

MODELAÇÃO NUMÉRICA PARA INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO NO MACIÇO ROCHOSO DA NOVA CENTRAL DA BEMPOSTA

J. Muralha¹, B. Figueiredo¹ e L. Lamas¹

1: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Departamento de Barragens de Betão
Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
e-mail: jmuralha@lnec.pt <http://www.lnec.pt/organizacao/dbb/nfos>

Palavras-chave: Maciço rochoso, estado de tensão, obras subterrâneas, modelos 2D e 3D

Resumo. *A libertação do estado de tensão inicial nos maciços rochosos é a principal acção a considerar em escavações subterrâneas. Como o estado de tensão é muito influenciado pela topografia e por condições geológicas particulares de cada local, a sua determinação a partir de ensaios de campo necessita de uma abordagem particular que, tendo em conta a natureza pontual dos ensaios e a sua variabilidade, permita estimar o estado de tensão global no maciço. Apresentam-se os ensaios realizados para o projecto de uma central subterrânea, com destaque para a modelação numérica que permitiu integrar os resultados dos ensaios e determinar o estado de tensão global mais provável. Os modelos usados permitiram considerar no estado de tensão inicial o efeito erosivo do rio ao escavar o vale e da abertura das galerias onde os ensaios foram executados.*

1. INTRODUÇÃO

As obras do reforço de potência da barragem de Bemposta incluem a construção de um novo circuito hidráulico na margem direita do rio Douro, na sua zona internacional. Permitem quase duplicar a potência nominal da central existente, 238 MW provenientes de 3 grupos, para 450 MW, com a instalação de um novo grupo numa central em poço a construir na margem direita do rio. As principais componentes deste novo circuito são uma central subterrânea num poço, com uma secção de cerca de 30×22 m² e uma altura de cerca de 80 m (até à cota 305 m), uma galeria de adução, com cerca de 500 m de comprimento e 12 m de diâmetro, e importantes obras de escavação na zona da restituição e, em particular, da tomada de água. Na Figura 1 apresentam-se as obras a executar, distinguindo-se o novo circuito hidráulico com a respectiva central mais a jusante, bem como as novas galerias de adução e restituição.

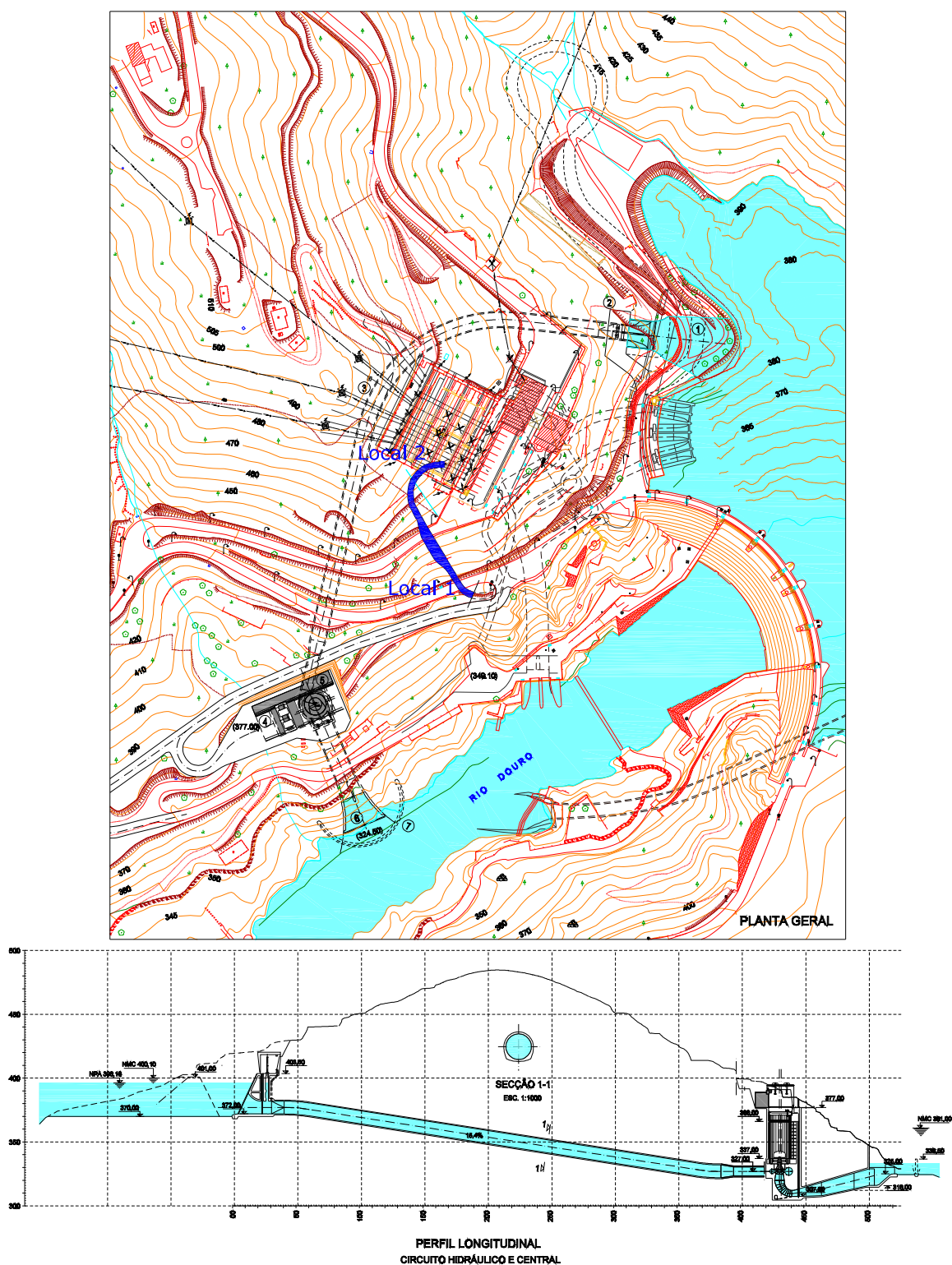


Figura 1. Planta geral e corte longitudinal pelo circuito hidráulico das obras.

A prospecção geológico-geotécnica mostrou a ocorrência de dois tipos de materiais rochosos: i) migmatitos/micaxistos na zona das obras da tomada de água e circuito hidráulico, e na zona do encontro da margem direita da barragem; ii) granito gnáissico com intrusões de pegmatito e de migmatito na zona da nova central e da restituição. No âmbito dos estudos para este projecto de reforço de potência, o Projectista e Dono da Obra, EDP Gestão da Produção de Energia S.A. (EDP), solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) a realização de um conjunto de ensaios in situ e laboratoriais de Mecânica das Rochas [1]. Neste conjunto incluíam-se ensaios in situ com dilatómetro em furos de sondagem, para a determinação da deformabilidade do maciço rochoso na zona do poço da nova central, e ensaios para determinação do estado de tensão, bem como ensaios laboratoriais de compressão axial, triaxial e diametral para definir as características de deformabilidade e resistência à compressão e tracção das rochas, e ensaios de deslizamento de descontinuidades.

Sendo a libertação do estado de tensão uma das acções mais importantes a considerar no dimensionamento das obras subterrâneas, foram realizados, em duas zonas de uma das galerias abertas no decurso dos trabalhos de escavação do circuito hidráulico já existente (local 1 e local 2), ensaios de reposição da tensão com almofadas pequenas (Small Flat Jacks - SFJ) nas paredes da galeria e ensaios de sobrecarotagem com defómetro tridimensional (Stress Tensor Tube - STT) em furos de sondagem executados nas proximidades dos ensaios SFJ. A galeria onde os ensaios foram executados e os dois locais encontram-se assinalados na Figura 1.

O estado de tensão no maciço na zona do poço da nova central deve ser bastante influenciado pela topografia do terreno, em particular da forma do vale que resultou do efeito erosivo do rio Douro ao longo do tempo geológico. Para além disso, os resultados dos ensaios não reproduzem directamente o estado de tensão natural, pois foram determinados na vizinhança de uma galeria que provocou a sua alteração. Assim, para interpretar de forma conjunta os resultados das diversas determinações do estado de tensão, torna-se necessária a consideração de um modelo global para o estado de tensão na zona, para cuja simulação foram usados os programas FLAC [3] e FLAC3D [4].

Atendendo à grande complexidade da geometria das escavações, foi decidido não empregar um modelo tridimensional global para a análise do problema. Assim, a análise utilizou, em primeiro lugar, um modelo plano de uma secção vertical aproximadamente perpendicular ao rio para modelar a variação do estado de tensão provocada pela escavação do terreno resultante da acção erosiva do rio e a escavação da galeria no local 2. Em seguida, foi usado um modelo tridimensional de espessura unitária, perpendicular ao anterior, para modelar a influência da escavação da galeria no local 2 onde os ensaios foram realizados.

A actuação das tensões naturais (tensão vertical e tensões horizontais paralela e perpendicular à direcção do rio) foi considerada separadamente em cada um dos modelos e permitiu calcular os valores de todas as componentes do estado de tensão nos mesmos locais onde estas foram determinadas experimentalmente. Por minimização da norma do quadrado dos desvios entre os valores das tensões obtidos dos modelos e os correspondentes valores determinados nos ensaios, foram determinados os valores mais

prováveis das tensões naturais que correspondem ao estado de tensão prévio à escavação do vale, a partir dos quais é possível calcular as tensões em qualquer ponto do maciço e interpretar de uma forma integrada todos os resultados dos ensaios efectuados. Somente através desta abordagem foi possível interpretar de forma conjunta os resultados dos dois tipos de ensaios realizados, em locais afastados e a diferentes profundidades e, assim, determinar o estado de tensão natural no maciço.

2. ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO

Para a determinação do estado de tensão no maciço foram consideradas duas possibilidades: a primeira previa a execução de ensaios de sobre-carotagem com defórmetro tridimensional (STT) em furos de sondagem verticais a executar a partir da superfície do terreno na zona da nova central, e a segunda era constituída por um conjunto de ensaios de almofadas planas de pequena área (SFJ), para além de um número mais reduzido de ensaios STT em furos curtos, numa das galerias que serviram de acesso durante a fase de construção da central existente. Apesar de na zona desta galeria o maciço ser formado por rocha migmatítica, ao passo que na zona da nova central é constituído por granito gnáissico, foi seguida esta segunda possibilidade, pois foi considerado que as diferenças entre as duas litologias e as topografias do vale nos dois locais não deveriam conduzir a variações significativas do estado de tensão global no maciço entre as duas zonas. Para além das vantagens relacionadas com o planeamento dos trabalhos, esta opção era mais económica que a primeira, dado que a execução de furos de sondagem de diâmetro superior a 100 mm desde a superfície até à profundidade de interesse para os ensaios seria bastante onerosa.

Em cada um dos 2 locais foram realizados 3 ensaios de almofadas nas paredes da galeria (um rasgo horizontal, um vertical e um inclinado a 45°) e ensaios de sobre-carotagem STT em furos abertos a partir desses locais, com direcções perpendiculares ao eixo da galeria e inclinações descendentes de 45°.

No local 1, as almofadas encontram-se a uma cota de aproximadamente 321 m, a cerca de 95 m de profundidade, e num plano aproximadamente vertical de direcção N152°W. O furo STT1 tem a orientação de (242°;45°) e nele foram executados ensaios às profundidades de 12,55; 14,85 e 17,15 m. No local 2, localizado a uma cota aproximada de 332 m e a cerca de 130 m de profundidade, as almofadas foram colocadas num plano aproximadamente N81°W. O furo STT2 tem a orientação (350°;45°) e nele os ensaios foram executados às profundidades de 5,35 e 9,60 m.

Os ensaios com almofadas planas de pequena área (SFJ) são ensaios de reposição do estado de tensão que consistem na abertura de um rasgo numa superfície exposta de um maciço rochoso e no restabelecimento do estado de deformação inicial mediante a aplicação de uma pressão no interior do rasgo por meio de um macaco hidráulico de pequena espessura (cerca de 10 mm). Para este efeito são medidas as distâncias entre pares de bases de medida previamente colocadas segundo a direcção normal ao rasgo a executar, após o que é efectuado o rasgo de 27 cm de flecha, em forma de segmento

circular, com uma serra de disco; em seguida, é introduzida o macaco no rasgo e é aplicada pressão no seu interior por patamares até que as distâncias entre os pares de bases de medida retomem os valores iniciais. Nesta altura, a pressão no interior da almofada corresponde à tensão normal existente no local segundo a direcção normal ao rasgo.

Complementarmente, podem ser realizados ciclos de carga-descarga com leitura dos deslocamentos que permitem a determinação do módulo de deformabilidade a partir da equação seguinte, em que a constante k , estabelecida a partir de uma análise por elementos finitos [2], é igual 519,5 mm:

$$\delta = k \frac{P}{E} \quad (1)$$

Apresentam-se, na Tabela 1, os valores das tensões (vertical, horizontal e inclinada a 45°) dos ensaios SFJ efectuados nos dois locais, bem como os valores dos módulos de deformabilidade determinados.

	Rasgo	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
Local 1	Horizontal	$\sigma_v=3,46$	8,2
	Vertical	$\sigma_h=3,61$	12,9
	Inclinado	$\sigma_{inc}=1,85$	5,0
Local 2	Horizontal	$\sigma_v=1,91$	30,6
	Vertical	$\sigma_h=3,31$	29,3
	Inclinado	$\sigma_{inc}=4,32$	30,6

Tabela 1. Resultados dos ensaios de almofadas pequenas.

O defórmetro tridimensional, designado abreviadamente por STT (Strain Tensor Tube), é um equipamento constituído essencialmente por um tubo cilíndrico de resina epoxídica de parede relativamente fina (2 mm) com cerca de 20 cm de altura, em cujo interior (a meia espessura) se encontram embebidos 10 extensómetros eléctricos de resistência dispostos segundo direcções que permitem a determinação do estado de tensão completo (tridimensional) por meio de uma técnica de sobre-carotagem dentro de furos de sondagem [5]. O tubo com os extensómetros está ligado a uma peça metálica que permite a ligação às varas de posicionamento e que serve, também, para protecção da placa de aquisição que realiza as leituras das extensões e da temperatura, para o que dispõe de um termo-par, bem como para armazenar estes valores em memória não-volátil.

Os ensaios STT baseiam-se numa técnica de libertação de tensões por sobre-carotagem, que consta dos seguintes passos:

- abertura de um furo de sondagem com cerca de 120 mm de diâmetro (furo largo) até à vizinhança do local onde se pretende realizar a determinação do estado de tensão;
- abertura de um furo coaxial com 37 mm (furo estreito) para colocação do STT, a partir do fundo do furo anterior;

- colocação do STT no furo estreito, devidamente orientado por meio das varas de posicionamento, e colagem do STT (que dura entre 24 e 48 horas, conforme as condições de temperatura no local);
- remoção das varas de posicionamento após a colagem;
- sobrecarotagem (aprofundamento do furo largo) do STT até uma profundidade que garanta a libertação total das tensões no maciço;
- estabilização da temperatura e das leituras dos extensómetros;
- recolha do tarolo contendo o STT, para a recuperação dos valores das extensões e temperatura medidos desde a colocação e armazenados na memória da placa de aquisição;
- realização de um ensaio biaxial para determinar as constantes elásticas do tarolo de rocha, com as quais se calcula o estado de tensão a partir das diferenças das extensões medidas antes e após a sobrecarotagem.

A interpretação dos resultados dos ensaios STT considera as hipóteses de continuidade, homogeneidade, isotropia e elasticidade linear para estabelecer as relações tensões *vs* deformações de um tarolo cilíndrico, no interior do qual está a célula STT, submetido a um estado de tensão na sua fronteira exterior equivalente ao estado de tensão existente no maciço. A sobrecarotagem provoca a libertação desse estado de tensão, que origina as deformações que são medidas pelos 10 extensómetros. A partir desses valores é possível calcular o estado de tensão respectivo, desde que sejam conhecidas as constantes elásticas do tarolo (módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν), determinadas a partir dos resultados do ensaio biaxial [5].

O sistema de leitura efectua a aquisição de dados de uma forma continuada (intervalos de leitura programáveis) desde o posicionamento, até à sobrecarotagem do STT, o que possibilita a elaboração dos gráficos com a evolução das deformações e a determinação das extensões medidas no decorrer da sobrecarotagem. A partir destes valores, e usando os valores de E e ν do ensaio biaxial respectivo, calcula-se o estado de tensão no maciço referido a um sistema de eixos $Oxyz$ associados ao STT. Na Tabela 2 apresenta-se um exemplo dos resultados de um ensaio STT: valores das 10 extensões medidas e que resultaram da libertação do estado de tensão pela sobrecarotagem, valores das constantes elásticas determinadas no ensaio biaxial e que foram usadas para determinar o estado de tensão que melhor aproxima o estado de deformação medido e, ainda, valores das extensões calculadas a partir do estado de tensão.

Como as varas de posicionamento permitem a orientação do STT, é possível calcular as tensões principais (σ_I , σ_{II} e σ_{III}) e as respectivas direcções para cada um dos ensaios. Estes resultados são apresentados na Tabela 3 para os 5 ensaios STT realizados. Na Figura 2 encontram-se representadas as respectivas projecções estereográficas (hemisfério inferior).

Extensões (10 ⁻⁶)	Medidas	Calculadas	$E=15,3 \text{ GPa}$ $\nu=0,24$		
ε_1	379	384	$\sigma_x=2,45$	$\tau_{xy}=0,30$	$\tau_{xz}=1,25$
ε_2	154	173			
ε_3	154	170			
ε_4	108	96			
ε_5	216	186			
ε_6	249	189			
ε_7	210	276			
ε_8	512	471			
ε_9	872	596			
ε_{10}	275	311			

Tabela 2. Resultados da sobre-carotagem no furo STT1 à profundidade de 12,55 m.

Ensaio	Tensões	Valor (MPa)	Orientação Direc./Inclin.
Furo STT1 12,55 m	σ_I	1,97	143/18
	σ_{II}	2,01	45/21
	σ_{III}	6,21	269/62
Furo STT1 14,85 m	σ_I	0,34	6/26
	σ_{II}	0,49	115/33
	σ_{III}	4,58	246/45
Furo STT1 17,15 m	σ_I	2,38	97/42
	σ_{II}	2,90	352/16
	σ_{III}	7,51	246/44
Furo STT2 5,35 m	σ_I	2,21	252/7
	σ_{II}	2,57	157/32
	σ_{III}	3,43	352/57
Furo STT2 9,60 m	σ_I	1,38	175/40
	σ_{II}	1,81	82/4
	σ_{III}	7,40	348/49

Tabela 3. Tensões e direcções principais dos ensaios STT.

3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

O estado de tensão no maciço na zona da nova central e respectivo circuito hidráulico é influenciado pela topografia do terreno, em particular do vale resultante do efeito erosivo do rio Douro ao longo do tempo geológico. Para além disso, os resultados dos ensaios não reproduzem directamente o estado de tensão natural pois foram determinados na vizinhança de uma galeria que provocou a sua alteração.

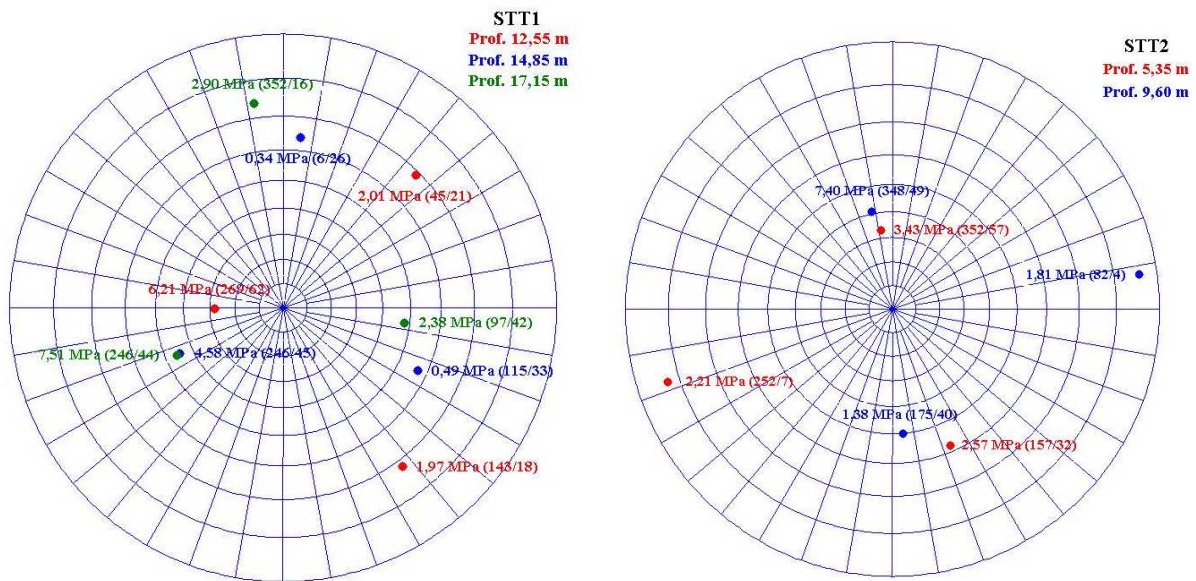


Figura 2. Projecções estereográficas das tensões e direcções principais.

Assim, para interpretar de forma conjunta os resultados das diversas determinações do estado de tensão pelas técnicas das almofadas planas (SFJ) e do defórmetro tridimensional (STT), torna-se necessária a consideração de um modelo global para o estado de tensão na zona, para cuja resolução foram usados os programas FLAC [3] e FLAC3D [4].

Numa fase inicial do estudo ponderou-se a construção de um modelo tridimensional que permitisse modelar conjuntamente as escavações efectuadas nos locais 1 e 2. No entanto, constatou-se que a malha desse modelo teria muito grandes dimensões, devido à grande complexidade da geometria das escavações. A pequena dimensão das escavações, quando comparada com o volume do domínio do problema, associada ao facto da discretização necessitar de ser muito fina na zona dos locais de ensaios, conduziria a uma malha global que requereria meios informáticos e tempos de cálculo inoportáveis face à natureza do problema a resolver.

Face a esta dificuldade, foi modelado, em primeiro lugar, o efeito resultante da topografia existente, que é devida à acção erosiva do rio, na distribuição das tensões no maciço. Foi considerado um modelo bidimensional de uma secção vertical contendo aproximadamente a direcção da galeria na zona do local 1 e, por isso, sensivelmente perpendicular ao rio (N20°W). Dado que na margem direita se atingem cotas cerca de 100 m superiores às da margem esquerda, a geometria do modelo considera um perfil do terreno assimétrico.

Este modelo tem 2100 m de desenvolvimento horizontal, em que as cotas variam entre 580 m (extremidade esquerda) e 460 m (extremidade direita). Foi considerada uma cota de 310 m para o fundo do rio sendo a sua largura 40 m. O modelo integra 660 × 490 elementos

numa malha que na generalidade apresenta elementos com $5 \times 5 \text{ m}^2$, sendo que na vizinhança do rio e das zonas onde se encontram as galerias de ensaio apresenta elementos com $1 \times 1 \text{ m}^2$ (Figura 3). Como condições de fronteira, impôs-se restrição de deslocamentos horizontais nas extremidades (esquerda e direita) do modelo e restrição de deslocamentos verticais na base do mesmo.

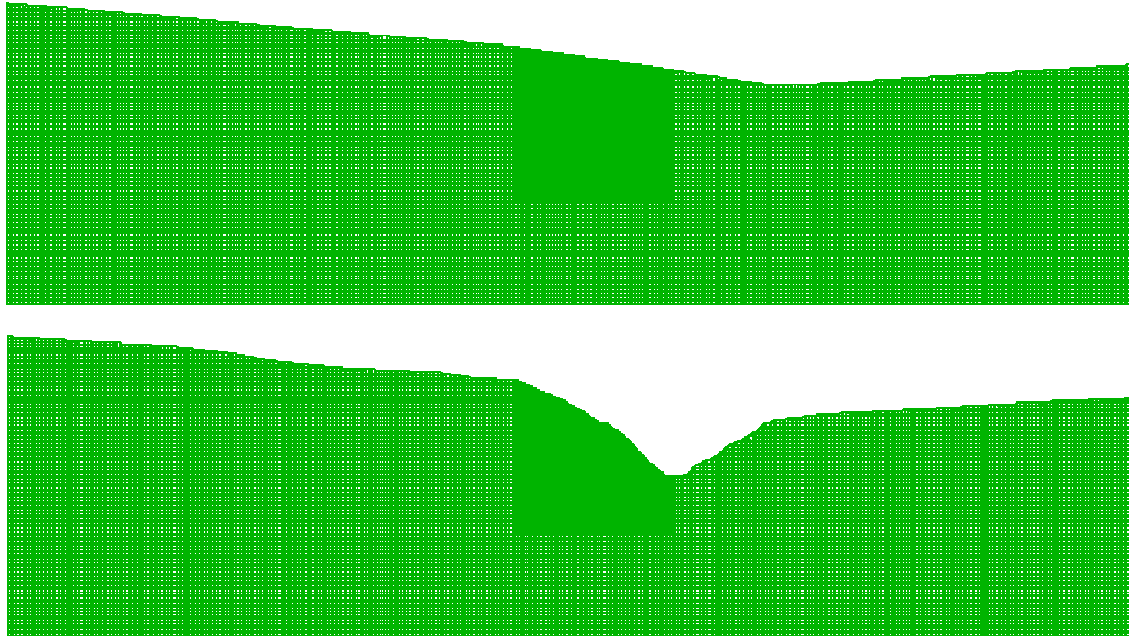


Figura 3. Modelo com representação do perfil do terreno antes e após a escavação pelo rio.

Neste modelo foram assumidas as seguintes hipóteses:

- estado plano de deformação;
- o terreno antes e após a escavação devida ao efeito erosivo do rio possuía os perfis apresentados na Figura 3;
- a componente vertical do estado de tensão natural, anterior à escavação devida ao rio (σ_{vert}) é proporcional ao peso dos terrenos sobrejacentes;
- as componentes horizontais do estado de tensão natural antes da escavação realizada pelo rio – σ_{hor} no plano do modelo e σ_{nor} no plano perpendicular – variam, também, linearmente com a profundidade;
- σ_{vert} , σ_{hor} e σ_{nor} são direcções principais do estado de tensão natural.

Face a estas hipóteses, as componentes de tensão segundo as direcções σ_{hor} (horizontal no plano do modelo), σ_{vert} (vertical) e σ_{nor} (perpendicular ao plano do modelo) podem ser representadas pelas seguintes equações, em que γ é o peso volúmico do maciço (considerado igual a 27 kN/m^3) e h a profundidade do local referida ao perfil do terreno antes da escavação provocada pelo rio:

$$\begin{aligned}\sigma_{hor} &= k_1 \gamma h \\ \sigma_{vert} &= k_2 \gamma h \\ \sigma_{nor} &= k_3 \gamma h\end{aligned}\quad (2)$$

O maciço rochoso foi considerado como um meio contínuo, homogéneo e isótropo, com um comportamento elástico linear e, como se pretende unicamente uma análise em termos de tensões, foi usado um valor do coeficiente de Poisson de 0,25, que corresponde a uma média dos resultados dos ensaios, e um valor do módulo de elasticidade de 20 GPa.

Este modelo inclui, igualmente, a abertura de uma galeria de secção circular no local 2, que permite avaliar a sua influência nas tensões determinadas experimentalmente nessa zona (Figura 4).

A actuação das tensões naturais (σ_{hor} , σ_{vert} , σ_{nor}) foi considerada separadamente, correspondendo assim a 3 acções distintas E_i , com $i = 1,2,3$.

$$\begin{aligned}E_1: \quad &\sigma_{hor} = \gamma h, \quad \sigma_{vert} = 0, \quad \sigma_{nor} = 0 \\ E_2: \quad &\sigma_{hor} = 0, \quad \sigma_{vert} = \gamma h, \quad \sigma_{nor} = 0 \\ E_3: \quad &\sigma_{hor} = 0, \quad \sigma_{vert} = 0, \quad \sigma_{nor} = \gamma h\end{aligned}\quad (3)$$

Para cada uma destas acções E_i ($i = 1,2,3$), o modelo bi-dimensional permitiu calcular directamente todas as componentes do estado de tensão nas profundidades dos furos onde foram realizados os ensaios de sobrecarotagem no furo STT e as tensões nos pontos onde foram efectuados os ensaios com almofadas planas no local 2, pois neste local a direcção da galeria é sensivelmente perpendicular ao modelo e, assim, o efeito da respectiva abertura já se encontra contemplado.

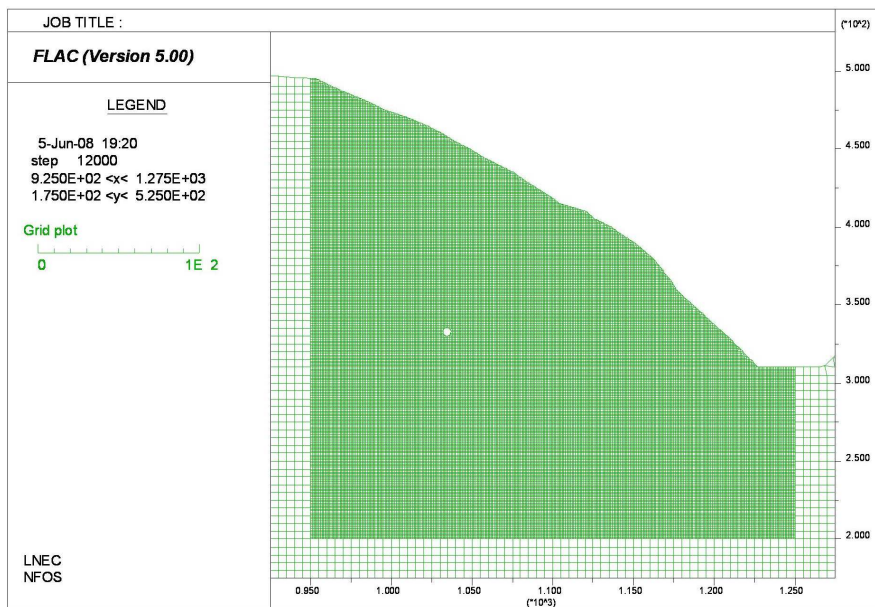


Figura 4. Aspecto da zona do modelo com a dimensão dos dois tipos de malha e a galeria no local 2.

No local 1, a galeria onde foram realizados os ensaios é sensivelmente paralela ao modelo; assim, para além da influência no estado de tensão da abertura do vale pelo efeito erosivo do rio (considerada no modelo 2D), existe ainda o efeito da escavação da galeria nessa zona. Este é tido em conta por um outro modelo com uma geometria que considera um plano perpendicular ao do modelo anterior. Trata-se de um modelo tridimensional centrado na galeria, com $100 \times 100 \text{ m}^2$ e uma espessura unitária na direcção do eixo da galeria em que são aplicados os estados de tensão determinados no modelo anterior. O modelo considera a geometria aproximada da galeria no local, sendo constituído por elementos de dimensão $0,5 \times 0,5 \times 1 \text{ m}^3$ (Figura 5).

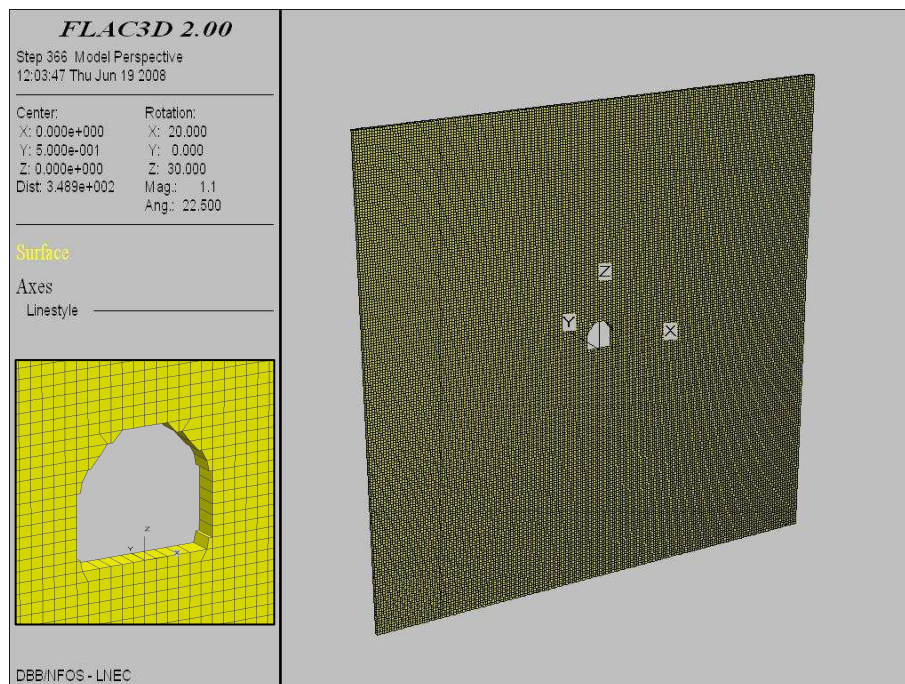


Figura 5. Malha do modelo tridimensional na zona do local 2 e pormenor na zona da galeria.

O modelo foi implementado no programa FLAC3D. O cálculo inicia-se pela aplicação do estado de tensão inicial e pela verificação das condições de equilíbrio, procedendo-se, em seguida, à escavação da galeria situada no local 1. Foram fixados os deslocamentos normais aos 4 bordos da secção bem como os deslocamentos normais segundo o eixo da galeria nas duas faces da secção.

A necessidade de utilizar um modelo 3D num problema envolvendo um estado plano de deformação decorre do facto de o estado de tensão inicial a considerar não apresentar uma direcção principal segundo a direcção *Y* do eixo da galeria.

Os resultados do modelo tri-dimensional fornecem as componentes do estado de tensão nos locais dos ensaios de sobrecarotagem no furo STT1 e as tensões nos pontos onde foram efectuados os ensaios com almofadas planas no local 1.

Designando por σ_{xi} , σ_{yi} , σ_{zi} , τ_{xyi} , τ_{yzi} e τ_{zxi} as componentes do estado de tensão em cada um dos 5 ensaios STT e por $\sigma_{vert\ i}$, $\sigma_{hor\ i}$, $\sigma_{nor\ i}$, as tensões determinadas com os 6 ensaios SFJ, para cada uma das acções E_i , é possível definir, por sobreposição de efeitos, a partir das equações anteriores, para cada um dos ensaios STT, as seguintes equações:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= k_1 \sigma_{x1} + k_2 \sigma_{x2} + k_3 \sigma_{x3} \\
 \sigma_y &= k_1 \sigma_{y1} + k_2 \sigma_{y2} + k_3 \sigma_{y3} \\
 \sigma_z &= k_1 \sigma_{z1} + k_2 \sigma_{z2} + k_3 \sigma_{z3} \\
 \tau_{xy} &= k_1 \tau_{xy1} + k_2 \tau_{xy2} + k_3 \tau_{xy3} \\
 \tau_{xz} &= k_1 \tau_{xz1} + k_2 \tau_{xz2} + k_3 \tau_{xz3} \\
 \tau_{yz} &= k_1 \tau_{yz1} + k_2 \tau_{yz2} + k_3 \tau_{yz3}
 \end{aligned} \tag{4}$$

E da mesma forma, as equações seguintes para os ensaios SFJ:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{vert} &= k_1 \sigma_{vert1} + k_2 \sigma_{vert2} + k_3 \sigma_{vert3} \\
 \sigma_{hor} &= k_1 \sigma_{hor1} + k_2 \sigma_{hor2} + k_3 \sigma_{hor3} \\
 \sigma_{nor} &= k_1 \sigma_{nor1} + k_2 \sigma_{nor2} + k_3 \sigma_{nor3}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Nestes dois conjuntos de equações (4) e (5), as tensões nos membros à esquerda representam os resultados dos ensaios e as tensões, com os índices 1, 2 e 3 nos membros à direita, correspondem aos resultados obtidos dos modelos matemáticos. A sua resolução pelo método dos mínimos quadrados permite determinar os valores de 0,60; 0,91 e 0,75 para as constantes k_1 , k_2 e k_3 , respectivamente. A partir destes valores é possível estimar o estado de tensão no maciço em qualquer ponto do modelo, designadamente na zona da nova central.

Na Figura 6 apresentam-se, à esquerda, as tensões principais σ_I e σ_{II} no plano do modelo bidimensional (aproximadamente paralelo ao rio) e, à direita, as tensões verticais σ_Y e horizontais σ_Z no plano perpendicular a este. Esta figura evidencia a rotação das tensões resultantes do efeito da topografia do terreno, que corresponde a uma diminuição da inclinação da tensão máxima com a profundidade, verificando-se que esta se aproxima da horizontal nas zonas próximas das cotas mais baixas das escavações.

Na Figura 7 apresentam-se graficamente as relações entre as tensões horizontais no plano do modelo σ_X e no plano normal ao modelo σ_Z e a tensão vertical σ_Y , ao longo do poço da central. A figura permite verificar que, após a zona superficial do maciço, a relação entre a tensão horizontal com direcção transversal ao rio σ_X e a tensão vertical é aproximadamente unitária e que a relação entre a tensão horizontal paralela ao rio σ_Z e a tensão vertical é um pouco superior, tomando valores de cerca de 1,2.

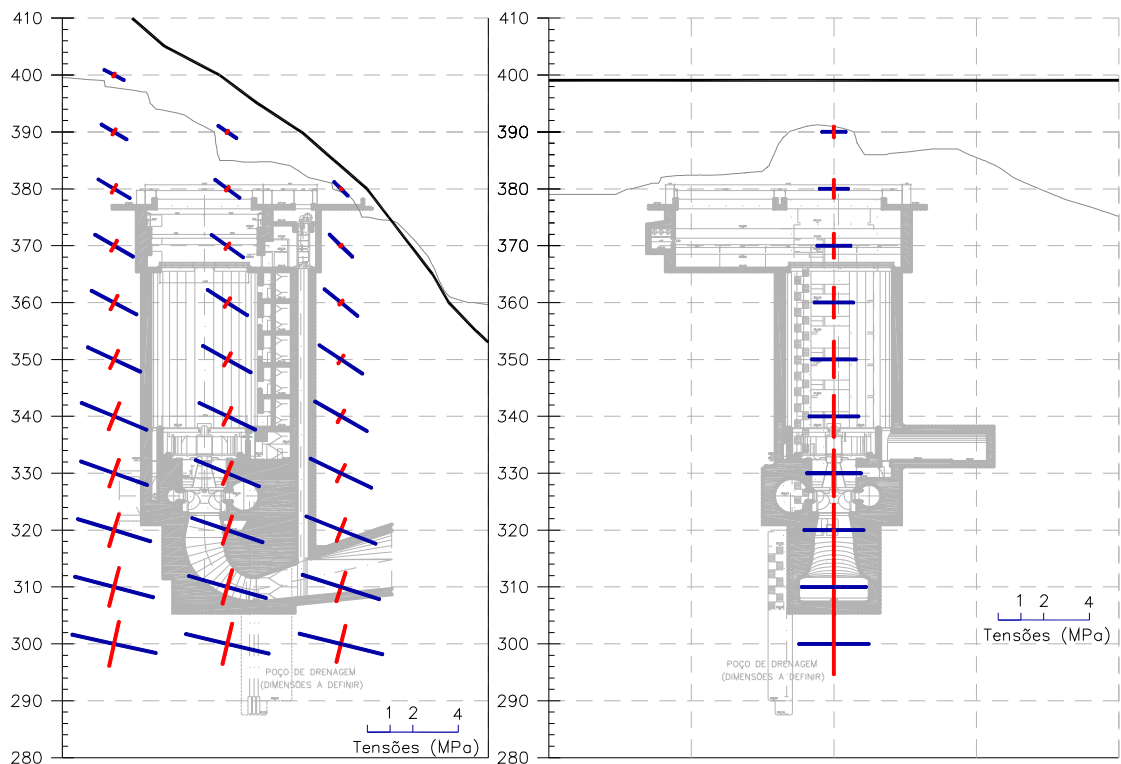


Figura 6. Tensões na zona da nova central.

Na Figura 8 representam-se as relações entre as tensões principais do modelo bidimensional no plano transversal ao eixo do rio σ_I e σ_{II} e a tensão vertical σ_Y , e repete-se a relação entre a tensão horizontal normal a este plano σ_Z e a tensão vertical, pois σ_Z é igualmente uma tensão principal devido às hipóteses colocadas inicialmente.

Os valores presentes nesta figura permitem calcular a relação entre as tensões principais no plano do modelo bidimensional para as profundidades que interessam ao dimensionamento da central, que varia entre cerca de 0,25 e 0,5.

4. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

O modelo anterior foi elaborado considerando um volume $100 \times 100 \times 1 \text{ m}^3$ centrado na galeria na zona do local 1, com a finalidade de modelar a influência desta no estado de tensão global. Nele foram aplicados os estados de tensão resultantes das acções E_1 , E_2 e E_3 resultantes do modelo bidimensional. Na Figura 9 representa-se, para a acção E_1 (tensões horizontais proporcionais à profundidade), a variação das tensões σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} e τ_{xy} nas fronteiras superior e inferior do modelo bidimensional ao longo de 100 m centrados na secção do local 1, desde -50 m na direcção oposta ao rio, até +50 m na direcção do rio.

Neste exemplo, verifica-se que para as tensões horizontais σ_{xx} , que são aquelas mais directamente relacionadas com a acção considerada, existe uma variação do campo de tensões na direcção do eixo da galeria que se pode considerar significativa e pode ter influência nos

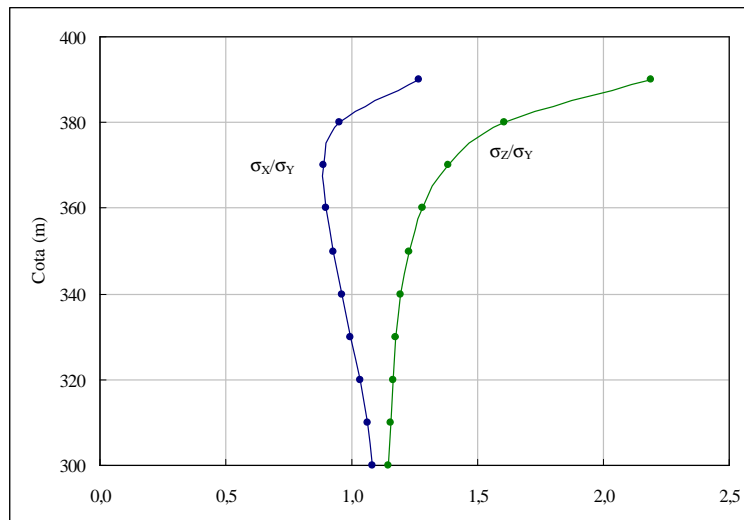


Figura 7. Relações entre as tensões horizontais e normais e a tensão vertical.

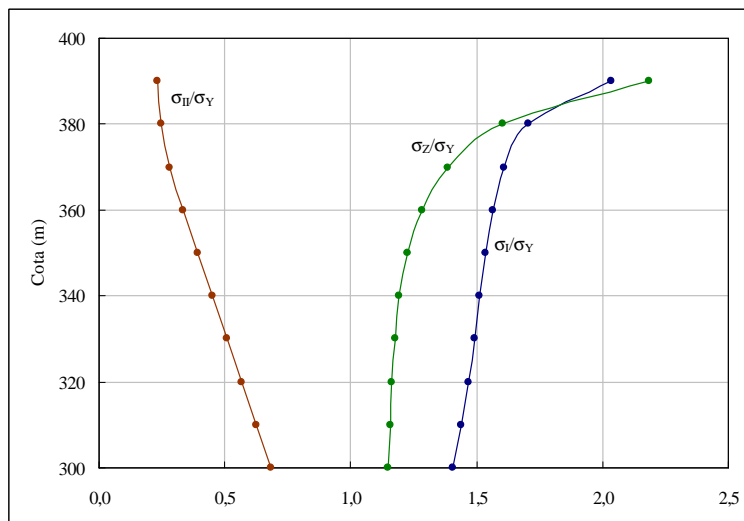


Figura 8. Relações entre as tensões principais e a tensão vertical.

resultados apresentados. Para avaliar esta influência, foram desenvolvidos 3 modelos tridimensionais mais extensos com espessuras de 11 m, 63 m e 141 m na direcção do eixo da galeria (Figura 10).

Devido ao elevado esforço computacional que estes modelos requerem utilizou-se no plano perpendicular ao eixo da galeria uma malha menos refinada do que a utilizada anteriormente. Neste plano, a malha tem elementos de dimensão $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ numa área de $20 \times 20 \text{ m}^2$, centrada na galeria e envolvendo os locais onde foram efectuados os ensaios para determinação do estado de tensão, e elementos com $1 \times 1 \text{ m}^2$ na restante área.

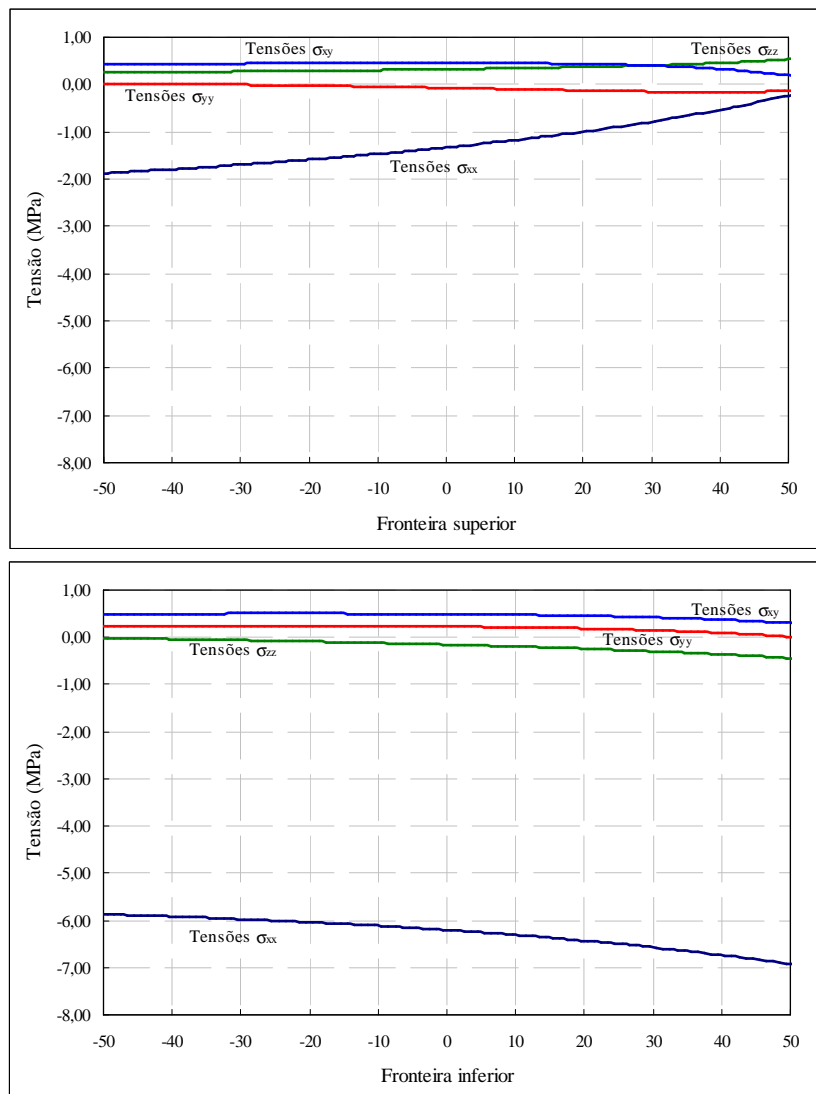


Figura 9. Variação das tensões ao longo da direcção normal ao rio.

No modelo com 141 m de desenvolvimento não foi considerada uma secção transversal idêntica aos restantes, mas uma mais reduzida de $60 \times 60 \text{ m}^2$, para evitar que intersectasse a superfície do terreno.

Com o objectivo de inferir sobre a precisão dos resultados obtidos com esta nova malha, desenvolveu-se igualmente um modelo com 1 m de espessura, que também se apresenta na Figura 10. A comparação dos resultados entre os modelos de espessura unitária permitiu concluir que a utilização de uma malha menos refinada não afectou a precisão dos mesmos.

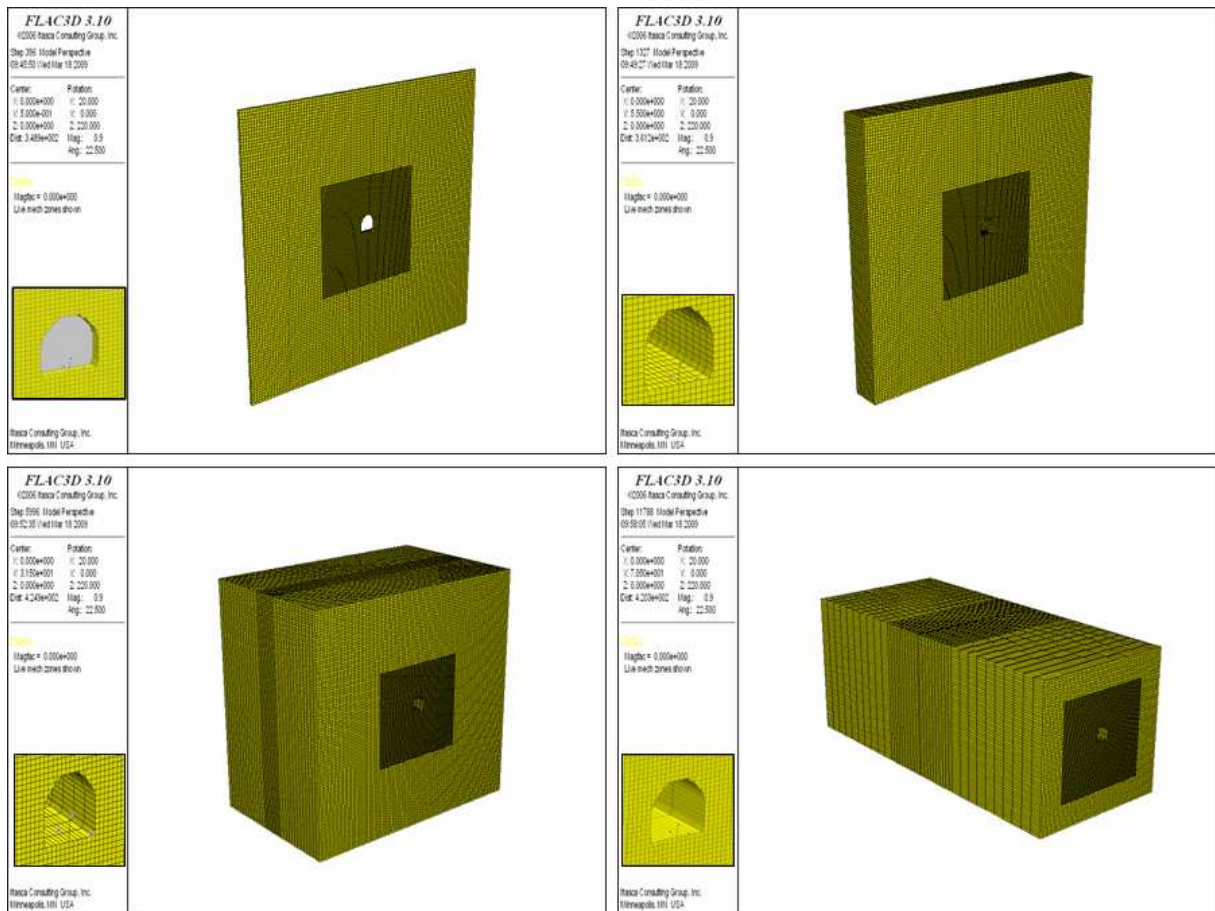


Figura 10. Malhas dos modelos tridimensionais na zona do local 2 e pormenores na zona da galeria.

Na direcção do eixo da galeria os restantes modelos têm elementos com as seguintes distribuições: modelo com 11 m: 11 elementos com 1 m de espessura; modelo com 63 m: 11 elementos com 1 m em torno da secção de referência e dois conjuntos de 10 elementos com 2 m de espessura, para cada lado da secção de referência; modelo com 141 m: 1 elemento de 1 m de espessura na secção de referência, seguindo-se, em ambos os sentidos, 10 elementos com 2 m de espessura e ainda outros 10 elementos com 5 m de espessura.

Foi efectuada, com cada um destes quatro modelos, uma análise semelhante à anterior, tendo-se iniciado pela aplicação dos estados de tensão resultantes das acções, seguida da modelação do efeito da abertura da galeria. A título de exemplo, a Figura 11 apresenta as tensões horizontais segundo a normal ao eixo do rio, resultantes da aplicação da acção E_1 . Esta figura mostra as diferenças na consideração do estado de tensão inicial

A Figura 12 ilustra, para os 4 modelos tridimensionais, o efeito da variação do estado de tensão resultante da abertura da galeria. Neste caso, em que se apresenta o efeito nas tensões verticais, verifica-se que são reduzidas as variações entre os 4 modelos.

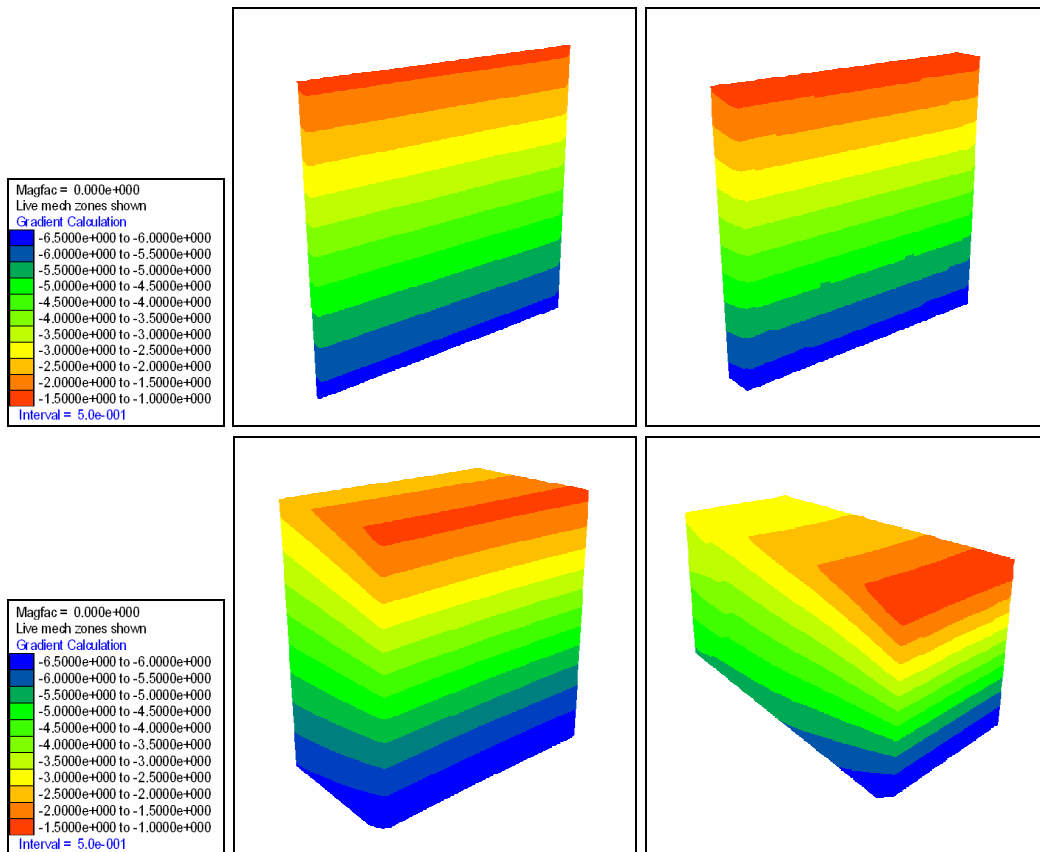


Figura 11. Estado de tensão inicial resultante da acção erosiva do rio (acção E_1).

A partir dos resultados dos quatro modelos, foram calculados os valores das constantes k_1 , k_2 e k_3 , que se apresentam na Tabela 4.

	Modelo: 1m	Modelo: 11 m	Modelo: 63 m	Modelo: 141 m
k_1	0,604	0,604	0,608	0,615
k_2	0,906	0,906	0,907	0,911
k_3	0,748	0,746	0,756	0,759

Tabela 4. Valores das constantes k_1 , k_2 e k_3 calculados a partir dos quatro modelos.

Os valores das constantes apresentados não mostram que não existem variações significativas nos resultados dos quatro modelos, o que permite concluir que a consideração de um modelo com uma espessura de 1 m pode aceitar-se. Esta conclusão pode ser adoptada em situações em que se verifiquem variações do estado de tensão semelhantes.

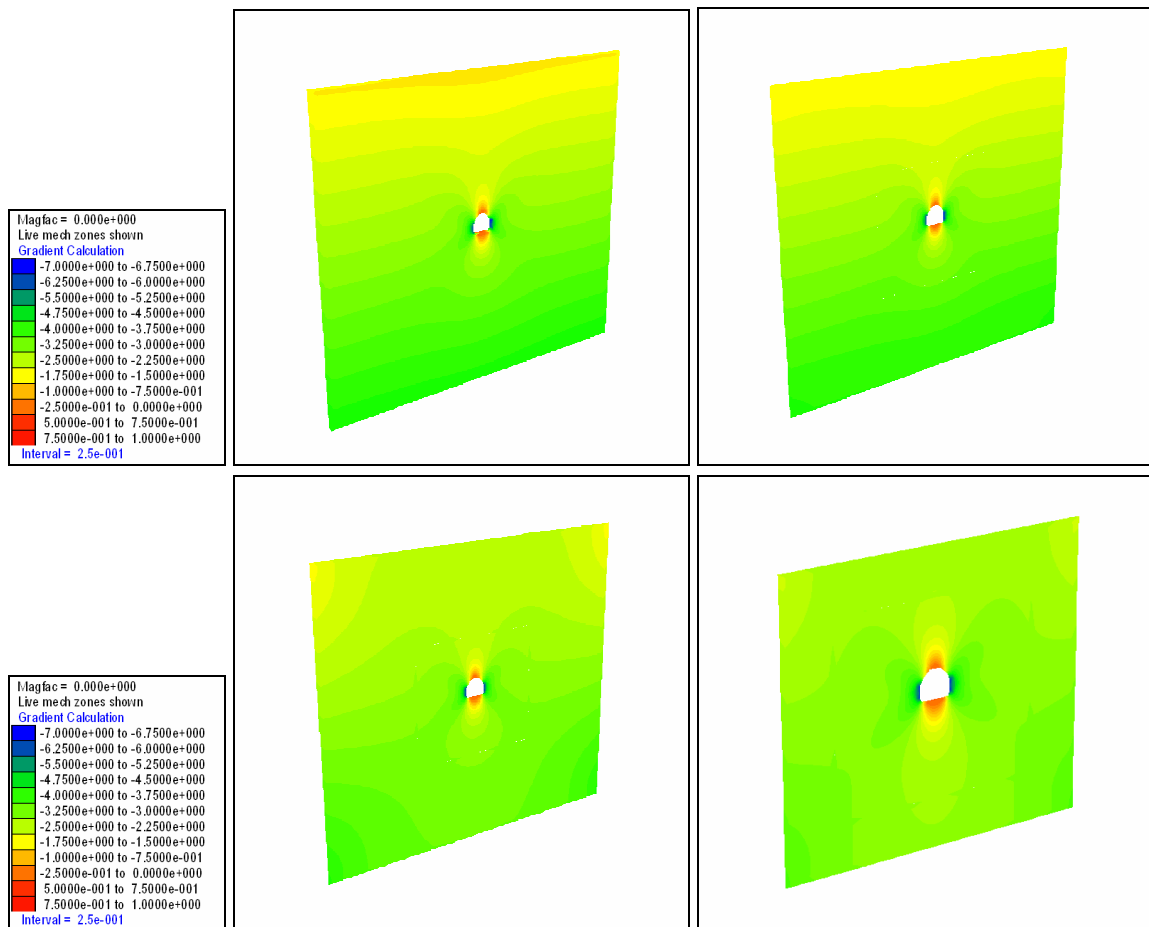


Figura 12. Estado de tensão após a escavação da galeria (acção E_2)

5. CONCLUSÕES

O estado de tensão inicial nos maciços rochosos é a origem da principal acção a considerar em escavações subterrâneas e é muito influenciado pela topografia e por condições geológicas particulares de cada local. A sua determinação com base em ensaios de campo necessita de uma abordagem particular que, tendo em conta a natureza pontual dos ensaios e a variabilidade das medições, permita estimar o estado de tensão global no maciço.

Apresentaram-se os ensaios de determinação do estado de tensão realizados para o projecto da central subterrânea da barragem da Bemposta, com destaque para a modelação numérica que permitiu integrar os resultados dos diferentes tipos de ensaios e determinar o estado de tensão global mais provável. Os modelos utilizados permitiram considerar no estado de tensão inicial o efeito erosivo do rio ao escavar o vale e das escavações das galerias onde os ensaios foram executados.

A análise utilizou, em primeiro lugar, um modelo plano de uma secção vertical aproximadamente perpendicular ao rio para modelar a variação do estado de tensão provocada

pela escavação do terreno resultante da acção erosiva do rio. Em seguida, foi utilizado um modelo tridimensional de espessura unitária, perpendicular ao anterior, para modelar a influência da escavação da galeria onde os ensaios foram realizados. Neste modelo aplicou-se como estado de tensão inicial o estado de tensão proveniente do modelo bidimensional no local onde foram efectuados os ensaios.

Através da utilização de modelos com uma espessura maior na direcção do eixo da galeria, concluiu-se que a aproximação obtida com um modelo de espessura unitária é adequada, uma vez que a variação das componentes de tensão na direcção do eixo da galeria não é muito significativa nas proximidades do local onde foram efectuados os ensaios.

AGRADECIMENTOS

Este artigo surgiu no âmbito dos estudos para o projecto de reforço de potência da Barragem da Bemposta, solicitados pelo Projectista e Dono de Obra, EDP Gestão da Produção de Energia, S.A. (EDP), ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Este artigo foi financiado através do projecto da FCT POCI/ECM/57495/2004 da Fundação para a Ciência e a Tecnologia intitulado “Risco Geotécnico em Túneis para Comboios de Alta Velocidade”.

REFERÊNCIAS

- [1] LNEC (J. Muralha), *Ensaio de caracterização geomecânica do maciço rochoso da nova central da barragem de Bemposta*. Relatório LNEC 246 – NFOS, (2008).
- [2] C. Souza Martins, *Contribuição para o estudo de estruturas subterrâneas associadas a empreendimentos hidroeléctricos*. Relatório LNEC 24/86, (1986).
- [3] Itasca, *FLAC, Version 5.0, User's Manual*. Itasca Consulting Group, Mineapolis, USA, (2005).
- [4] Itasca, *FLAC3D, Version 3.1, User's Manual*. Itasca Consulting Group, Mineapolis, USA (2006).
- [5] Rocha, M. & Silvério, A. “A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses”, *Géotechnique*. Vol. **19**, pp. 116-132, (1969).
- [6] Wittke, W., *Rock Mechanics: Theory and Applications with Case Histories*. Springer-Verlag, (1990).