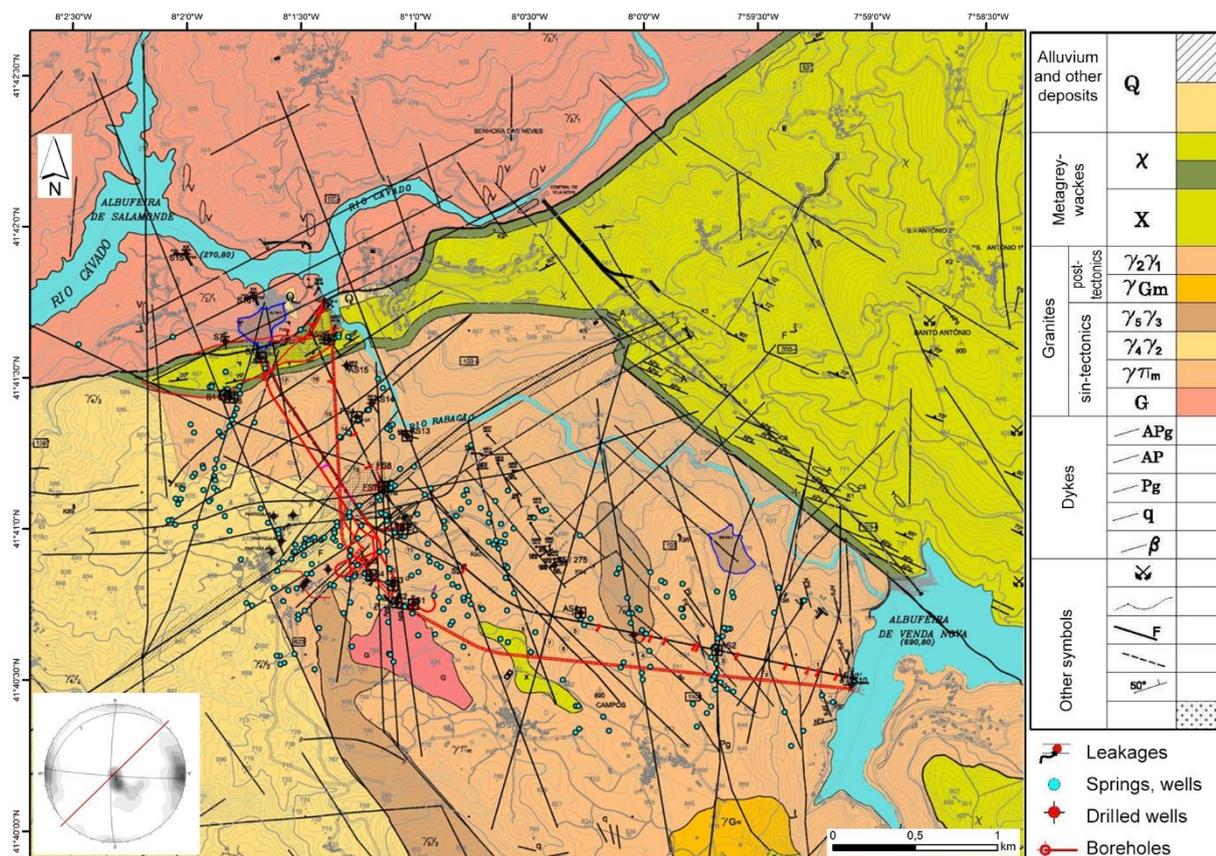


Figura 13 – Cartografia geológica de superfície, prospeção, pontos de água da rede de monitorização hidrogeológica e aflúências registadas nas escavações de Venda Nova II

2.2 - Caracterização geológico-geotécnica

Estando o traçado do circuito hidráulico de Venda Nova III localizado para o interior do maciço rochoso, quando em comparação com a posição do circuito hidráulico de Venda Nova II, considerou-se que o novo circuito hidráulico se iria inserir em condições semelhantes ou melhores.

Os estudos geológico-geotécnicos integrados no âmbito do projeto de Venda Nova III consideraram a informação proveniente das campanhas de prospeção realizadas para Venda Nova II, que decorreram em 1982 e em 1996, que integraram 4 sondagens verticais que atingiram profundidades na ordem dos 400 m. Posteriormente, em 2008 e especificamente para o projeto de Venda Nova III, foram realizadas outras campanhas de prospeção mecânica e ensaios. No total foram realizados 6970 metros de furação com recolha de amostra e ensaios de absorção de água, distribuídos por 53 sondagens. Os ensaios laboratoriais realizados em 1997, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e laboratório da EDP Produção, em amostras da zona da central de Venda Nova II, englobaram a determinação da resistência à compressão uniaxial (UCS) e do módulo de deformabilidade da rocha (E_r) determinados em provetes colhidos a diferentes profundidades, nomeadamente às cotas da escavação da caverna da central de Venda Nova II, cujos valores médios foram aproximadamente 110 MPa e 55 GPa, respetivamente para UCS e E_r . Posteriormente, o LNEC realizou ensaios laboratoriais em amostras recolhidas na galeria de reconhecimento geológico realizada antes da escavação da central de Venda Nova II. Resumindo, tendo por base a informação de carácter geológico-geotécnico obtida, foi dividido o maciço rochoso em três classes geológico-geotécnicas, de acordo com as características apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características das zonas geológico-geotécnicas do maciço onde se integrou o circuito hidráulico de Venda Nova III.

Zona	W, F	RQD	Ondas P (m/s)	E_r (GPa)	UCS (MPa)	Permeabilidade (unidades Lugeon)			
						>10	10-2	2-1	<1
ZG3	W5, F5; W3, F4	0-70	800-2800	< 20	< 30	36%	29%	9%	26%
ZG2	W3, F3; W2, F1-2	70-95	3000-4600	20-40	70-100	1%	27%	9%	63%
ZG1	W1-2, F3; W1, F1	95-100	4800	40-70	110	2%	2%	4%	92%

Legenda: W, F – Grau de alteração e fraturação; E_r – módulo de deformabilidade da rocha; UCS – resistência à compressão uniaxial.

O LNEC determinou "in situ" o módulo de deformabilidade do maciço (Em) em ensaios realizados na galeria de reconhecimento geológico da central de Venda Nova II, que incluíram ensaios de almofadas de grande área (LFJ - large flat jack). Com o objetivo de determinar o estado de tensão do maciço intersectado pela central de Venda Nova II, foram realizados pelo LNEC ensaios de almofadas planas (SFJ – small flat jack) e com defórmetro tridimensional (STT – stress tensor tube).

As características das descontinuidades principais apresentam-se resumidas no Quadro 2, de acordo com os métodos propostos pela ISRM (1981). Além das descontinuidades aqui descritas existe uma quarta família, rara, com orientação N40-50E;subvertical, à qual pertence a falha da Botica. A orientação das descontinuidades principais encontra-se representada na projeção estereográfica da Figura 13.

Quadro 2 – Resumo das características das descontinuidades (levantamento da zona da central).

Família de diáclases	F1	F2	F3
Direção	NS	N94°W	N57°E
Inclinação	85°W	87°S	13°NW
Persistência	3-10m	1-3m	1-10 m
Alteração das paredes	W1-2, occ. W4	W1-2, occ. W3	W1-2
Abertura	Fechada a 0.5mm, st. 2.5mm	Fechada a 0.5mm	Fechada a 0.5mm
Preenchimento	Nenhuma a 2.5mm	Nenhuma a 0.5mm	Nenhuma a 0.5mm
Rugosidade	rugosa, plana, st. polida	ondulada, pouco rugosa a rugosa	ondulada, pouco rugosa, st. rugosa a denteada
Percolação	seca, occ. com percolação	seca	seca
Espaçamento	1-2m	2-3m, st. 5-6m	2-3m, st. 1m

Legenda: occ. – ocasionalmente; st. – por vezes.

Acompanhando as escavações de Venda Nova III foi realizada cartografia geológica e caracterização geotécnica. Confirmou-se que o maciço rochoso ao longo do traçado dos circuitos hidráulicos é constituído, predominantemente, por granito porfiróide grosseiro a médio com massas, filões e filonetes pegmatíticos, cortado por diversas falhas. No entanto, no túnel em carga de Venda Nova III foi intersectada uma massa migmatítica em extensão significativa, superior à escavada no túnel em carga de Venda Nova II. Dispersas pelas diversas escavações realizadas, nomeadamente na zona da central de Frades, foram encontradas também várias massas de granito róseo. Como expectável, algumas zonas de falha foram atravessadas, por vezes com água associada.

O modelo geológico final, cujo perfil longitudinal segundo o circuito hidráulico é apresentado na Figura 14, teve em consideração a informação proveniente do reconhecimento geológico de superfície, das campanhas de prospeção realizadas nos anos 80 e 90 para o projeto de Venda Nova II, a prospeção realizada para o projeto de Venda Nova III e o mapeamento geológico das superfícies de escavação de ambos os circuitos hidráulicos.

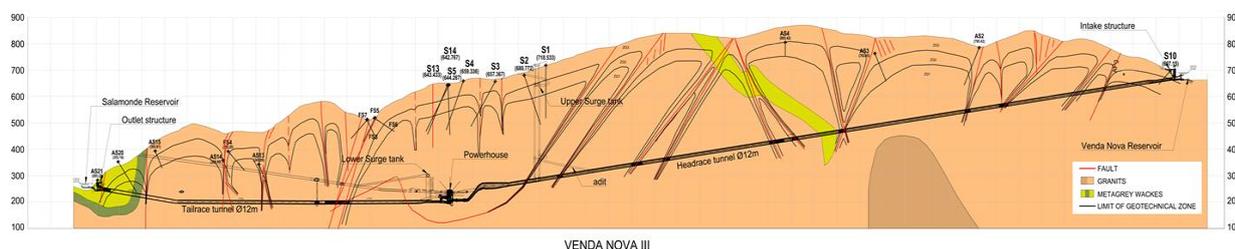


Figura 14 – Perfil longitudinal com zonamento geológico-geotécnico do circuito hidráulico de Venda Nova III, integrando a informação obtida na fase de obra

Confirmando as boas características geomecânicas, cerca de 75% das obras subterrâneas foram escavadas em características associadas às zonas geológico-geotécnicas ZG1 e ZG2, significando que a percolação de água no maciço rochoso é condicionada pelas características das descontinuidades. As zonas mais permeáveis do maciço rochoso encontram-se associadas aos locais com piores características geotécnicas, localizadas na zona da estrutura da restituição, tomada de água, cotas superiores da chaminé de equilíbrio, assim como nas zonas de interseção de falhas.

À semelhança dos túneis de restituição e de acesso à central de Venda Nova II, em Venda Nova III também se intersectou a falha da Botica nas escavações realizadas para o túnel de saída de energia e túnel de restituição.

Intersectaram-se outras zonas de falha, sendo que a geoestrutura com maior impacto para as escavações e exploração do circuito hidráulico da central de Venda Nova III foi intersectada pelo túnel de saída de energia e construção, caverna da central, rolhão superior, túnel em carga, poços da chaminé de equilíbrio, câmara das comportas e túnel de restituição. A estrutura geológica acima referida tem uma orientação geral NNW a NW, com inclinação para W (entre 60° e 85°), é constituída por várias superfícies onduladas que se entrecruzam, por vezes fecham outras vezes apresentam preenchimentos miloníticos lenticulares ou com espessuras decimétricas. Foi designada por falha da Central e Chaminé de Equilíbrio, tendo sido atribuída a designação de F1_Central ao ramo que intersecta a caverna da central, assumindo neste local orientação N40°W, inclinação 80°W e uma matriz argilosa com cerca de 0,40 m de espessura. Na Figura 15 apresenta-se uma perspetiva da relação desses planos estruturais com a zona da central e sua envolvente, assim como uma representação esquemática em planta.

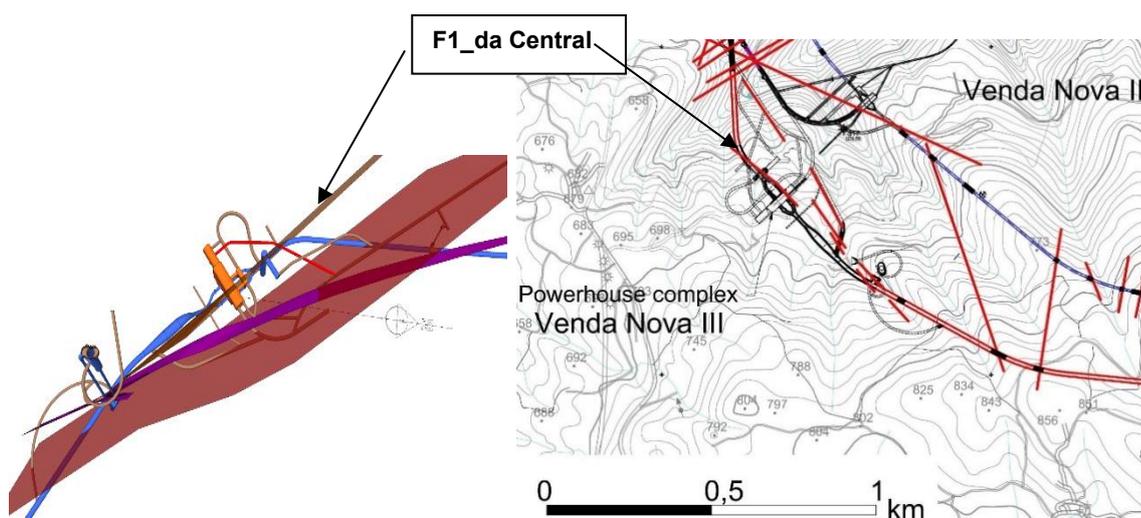


Figura 15 – Modelo geológico da zona envolvente da central de Venda Nova III (perspetiva e planta esquemática): influência dos planos da falha da central e chaminé de equilíbrio

Dada a proximidade entre a central de Venda Nova II e a central de Venda Nova III, estando ambas as cavernas inseridas no mesmo ambiente litológico e a profundidade idêntica, foi assumido que não seria de esperar uma grande diferença nas características geomecânicas entre o maciço onde se encontrava a central de Venda Nova II e o maciço onde se escavaria a zona do complexo da central do circuito hidroelétrico de Venda Nova III. Assim, admitiram-se como válidos para a zona do complexo da central de Venda Nova III e sua envolvente, os parâmetros utilizados no dimensionamento da central de Venda Nova II (Quadro 3). As escavações realizadas para as estruturas principais do complexo da central de Venda Nova III permitiram confirmar esses pressupostos.

Quadro 3 – Características geológico-geotécnico na envolvente das centrais de Venda Nova II e Venda Nova III

Zona geotécnica	Grau de alteração	Grau de fracturação	RQD (%)	UCS (MPa)	Er (GPa)	Em (GPa)
ZG1 Granito	W1-2	F1-2	70-100	110	40-70	30-40

2.3 - Caracterização hidrogeológica

Um dos impactes frequentes das obras subterrâneas está associado ao risco de descida dos níveis piezométricos. Assim, à semelhança do que havia já sido realizado para Venda Nova II, foi avaliado o risco hidrogeológico associado ao empreendimento e monitorizados os eventuais impactos que as escavações subterrâneas poderiam ter nos níveis e caudais das águas subterrâneas exploradas pela população.

Os resultados dos ensaios de absorção de água realizados nos furos das sondagens permitiram a caracterização do tipo de escoamento verificado no maciço rochoso. Em 53% dos ensaios realizados foi obtida uma absorção nula, sendo que, genericamente, estes resultados correspondem aos realizados a maiores profundidades. Estas características permitiram considerar ser baixa a probabilidade de a escavação influenciar os níveis piezométricos e, também, ser reduzida a possibilidade de ocorrerem afluições significativas de água às escavações subterrâneas. Situações pontuais de elevada

permeabilidade foram admitidas associadas a estruturas geológicas individualizadas, assim como em zonas particulares de escavações localizadas próximo da superfície.

Dado que as zonas particulares do circuito acima referidas foram revestidas com betão cofrado, minimizaram-se as possibilidades de virem a ocorrer significativas fugas de água e significativas variações dos níveis piezométricos na fase de exploração do aproveitamento.

Pese embora o acima referido, considerou-se pertinente efetuar o controle dos níveis piezométricos. Assim, numa fase inicial do projeto foi realizado o inventário e caracterização sumária de pontos de água existentes na área de influência do empreendimento e a seleção dos pontos de água monitorizados no âmbito da observação de Venda Nova II, cujo controlo interessava continuar a assegurar para Venda Nova III.

O controlo dos níveis/caudais dos pontos de água considerados foi efetuado com base em quatro campanhas de medição anual, realizadas num conjunto de pontos considerado representativo para controlo e quantificação dos impactes gerados por Venda Nova III. Durante a fase de construção, nas campanhas de outubro/novembro e março/abril, foram adicionalmente controlados pontos de água, designados por "pontos de carácter social", cujo acompanhamento não se justificava em termos técnicos, mas que se revelava fundamental a nível social e do envolvimento da população local. Foi monitorizado um total de cerca de 270 pontos de água, incluindo nascentes, poças, poços, furos de captação e furos de sondagem. Parte dos furos de sondagem monitorizados integraram a rede de monitorização para a fase de exploração. No âmbito deste controlo, para além das medições de níveis/caudais referidas, foram adicionalmente registados os parâmetros pH, temperatura e condutividade.

A análise crítica dos dados já recolhidos e a comparação dos mesmos com os últimos registos obtidos no âmbito de Venda Nova II (datados de 2005, numa altura em que o circuito hidráulico de Venda Nova II se encontrava já em carga) permitirá, no final do período de monitorização correspondente a 2 anos após o enchimento do circuito hidráulico de Venda Nova III, avaliar o real impacto hidrogeológico do projeto.

3 - ASPETOS DE ELEVADA RELEVÂNCIA GEOTÉCNICA

O Reforço de Potência de Venda Nova III é um projeto eminentemente geotécnico que comporta um conjunto de elementos de obra e de trabalhos que, pela sua conceção, dimensão, complexidade e variedade, se destaca no panorama das grandes obras subterrâneas.

No presente capítulo apresentam-se, com maior detalhe, os elementos de obra e trabalhos que se consideram mais distintivos do ponto de vista geotécnico.

3.1 - Circuito hidráulico

As boas características geotécnicas do maciço e a garantia de cobertura adequada ao longo de todo o traçado do circuito hidráulico permitiram que se optasse por uma solução de túneis com revestimentos flexíveis, ou seja, em que o sistema de suporte é constituído por pregagens e betão projetado em grande parte da sua extensão. Em troços particulares do circuito hidráulico, por razões de segurança hidráulica e estrutural, foram adotadas soluções de revestimento com betão armado ou mesmo revestimento metálico, designadamente junto aos bocais da tomada de água e da restituição, trechos superior e inferior da central.

A atribuição de cada uma das 4 secções tipo de suporte do circuito hidráulico preconizadas no projeto de execução foi estabelecida com base nas classificações geomecânicas de Bieniawski (RMR) e de Barton (Q) atribuídas pela equipa de geologia, no acompanhamento da escavação. Estas secções tipo representam-se na Figura 16, resumindo-se no Quadro 4 a distribuição percentual das extensões do circuito hidráulico relativas a cada uma destas secções.

Quadro 4 – Distribuição percentual final da extensão dos túneis do circuito hidráulico relativa a cada uma das secções tipo de contenção aplicada.

Secção tipo	RMR	Túnel em carga (L=2806 m)	Túnel de restituição (L=1382 m)
A	70 – 100	56%	17%
B	50 – 70	29%	35%
C	20 – 50	4%	30%
D	0 – 20	11%	18%

Em complemento às secções tipo de suporte registadas no Quadro 4, quando necessário, foram realizados tratamentos localizados de descontinuidades com preenchimento argiloso, assim como, reforçada a

contenção definitiva, essencialmente em zonas localizadas com estruturas geológicas subhorizontais. De um modo geral, nas zonas revestidas a betão cofrado o tratamento por injeções foi preconizado com duas fases de injeção de caldas de cimento, utilizando pressões de injeção relativamente baixas.

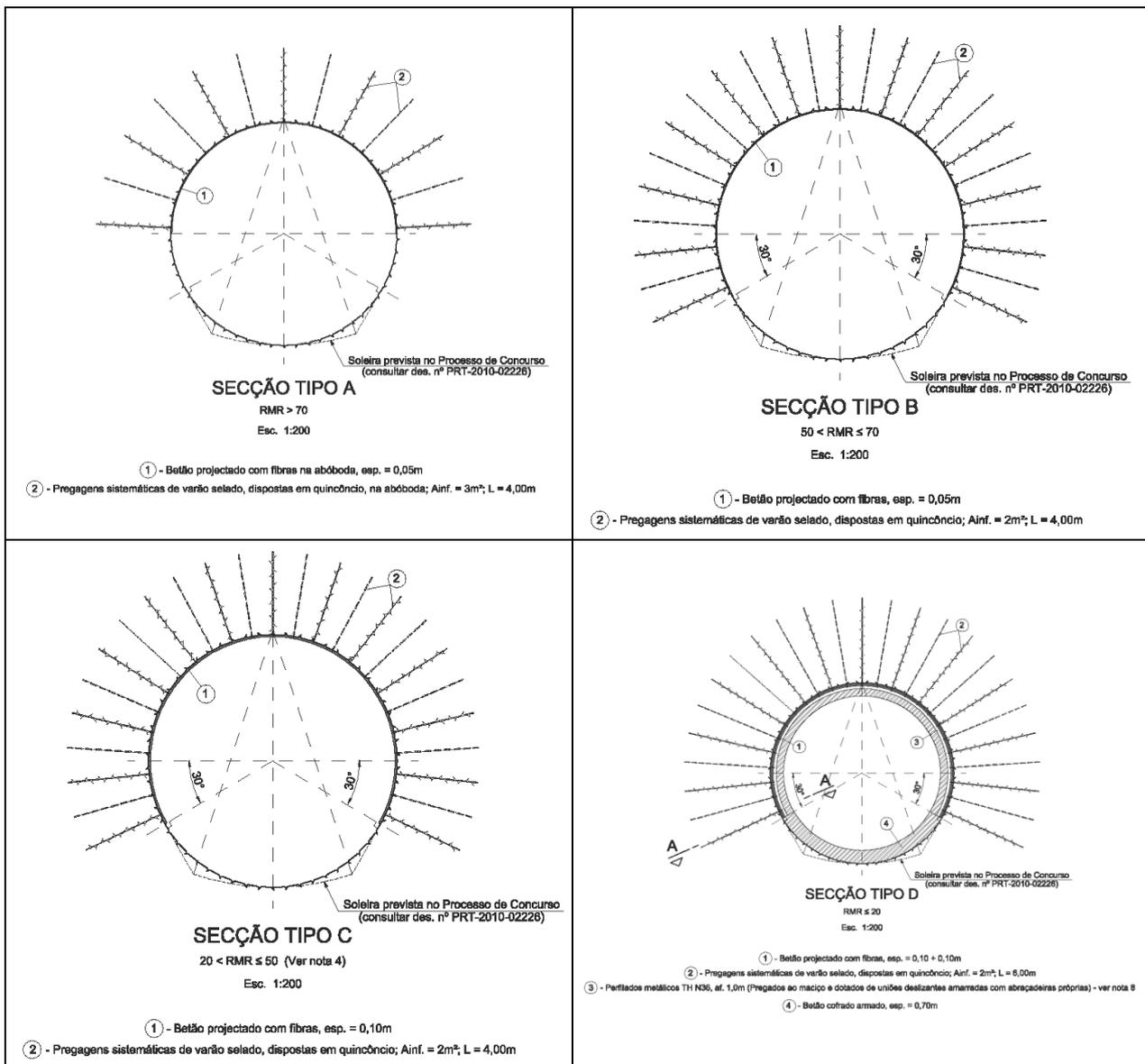


Figura 16 – Secções tipo de contenção definitiva do circuito hidráulico de Venda Nova III

Refira-se ainda que a envolvente dos túneis é drenada por meio de furos curtos com orientação radial na abóbada em toda a extensão, com o objetivo de facilitar o equilíbrio de pressões entre o interior do circuito hidráulico e o maciço rochoso envolvente.

As escavações dos túneis do circuito hidráulico foram realizadas em secção total, recorrendo a explosivos (drill and blast), mantendo-se o circuito hidráulico de Venda Nova II em funcionamento.

Atendendo à proximidade dos circuitos hidráulicos de Venda Nova III e de Venda Nova II, sabendo-se que parte das estruturas geológicas iriam intersectar ambos os circuitos e que tais estruturas poderiam constituir caminhos privilegiados de aflúências de água às frentes de escavação, com efeitos adversos nas metodologias de trabalho, foi preconizado um tratamento para avanço da escavação.

Assim, tendo em vista minimizar os riscos decorrentes de tais aflúências, foram realizados, à medida do avanço da escavação, furos exploratórios subhorizontais com comprimento na ordem dos 20 metros, conforme esquema da Figura 17, nos quais foram efetuadas medições de caudal, pH, condutividade, concentração de ferro e fluoreto da água afluyente. Por norma realizaram-se no mínimo 2 furos, e no máximo 6 em cada posição de frente escavada auscultada.

Os caudais afluentes aos túneis nos furos exploratórios foram, na generalidade, relativamente baixos (menores que 30 l/min) pelo que, apenas pontualmente, foram efetuadas operações de impermeabilização do maciço com recurso a injeções de caldas de cimento.

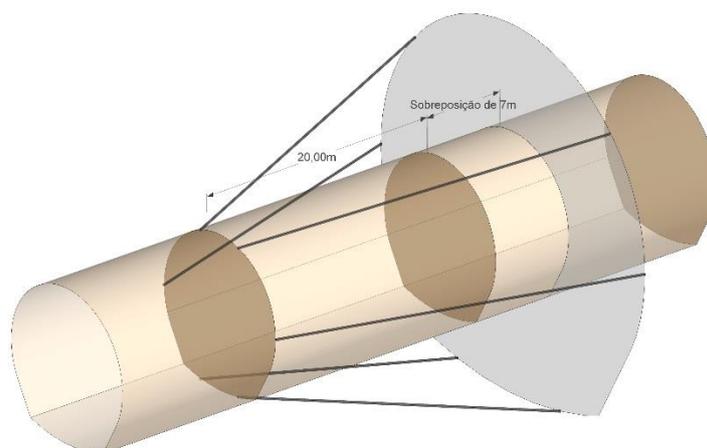


Figura 17 – Representação esquemática dos furos exploratórios

A determinação da proveniência da água (que seria do maciço granítico ou do circuito hidráulico de Venda Nova II) baseou-se na comparação de valores paramétricos previamente estipulados para ambas as águas. Verificou-se um aumento gradual de pH e condutividade elétrica com o aumento de distância à albufeira de Venda Nova, o que corresponde a zonas onde o túnel está a maiores profundidades e mais afastado do circuito hidráulico de Venda Nova II. Estes resultados são consistentes com o modelo hidrogeológico conceptual, confirmando a baixa permeabilidade global do maciço rochoso.

3.2 - Central

Conforme mencionado no ponto 1, o complexo da central de Venda Nova III é fundamentalmente constituído por duas câmaras contíguas, unidas pelos topos e de secções distintas, sendo a de maiores dimensões destinada aos dois grupos reversíveis turbina-bomba/alternador-motor de eixo vertical (caverna dos grupos) e a mais pequena para alojar os transformadores principais (câmara dos transformadores) (Figura 18).

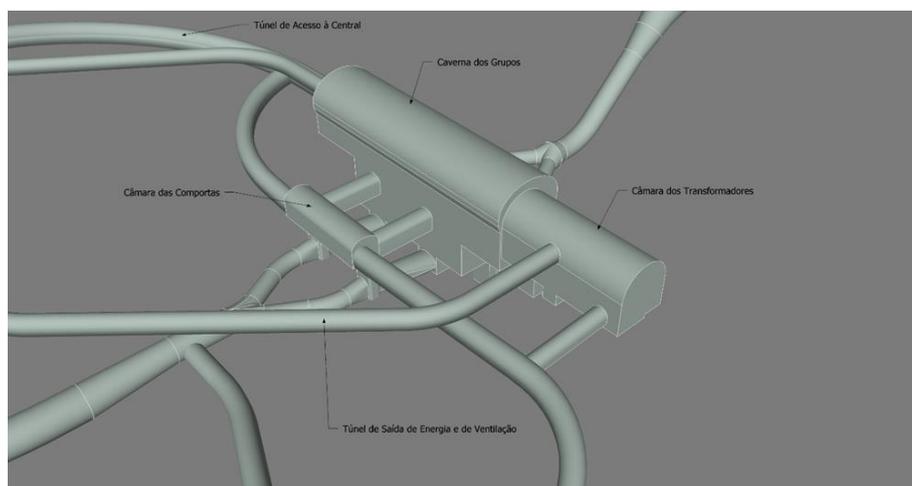


Figura 18 – Complexo da central

A caverna dos grupos apresenta, em planta, as dimensões úteis de 25,00 m por 103,10 m, e a secção transversal tem altura de 53,2 m na zona dos grupos geradores e de 24 m na zona do átrio de montagem, medidas até à geratriz superior da abóbada em arco abatido que constitui o seu teto. A câmara dos transformadores possui largura de 19,8 m, comprimento de 50 m e uma altura livre de 20 m. Tem uma secção transversal constituída por hasteais verticais e abóbada de volta inteira.

Na Figura 19 e na Figura 20 apresenta-se uma planta e um corte longitudinal da central, respetivamente. Na Figura 21 mostra-se um corte transversal da central, pelo eixo de um dos grupos.

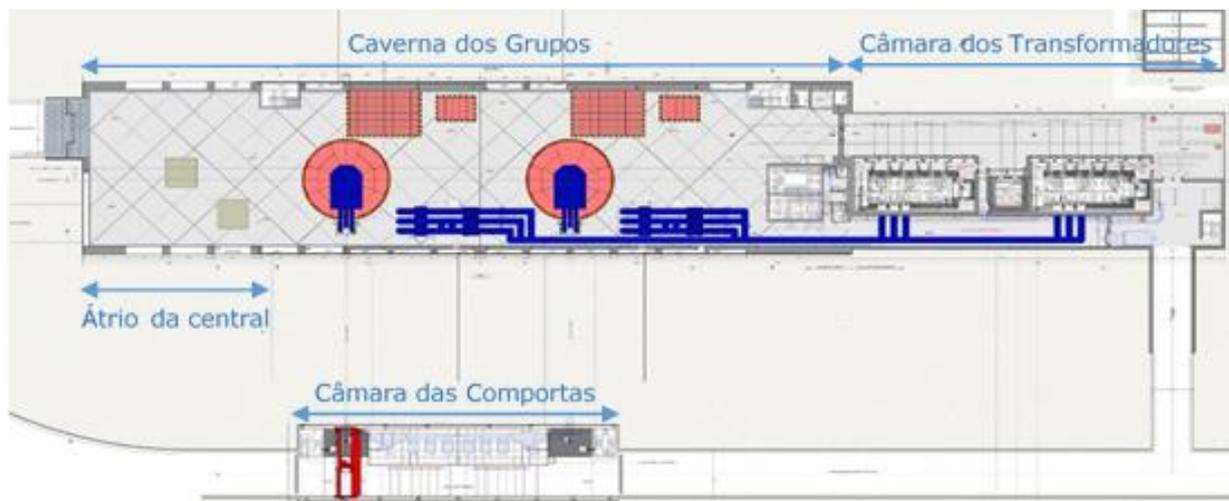


Figura 19 – Complexo da central: caverna dos grupos, câmaras dos transformadores e das comportas. Planta

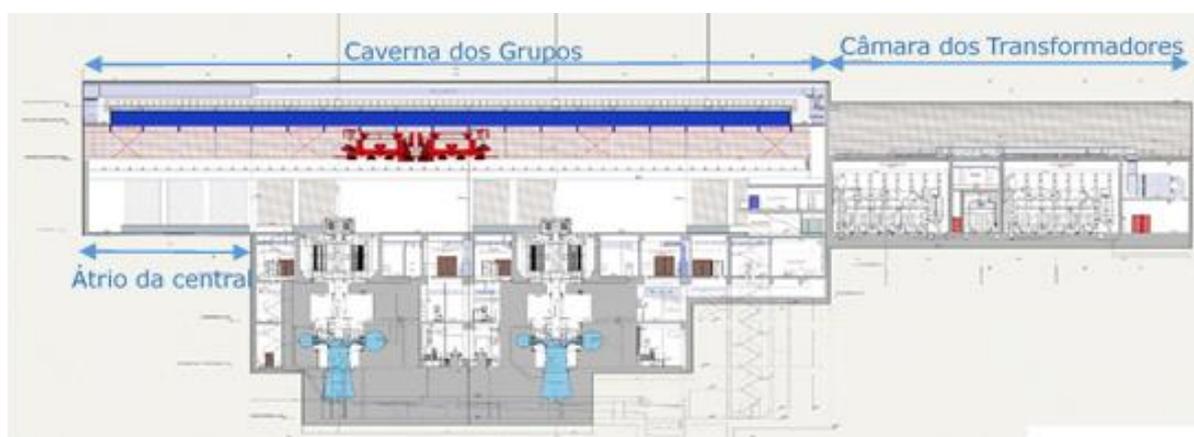


Figura 20 – Complexo da central. Corte longitudinal

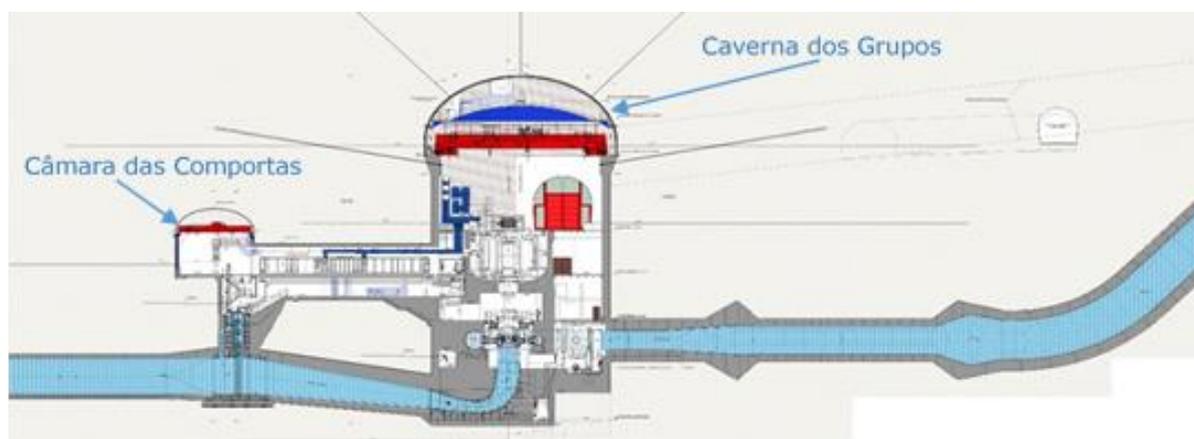


Figura 21 – Complexo da central. Corte transversal pelo eixo de um grupo

3.2.1 - Faseamento de escavação da central

A escavação da central iniciou-se a partir do túnel de ventilação e construção - TVC (ataque à abóbada), tendo-se procedido à abertura de 2 galerias longitudinais ao longo de toda a central, com recurso a um jumbo de 3 braços, e de 4 galerias transversais (uma junto ao TVC e as restantes três coincidentes as secções dos extensómetros).

Após escavação destas galerias e aplicação da respetiva contenção definitiva, procedeu-se à instalação de extensómetros de varas para monitorização dos deslocamentos do maciço rochoso. Seguidamente, completou-se a escavação da abóbada até à base das vigas de apoio das pontes rolantes, suspensas temporariamente por ancoragens ativas. Procedeu-se à execução das vigas ancoradas de 3 m de altura, 2 m de largura e 103 m de comprimento, com 3 juntas estruturais. Foram executadas um total de 112 ancoragens ativas, 68 unidades dimensionadas para um pré-esforço de 1350 kN e as restantes 44 unidades

dimensionadas para um pré-esforço de 950 kN. Todas as ancoragens foram realizadas com 10° de inclinação ascendente, comprimentos livres variáveis entre 21 e 25 m e comprimentos selados entre 7 e 11 m (Figura 22).

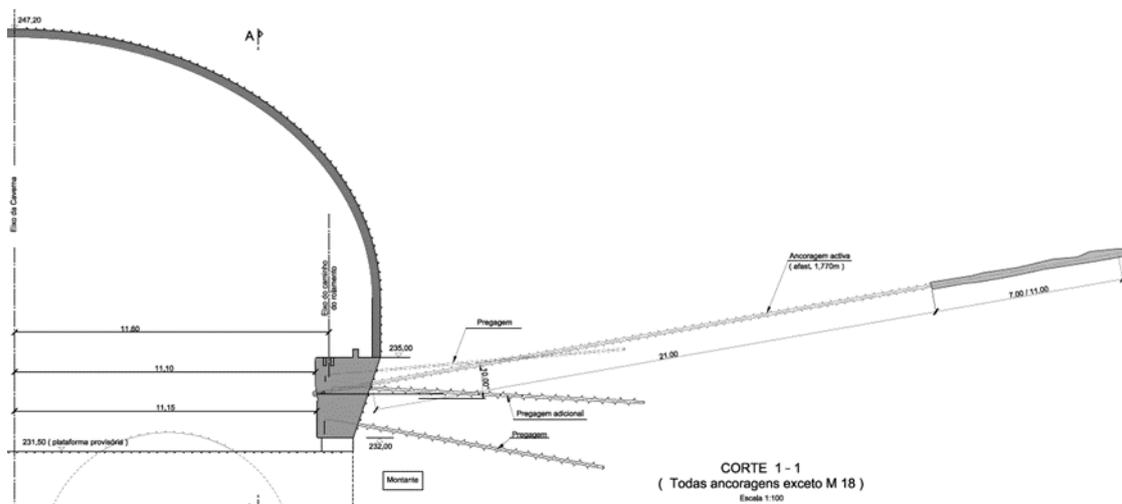


Figura 22 – Ancoragens das vigas das pontes rolantes. Corte transversal tipo

A restante escavação até à base do poço de bombagem foi executada por desmonte em bancada, sendo o escombro removido pelos diversos túneis e acessos existentes a cotas inferiores.

Salienta-se que na abóbada e nos hasteais das cavernas dos grupos e dos transformadores aplicaram-se sistemas de suporte flexíveis, constituídos por betão projetado reforçado com fibras de aço e pregagens seladas com calda de cimento.

3.2.2 - Modelo numérico tridimensional

Durante as diversas fases de construção da central de Venda Nova III foram realizados estudos de estabilidade, bem como o dimensionamento dos respetivos sistemas de suporte. Para tal, foram feitas análises de estabilidade local e global recorrendo a vários tipos de programas de cálculo (Unwedge, Phase2 e Flac3D).

Além disso, com o objetivo de permitir um acompanhamento das escavações e a aferição das condições de segurança durante o processo de escavação da central, foi construído um modelo numérico 3D, que permitiu estudar o comportamento do maciço envolvente daquela. Através deste modelo, avaliaram-se os esforços induzidos no maciço rochoso e foram calculados os valores dos deslocamentos esperados em pontos do modelo correspondentes com a localização dos pontos de selagem dos extensómetros instalados no âmbito do plano de observação da central, os quais foram comparados com os deslocamentos reais observados durante a execução da escavação faseada.

Este estudo numérico foi realizado recorrendo ao programa tridimensional de diferenças finitas Flac3D, tendo-se representado as principais cavidades na zona do complexo da central, com vista à determinação dos estados de tensão e de deformação em torno das mesmas, ao longo de uma sequência de escavação similar à implementada em obra. Na Figura 23 apresenta-se uma perspetiva global da malha utilizada no estudo.

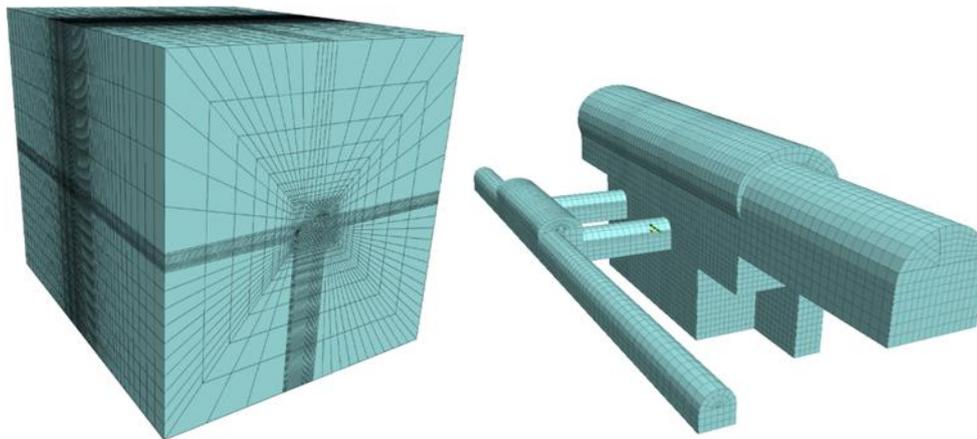


Figura 23 - Perspetiva global da malha utilizada no estudo

O estabelecimento do estado de tensão "in situ" teve por base a interpretação dos resultados dos ensaios STT e SFJ e as retroanálises efetuadas a partir dos dados de monitorização obtidos durante a construção do reforço de potência de Venda Nova II. Deste modo, a tensão vertical num determinado ponto do modelo foi calculada com base no peso do material sobrejacente, ou seja, admitiu-se uma distribuição com um gradiente gravítico na direção vertical, tendo-se considerado um peso volúmico de 27 kN/m³. Para a tensão horizontal normal ao eixo da central considerou-se razoável assumir um valor aproximadamente igual a 2,5 vezes a tensão vertical ($k=2,5$) e para a tensão horizontal paralela ao eixo um valor igual à tensão vertical ($k=1,0$).

No estudo realizado admitiu-se que o maciço rochoso teria um comportamento elastoplástico definido pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb, tendo sido considerados os parâmetros elásticos (E e ν) e os parâmetros de resistência (ϕ , c e σ_t) que se apresentam no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros elásticos e de resistência considerados no cálculo

Material	Parâmetros elásticos		Parâmetros de resistência (Critério de <i>Mohr-Coulomb</i>)		
	E (GPa)	ν	ϕ (°)	c (MPa)	σ_t (MPa)
Falha F1	1	0,2	40	1	0
Maciço	30	0,2	55	3	3

No modelo foi incluído o ramo F1_Central da falha da central e chaminé de equilíbrio (Figura 24), identificada no decurso das escavações da abóbada desta caverna.

O processo de escavação foi simulado de modo simplificado, tendo sido consideradas as fases de escavação, em correspondência com a sequência de escavação adotada em obra.

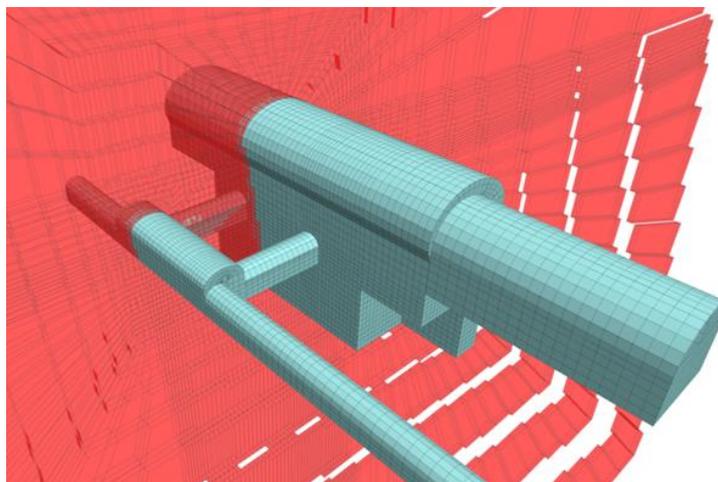
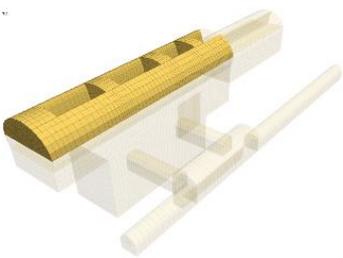
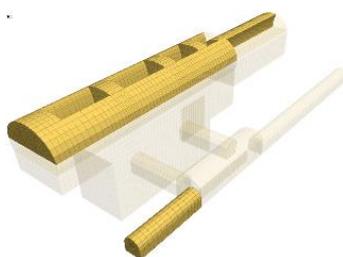
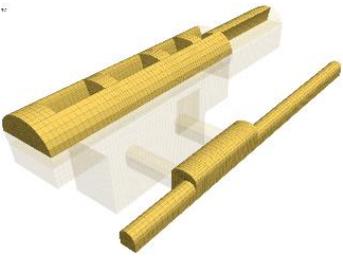
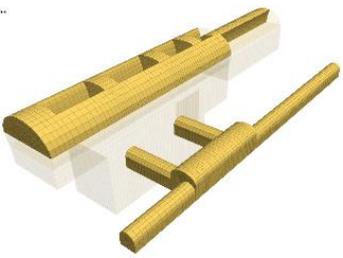
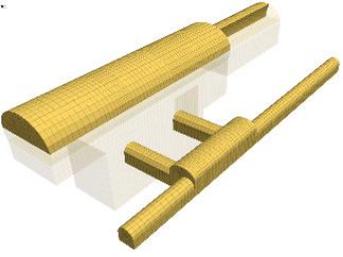
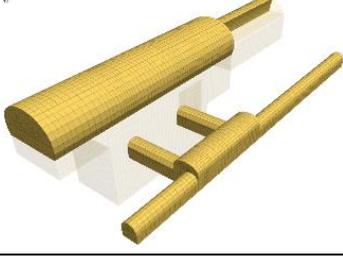
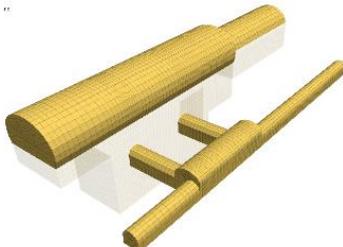
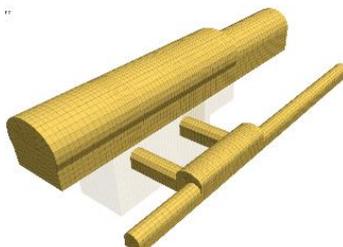
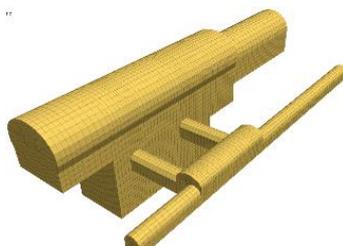


Figura 24 - Modelação da falha da central e chaminé de equilíbrio

No Quadro 6 apresenta-se de forma esquemática a sequência de escavação modelada. Apresentam-se ainda algumas fotografias tiradas no decorrer da obra, onde é possível observar a evolução real da escavação.

Quadro 6 – Faseamento da escavação

Fase	Descrição	Modelo	Escavação
1	<p>Escavação de duas galerias laterais ao nível das nascenças da abóbada, desenvolvendo-se em toda a extensão da caverna dos grupos e de quatro galerias transversais ligando aquelas duas.</p> <p>Instalação dos extensómetros localizados na abóbada da caverna dos grupos, em três secções transversais.</p>		
2	<p>Escavação parcial da abóbada da câmara dos transformadores e do túnel de acesso à câmara das comportas e ao túnel de restituição (TACCTR).</p> <p>Instalação dos extensómetros localizados na abóbada da câmara dos transformadores.</p>		
3	<p>Escavação parcial da câmara das comportas e do TACCTR.</p>		
4	<p>Escavação da parte superior das câmaras dos VSI's (exceto 5 m junto à caverna dos Grupos).</p>		
5	<p>Escavação restante (pilares) da abóbada da caverna dos grupos.</p>		
6	<p>Escavação da caverna dos grupos: rebaixo para as vigas da ponte rolante, suspensas por ancoragens ativas.</p>		

Fase	Descrição	Modelo	Escavação
7	Escavação restante da abóbada da câmara dos transformadores.		
8	Escavação da caverna dos grupos: rebaixo para o piso principal e escavação restante da câmara dos transformadores. Instalação dos extensómetros localizados nos hasteais da caverna dos grupos, em três secções transversais.		
9	Escavação da caverna dos grupos: rebaixos sucessivos de 7 m até à base do poço de bombagem.		

A fotografia da Figura 25 ilustra o aspeto do interior da caverna dos grupos e da câmara dos transformadores no final das escavações. Na parte superior da fotografia é possível visualizar as duas vigas ancoradas de suporte das pontes rolantes anteriormente referidas.



Figura 25 - Fotografia do interior da caverna dos grupos e da câmara dos transformadores no final das escavações

Na Figura 26 apresentam-se os deslocamentos e as tensões principais mínimas (compressões máximas) no maciço rochoso, numa secção transversal coincidente com o eixo do grupo 2, no final da escavação, obtidos através dos cálculos numéricos.

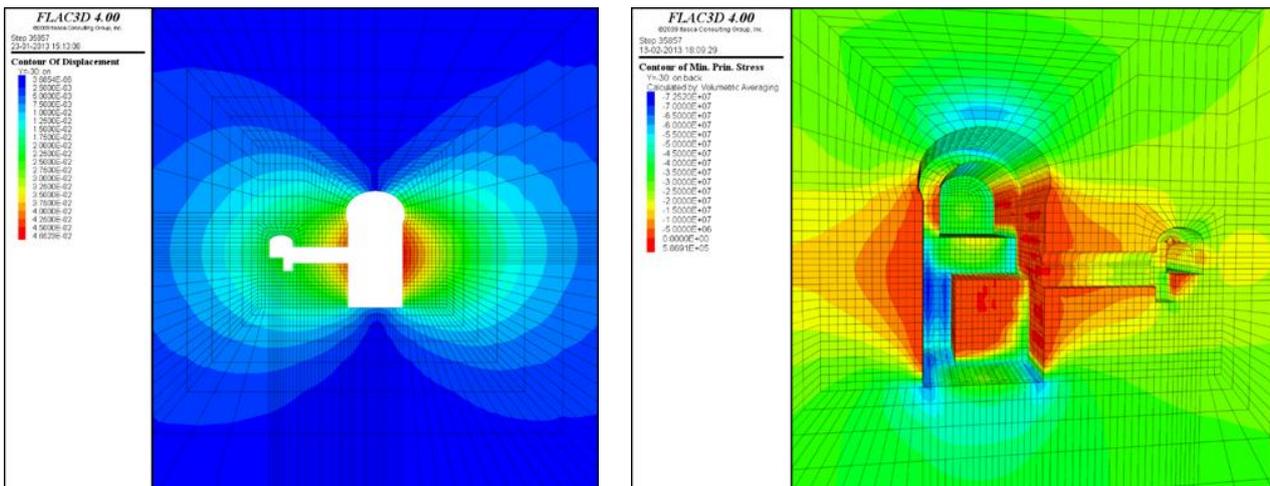


Figura 26 – Deslocamentos (corte, à esquerda) e tensões principais mínimas (perspetiva, à direita), obtidas numericamente para uma secção transversal coincidente com o eixo do grupo 2, no final da escavação

3.2.3 - Monitorização

Na zona do complexo da central os deslocamentos do maciço rochoso são monitorizados por intermédio de 24 extensómetros de varas duplos (em número de 5) e triplos (em número de 19), dispostos em 4 secções transversais às duas cavidades. Três das secções instrumentadas situam-se na caverna dos grupos e uma na câmara dos transformadores (Figura 27). As varas dos extensómetros apresentam comprimentos variando entre os 5 m e os 50 m.

O Plano de Observação do complexo da central contempla ainda a medição da carga instalada em 10 ancoragens ativas das vigas das pontes rolantes e a medição do nível de água através de dez piezómetros.

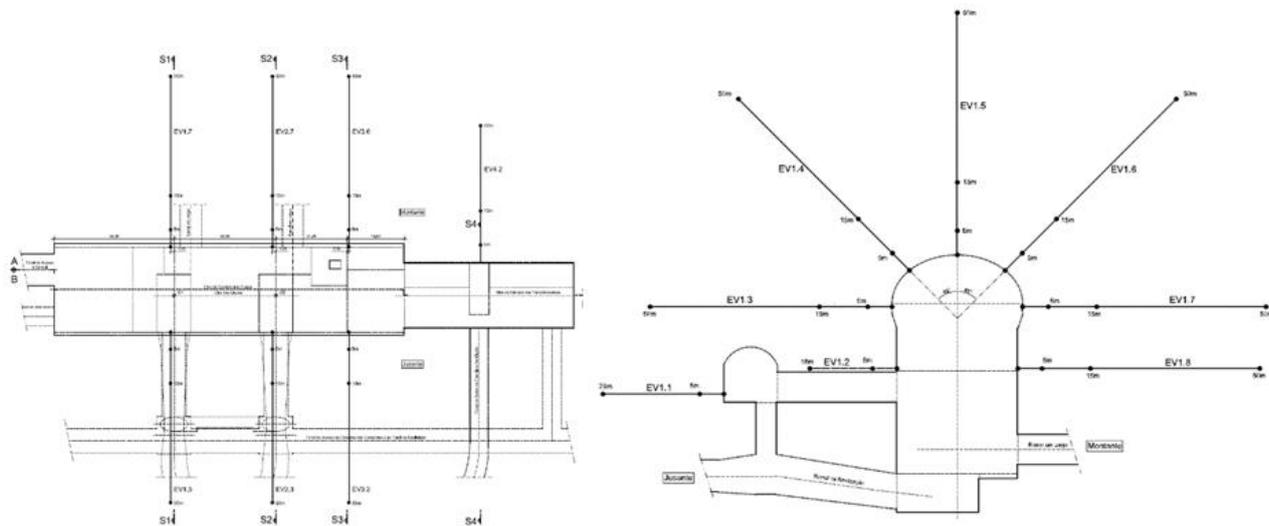


Figura 27 - Monitorização do complexo da central – Extensómetros de varas. Planta (à esquerda) e secção transversal (à direita)

Na Figura 28 apresentam-se os gráficos que retratam a previsão da evolução dos deslocamentos obtidos a partir do modelo numérico (à esquerda) assim como as leituras registadas durante a obra (à direita) num dos extensómetros instalado no hasteal de jusante da caverna dos grupos, desde a fase da respetiva instalação até ao final das escavações das cavidades da central.

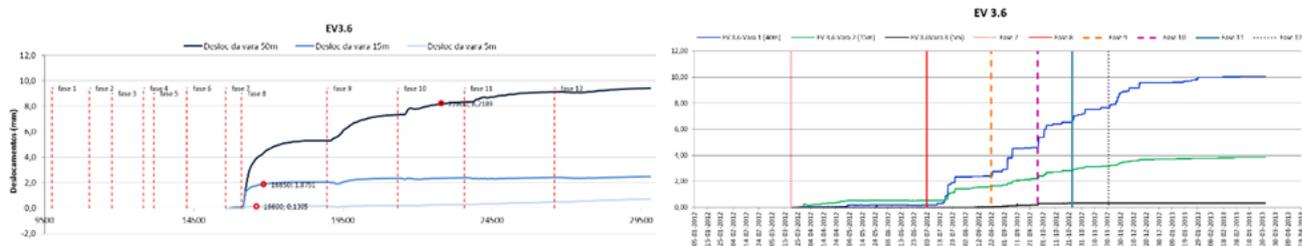


Figura 28 – Previsão da evolução dos deslocamentos (à esquerda) e leituras registadas durante a escavação (à direita)

A comparação entre os deslocamentos previstos e as leituras registadas em obra revelou, de uma forma geral, uma boa aproximação para os aparelhos instalados na central.

Salienta-se a utilidade que o modelo numérico teve no apoio ao desenvolvimento do projeto de Venda Nova III e acompanhamento da execução das escavações. O modelo numérico assumiu-se como elemento fundamental para a interpretação da informação de monitorização e identificação de mecanismos de deformação, permitindo antecipar a tomada de medidas necessárias à segurança da obra.

Concluídos os trabalhos de escavação da central, tiveram início os betões estruturais dos diversos pisos, bem como as montagens dos equipamentos a embeber, tais como os difusores, espirais, fossas dos alternadores, entre outros. Os trabalhos de betão armado da central de Venda Nova III revestiram-se de diversas dificuldades e desafios devido, por um lado, à dimensão e complexidade da central, mas também, por outro lado, devido à simultaneidade de trabalhos de construção civil em diversas frentes concomitantes com a montagem de equipamentos (Figura 29).

Posteriormente seguiram-se as montagens mecânicas dos grupos, montagens elétricas e os acabamentos de construção civil. Concluído o circuito hidráulico, procedeu-se ao primeiro enchimento do mesmo, de modo a permitir dar-se início ao comissionamento dos grupos com água.

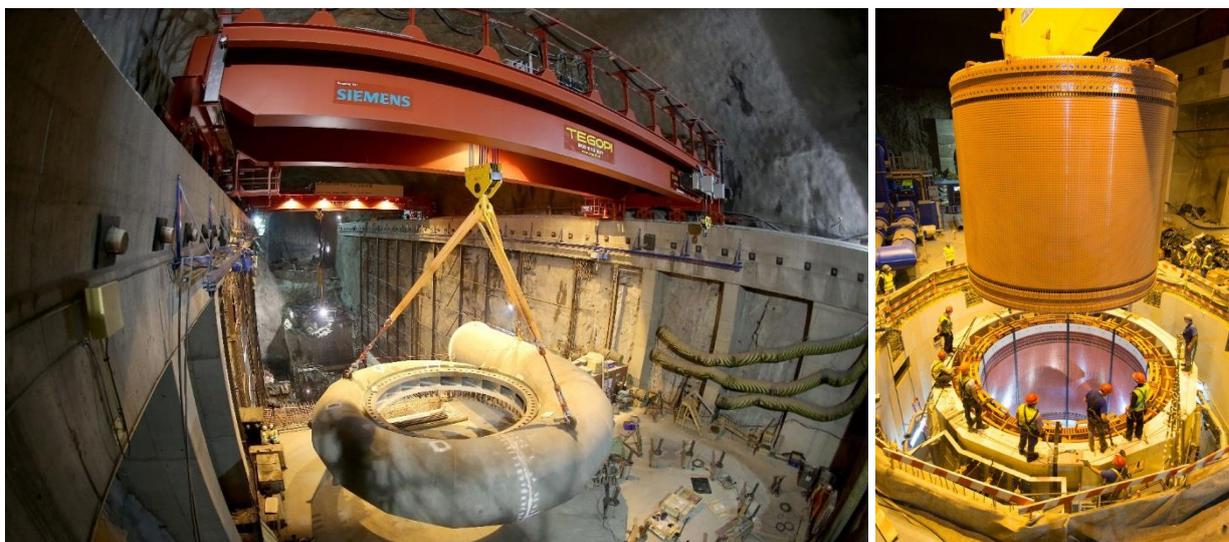


Figura 29 – Montagem da caixa espiral do G1 (esquerda) e do rotor do G1 (direita)

3.3 - Desarenador superior

O desarenador superior é o troço do circuito hidráulico que estabelece a ligação entre o túnel em carga e o troço blindado. Tratando-se de um circuito hidráulico maioritariamente não revestido, este elemento destina-se a promover a deposição de materiais de maior dimensão eventualmente arrastados pela água, através da redução da velocidade de escoamento. Trata-se de uma grande cavidade com extensão total de 105 m e secção transversal circular com 22,4 m de diâmetro máximo de escavação. A elevada ordem de grandeza das suas dimensões e as exigências de funcionamento hidráulico conduziram a uma solução estrutural de revestimento com betão cofrado cuja espessura teórica varia entre 0,90 m e 1,20 m. A Figura 30 ilustra o perfil longitudinal deste elemento.

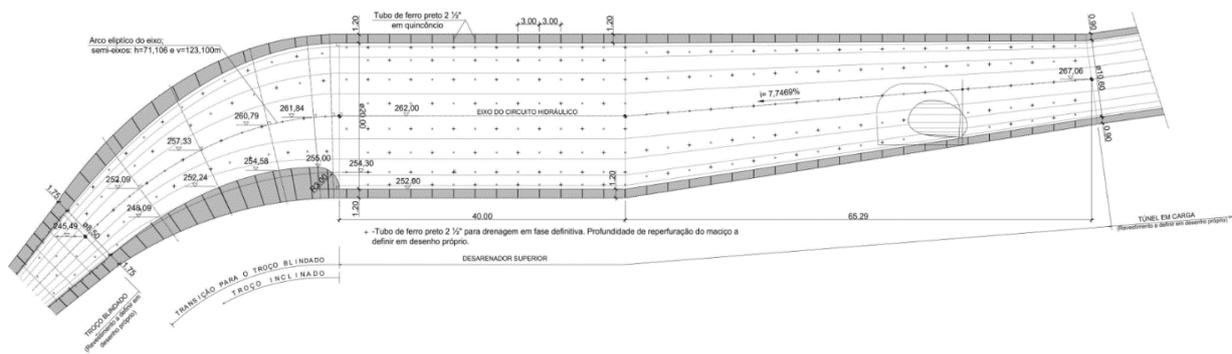


Figura 30 – Perfil longitudinal do desarenador superior e troço de transição para a blindagem

A alta queda que caracteriza este aproveitamento hidroelétrico, associada aos efeitos dos regimes transitórios causados pelas manobras dos grupos, conduz a uma pressão hidrostática interna no desarenador próxima de 500 m.c.a.. Era inequívoca a extrema dificuldade de dimensionar uma solução de revestimento em betão armado autoportante, sem o contributo do maciço rochoso envolvente, face a pressões tão elevadas. Por outro lado, num revestimento de betão armado cofrado, não só devido às juntas construtivas, mas também devido à fissuração induzida pela pressão da água, é inevitável que esta atravessasse a barreira constituída pelo revestimento.

No que respeita à pressão interior da água, a carga hidrostática atinge nesta zona do circuito hidráulico cerca de 430 m.c.a. apenas devido ao desnível altimétrico relativamente ao nível de pleno armazenamento da albufeira de Venda Nova. Este valor pode ter um rápido incremento, próximo de ± 50 m.c.a., devido a fenómenos resultantes das perturbações no escoamento originadas pela operação de equipamentos mecânicos, ou seja, oscilações de massa e/ou choque hidráulico (fenómenos transitórios). Isto significa que a maior percentagem da pressão hidrostática interior atua de forma permanente sobre o revestimento.

A ideia chave considerada na conceção do revestimento do desarenador passou por se admitir um cenário com um diferencial de pressões entre o intradorso e o extradorso do revestimento menor que o valor total da pressão da água no desarenador. Para o efeito, idealizou-se uma solução que promove o equilíbrio da pressão hidrostática entre o interior do desarenador e o maciço envolvente, materializada através de furos de drenagem que atravessam o revestimento e penetram 2 m no maciço rochoso (Figura 31).

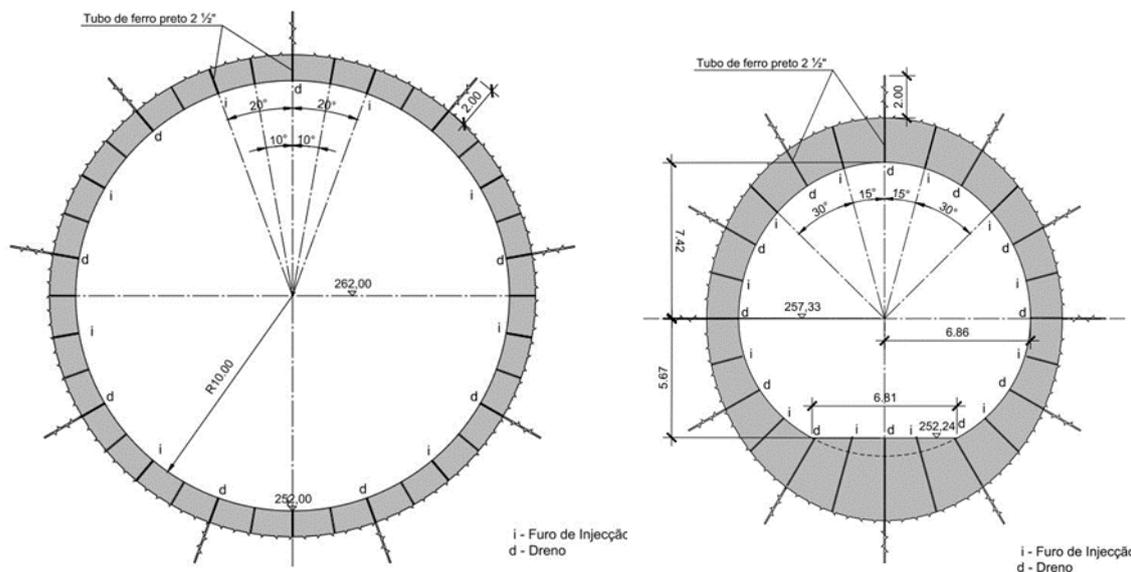


Figura 31 – Secções transversais tipo: a) desarenador superior; b) troço de transição para a blindagem

Para o dimensionamento estrutural do revestimento desenvolveram-se diferentes tipos de modelos estruturais, nos quais se considerou o contributo do maciço rochoso simulando o revestimento apoiado em meio elástico. A Figura 32 exemplifica os tipos de modelos adotados.

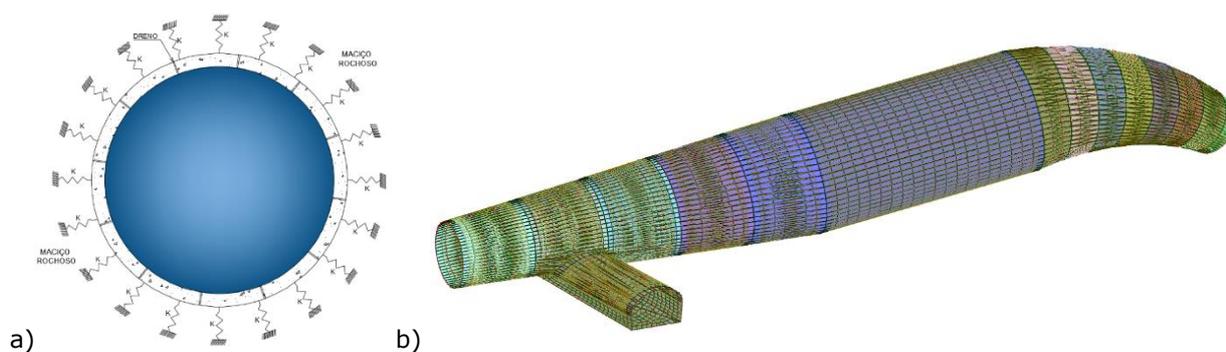


Figura 32 – Tipos de modelos numéricos utilizados no cálculo do revestimento de betão armado: a) modelo bidimensional tipo “pórtico”; b) Perspetiva do modelo de elementos finitos tridimensional

Importa referir que uma solução desta natureza acarreta preocupações e riscos adicionais uma vez que implica a admissão de pressões neutras significativas no maciço rochoso o que pode originar efeitos não desejáveis numa perspetiva do comportamento global da obra. Por este motivo, foram adotadas medidas adicionais para controlo de infiltrações.

Com o objetivo de melhorar o comportamento do maciço rochoso envolvente do desarenador preconizaram-se tratamentos de injeção com caldas de cimento e com resinas de poliuretano. Este tratamento visou consolidar e impermeabilizar o maciço rochoso, constituindo uma barreira à percolação da água em direção ao complexo subterrâneo da central. Foi materializado através de perfis de injeção afastados entre si de 3 m, estando os furos de cada perfil dispostos radialmente com afastamentos angulares compreendidos entre 20 e 30° (Figuras 33 e 34). Estes tratamentos de injeção integraram três fases distintas:

- Injeção de colagem e ligação, com calda de cimento e a baixa pressão (0,2 MPa), para preenchimento dos maiores vazios da zona do fecho da abóbada.
- Injeção de consolidação e impermeabilização, com calda de cimento e a uma pressão de 0,5 MPa, do maciço rochoso através de furos com 5 m de profundidade distribuídos em todo o contorno da secção.
- Injeção de impermeabilização do maciço rochoso com resina de poliuretano e a uma pressão de 5 MPa, em furos com 10 m de profundidade.

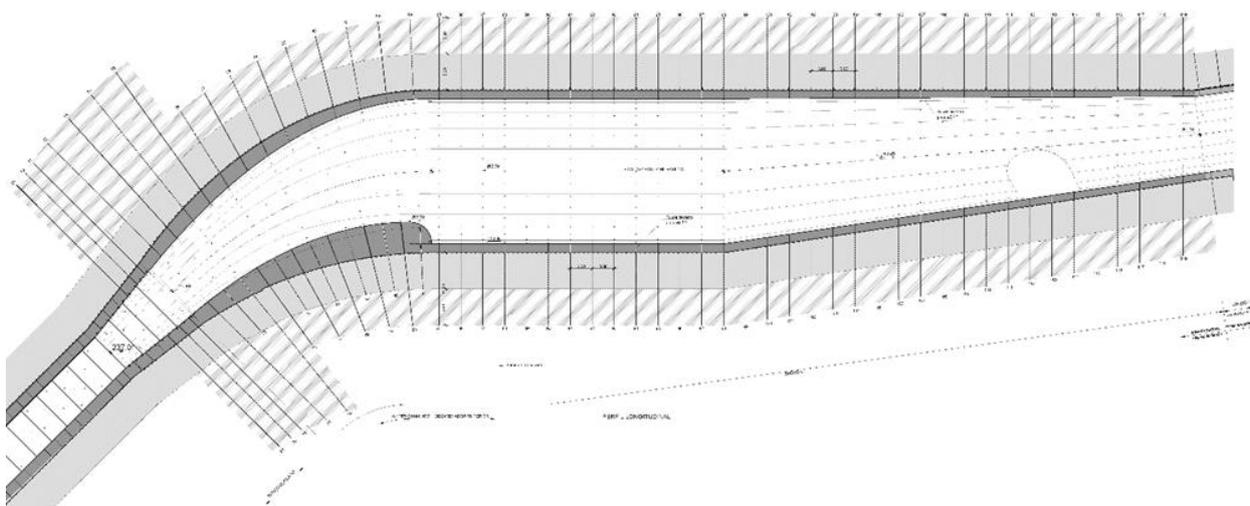


Figura 33 –Perfil de injeções na zona de transição entre o desarenador e a blindagem

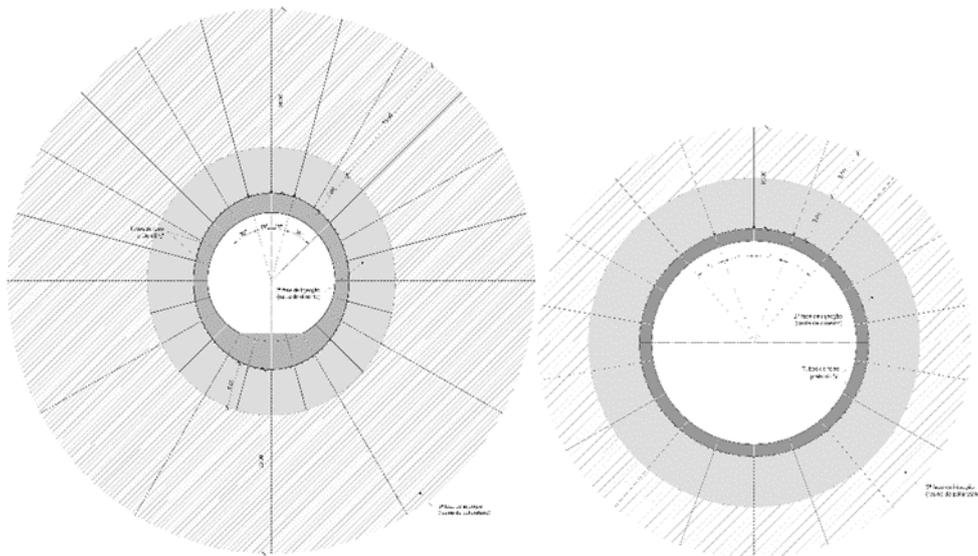


Figura 34 – Secções tipo de injeção: a) zona de transição entre o desarenador e a blindagem; b) zona do desarenador

Para além das medidas habituais para controlo de infiltrações para a zona da central (designadamente, a materialização de caleiras, bicas de medição de caudal e furos de drenagem), merece destaque a implantação da designada “Galeria de Drenagem de Montante”, que se desenvolve paralelamente à central, do lado de montante desta (ver Figura 35). A partir desta galeria foram abertos vários furos de drenagem, com os quais se pretendeu criar uma “máscara” drenante a montante da central. Esta galeria funcionou, também, como medida preventiva que visa aliviar, num cenário de eventual esvaziamento do circuito hidráulico, o valor das pressões da água que possam instalar-se no extradorso da blindagem do circuito.

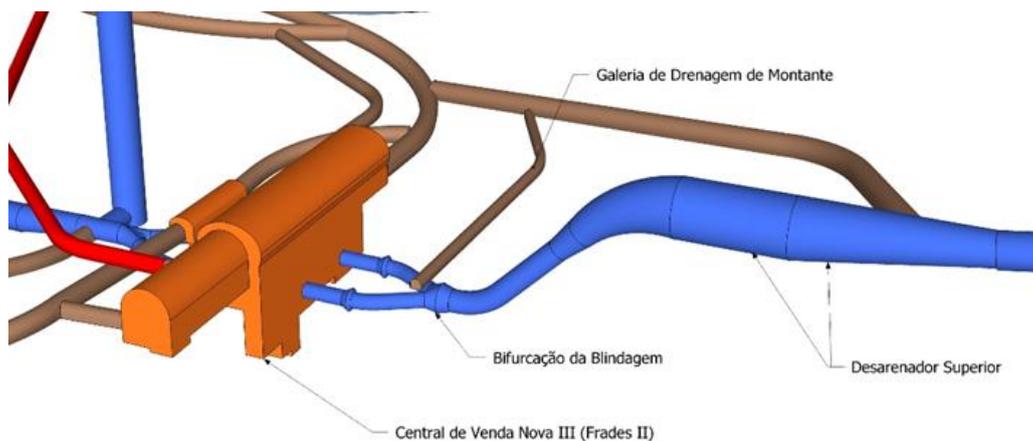


Figura 35 – Perspetiva do complexo subterrâneo das centrais de Venda Nova III

3.4 - Chaminé de equilíbrio superior

Nas primeiras fases de desenvolvimento do projeto, a solução que se perspetivava para a chaminé de equilíbrio superior de Venda Nova III passava pela construção de um poço de 13 m de diâmetro, com uma câmara de expansão à superfície, e de um poço a estabelecer a ligação ao túnel em carga.

Com o desenvolvimento do projeto, constatou-se que tal solução se afigurava pouco atrativa em termos de prazos, custos e segurança para os trabalhadores, na medida em que a utilização da tecnologia de “raise-boring” se revelou inviável para as dimensões requeridas, principalmente para a escavação mecânica, a secção plena, do poço de ligação.

A solução projetada consistiu então num poço principal com 78 m de altura e 13 m de diâmetro, revestido a betão armado cofrado, numa câmara de expansão à superfície, numa câmara inferior (câmara de alimentação) e dois poços de ligação ao túnel em carga, não revestidos, com 360 m de altura e 5,4 m de diâmetro e a escavar mecanicamente com recurso à tecnologia “raise-boring”.

O faseamento e sequência construtiva previstos comportavam: a escavação do túnel de ataque que liga à câmara de alimentação; a escavação e revestimento em betão do poço principal e desta câmara; a escavação dos dois poços de ligação.

Contudo, no decurso da escavação dos poços de ligação ocorreram vários imprevistos que exigiram a alteração significativa dos métodos e trabalhos previstos para estes poços, destacando-se os seguintes eventos:

- Na furação dos furos piloto a partir da câmara inferior, pela tecnologia de furação dirigida RVDS, e já com quase 300 m de furação realizada (a cerca de 70 m da base destes poços), verificou-se perda de água total da furação em ambos os poços; após tratamento com injeções de cimento e de polímeros, foi possível concluir os furos piloto;
- Acoplada a cabeça escarificadora e iniciadas os trabalhos de "reaming" num dos poços (escavação mecânica vertical ascendente em "full-face") constatou-se, num primeiro momento, um desgaste anormal dos cortantes, a que se seguiu o colapso e dano integral da cabeça escarificadora a cerca de 65 m da base;
- Após substituição da cabeça escarificadora e retomada a escavação, verificou-se novo colapso poucos metros acima;
- A mesma situação veio a repetir-se no outro poço, praticamente à mesma profundidade, tendo levado à suspensão dos trabalhos nos dois poços.

Face a esta situação foi decidido realizar, desde a câmara inferior, 3 sondagens para tentar melhor identificar e caracterizar as estruturas geológicas que estariam a impedir a normal escavação. A interpretação das sondagens permitiu identificar vários planos de falha e zonas de esmagamento associado, sem permitir, contudo, identificar a real magnitude e geometria da interceção com os poços, concluindo-se também pela inadequação da tecnologia "raise-boring" às características do maciço nesses troços dos poços.

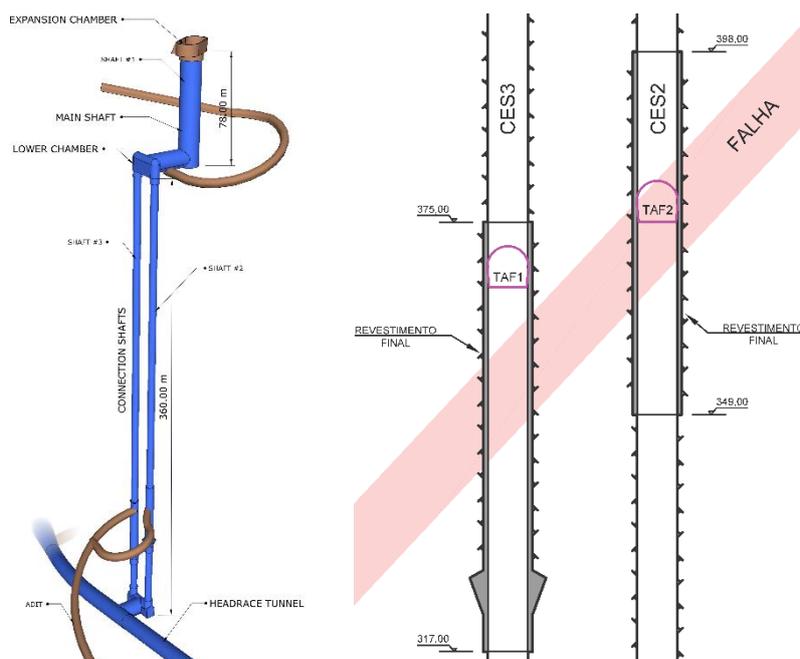


Figura 36 – Representação esquemática da chaminé de equilíbrio superior (esquerda); representação em maior escala da zona em que a falha atravessa os poços de ligação (direita)

Várias soluções alternativas para ultrapassar este obstáculo foram equacionadas, quer ao nível da solução projetada, quer ao nível dos métodos construtivos, tendo-se optado por:

- Manter a conceção geral da chaminé;
- Construir um túnel para atingir a parte superior da interceção das falhas com os poços;
- Dessa interceção prosseguir com a escavação da parte superior dos poços em "raise-boring" e posterior contenção das paredes;
- Concluída a contenção da parte superior dos poços, demolir os troços não escavados (variando entre 12 a 18 m) por métodos convencionais e com recurso a um prévio furo piloto de pequena dimensão (cerca de 1,2 m de diâmetro).

- Concluídos os furos piloto referidos, e antes de se avançar com a demolição total dos respetivos troços de poço, foi decidido fazer um levantamento 3D por "laser scanning" com o objetivo de melhor perceber a geometria das cavidades entretanto criadas pela esporádica queda de material da zona conturbada pela falha (Figura 37).

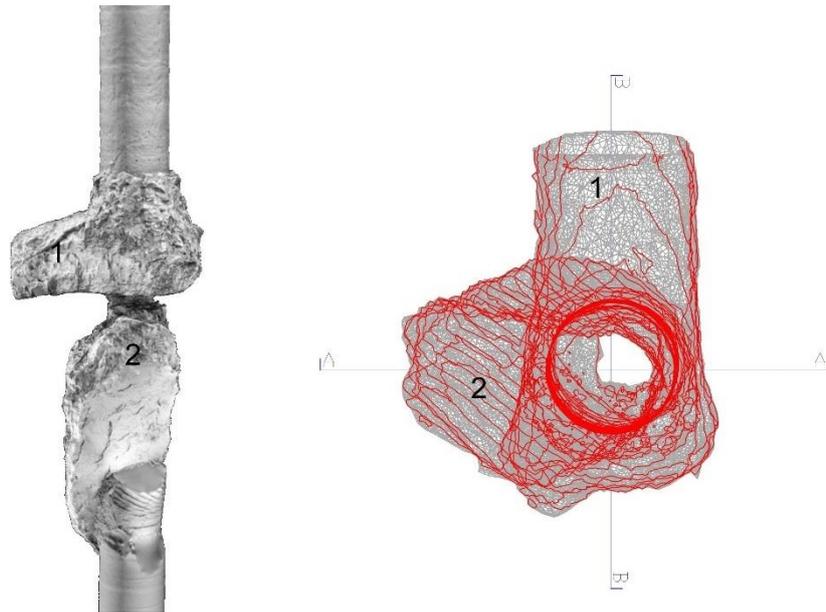


Figura 37 -Levantamento 3D por laser scanning (1: TAF; 2:Falha)

O resultado obtido com este levantamento 3D permitiu uma muito precisa interpretação das reais condições geométricas e físicas das zonas a demolir e concluir que a demolição dos troços em falta por métodos convencionais era, do ponto de vista técnico e da segurança para os trabalhadores, inaceitável, na medida em que não impediria o incremento da dimensão das cavidades já formadas. Por outro lado, permitiu logo concluir pela necessidade de, em definitivo, estabilizar estas zonas através do revestimento com betão armado.

A solução a implementar para a demolição destes troços teria de assegurar simultaneamente: a não progressão da cavidade criada na zona conturbada pela falha; a estabilização provisória das superfícies escavadas até ao seu revestimento com betão armado; a manutenção, em todas as fases, de um nível de segurança adequado para os trabalhadores.

Após várias interações com o empreiteiro e o apoio de uma empresa mineira especializada em recuperação de poços de minas, foi então configurada uma solução projeto-constructiva que compreendeu as seguintes etapas:

- 1) Enchimento do poço com brita drenante criteriosamente selecionada até à interceção com os túneis de ataque à falha, por forma a constituir plataformas seguras de trabalho (Figura 38);
- 2) Reperfilamento das zonas em subescavação, por troços com altura de 3 m, seguida da remoção de igual altura de brita;
- 3) Aplicação de pregagens, betão projetado e consolidação do maciço através de injeção de resina de poliuretano (Figura 39);
- 4) Execução do revestimento definitivo do poço na zona superior da cavidade que permitiu fazer o preenchimento da mesma e criar condições de segurança para os trabalhos subsequentes (Figura 39);
- 5) Repetição das etapas 2) e 3) ao longo de toda a altura a betonar;
- 6) Remoção da brita sobranete no poço e betonagem do anel de revestimento definitivo no sentido ascendente.

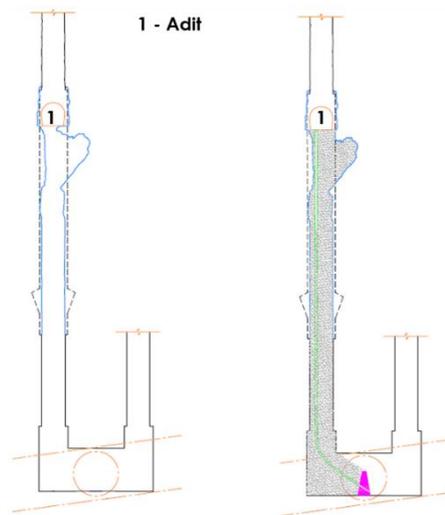


Figura 38 – Enchimento do poço com brita (antes e depois)

Dada a proximidade dos 2 poços (distância entre eixos de 20 m) e a simultaneidade de trabalhos, foi necessário impor limites muito restritivos ao nível das vibrações provocadas, principalmente, pelas escavações com explosivos.

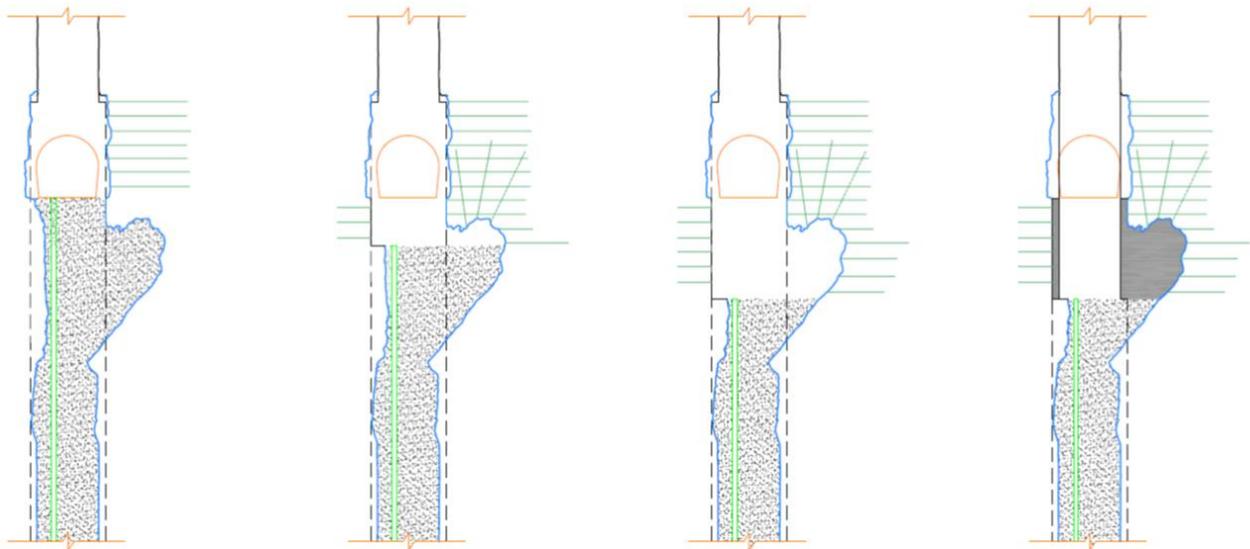


Figura 39 – Sequência do tratamento da zona de falha

3.5 - Rolhão de montante

O rolhão superior materializa a obturação do circuito hidráulico na ligação ao túnel de acesso ao túnel em carga (TATC), na proximidade do desarenador superior (ver Figura 2). O seu eixo está à cota (262,00), o que significa que é solicitado por a uma pressão hidrostática de 429,3 m.c.a. para o nível de máxima cheia da albufeira de Venda Nova (691,30). Em regime transitório o valor da pressão pode atingir cerca de 470 m.c.a.. O TATC tem secção corrente teórica de escavação em forma de ferradura com área de 60,8 m².

O rolhão foi concebido com uma extensão de 52,5 m materializada através de 7 blocos de 7,5 m de extensão cada um, os quais estão separados por juntas verticais de contração (Figura 40). No penúltimo bloco foi materializada uma recrava na escavação com o intuito de incrementar a margem de segurança ao deslizamento do rolhão. Imediatamente a montante do rolhão existe uma junta vertical (designada Junta de Construção 1) que materializa a separação entre o rolhão e o revestimento do circuito hidráulico. A zona montante do rolhão é dotada de uma blindagem com 12,3 m de extensão obturada por uma porta estanque. Na Figura 41 representa-se a secção transversal corrente do rolhão e a secção transversal na Junta de Construção 1.

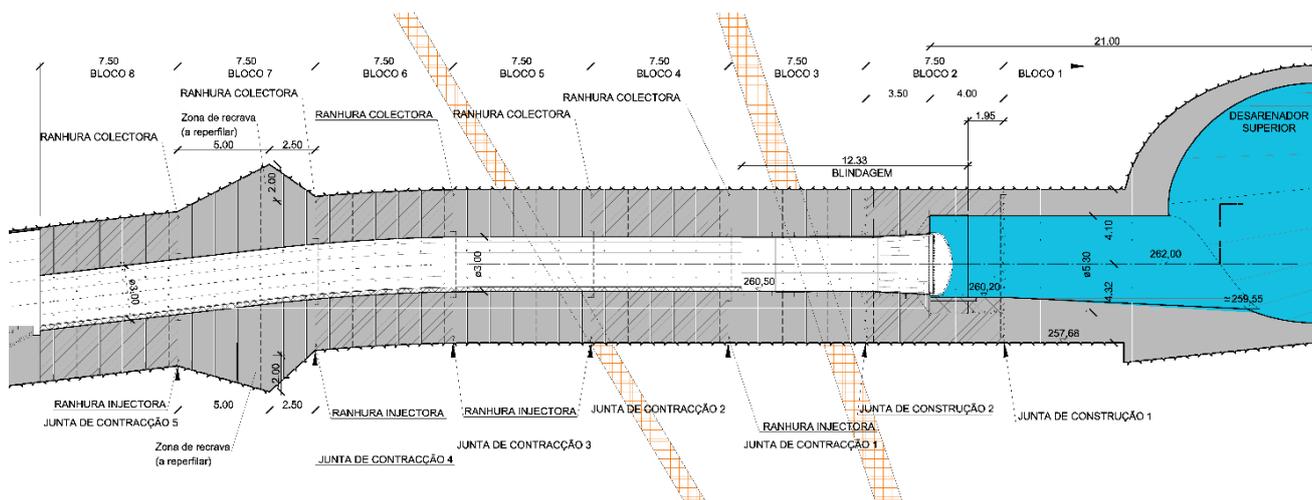


Figura 40 – Perfil longitudinal do rolhão

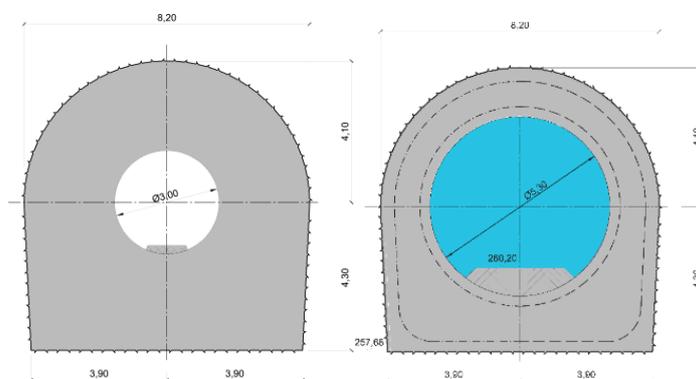


Figura 41 – Secções transversal corrente do rolhão (à esquerda) e secção transversal na Junta de Construção 1 (à direita)

Na zona de implantação do rolhão o TATC atravessou duas importantes zonas geologicamente conturbadas que condicionaram a sua conceção, nomeadamente no que se refere ao posicionamento da recrava. De fato, neste tipo de estruturas é habitual posicionar a(s) recrava(s) na parte montante do rolhão, próximo da zona onde está aplicada a pressão da água. Neste caso, no entanto, devido às condições geológicas, considerou-se conveniente materializar a recrava a jusante das zonas conturbadas.

Com o objetivo de melhor fundamentar os pressupostos considerados na conceção do rolhão, foram realizados pelo LNEC diversos ensaios laboratoriais para caracterização da interface rolhão/rocha. Com estes ensaios obteve-se um conjunto de parâmetros caracterizadores do comportamento desta interface (nomeadamente, as rigidezes normal e tangencial e os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb - coesão e ângulo de atrito), os quais foram utilizados em simulações numéricas.

Com o intuito de analisar a estabilidade global ao deslizamento do rolhão, construiu-se um modelo numérico tridimensional em meio contínuo, no qual se simulou o comportamento na interface rolhão/rocha e nas juntas entre os blocos do rolhão. Para o efeito recorreu-se aos designados "elementos de contacto" disponibilizados no programa de cálculo utilizado nas simulações numéricas (Flac3D), através dos quais é possível simular cenários de escorregamento que obedeçam ao critério de rotura de Mohr-Coulomb. Deste modo, foi possível aferir o processo de degradação de carga ao longo da extensão do rolhão e dispor de uma base de comparação com os valores lidos nos dispositivos de monitorização instalados no rolhão. A Figura 42 ilustra a malha de diferenças finitas utilizada nas simulações numéricas.

Tanto o maciço rochoso como o rolhão foram simulados com comportamento linear elástico. Na envolvente da secção de escavação do túnel admitiu-se a existência de uma auréola de 2,0 m de espessura com características de deformabilidade inferiores às do restante maciço rochoso, com o intuito de simular uma região de maciço perturbado pelo processo de escavação. As duas bandas geologicamente conturbadas foram simuladas com configuração planar e com espessura constante em todo o respetivo desenvolvimento. O Quadro 8 sintetiza as propriedades elásticas dos diferentes materiais que foram adotadas.

Quadro 8 – Propriedades elásticas dos materiais

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, ν
Betão (blocos do rolhão)	30,5	0,20
Maciço rochoso	20,0	0,20
Maciço rochoso nas zonas de falha	1,0	0,35
Auréola perturbada pela escavação	10,0	0,20
Auréola perturbada pela escavação nas zonas de falha	0,5	0,35

Os elementos de interface entre o rolhão e o maciço rochoso envolvente seguem o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, para os quais se tomaram os seguintes valores característicos: $\phi_k=45^\circ$ e $c_k=14$ kPa.

No que refere às ações, para além do peso próprio dos materiais e da pressão da água no interior do circuito hidráulico, considerou-se um diagrama de subpressões na interface rolhão/rocha conforme ilustra a Figura 43.

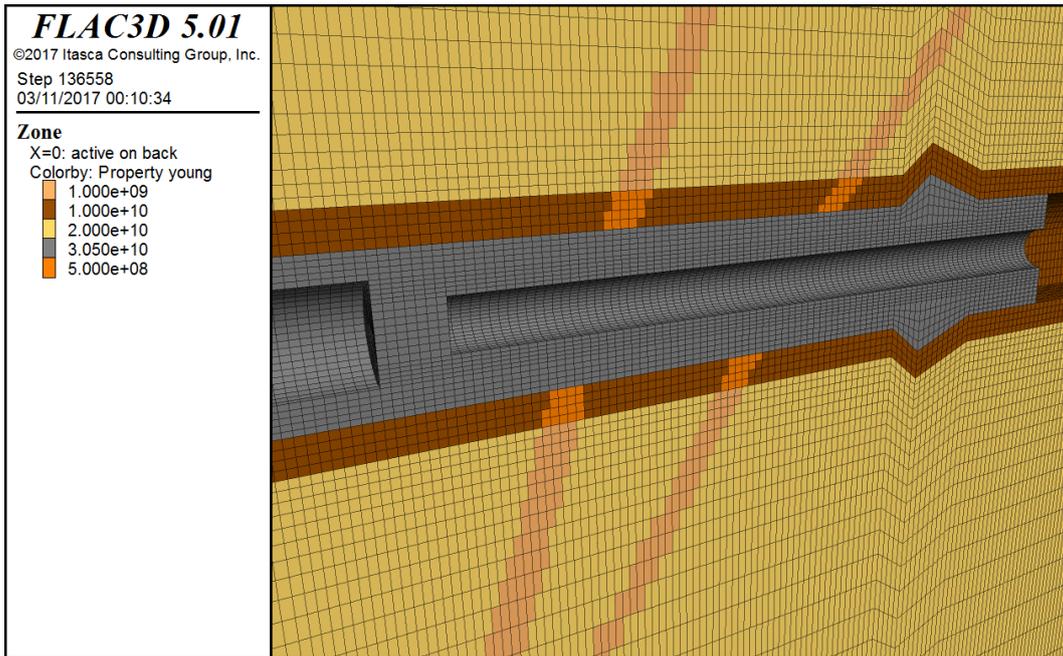


Figura 42 – Perspetiva da malha de diferenças finitas utilizada nas simulações numéricas – coloração da malha em função do módulo de deformabilidade dos materiais (N/m²)

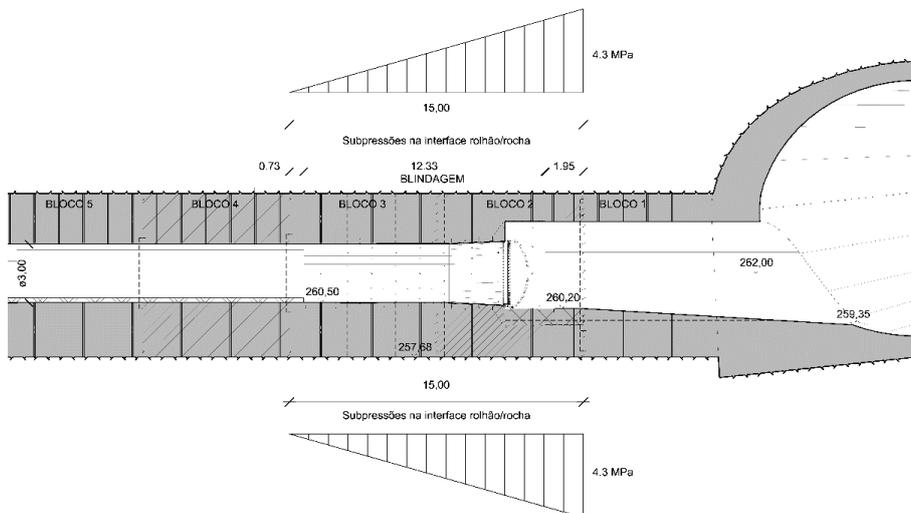


Figura 43 – Diagrama de subpressões na interface rolhão/rocha considerado no modelo numérico

O procedimento de cálculo numérico seguiu o seguinte faseamento:

- Fase 0 – Estabelecimento do estado de tensão inicial no maciço rochoso;
- Fase 1 – Escavação do túnel;
- Fase 2 – Materialização do rolhão e do revestimento do túnel a montante do rolhão, com as respetivas juntas;
- Fase 3 – Aplicação da pressão da água e da subpressão na interface rolhão/rocha;
- Fase 4 – Minoração progressiva da resistência ao corte da interface rolhão/rocha, através da redução progressiva do ângulo de atrito, até se atingir situação de perda de equilíbrio, ou seja, até que a resistência ao corte mobilizada ao longo da interface rolhão/rocha seja insuficiente para sustentar a pressão aplicada, ou até se atingir um fator parcial de segurança relativamente ao ângulo de atrito de 2,0. Esta análise foi realizada para diferentes valores da extensão do rolhão, tendo-se iniciado com um extensão $L=67,5$ m, a qual foi sendo progressivamente reduzida através da supressão sequencial de blocos no sentido jusante - montante.

A análise efetuada no âmbito da Fase 4 conduziu à realização de várias dezenas de cenários de cálculo. Esta tarefa foi automatizada através de rotina escrita na linguagem interna de programação (designada FISH) do programa de cálculo utilizado. A verificação da estabilidade do rolhão foi aferida através do controlo do deslocamento do nó situado na zona do modelo que simula porta estanque.

Os resultados das simulações numéricas conduziram à configuração do rolhão previamente apresentada na Figura 40. As figuras seguintes ilustram alguns resultados extraídos do modelo numérico: a Figura 44 permite observar que os deslocamentos máximos do rolhão são da ordem de 10 mm; a Figura 45 ilustra as tensões de corte mobilizadas ao longo da interface rolhão/rocha, permitindo constatar que grande parte da resistência ao corte é mobilizada na zona da recrava, onde a tensão de corte atinge 1,0 MPa numa área apreciável da mesma.

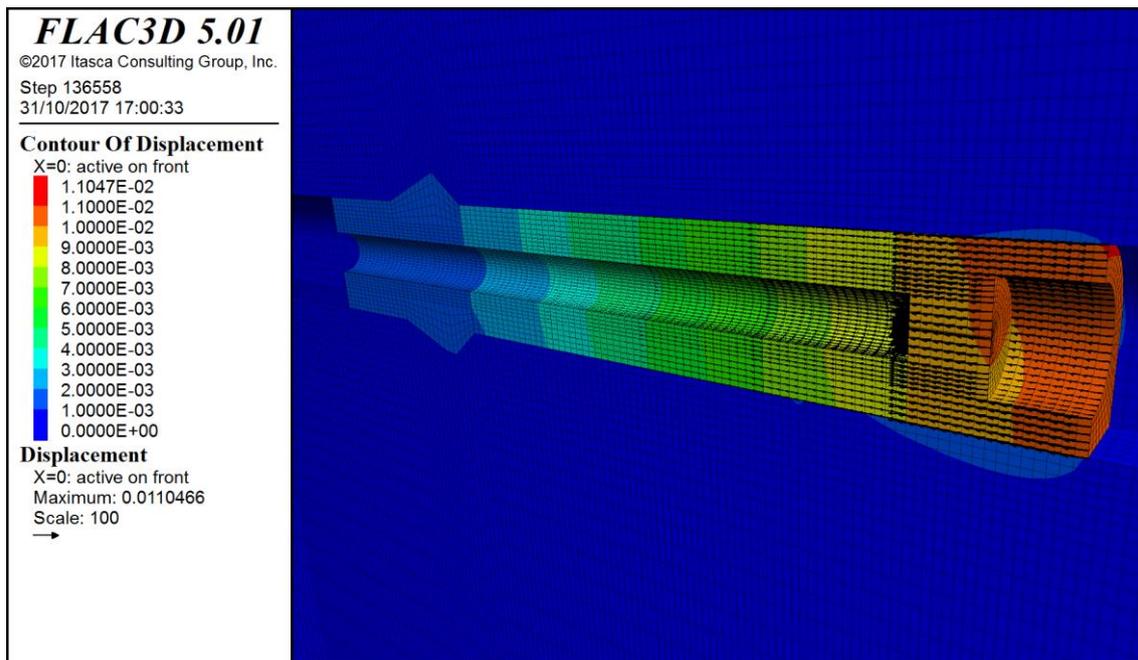


Figura 44 – Deslocamentos do rolhão (m) no final da Fase 4, admitindo um coeficiente parcial de segurança relativamente ao ângulo de atrito de 2,0

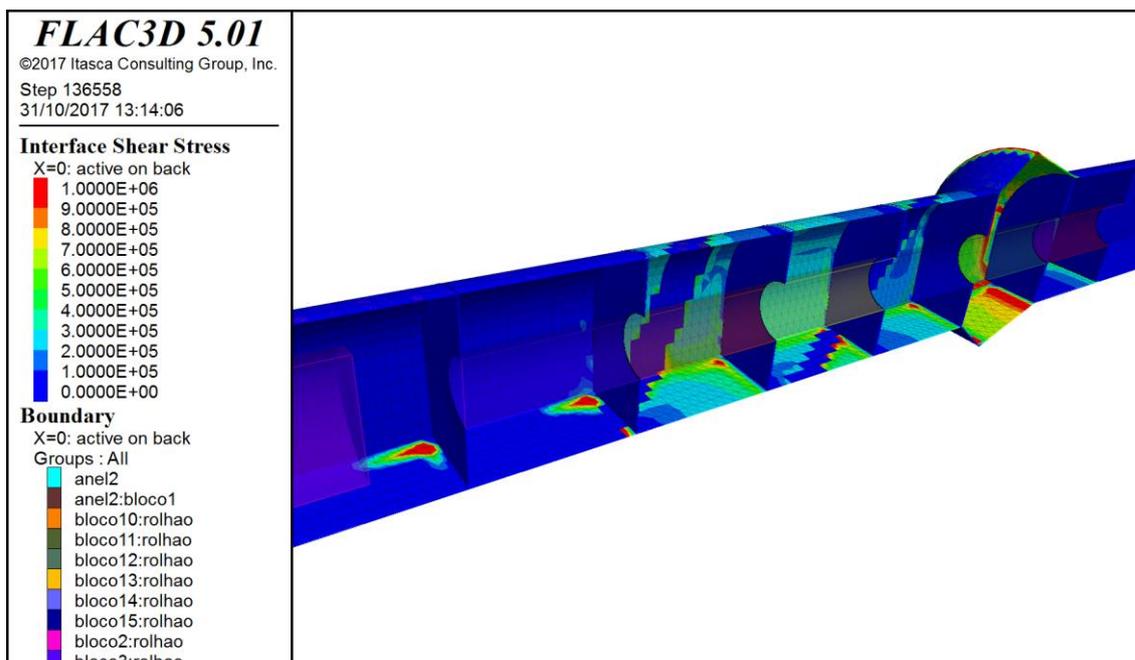


Figura 45 – Tensões de corte (N/m^2) mobilizadas na interface rolhão/rocha no final da Fase 4, admitindo um coeficiente parcial de segurança relativamente ao ângulo de atrito de 2,0

3.6 - Primeiro enchimento do circuito hidráulico. Monitorização

O primeiro enchimento de um circuito hidráulico não revestido corresponde a uma fase crítica da sua vida útil, em particular quando as pressões internas são elevadas. Portanto, é essencial a definição de um plano de primeiro enchimento e de monitorização específicos, tendo em vista evitar a ocorrência de acidentes e incidentes. Por outro lado, esta fase permite avaliar a adequabilidade do sistema de observação para a fase de exploração.

O primeiro enchimento do circuito hidráulico dividiu-se em duas grandes etapas: primeiro fez-se o enchimento a partir da albufeira de Salamonde (enchimento por jusante), que permitiu encher o circuito de restituição e, posteriormente, o trecho superior da central; numa segunda etapa fez-se o enchimento a partir da albufeira de Venda Nova (enchimento por montante) que permitiu encher a generalidade do túnel em carga e a chaminé de equilíbrio superior.

Em projetos com estas características é habitual implementar um enchimento por patamares, em que a subida do nível da água no interior do circuito hidráulico é temporariamente suspensa para a realização de observações e avaliação do comportamento da obra. Neste sentido, não obstante terem sido estabelecidos à partida diversos patamares de paragem, sabia-se de antemão que os mesmos poderiam ter que ser adaptados em função da evolução do comportamento observado no decurso do enchimento. O controlo de segurança em cada patamar e a tomada de decisão sobre a prossecução do enchimento baseou-se na análise integrada da informação que foi sendo recolhida. Seguidamente apresenta-se uma descrição sucinta do procedimento seguido em cada etapa e indicam-se os motivos que conduziram à necessidade de realizar ajustes face ao que havia sido previsto. Mais adiante indicam-se as grandezas que integraram o Sistema de Observação.

A primeira etapa (enchimento por jusante) iniciou-se com o enchimento da parte do circuito de restituição situado a jusante das comportas ensecadeiras dos grupos. Para esta fase estavam previstos dois patamares intermédios de observação às cotas (215,00) e (230,00), cada um com uma duração de 24 horas. Em face de ressurgências ocorridas na zona da câmara das comportas, implementou-se um patamar de observação adicional à cota (245,00), com o intuito de permitir fazer uma análise mais controlada da evolução do comportamento observado. A Figura 46 ilustra a curva real de enchimento do circuito de restituição.

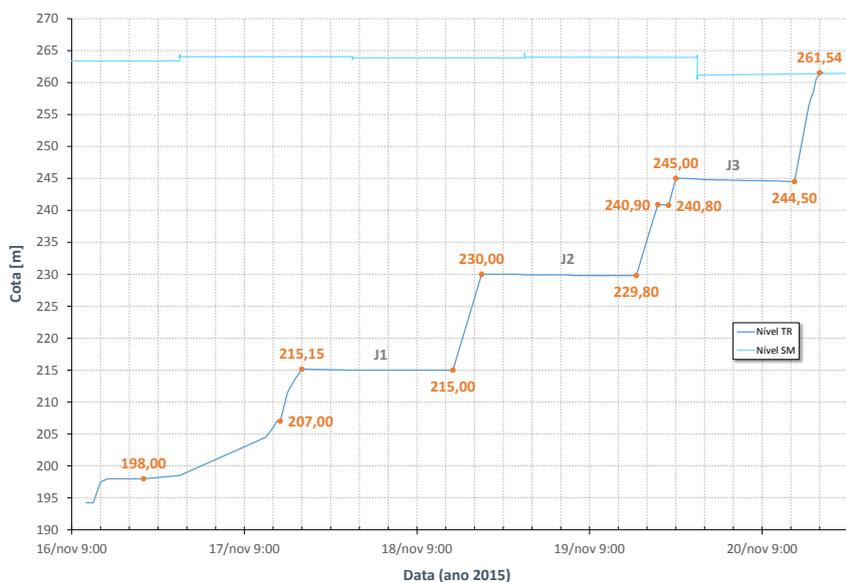


Figura 46 – Curva de enchimento do circuito de restituição

Posteriormente, procedeu-se ao enchimento do trecho a montante da central, por equilíbrio de pressões, conforme se representa de forma esquemática na Figura 47.

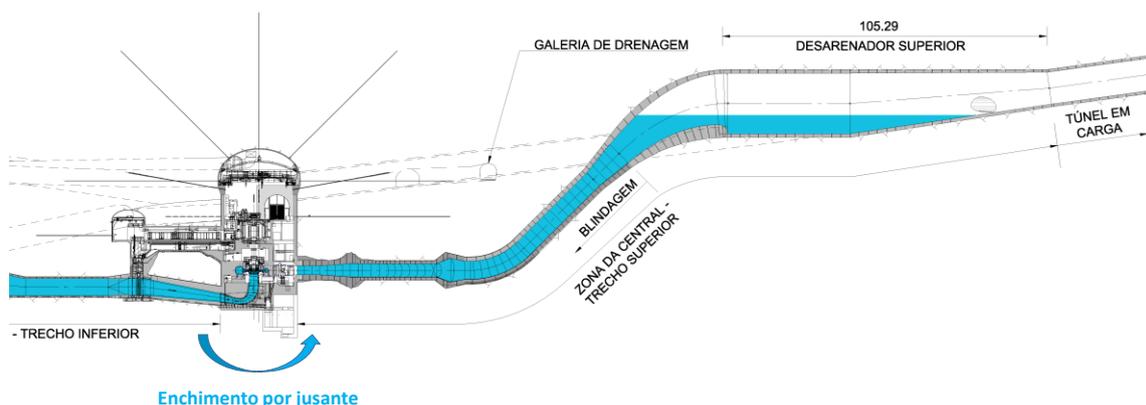


Figura 47 – Representação esquemática do primeiro enchimento do trecho superior da central

Concluído o enchimento a partir da albufeira de Salamonde, foi iniciado o enchimento a partir da albufeira de Venda Nova, que constituiu a segunda grande etapa de enchimento do circuito hidráulico. Para esta etapa estavam previstos seis patamares intermédios de paragem e observação (M2, M3, M4, M5, M6, M7), respetivamente às cotas (320,00), (385,00), (450,00), (520,00), (580,00), (640,00) em que os primeiros três patamares (M2, M3 e M4) teriam duração mínima de 3 dias e os restantes (M5, M6 e M7) de 2 dias. Conforme se pode observar na Figura 48, o procedimento implementado seguiu, em termos gerais, o planeado, não obstante ter sido necessário efetuar alguns ajustes. Conforme se observa na Figura 48, esta segunda etapa teve uma duração total de 25 dias.

Para a realização do primeiro enchimento do circuito hidráulico foi estabelecido um vasto conjunto de observações e respetivas frequências, que compreendeu aparelhagem instalada durante a construção, assim como outro equipamento instalado especificamente para este efeito. Assim, o sistema de observação instalado incluiu, entre outros, extensómetros de varas, medidores de junta, sondas termométricas, alvos topográficos, marcas de superfície, células de carga, células de pressão, piezómetros, bicas e drenos.

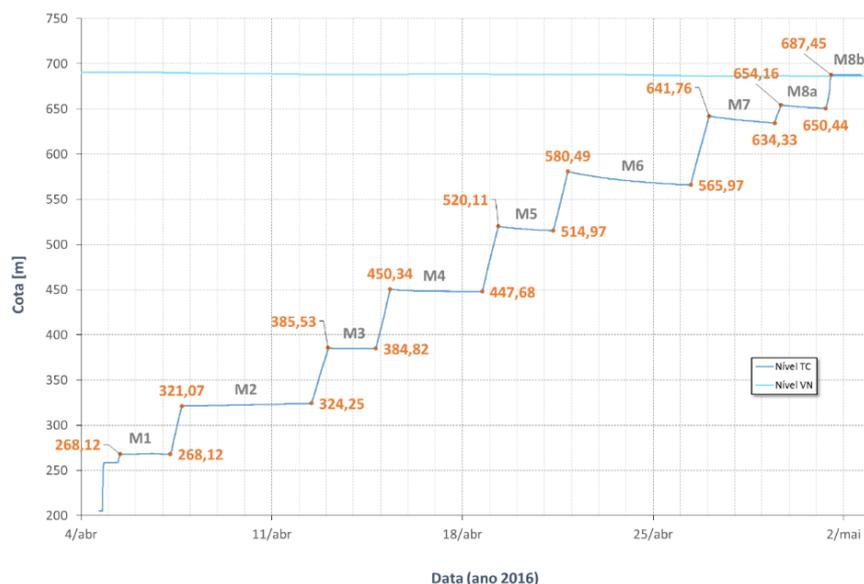


Figura 48 – Curva de enchimento do circuito de montante

Antecedendo o enchimento, foi realizada uma inspeção do circuito hidráulico, da central e de todo o sistema de observação e definida a situação de referência, que constituiu um padrão de comparação para a fase de enchimento e período posterior. A periodicidade das leituras de observação foi sendo ajustada em função da análise dos resultados recolhidos.

4 - ELEMENTOS BIBLIOGRÁFICOS

- Cazaillet, O., Derrien, S., Bazerque, L., Ribeiro, V., Pinto, P. (2013). Physical Model Studies of the Upgrading of Existing Venda Nova Scheme. *ICOLD 2013 International Symposium— Seattle USA – Changing Times: Infrastructure Development to Infrastructure Management*.
- Cotelo Neiva, J.M., Plasencia, N., Lima, C. (2000). Características Geológico-Geotécnicas do Maciço Rochoso do Circuito Hidráulico do Empreendimento da Venda Nova II. *Em Proc. VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto, pp. 113-122.
- EDP Produção (2009) – Venda Nova III – Aditamento ao Projeto – Estudos de Especialidade e Elementos Complementares – Volume IV – Plano de Observação, Março de 2009.
- EDP Produção (2015) – Venda Nova III – Primeiro Enchimento do Circuito Hidráulico – Especificação - PRT-2015-01378 (Rev. C). Abril de 2016.
- EDP (2009) – Reforço de Potência do Aproveitamento de Venda Nova. Projecto. Janeiro de 2009, Porto.
- Esteves, C., Plasencia, N.; Lima, C. (2018). Conceção e dimensionamento do rolhão superior do circuito hidráulico do Reforço de Potência de Venda Nova III, *16º Congresso Nacional de Geotecnia*. Açores, Portugal.
- Esteves, C., Plasencia, N., Pinto, P., Marques, T. (2017). First filling of hydraulic tunnels of Venda Nova III hydropower scheme. *World Tunneling Congress 2017*. Bergen, Norway.
- Ferreira, A., Esteves, C., Lima, C., Sarmiento, C., Plasencia, N. (2015). Conceção do Revestimento do Desarenador Superior do reforço de Potência de Venda Nova III. *15º Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto, Portugal.
- Ferreira, A., Sarmiento, C. e Lima, C. (2012). Tomada de água do Reforço de Potência de Venda Nova III, *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012*, FEUP, 24-26 de outubro de 2012, Porto, Portugal.
- Lima, C., Resende, M., Plasencia, N., Esteves, C. (2002). Venda Nova II hydroelectric scheme: powerhouse geotechnics and design. *ISRM News J* 7(2):37-41.
- LNEC (2003) Empreendimento Hidroelétrico de Venda Nova II. Determinação do estado de tensão. *Relatório 371/03-NFOS*, Lisboa.
- LNEC (2006). Empreendimento Hidroelétrico de Venda Nova II. Ensaios de Caracterização Geomecânica do Maciço Rochoso da Central Subterrânea. *Relatório 64/06-NFOS*, Lisboa.
- LNEC (2015). Boletins de Ensaios de Deslizamento realizados sobre amostras de tarolos de sondagem com contactos de betão com rocha, recolhidos na obra de Venda Nova III. Agosto de 2015, Lisboa.

- LNEC (2016). Reforço de Potência de Venda Nova – Venda Nova III. Plano do primeiro enchimento e da entrada em funcionamento do circuito hidráulico. Lisboa, Portugal.
- Marques, T., Plasencia, N., Esteves, C., Pinto, P., Oliveira, M.A. and Lima, C. (2017). The surge shafts of Venda Nova III hydropower plant's surge tank – geological conditions and constructive solutions. *World Tunneling Congress 2017*. Bergen, Norway.
- Oliveira, M.A., Duarte, F., Camacho, M., Silva, A.F. (2010). Venda Nova III pumped-storage scheme facing variable speed, *Hydro 2010*, Lisboa, Portugal, 2010.
- Oliveira, M.A., Esteves, C., Duarte, F. (2011). Venda Nova III repowering project. *Proceedings, International Conference Hydro 2011*, Prague, Czech Republic, 2011.
- Oliveira, M., Alves, S., Guerra, J. and Ribeiro, V. (2013). Venda Nova III Repowering Project – Flood risk management of the existing plant as a result of the proximity of the pressure tunnels, *Hydro 2013*. Innsbruck, Austria.
- Pinto, P., Ribeiro, V. (2012). Two surge tanks hydropower schemes - Design criteria and case studies, *4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*. February 9-11, Porto, Portugal.
- Plasencia, N.S., Coelho, M.J., Lima, C., Fialho, L. (2000). Contribuição da Tomografia Sísmica para a Caracterização do Maciço Rochoso do da Central de Venda Nova II. *Proceedings do VII Congresso Nacional de Geotecnia*.
- Plasencia, N., Flores, J., Ribeiro, V. (2008). Venda Nova III – The second reversible repowering project of Venda Nova hydropower plant, *Hydro 2008 – Progressing World Hydro Development*, Ljubljana, Slovenia, 2008.
- Plasencia, N., Cavaco, T., Carvalho, J.M. (2013). Groundwater impacts of deep excavations; The Venda Nova repowerings case, *12th International Conference "Underground Construction Prague 2013*, Prague.
- Plasencia, N., Carvalho, J.M., Cavaco, T. (2015). Groundwater monitoring impacts of deep excavations: hydrogeology in the Venda Nova repowering schemes. In: *Environmental Earth Sciences. Springer*, pp 2081-2995.
- Queralt, M., Esteves, C., Lima, C. (2015). Simulação numérica da escavação faseada da central do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III. *15º Congresso Nacional de Geotecnia*. Porto, Portugal.
- Ribeiro, V. (2011). Venda Nova III. Segundo Reforço de Potência de Venda Nova, *6as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP*, Porto.
- Ribeiro, V., Pinto, P., Bazerque, L., and Cazaillet, O. (2012). Venda Nova III surge tanks: Physical model studies, *11th International Conference on Pressure Surges*, Lisbon, October 24-26 2012, Portugal.
- Ribeiro, V., Pinto, P., Bazerque, L., Cazaillet, O., and Derrien, S. (2014). Venda Nova III Repowering Project: Outlet and Downstream Channel Scale Model Studies, *3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings*, 2014, Porto, Portugal.
- Ribeiro, V., Paixão, J., Matos, D., Silva, J. and Ferreira, I. (2013). Venda Nova Hydroelectric Scheme - Repowering projects and dam maintenance, *IECS 2013, 9th ICOLD European Club Symposium - Sharing experience for safe and sustainable water storage*, 10 – 12 April 2013 - Venice, Italy.

ANEXO
Fotografias



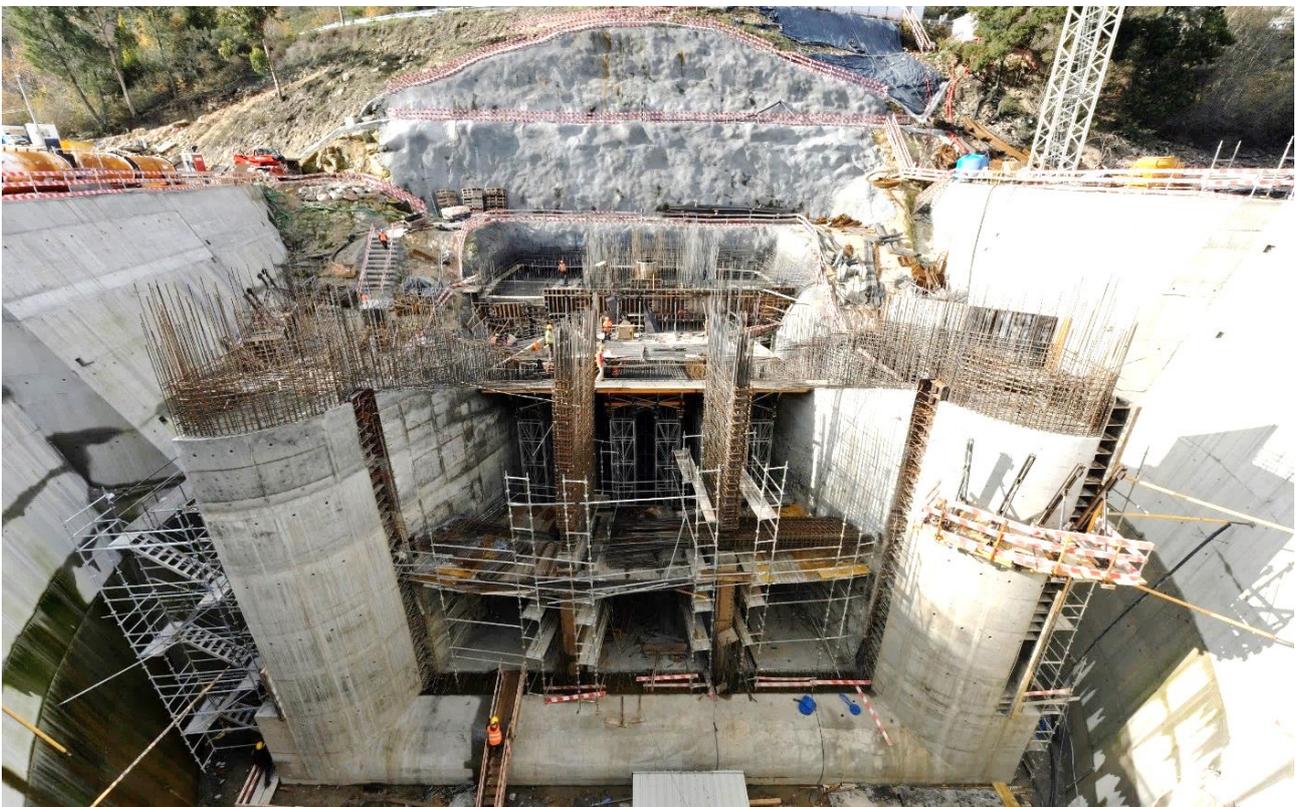
Barragem de Venda Nova



Vista aérea da região



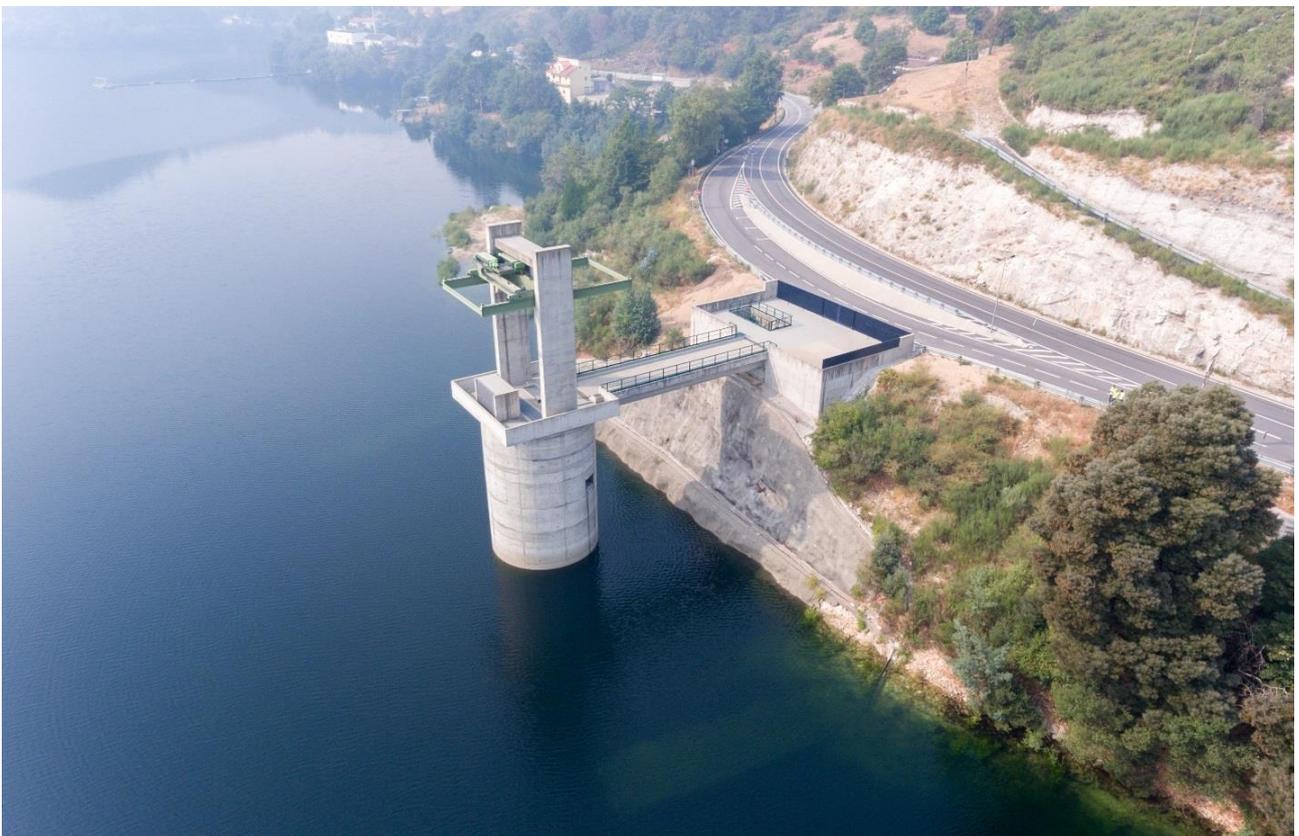
TOMADA DE ÁGUA - Fase final da construção da ensecadeira



TOMADA DE ÁGUA - Fase final dos betões do bocal / montagem de cimbre para a laje



TOMADA DE ÁGUA - fase final de conclusão dos betões



TOMADA DE ÁGUA - conclusão dos trabalhos



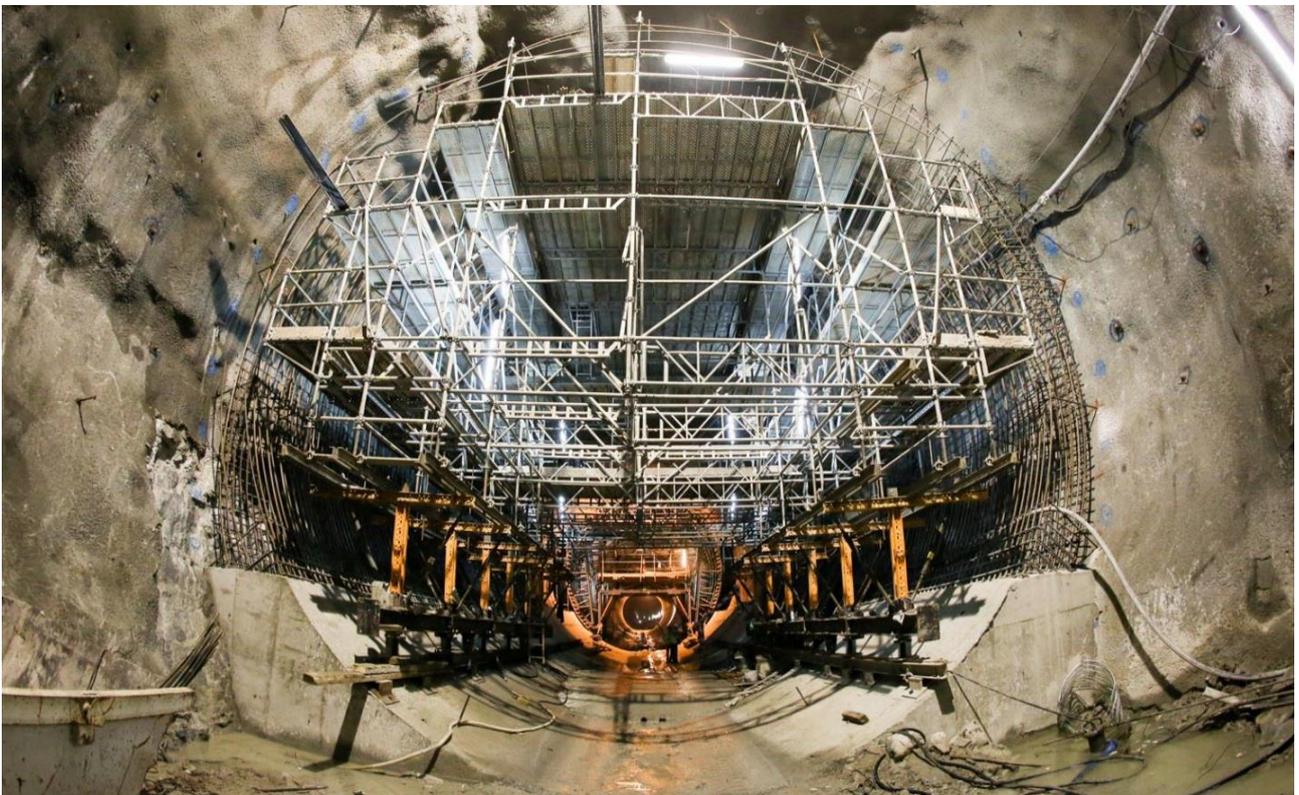
TÚNEL EM CARGA - em curso furação na frente de jusante



TÚNEL EM CARGA - em curso furação na frente de jusante



TÚNEL EM CARGA - em curso furação na frente de jusante



TÚNEL EM CARGA - montagem de armaduras na abóbada de um troço revestido



TÚNEL EM CARGA - conclusão da montagem de armadura / preparação para montagem de cimbre



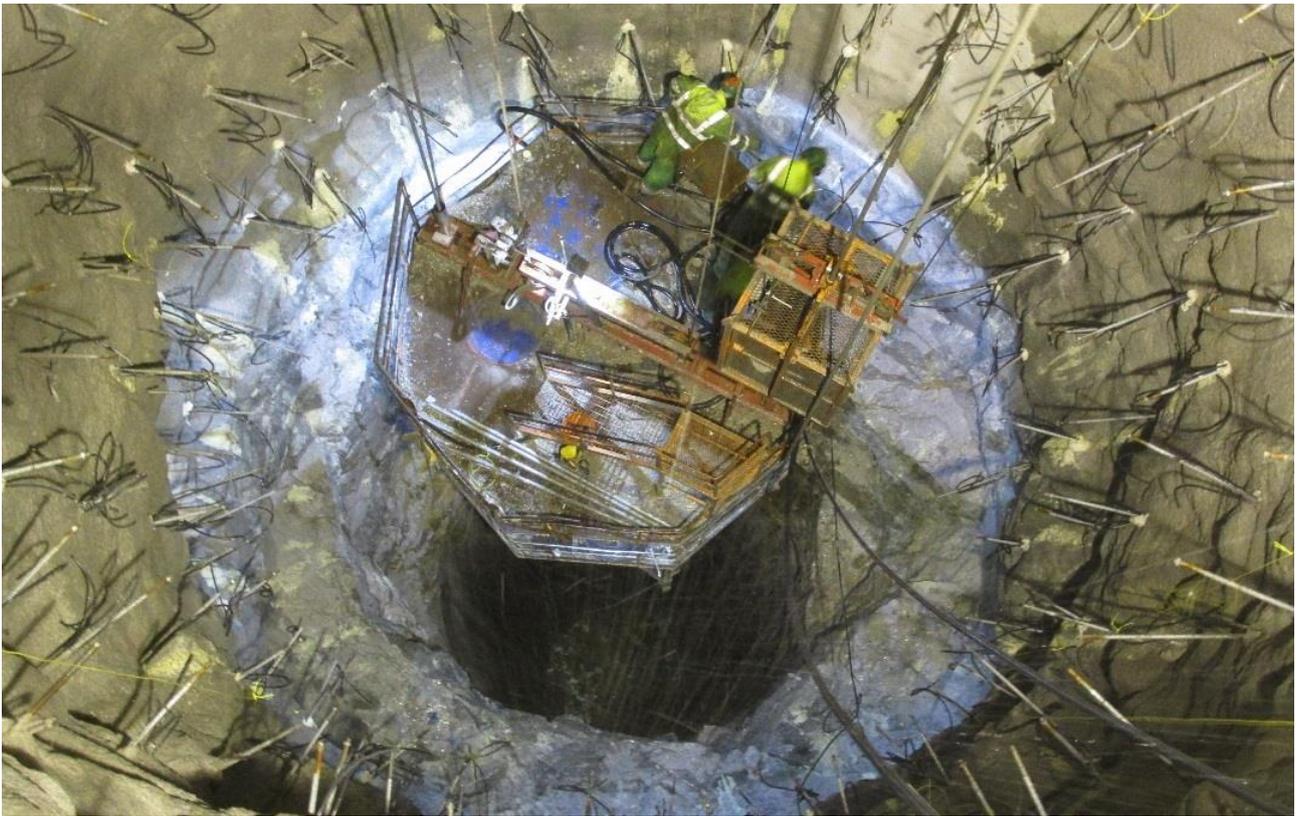
TÚNEL EM CARGA - secção revestida



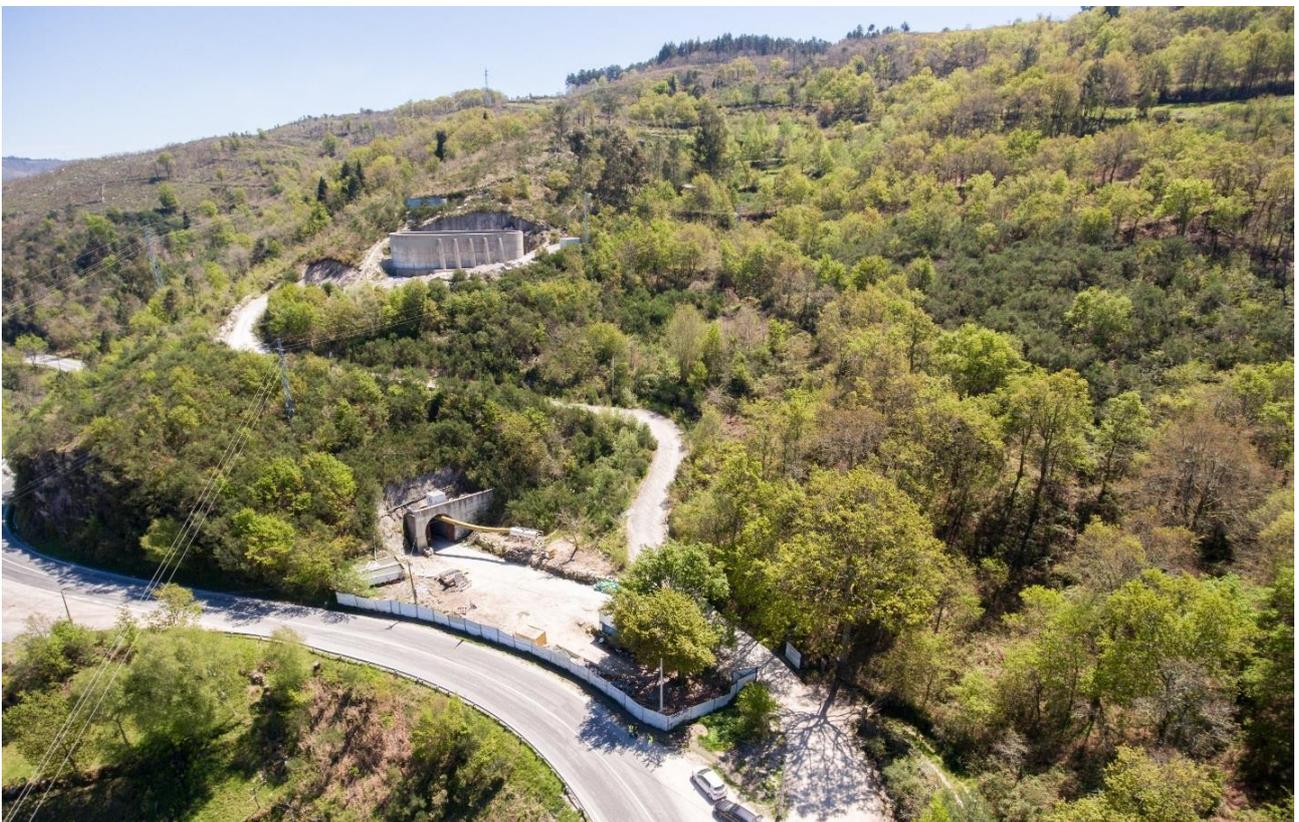
CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SUPERIOR - conclusão do enchimento do poço 3 para posterior tratamento da falha



CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SUPERIOR - em curso betões de revestimento da zona de falha do poço 2



CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SUPERIOR - escavação e contenção da falha do poço 2 concluídos



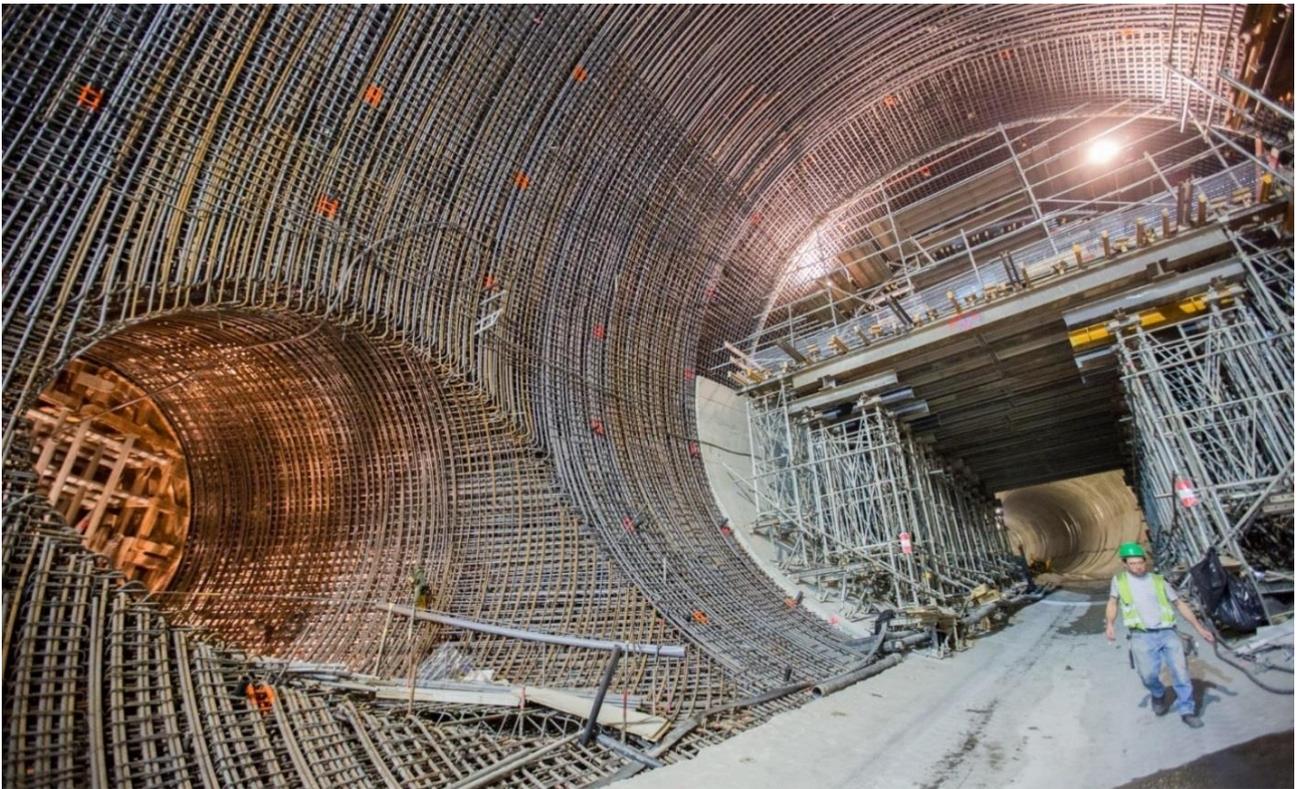
CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SUPERIOR - câmara de expansão



DESARENADOR SUPERIOR – fase final da escavação



DESARENADOR SUPERIOR – montagem de blindagens e execução de betões



DESARENADOR SUPERIOR - ligação da zona do rolhão de montante com o desarenador superior



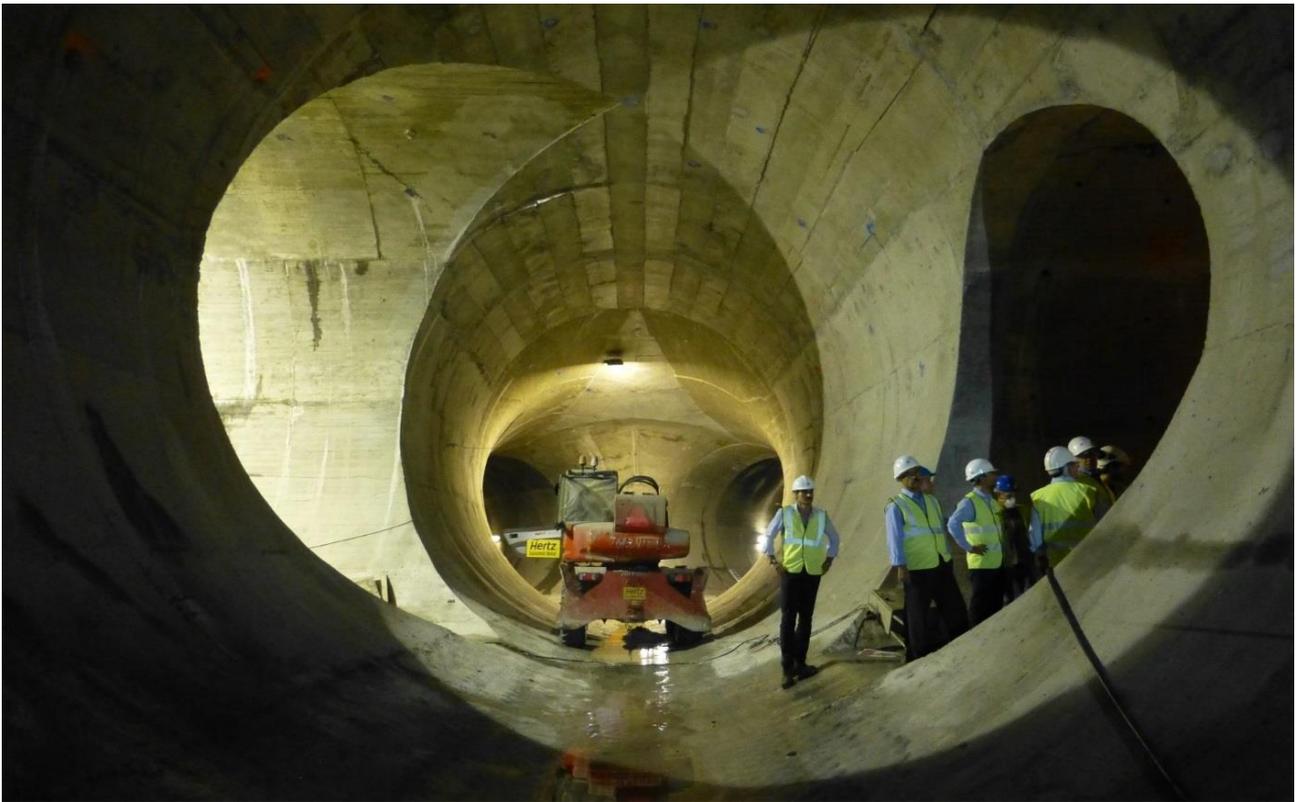
DESARENADOR SUPERIOR - trabalhos de injeções do troço variável de jusante



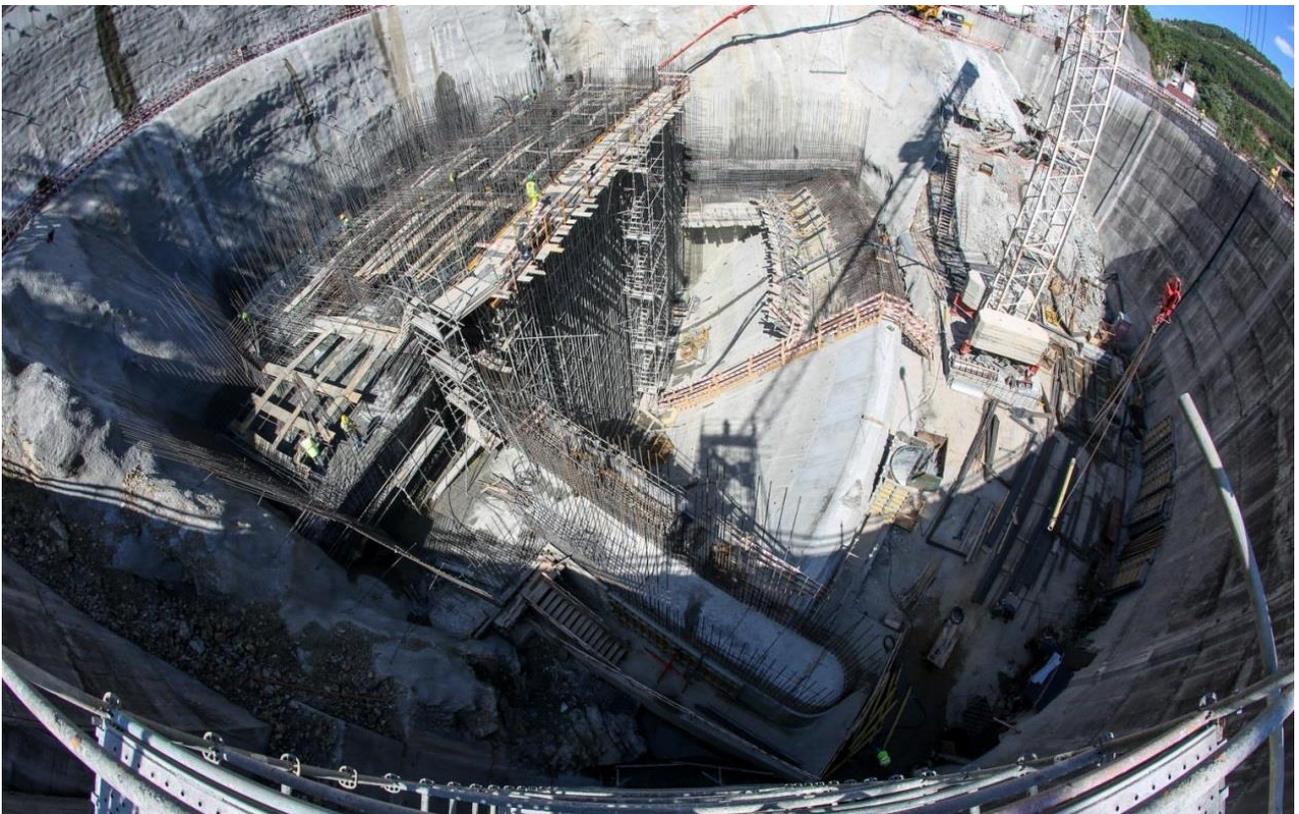
RAMAIS EM CARGA - montagem de malha exterior nos ramais em carga antes do posicionamento das virolas



TRECHO INFERIOR DA CENTRAL - montagem de cimbra da bifurcação



TRECHO INFERIOR DA CENTRAL - concluídos os betões e desmontagem de cofragens / em curso trabalhos de injeções



RESTITUIÇÃO - betões do lábio e montagem de cimbres do bocal



RESTITUIÇÃO - conclusão dos trabalhos do bocal da restituição ao abrigo da ensecadeira



RESTITUIÇÃO - fase final dos betões e selagem de peças fixas do bocal



RESTITUIÇÃO - demolição da ensecadeira da restituição



RESTITUIÇÃO - demolição da ensecadeira da restituição



CENTRAL - colocação de extensómetros de varas na abóbada



CENTRAL - em curso escavação da Central



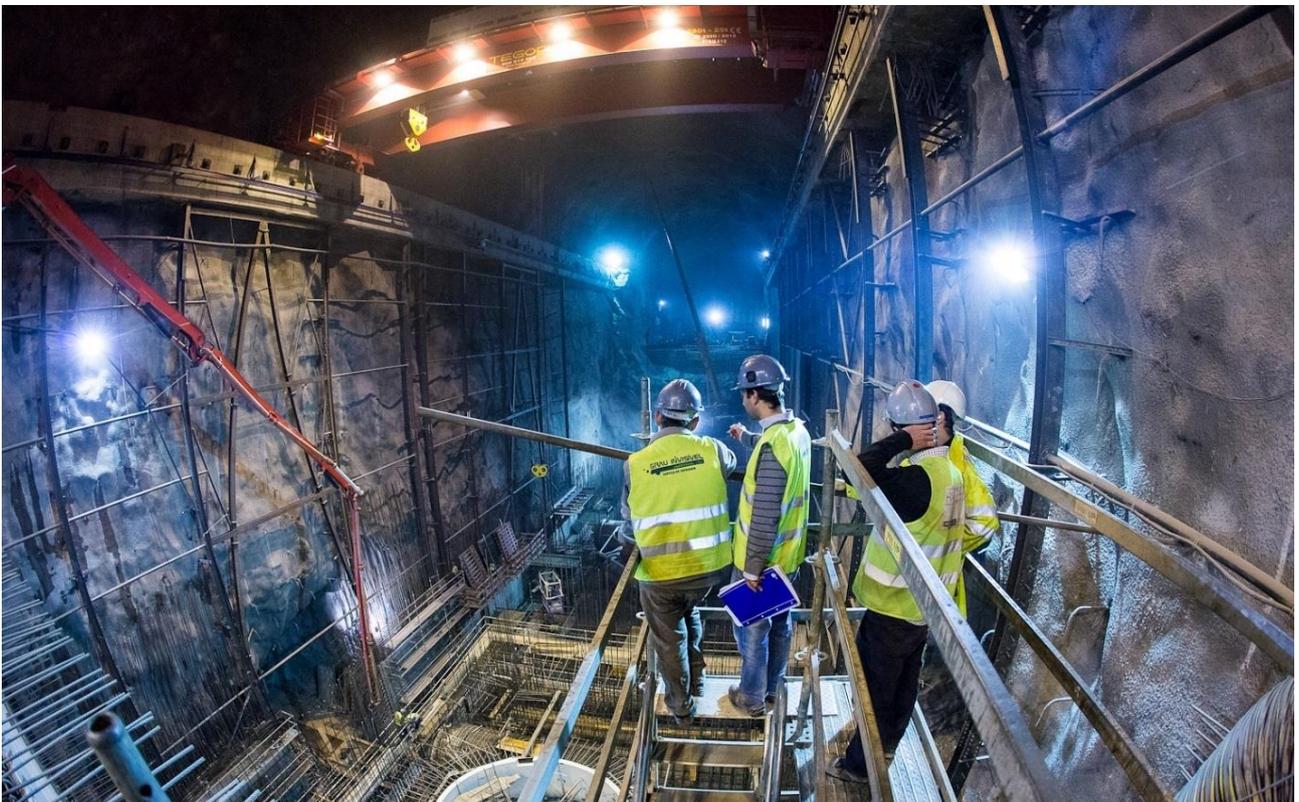
CENTRAL - fase final da escavação da Central



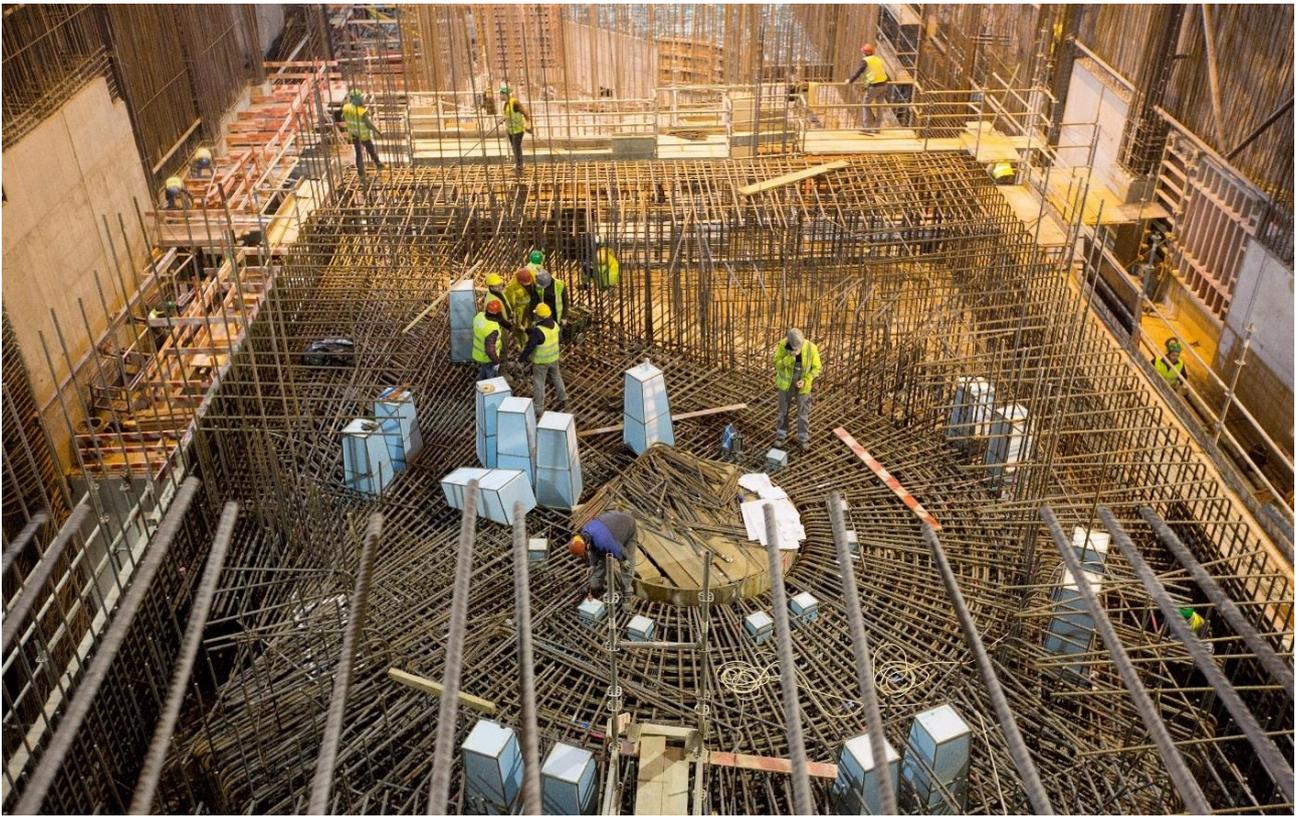
CENTRAL - fase inicial dos betões da Central



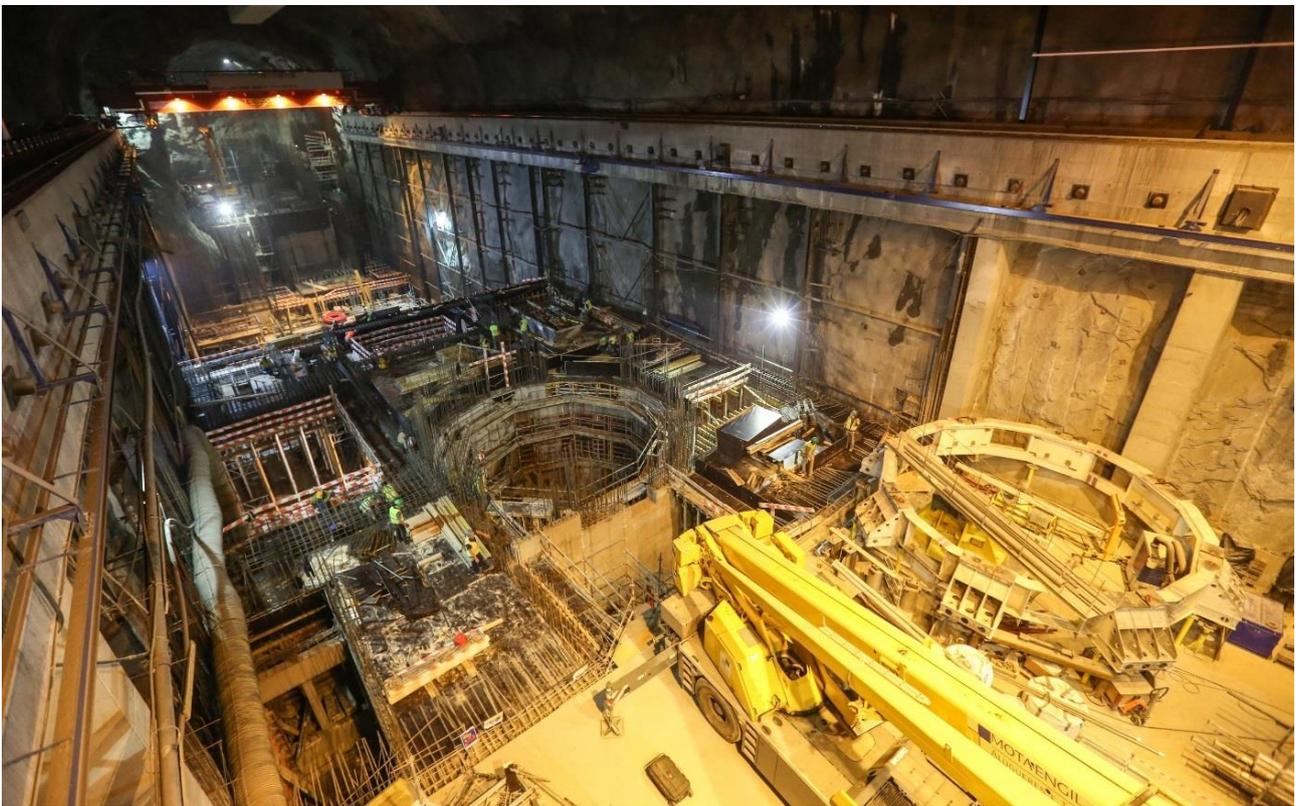
CENTRAL – transporte da espiral do Grupo 1



CENTRAL - montagem de armaduras para envolvimento das espirais dos Grupos



CENTRAL - montagem de armaduras da fundação do alternador do Grupo 1



CENTRAL - montagem de armaduras da fossa do alternador do Grupo 1 e da fundação do alternador



CENTRAL – empilhamento dos rotores dos Grupos



CENTRAL – montagem do transformador principal do Grupo 2



CENTRAL – transporte do rotor do Grupo 2 para o poço do alternador



CENTRAL – piso principal



EDIFÍCIOS EXTERIORES - betões da cobertura do edifício de apoio



EDIFÍCIOS EXTERIORES - fase final da construção dos edifícios



ESCOMBREIRAS – modelação final da escombreira de montante



ESCOMBREIRAS – recuperação paisagística da escombreira principal