

## MODELO TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE GLOBAL DOS ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES *IN SITU* NO MACIÇO ROCHOSO DA CAVERNA DA CENTRAL DE SALAMONDE II

Margarida Espada<sup>1\*</sup>, Luís Lamas<sup>1</sup> e Noemí Leitão<sup>2</sup>

1: Núcleo de Fundações e Obras Subterrâneas  
Departamento de Barragens de Betão  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)  
Av. do Brasil, 101, 1700 Lisboa, Portugal  
e-mail: {mespada, llamas}@lnec.pt

2: Núcleo de Modelação Matemática e Física  
Departamento de Barragens de Betão  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)  
Av. do Brasil, 101, 1700 Lisboa, Portugal  
e-mail: nschclar@lnec.pt

**Palavras-chave:** Modelo numérico tridimensional, estado de tensão *in situ*, ensaios de medição de tensões *in situ*, maciço rochoso

**Resumo.** Neste trabalho apresenta-se um modelo interpretativo tridimensional, que permite estimar o estado de tensão mais provável num maciço rochoso, integrando os resultados provenientes de ensaios de medição do estado de tensão *in situ*. Apresenta-se o caso de estudo da caverna da central subterrânea do reforço de potência do empreendimento hidroelétrico de Salamonde, localizado no rio Cávado, em Portugal. Neste caso de estudo, foi efetuada uma análise global integrando os resultados de dois tipos de ensaios, realizados em diferentes locais do maciço rochoso: i) ensaios de sobre-carotagem (STT), executados em furos de sondagens, antes de se iniciarem as obras do reforço de potência e; ii) ensaios de reposição de tensões com macacos planos (SFJ), realizados já em fase de execução da obra. Foi utilizado um modelo numérico tridimensional e uma metodologia apropriada, incluindo a geometria das escavações na altura da execução dos ensaios e a topografia do terreno, de forma a permitir uma estimativa do estado de tensão mais provável na zona da caverna da central.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de modelos numéricos, que possam integrar os resultados de todos os ensaios de medição de tensões, realizados em diferentes locais, de preferência utilizando mais de um método de ensaio, é bastante útil para estimar o estado de tensão existente num grande volume de maciço rochoso, dada a escassez de ensaios executados e a incerteza sobre a representatividade dos resultados obtidos.

No âmbito dos estudos realizados pelo LNEC para apoio ao projeto das obras de reforço de potência de Salomonde II, foram realizados, em 2009, seis ensaios de sobre-carotagem em furos de sondagem, e efetuada uma análise preliminar do estado de tensão instalado no maciço rochoso. Nessa altura, foi sugerido que os ensaios realizados deveriam ser complementados por uma nova campanha de ensaios, numa fase de execução da obra, que permitisse o acesso a zonas do maciço mais próximas da nova caverna da central. Assim, já em fase de obra, foram realizados em 2012 dez ensaios de almofadas planas de pequena área, em três locais das obras subterrâneas.

Com o objetivo de estimar o estado de tensão inicial na zona da nova caverna da central, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional, que inclui a geometria das escavações e a topografia do terreno, e foi utilizada uma metodologia apropriada, para a interpretação, em conjunto, de todos os resultados dos ensaios efetuados.

## 2. REFORÇO DE POTÊNCIA DE SALAMONDE

O reforço de potência do empreendimento hidroelétrico de Salomonde, promovido pelo dono de obra, EDP - Energias de Portugal, localiza-se numa zona montanhosa no norte de Portugal, no rio Cávado. As obras de reforço de potência incluem a construção de um novo circuito hidráulico subterrâneo, com cerca de 2 km, e de uma nova central subterrânea.

Em fase de projeto, procedeu-se à execução de um vasto programa de prospeção geotécnica para caracterização do maciço rochoso interessado pelas obras subterrâneas do empreendimento de Salomonde II. O maciço rochoso é de boa qualidade, homogéneo, constituído por granito porfiróide de grão médio a grosseiro e inter-setado por várias zonas de falha. O estado de tensão na vizinhança da nova central subterrânea é influenciado pela complexa topografia do terreno.

A caverna da central de Salomonde II situa-se a 150 m a sul do encontro esquerdo da barragem e a cerca de 150 m de profundidade. A caverna da central apresenta um comprimento total de 66 m, uma largura de 26,5 m e uma altura máxima de cerca de 56 m, considerando o corte transversal pelo eixo do grupo [1]. Na Figura 1 mostra-se um perfil longitudinal ao longo do circuito hidráulico. Na Figura 2 apresenta-se a planta geral do reforço de potência, com a localização da nova central subterrânea e da central existente, e uma perspetiva tridimensional das escavações nas proximidades da nova central.

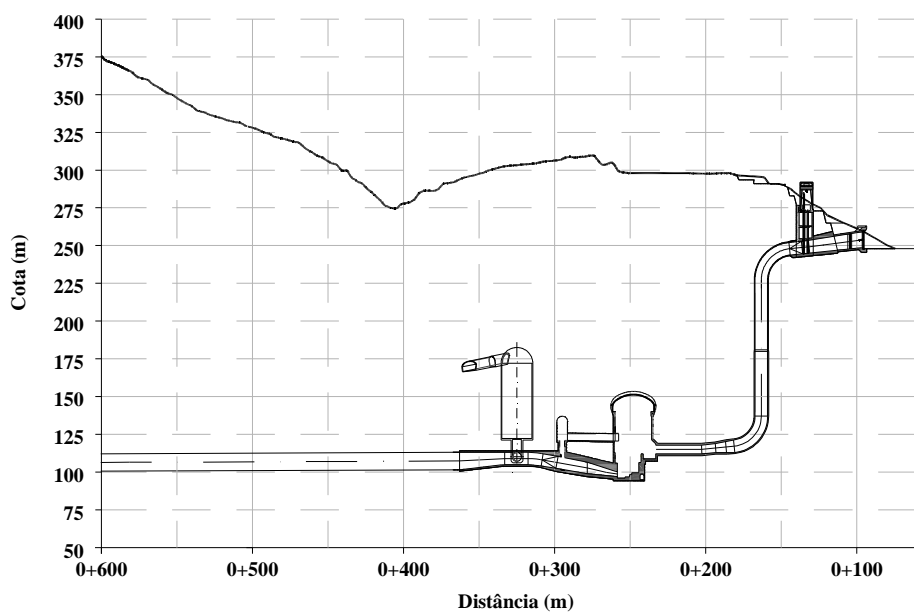


Figura 1. Perfil longitudinal ao longo do circuito hidráulico de Salomonde II.

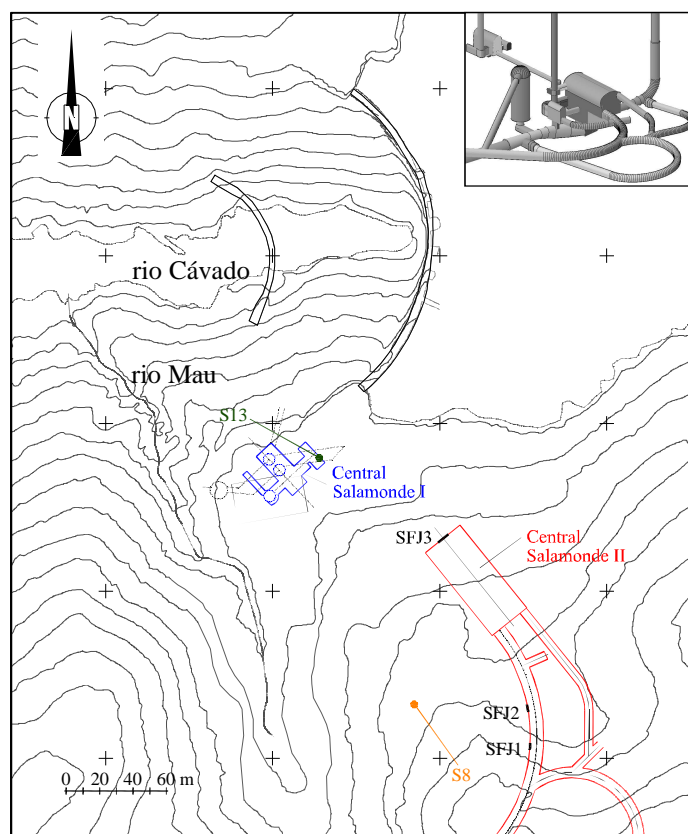


Figura 2. Obras do reforço de potência de Salomonde II e central existente.

### 3. ENSAIOS COM DEFÓRMETRO TRIDIMENSIONAL

Foram realizados em 2009 seis ensaios com o defórmetro tridimensional (STT) nos furos de sondagem S8 e S13 [2], cuja localização é apresentada na Figura 2. O furo S8 é vertical, estando a boca na superfície do terreno, à cota 310,53 m, e o furo S13 foi executado a partir da câmara de válvulas, à cota 154 m, com a direção N45°E e inclinação de 70°.

Foram executados três ensaios em cada furo de sondagem, a profundidades compreendidas entre os 79 e os 96 m na sondagem S8 e entre os 28 e os 48 m na sondagem S13. Contudo, os resultados obtidos em dois ensaios realizados no furo de sondagem S8 foram muito duvidosos, tendo em conta os valores expectáveis das tensões e os valores obtidos nos restantes ensaios, não tendo sido considerados para a análise das tensões.

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial realizados em provetes de sondagens, para a obtenção das constantes elásticas a serem utilizados na interpretação dos ensaios com defórmetro tridimensional, conduziram a valores médios do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson de:  $E = 50 \text{ GPa}$  e  $\nu = 0,21$ .

Em ambos os furos de sondagem, obteve-se uma tensão principal máxima subvertical, de cerca de 7 MPa no furo S13 e de aproximadamente 4 MPa no furo S8. Na sondagem S13, mais próxima da encosta da margem esquerda do rio, a tensão principal mínima obtida, de cerca de 3 MPa, é subhorizontal e aproximadamente normal à direção do rio Cávado nos ensaios realizados às três profundidades. Na sondagem S8 a tensão principal mínima obtida, aproximadamente de 2 MPa, é também subhorizontal, mas paralela à direção do rio.

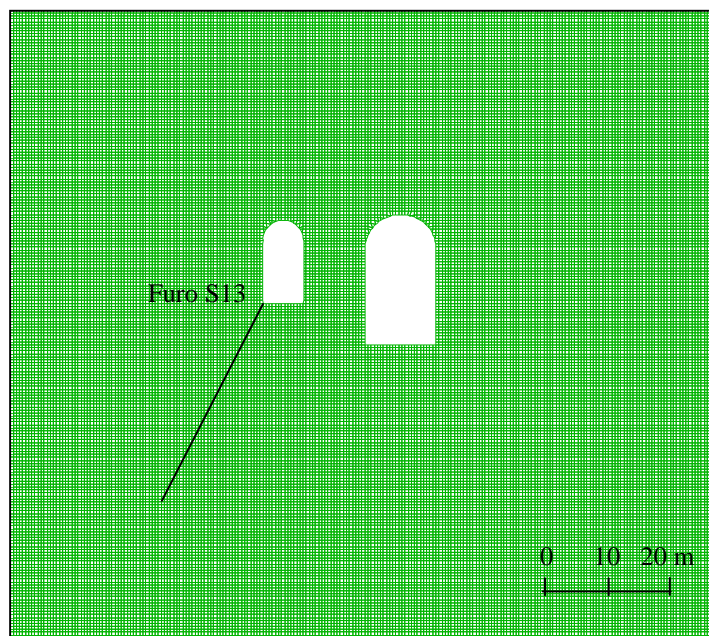
Para análise dos resultados obtidos, foi desenvolvido um modelo numérico bidimensional utilizando o programa FLAC [2], com o objetivo de interpretar os resultados dos ensaios realizados no furo de sondagem S13, devido à sua proximidade relativamente às cavernas da central I e da câmara das válvulas. Foi adotada uma seção vertical do maciço aproximadamente perpendicular ao eixo da caverna da central I e da câmara de válvulas. O maciço foi considerado como um meio contínuo, homogéneo e isótropo, com um comportamento elástico linear, caracterizado por um módulo de elasticidade e um coeficiente de Poisson idênticos aos obtidos nos ensaios de compressão uniaxial. Na Figura 3 apresenta-se a malha do modelo e a localização da sondagem S13.

Foram consideradas as seguintes hipóteses simplificativas para estimar o estado de tensão no maciço resultante do efeito da abertura da caverna da central I e da câmara das válvulas:

- estado plano de deformação;
- as componentes vertical e horizontais do estado de tensão, previamente à escavação das cavernas, são proporcionais ao peso dos terrenos sobrejacentes;
- as componentes vertical e horizontais do estado de tensão são direções principais.

A análise dos resultados obtidos com este modelo bidimensional, considerando os três ensaios realizados na sondagem S13, permitiram concluir que, nas zonas de ensaio, a tensão vertical é cerca de 1,4 vezes superior à resultante do peso dos terrenos sobrejacentes e que a tensão horizontal é cerca de 0,7 vezes a tensão vertical, não apresentando variações significativas com a direção. O facto de o valor obtido para a tensão vertical ser superior à tensão gravitacional poderá estar relacionado com os efeitos da topografia, que não foi

considerado neste modelo simples. No entanto, poderá também estar associado à sobreavaliação da componente vertical segundo o eixo do furo de sondagem, que por vezes ocorre nos ensaios de sobreacarotagem. Desta forma, foi recomendada a realização de uma campanha adicional de ensaios, em fase de execução da obra, que permitisse o acesso a zonas do maciço mais próximas da futura caverna da central.



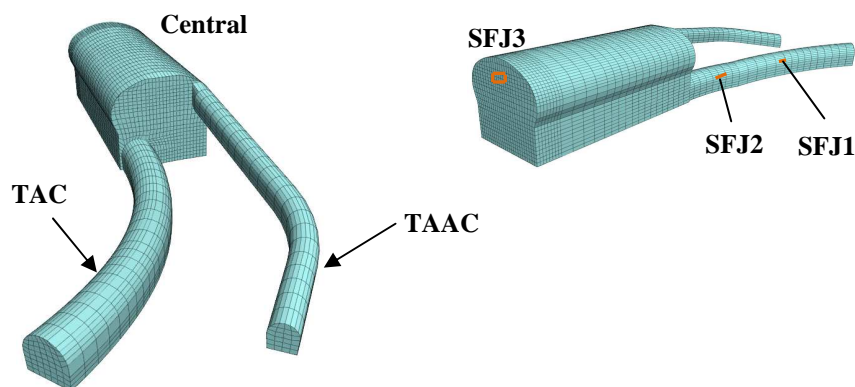
**Figura 3.** Modelo bidimensional e localização da sondagem S13.

#### **4. ENSAIOS COM ALMOFADAS PLANAS DE PEQUENA ÁREA**

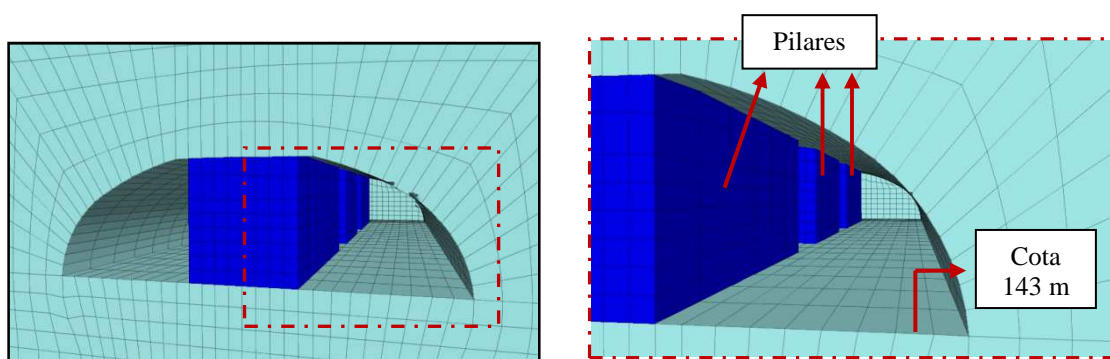
Os ensaios com almofadas planas de pequena área (SFJ) foram realizados em fevereiro e março de 2012 nos três locais identificados nas Figuras 2 e 4 como SFJ1, SFJ2 e SFJ3 [3]. Os locais SFJ1 e SFJ2 localizam-se no hastel esquerdo do túnel de acesso à central (TAC) e o local SFJ3 localiza-se na parede do topo norte da abóbada da central.

A escavação da caverna da central estava numa fase inicial quando decorreram os ensaios no local SFJ3, com a configuração que se apresenta na Figura 5, com a escavação das galerias longitudinais e transversais (cota 143 m) e com os três pilares.

Os resultados dos ensaios realizados no TAC, nos locais SFJ1 e SFJ2, foram analisados em conjunto devido à proximidade entre os locais e ao facto de apresentarem características litológicas semelhantes. Nos locais SFJ1 e SFJ2 obtiveram-se tensões principais máximas e mínimas de aproximadamente 16 MPa e 6 MPa, com direções e inclinações de  $173^{\circ}/72^{\circ}$  e  $353^{\circ}/18^{\circ}$ , respetivamente. No local SFJ3, as tensões principais máximas e mínimas obtidas foram de 8 MPa e 6 MPa, com direções e inclinações de  $225^{\circ}/56^{\circ}$  e  $45^{\circ}/34^{\circ}$ , respetivamente.



**Figura 4.** Perspetiva das obras subterrâneas e localização dos ensaios SFJ.



**Figura 5.** Pormenores das escavações na abóbada da central.

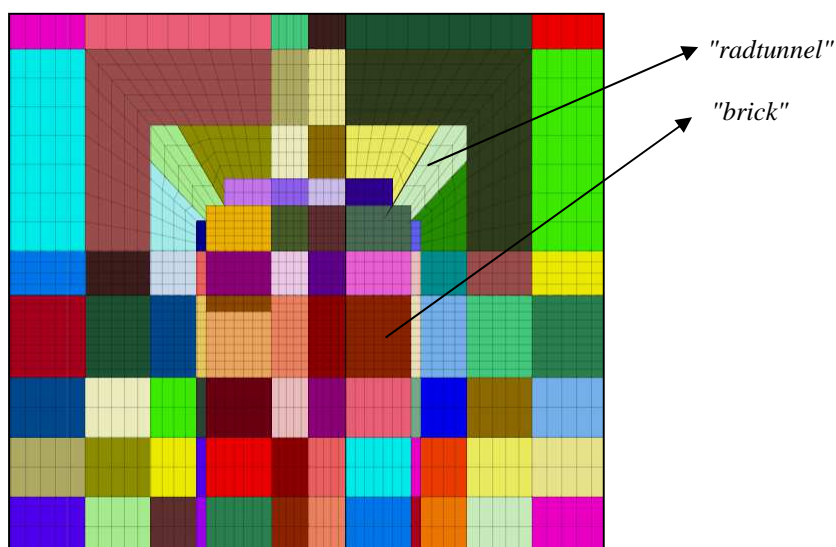
## 5. ANÁLISE DO ESTADO DE TENSÃO NO MACIÇO

### 5.1. Descrição do modelo numérico

Foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional para a interpretação, em conjunto, de todos os resultados dos ensaios, nomeadamente os ensaios STT realizados em 2009 nos furos S8 e S13 e os ensaios SFJ realizados em 2012 no túnel de acesso à central e na abóbada da central, de forma a permitir obter uma estimativa do estado de tensão na zona da caverna da nova central do empreendimento hidroelétrico de Salamonde [4]. Dada a semelhança entre as características litológicas nas zonas dos ensaios STT e SFJ, foi admitida como válida a hipótese de efetuar uma análise global de todos os ensaios realizados, considerando um maciço rochoso homogéneo.

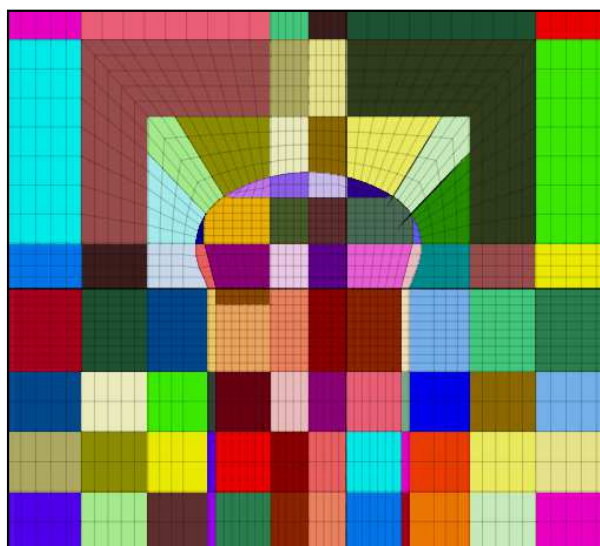
Para desenvolver o modelo numérico foi utilizado o programa de cálculo FLAC<sup>3D</sup>. Foram representados neste modelo a caverna da central, parte do túnel de acesso à central (TAC) e o túnel de ataque à abóbada da central (TAAC), como se observa na Figura 4. Foi também representada a topografia do terreno, que apresenta declives consideráveis.

A geração da malha no programa foi efetuada em duas fases. A primeira fase consistiu em definir uma malha uniforme, regular e não deformada, com dimensões da base do modelo de 210 m por 350 m e com uma altura a variar entre os 190 m a 260 m, constituída por diversos elementos do tipo "brick" e "radtunnel" (do FLAC<sup>3D</sup>), como se observa na Figura 6, onde se mostra um pormenor da malha na zona da nova central.



**Figura 6.** Pormenor da malha não deformada na zona da nova central.

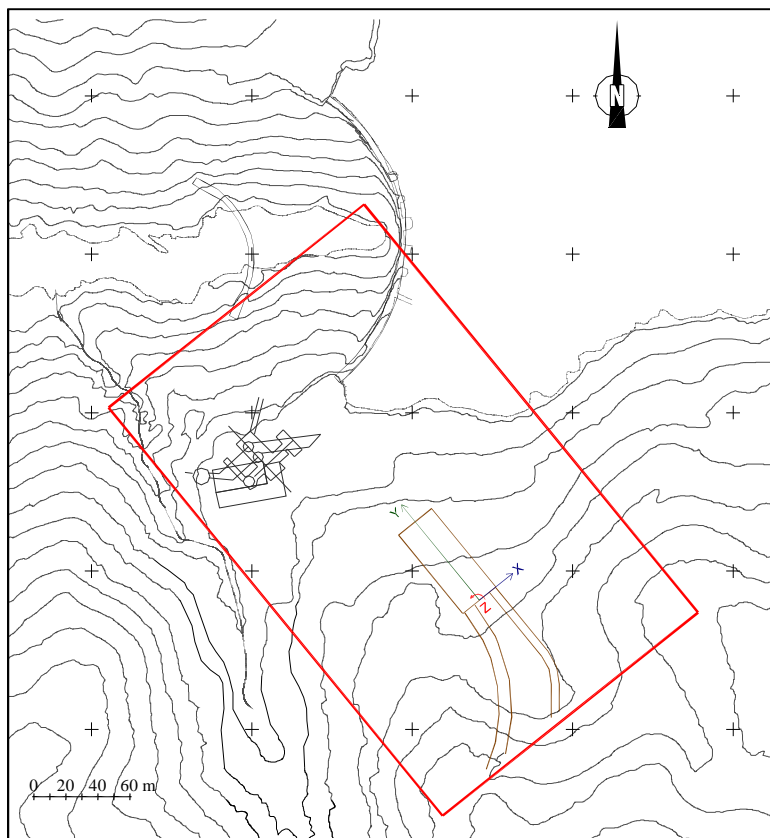
Na segunda fase foi necessário deformar a malha em alguns locais, de modo a ajustar-se às formas das obras subterrâneas consideradas (ver Figura 7), utilizando funções internas do FLAC<sup>3D</sup> na geração das zonas deformadas.



**Figura 7.** Pormenor da malha deformada na zona da nova central.

A representação da topografia do terreno, cujas cotas variam entre 193 m e 350 m, foi considerada com elementos do tipo "brick", cujas coordenadas foram obtidas com base nos perfis do terreno da zona que a malha abrange.

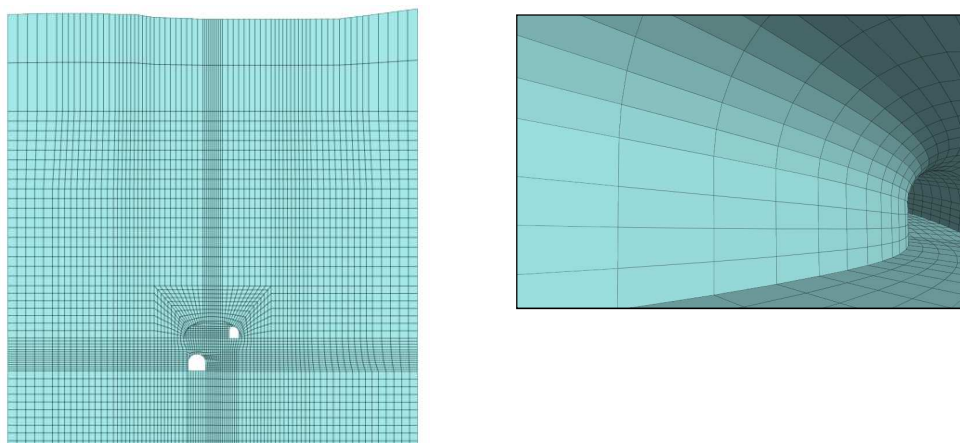
O modelo numérico tem um total de 405.622 nós e 389.414 elementos. O sistema de eixos coordenados foi definido de modo a que o eixo Y coincidisse com o eixo longitudinal da caverna da central, com o azimute de 315°, o eixo X fosse normal ao eixo da caverna da central, com o azimute de 45°, e o eixo Z fosse vertical e positivo com sentido ascendente. Na figura seguinte apresentam-se os limites adotados em planta para o modelo.



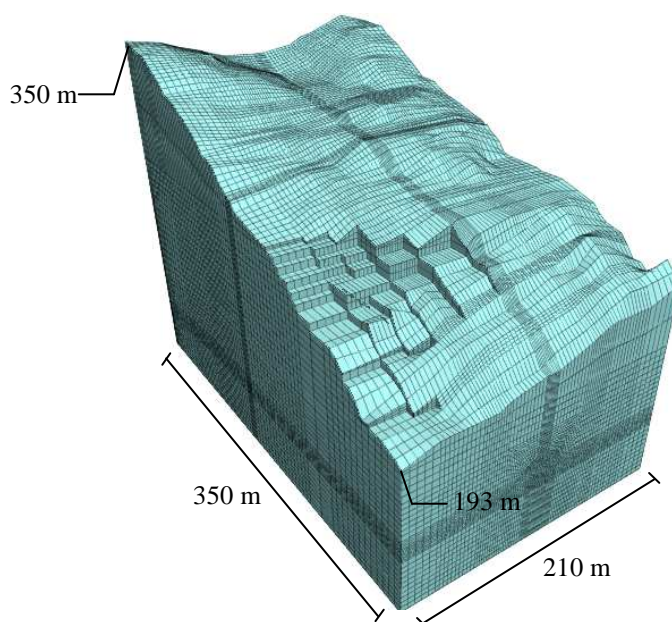
**Figura 8.** Limites adotados em planta para o modelo numérico.

Na Figura 9 representam-se as escavações do túnel de acesso à central e do túnel de ataque à abóbada da central e na Figura 10 apresenta-se uma perspetiva global do modelo. O maciço rochoso foi considerado como um meio contínuo, homogéneo e isotrópico, com um comportamento elástico linear, caracterizado por um módulo de elasticidade de 35 GPa, um coeficiente de Poisson de 0,20 e peso volúmico de 27 kN/m<sup>3</sup>. Visto que se pretende efetuar unicamente uma análise em termos de tensões, somente é relevante o valor do coeficiente de Poisson, pelo que se considerou um valor próximo da média obtida nos ensaios de compressão uniaxial. Relativamente ao valor do módulo de elasticidade, considerou-se representativo do maciço rochoso o valor médio obtido nos ensaios SFJ.





**Figura 9.** Corte transversal junto à caverna da central com as escavações dos túneis e pormenor do TAC.



**Figura 10.** Perspetiva global do modelo.

## 5.2. Metodologia para determinação do estado de tensão no maciço

A interpretação global dos resultados dos ensaios, por aplicação do modelo numérico tridimensional desenvolvido, implica o estabelecimento de algumas hipóteses relativamente às direções principais das tensões e à variação dos valores das tensões. É comum considerar que as tensões verticais e horizontais aumentam linearmente com a profundidade, pois estas tensões são, em larga medida, devidas ao peso dos terrenos sobrejacentes.

Em metodologias aplicadas pelo LNEC em trabalhos recentes [5], têm-se assumido as

seguintes hipóteses:

- são conhecidas as direções principais do estado de tensão inicial, e uma delas é vertical;
- as três tensões principais iniciais são proporcionais ao peso dos terrenos sobrejacentes,  $\gamma h$ , em que  $\gamma$  é o peso volúmico do maciço e  $h$  é a profundidade em cada local.

No caso presente, atendendo à natureza tridimensional da análise e à influência da topografia, considerou-se que o estado de tensão no maciço rochoso, antes das escavações, é dado por uma combinação linear dos seguintes estados de tensão, resultantes de carregamentos correspondentes a:

- uma tensão normal inicial, vertical (segundo o eixo Z), de valor igual ao peso dos terrenos sobrejacentes ( $\sigma_3^0 = \gamma h$ );
- tensões normais iniciais, no plano horizontal (segundo os eixos X e Y), de valor igual ao peso dos terrenos sobrejacentes ( $\sigma_1^0 = \gamma h$  e  $\sigma_2^0 = \gamma h$ );
- uma tensão tangencial inicial, no plano horizontal, de valor igual ao peso dos terrenos sobrejacentes ( $\sigma_4^0 = \gamma h$ ).

Aplicando separadamente, no modelo numérico, os carregamentos referidos acima é possível obter, em cada ponto do maciço, a matriz  $\sigma_{im}$  (com  $i = 1, \dots, 6$  e  $m = 1, \dots, 4$ ) com as seis componentes do estado de tensão para cada um dos quatro carregamentos.

Atendendo aos estados de tensão aplicados em cada carregamento, foram considerados dois tipos de condições de fronteira. Nos carregamentos correspondentes a tensões normais iniciais, nas fronteiras laterais do modelo foram impedidos os deslocamentos nas direções perpendiculares às mesmas e na fronteira inferior foram impedidos todos os deslocamentos. No carregamento correspondente a uma tensão tangencial inicial no plano horizontal, foram impedidos os deslocamentos horizontais nas fronteiras laterais e na fronteira inferior foram impedidos todos os deslocamentos.

Os valores de  $\sigma_{im}$  obtidos para os locais onde foram realizados os ensaios podem ser agrupados na matriz  $A_{\ell m}$  cujos elementos representam as componentes do estado de tensão correspondentes a cada uma das  $N$  medições efetuadas (com  $\ell = 1, \dots, N$ ), para os quatro carregamentos.

Designando por  $M_\ell$  o vetor das  $N$  medições efetuadas, a combinação linear dos estados de tensão resultantes dos quatro carregamentos considerados pode exprimir-se pelo seguinte sistema de equações:

$$\sum_m A_{\ell m} k_m = M_\ell \quad (\ell = 1, \dots, N) \quad (m = 1, \dots, 4) \quad (1)$$

A resolução deste sistema de equações é efetuada aplicando o método dos mínimos quadrados, permitindo desta forma determinar os parâmetros  $k_m$ , que são utilizados para estimar o estado de tensão *in situ* mais provável em qualquer local do maciço rochoso. Desta forma, o estado de tensão *in situ* num determinado local, corresponde ao seguinte somatório para os  $m$  carregamentos:

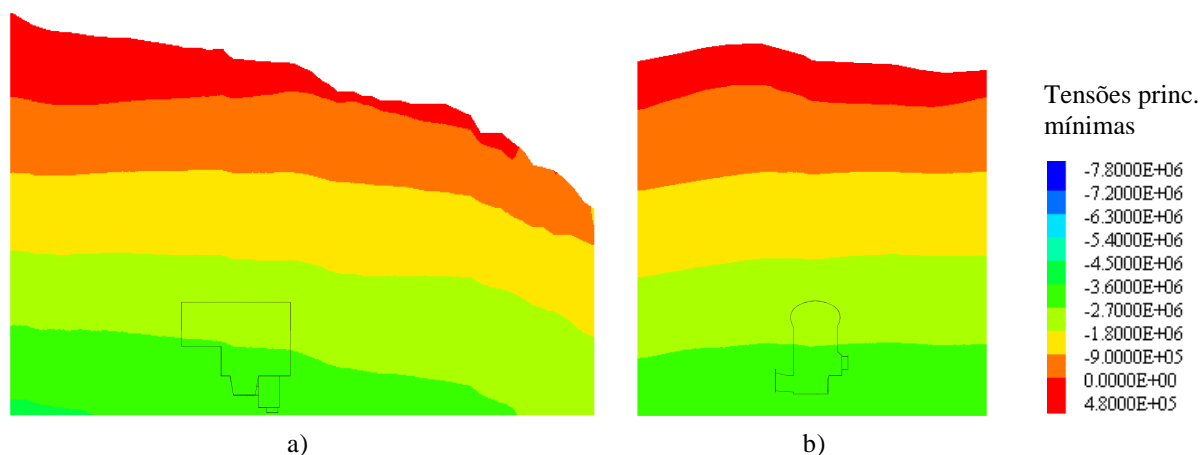
$$\sigma_i = \sum_m k_m \sigma_{im} \quad (i = 1, \dots, 6) \quad (m = 1, \dots, 4) \quad (2)$$

Para aplicação desta metodologia ao caso presente, foi ainda assumido que o parâmetro  $k_3$  é unitário, o que corresponde à hipótese habitual de admitir que a tensão vertical é igual ao peso dos terrenos subjacentes. Este constrangimento foi introduzido, uma vez que se verificou que nos resultados dos ensaios STT a componente vertical do estado de tensão (sensivelmente normal ao eixo dos furos) se encontrava sobreavaliada.

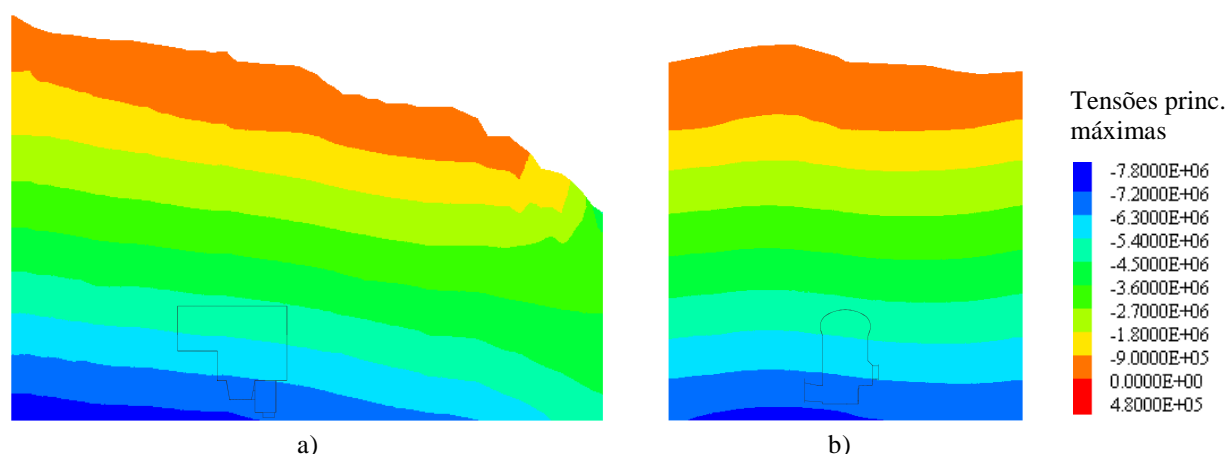
Considerando os ensaios SFJ realizados no TAC e na abóbada da central (seis equações), o ensaio STT realizado no furo S8 à profundidade de 93,48 m (seis equações) e os três ensaios STT realizados no furo S13 (dezoito equações), obtiveram-se os seguintes valores para os parâmetros  $k_m$ :  $k_1 = 0,88$ ,  $k_2 = 0,98$ ,  $k_3 = 1,00$  e  $k_4 = 0,31$ .

### 5.3. Análise dos resultados

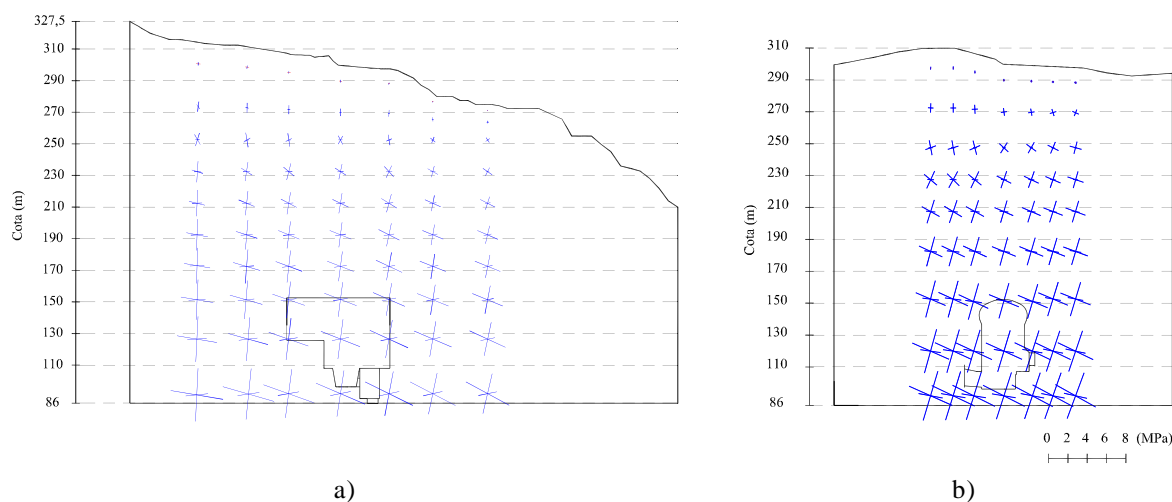
O estado de tensão *in situ* num determinado local, previamente às escavações, foi calculado a partir da combinação linear das tensões obtidas em cada carregamento e utilizando os valores obtidos de  $k_m$ . Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se, respetivamente, as distribuições das tensões principais mínimas e máximas em duas seções normais aos eixos coordenados. Pode-se verificar nestas figuras que as distribuições das tensões principais traduzem a variação das tensões com a profundidade e a influência da topografia. Importa ainda salientar que em zonas mais profundas do maciço, a tensão principal máxima é cerca de duas vezes a tensão principal mínima. Na Figura 13 apresentam-se as representações, segundo duas seções normais aos eixos coordenados, da evolução das tensões principais e da respetiva orientação na zona da nova caverna da central subterrânea, com a representação do tensor tridimensional em perspetiva. A Figura 13 a) evidencia a rotação da tensão principal máxima subhorizontal resultante do efeito da topografia do terreno e o corte vertical (Figura 13 b) mostra a rotação da tensão principal subvertical, que é coerente com a influência expectável do vale do rio Mau no campo de tensões.



**Figura 11.** Distribuição de tensões principais mínimas (Pa). a) Corte longitudinal pelo eixo da central. b) Corte vertical na zona média da central.

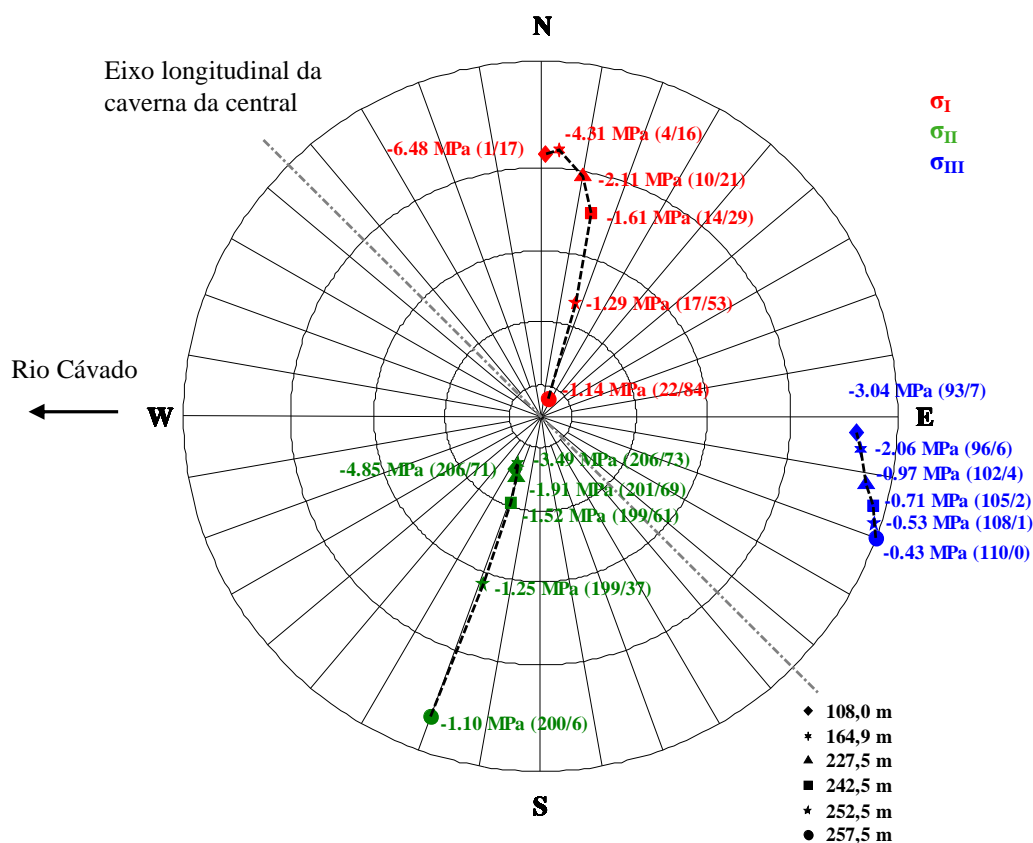


**Figura 12.** Distribuição de tensões principais máximas (Pa). a) Corte longitudinal pelo eixo da central. b) Corte vertical na zona média da central.



**Figura 13.** Tensões principais na zona da nova central. a) Corte longitudinal pelo eixo da central. b) Corte vertical na zona média da central.

Na Figura 14 mostra-se a projeção estereográfica (hemisfério inferior), para várias profundidades, das direções principais de tensão e os valores das tensões principais correspondentes. Verifica-se que ocorre uma rotação das tensões principais máximas ( $\sigma_I$ ) e intermédias ( $\sigma_{II}$ ) com a profundidade. Após a zona mais superficial do maciço, afetada por efeitos locais devido à topografia do terreno, a tensão  $\sigma_I$  é aproximadamente subhorizontal e perpendicular à direção do rio Cávado, enquanto que a tensão  $\sigma_{II}$  é praticamente subvertical. A tensão principal mínima ( $\sigma_{III}$ ) obtida, é aproximadamente subhorizontal e paralela à direção do rio Cávado. A tensão principal máxima horizontal corresponde a cerca de duas vezes a tensão principal mínima horizontal.



**Figura 14.** Tensões e direções principais para várias profundidades.

Na Figura 15 representam-se as relações entre as tensões principais e a tensão vertical para diversas cotas ao longo de um eixo vertical na zona média da central, em que a cota da superfície do terreno corresponde a 299,9 m. Verifica-se que, após a zona mais superficial do maciço, a relação entre a tensão principal máxima ( $\sigma_I$ ) e a tensão vertical varia entre 1,0 e 1,3, a relação entre a tensão principal intermédia ( $\sigma_{II}$ ) e a tensão vertical é aproximadamente unitária e que a relação entre a tensão principal mínima ( $\sigma_{III}$ ) e a tensão vertical varia entre 0,5 e 0,6.

Na Figura 16 apresenta-se um corte horizontal na zona média dos pilares da abóbada da central com a distribuição das tensões verticais, onde se observam as escavações efetuadas na abóbada. As Figuras 17 e 18 mostram, respetivamente, uma perspetiva na zona da abóbada da caverna da central e um corte longitudinal pelo eixo da central, com as distribuições das tensões horizontais, vertical e da tensão tangencial no plano horizontal. Estas figuras mostram a elevada gama de tensões verticais de compressão a que os três pilares e as nascenças dos arcos da abóbada da central estão submetidos, que atingem valores de cerca de 9 MPa. A esta profundidade, a tensão vertical correspondente ao peso dos terrenos subjacentes seria de cerca de 4 MPa. As tensões tangenciais  $\sigma_{yz}$  e  $\sigma_{xz}$  apresentam, como seria de esperar, valores muito inferiores aos das restantes componentes do estado de tensão.

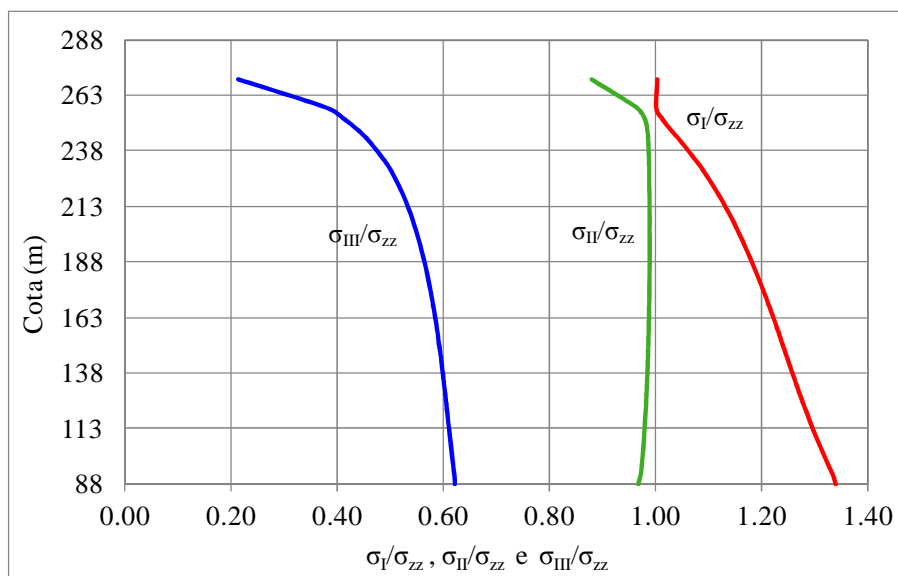


Figura 15. Relação entre as tensões principais e a tensão vertical.

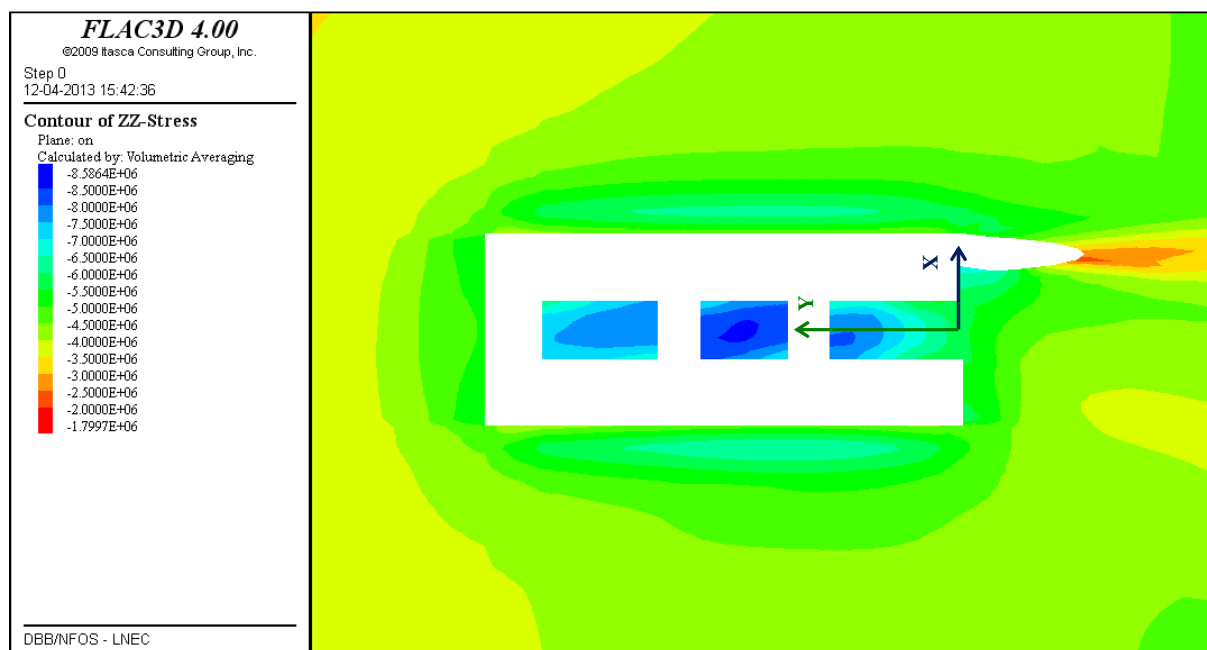
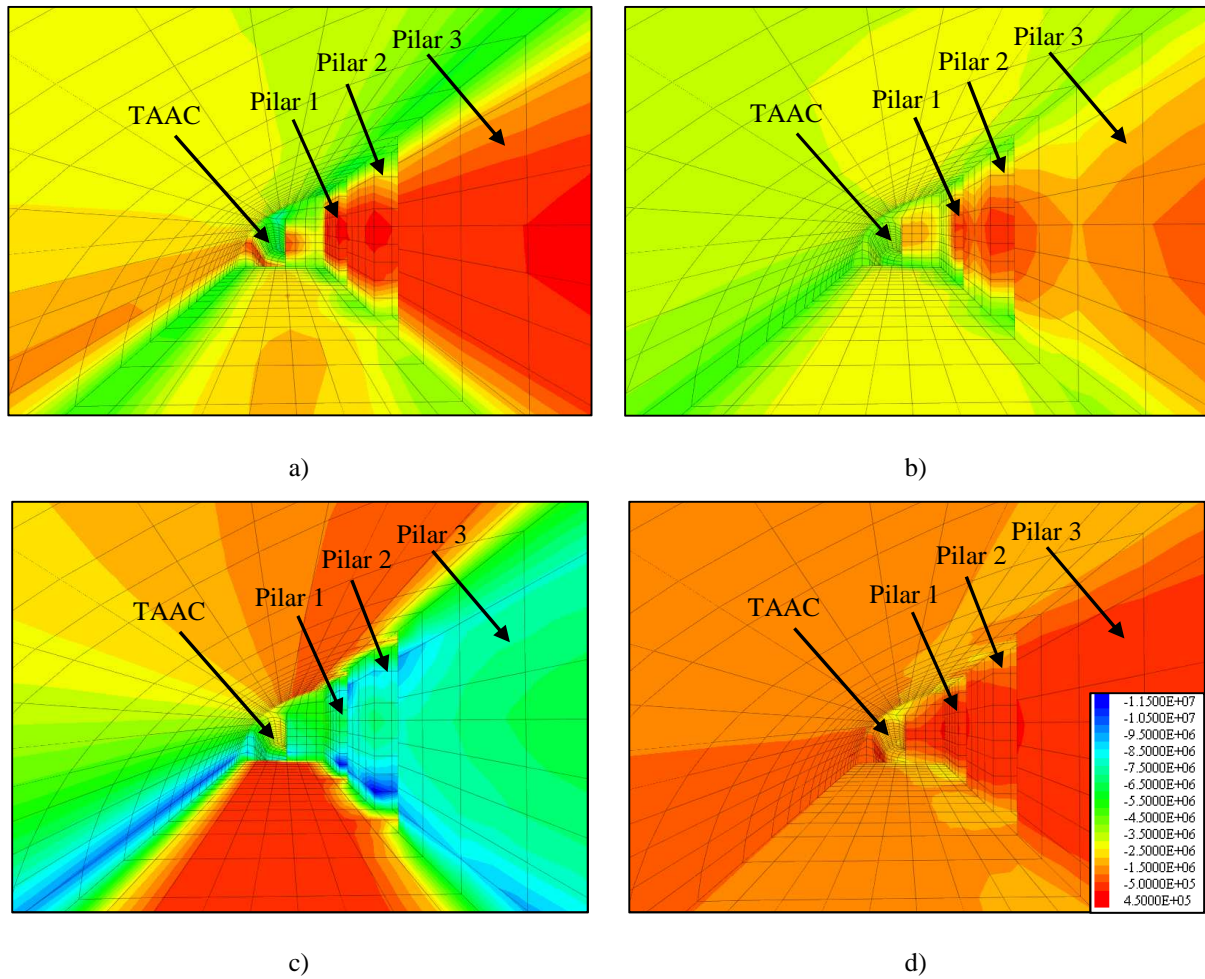


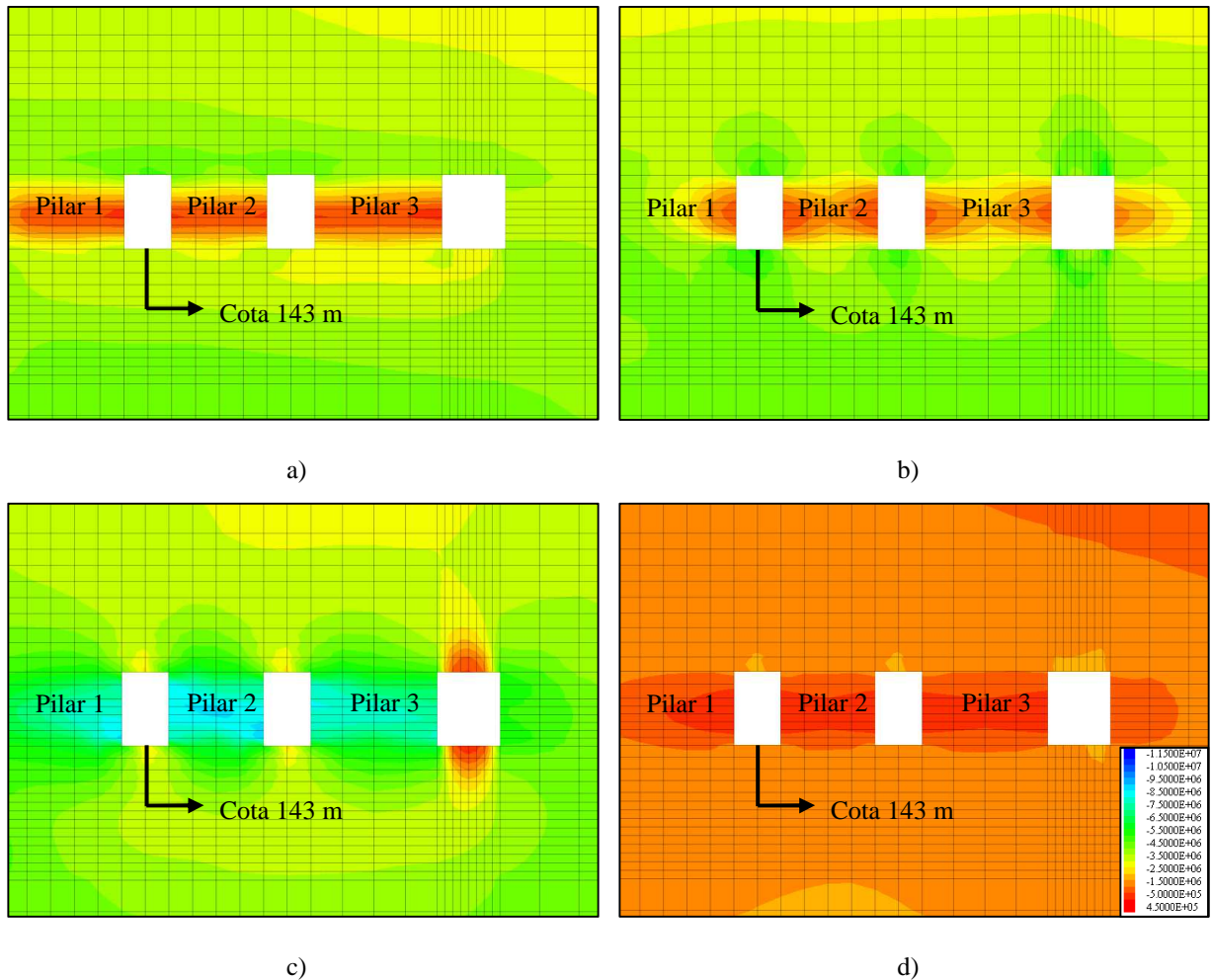
Figura 16. Corte horizontal na zona média dos pilares da abóbada da central com a distribuição de tensões verticais (Pa).



**Figura 17.** Perspetiva a partir da parede topo norte da abóbada da central com a distribuição das tensões horizontais  $\sigma_{xx}$  a) e  $\sigma_{yy}$  b), tensão vertical  $\sigma_{zz}$  c) e tensão tangencial no plano horizontal  $\sigma_{xy}$  d) (Pa).

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um modelo numérico tridimensional do maciço rochoso, que inclui as principais escavações e a topografia do terreno, com o objetivo de estimar o estado de tensão inicial na zona da nova caverna da central de Salomonde II. Foi utilizada uma metodologia que permite analisar, de forma integrada, os resultados de todos os ensaios realizados, nomeadamente os ensaios de sobrecarotagem e os ensaios com almofadas planas de pequena área e, mediante a adoção de determinadas hipóteses de cálculo, estimar o estado de tensão inicial mais provável em qualquer local do maciço rochoso. As hipóteses assumidas nesta metodologia relativamente ao estado de tensão instalado previamente às escavações, constituem aproximações razoáveis da realidade.



**Figura 18.** Corte longitudinal pelo eixo da central com a distribuição das tensões horizontais  $\sigma_{xx}$  a) e  $\sigma_{yy}$  b), tensão vertical  $\sigma_{zz}$  c) e tensão tangencial no plano horizontal  $\sigma_{xy}$  d) (Pa).

Nesta metodologia foi também considerada a aplicação, no modelo numérico tridimensional, do carregamento correspondente a uma tensão tangencial no plano horizontal, para analisar a rotação das tensões normais no plano.

Constatou-se que, após a zona mais superficial do maciço, obtiveram-se tensões principais mínima e máxima aproximadamente subhorizontais, respetivamente, paralela e perpendicular à direção do rio Cávado, sendo a tensão principal máxima cerca de 2 vezes a tensão principal mínima. As tensões principais intermédias obtidas são praticamente subverticais e correspondem, para a profundidade a que está localizada a central, ao peso dos terrenos sobrejacentes. Para a profundidade a que está localizada a caverna da central, obtiveram-se, respetivamente, tensões principais máxima e mínima correspondentes a 1,30 e 0,60 vezes a tensão resultante do peso dos terrenos sobrejacentes.



## REFERÊNCIAS

- [1] COBA, *Projecto do reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico de Salamonde - Salamonde II*, (2009).
- [2] L. Lamas e B. Figueiredo, *Reforço de potência de Salamonde – Ensaio com defórmeter tridimensional para determinação do estado de tensão*, Relatório do LNEC 403/09–DBB/NFOS, (2009).
- [3] M. Espada e L. Lamas, *Reforço de potência de Salamonde – Ensaio com almofadas planas de pequena área para determinação do estado de tensão durante a construção*, Relatório do LNEC 340/12–DBB/NFOS, (2012).
- [4] M. Espada, L. Lamas e N. Leitão, *Reforço de potência de Salamonde – Modelo interpretativo do estado de tensão inicial*, Relatório do LNEC 348/12–DBB/NFOS, (2012).
- [5] L. Lamas, J. Muralha e B. Figueiredo, *Application of a global interpretation model for assessment of the stress field for engineering purposes*, In Xie (ed.) *Rock Stress and Earthquakes; Proc. 5th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, Beijing*, London (2010), pp 631-636 Taylor & Francis.