

ANÁLISE GEOMECÂNICA DA EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DA PEDREIRA “TEXUGO”

GEOMECHANICAL ANALYSIS OF THE UNDERGROUND EXPLOITATION OF “TEXUGO” QUARRY

GOMES, D., *Centro de Investigação em Geociências Aplicadas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, Portugal, dina.gomes@ciga.fct.unl.pt*

ALMEIDA, J.A., *Centro de Investigação em Geociências Aplicadas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, Portugal, ja@fct.unl.pt*

COSTA, C., *Centro de Investigação em Geociências Aplicadas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, Portugal, cnc@fct.unl.pt*

SAÚDE, J.G., *Centro Tecnológico para o Aproveitamento e Valorização das Rochas Ornamentais e Industriais, Borba, Portugal, joaog.saude@cevalor.pt.*

RESUMO

A diminuição das reservas de mármore localizadas próximo da superfície e o aumento das restrições ambientais levou ao desenvolvimento de novos métodos de exploração. A exploração subterrânea emerge desta necessidade conseguindo conciliar vantagens económicas, através do aproveitamento de zonas de boa qualidade ornamental anteriormente inacessíveis, e ambientais uma vez que não é necessário extrair tanto volume de estéril para atingir a massa mineral. Na pedreira “Texugo”, este método de exploração, iniciou-se em 2000, estando neste momento numa fase avançada, e com perspectivas de alargamento. A aplicação de técnicas de modelação por Métodos de Elementos Finitos, permite simular o comportamento do maciço nas vizinhanças da escavação e avaliar a segurança da exploração através do estudo do comportamento geomecânico e das condições de estabilidade do maciço.

ABSTRACT

The reduction of superficial marble reserves together with more restrictive environmental regulations leads the development of new exploitation methods. Underground exploitation method emerges as an alternative to reconcile economical, through the use of ornamental quality areas previously inaccessible, and environmental advantages, decreasing volume of waste. This exploitation method was implemented in “Texugo” quarry during 2000, being now in an advanced stages and enlargement perspectives. The application of modelling techniques based on Finite Element Methods, allows to simulate the behaviour of the neighbourhood rock mass and to evaluate the exploitation security through analysis of geomechanical behaviour and stability of the rock mass.

1. INTRODUÇÃO

Motivada pelo exemplo e sucesso no estrangeiro, especialmente em Itália e nos Estados Unidos, a exploração subterrânea de mármore em Portugal foi iniciada em 1997, e surgiu da necessidade da conciliação de vários factores, nomeadamente: optimização da lavra (devido às características geométricas da massa mineral), satisfação das exigências do mercado (devido à qualidade do mármore presente nesta área), prolongamento da vida útil da jazida e diminuição substancial do impacte ambiental.

A pedreira “Texugo”, instalada no flanco sudoeste do Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa, é uma estrutura bem diferenciada que enquadra-se em termos tectono-estratigráficos no sector Estremoz – Barrancos da Zona de Ossa Morena [1].

O Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa é constituído por rochas com idade compreendida entre o Proterozóico superior e o Silúrico. O Complexo Vulcano Sedimentar de Estremoz, constituído por mármore de três variedades cromáticas principais (cinzento, branco e rosa), é datado do Ordovício.

Estruturalmente é uma região intensamente dobrada e fracturada, sendo possível identificar duas fases de deformação hercínica e uma fase tardi-hercínica que deu origem à instalação de famílias de fracturas de orientações NNE-SSE e ENE-WSW que conferem à região uma anisotropia bastante marcada [2].

Devido às características anteriormente expostas, a aplicação do método de exploração subterrânea nesta área implica um estudo detalhado das características geológicas, para a definição da estrutura da massa mineral, e geomecânicas para o dimensionamento dos desmontes, nomeadamente das câmaras e pilares.

Associado a este estudo foi efectuado, em fase prima, um levantamento cartográfico na exploração subterrânea da pedreira “Texugo”, através do método de *scan lines*, que permitiu identificar quatro famílias de descontinuidades (figura 1):

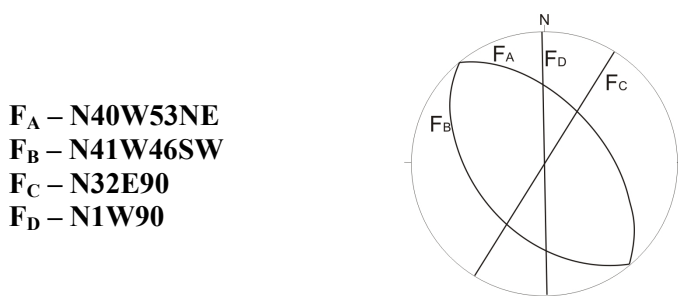


Figura 1 – Representação das quatro famílias de fracturas identificadas na área de exploração subterrânea da pedreira “Texugo”.

As famílias mais representativas são as F_C e F_D, que correspondem a fracturação sub-vertical. Devido ao método utilizado, não foi possível cartografar fracturação horizontal, contudo a sua existência é uma realidade que não poderá ser desconsiderada (figura 2).



Figura 2 – Fracturação horizontal na pedreira “Texugo”.

2. CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMECÂNICO APLICADO À EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES

2.1 Introdução

Um modelo geomecânico é uma ferramenta que permite a reprodução, com o maior realismo possível, das características e reacções de um maciço rochoso, simulando o seu comportamento face à aplicação de solicitações externas, nomeadamente a abertura de uma cavidade inerente a uma exploração subterrânea.

A rotura do maciço resulta da sua resposta a novas condições de pressão e temperatura. Sendo impossível contrariar, pretende-se, contudo, controlar o seu espaço e tempo de ocorrência, uma vez que uma rotura controlada constitui muitas vezes um factor decisivo de segurança ao promover a dissipação de tensões no maciço [3]. Por este motivo é imprescindível o conhecimento das propriedades do maciço, nem sempre homogéneo, para o planeamento racional da exploração de modo a prever quando e onde há fortes probabilidades de ocorrerem roturas.

A aplicação de ferramentas e modelos da mecânica das rochas à exploração subterrânea justifica-se por razões de segurança, garantindo a estabilidade da exploração em relação aos trabalhadores, e por razões económicas, através do controlo da deformação e rotura dos terrenos de modo a evitar que sejam afectadas as zonas necessárias para o seguimento dos trabalhos.

2.2. Aspectos a considerar na construção de um modelo geomecânico

A construção do modelo numérico geomecânico, para avaliar a estabilidade da escavação na pedreira “Texugo”, fez-se com o software *Phase 2* [4]. Este programa informático permite fazer a análise bidimensional do comportamento do maciço quando sujeito a solicitações não naturais. O estudo foi efectuado considerando dois perfis perpendiculares e nove fases representativas do avanço progressivo da exploração, desde a situação inicial de exploração a céu aberto, até uma situação hipotética correspondente à exploração de um quarto piso.

Para estudar o comportamento do maciço rochoso relativamente à abertura de escavações é necessário conhecer os seguintes aspectos.

2.2.1 Geometria da escavação

A forma e dimensão da escavação influenciam a distribuição das tensões radial e tangencial que se instalam na sua envolvente.

A definição geométrica do modelo, consiste na reprodução, a escala adequada, da realidade existente na exploração de modo a simular com a maior fiabilidade a resposta do maciço.

2.2.2 Características mecânicas das rochas

Na área correspondente à exploração subterrânea, existem duas variedades de mármore, distintas pela sua aptidão ornamental, o mármore rosa, actualmente interessante do ponto de vista económico, e o mármore azul, que não é comercialmente atractivo.

Através de cartografia geológica efectuada identificou-se o limite entre as duas variedades de mármore que é perfeitamente visível num pilar (figura 3), correspondendo à sobreposição do mármore azul sobre o mármore rosa, com inclinação de 50° para SW.



Figura 3 – Limite entre as duas variedades de mármore identificadas num pilar na área de exploração subterrânea da pedreira “Texugo”.

A heterogeneidade, anisotropia e descontinuidades que caracterizam o maciço influenciam o seu comportamento quando solicitado por determinada acção pelo que é indispensável a realização de ensaios laboratoriais e *in situ* para a caracterização da deformabilidade e resistência das rochas [3]. Os ensaios laboratoriais efectuados forneceram os resultados constantes no quadro 1, que foram considerados na construção do modelo numérico geomecânico.

Quadro 1 – Parâmetros obtidos através de ensaios laboratoriais para as diferentes variedades de mármore [1].

Litologia	Ensaio de compressão uniaxial			Ensaio de flexão	Ensaio de compressão triaxial	
	σ_c (MPa)	E (GPa)	ν	σ_t (MPa)	c (MPa)	Φ (°)
Mármore azul	58	57	0,38	6,5	10,0	47
Mármore rosa	57	50	0,40	7,4	10,4	51

Sendo de grande dificuldade prever o comportamento de um meio heterogéneo, como é um maciço rochoso, é necessário admitir algumas simplificações que restringem o seu comportamento e facilitam a posterior interpretação dos resultados. Neste caso, admitiu-se que a rotura ocorreria segundo o critério Mohr-Coulomb e que o material tem comportamento elástico.

Este critério de rotura refere que as rochas rompem por tracção ou por corte, segundo planos onde a tensão de corte é máxima admitindo que, quer a coesão (tensão de corte mobilizável), quer o ângulo de atrito, variam para a mesma rocha de acordo com as solicitações impostas. O cruzamento dos parâmetros obtidos através da realização de ensaios laboratoriais (Quadro 1), com o critério segundo o qual se pretende que seja feita a análise, permite obter diagramas indicativos da distribuição de várias propriedades que representam a resposta do maciço.

2.2.3 Estado natural de tensão dos maciços

O estado de tensão natural que actua num maciço rochoso, correspondente ao seu estado de tensões virgens, é motivado por [5]:

- Tensões litostáticas – devidas à acção da gravidade;
- Tensões latentes – de origem tectónica, efeitos de vulcanismo ou contracções originadas por arrefecimento.

Ao realizar-se uma escavação num maciço rochoso existe sempre a redistribuição das tensões instaladas no maciço; este ao reajustar-se às novas condições de equilíbrio, num espaço de tempo muito curto comparativamente com os processos geológicos, pode sofrer deslocamentos que originam fracturação da rocha segundo planos de descontinuidade. A modificação do estado de tensão contribui para a perda de resistência do material; como tal, é de extrema importância avaliar as condições iniciais a que está sujeito o maciço rochoso [6].

Na pedreira “Texugo”, foram realizados ensaios SFJ, segundo três direcções perpendiculares caracterizando-se o estado de tensão instalado no maciço (Quadro 2).

Quadro 2 – Parâmetros obtidos através da realização do ensaio SFJ [1].

Direcção	Tensão (MPa)
σ_1	1,34
σ_2	0,64
σ_3	0,29

Os valores das tensões instaladas, para as três direcções principais, com $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, mostram uma forte anisotropia existente no maciço.

3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Após a definição dos parâmetros necessários à análise segue-se a operação de discretização do espaço. Este processo, consiste na divisão da área em estudo em segmentos de dimensões variáveis e exige grande sensibilidade do utilizador uma vez que depende da maior ou menor variação das propriedades dos materiais. Assim, em zonas onde seja de esperar maiores esforços, deverá ser feita uma discretização mais pormenorizada.

Os elementos finitos são construídos a partir da união desses pontos, neste caso três a três (visto a malha ser triangular) obtendo-se uma malha regular que permite o tratamento do maciço rochoso como um meio contínuo [7]. Cada elemento finito é constituído por três nós e são calculados os deslocamentos generalizados nesses nós; os deslocamentos nos restantes pontos são obtidos por interpolação (figura 4).

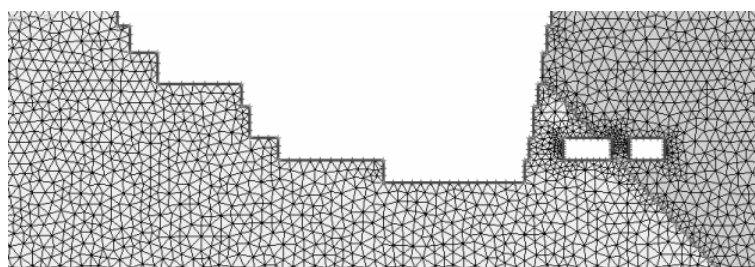


Figura 4 – Malha de Elementos Finitos no perfil da pedreira e desmontes da exploração em subterrâneo .

4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a construção do modelo, segue-se a fase de interpretação, que é facilitada através de mapas disponibilizados pela aplicação informática, que possibilitam a visualização da distribuição de vários parâmetros na área em análise e durante as várias fases de exploração, obtendo-se informação sobre:

- Distribuição das tensões segundo as direcções σ_1 (vertical), σ_3 (horizontal no plano de análise) e σ_z (horizontal e perpendicular ao plano de análise).
- Deslocamentos horizontais, verticais e totais, vectores de deslocamento e a deformada.
- Factor de segurança.

Seguidamente apresentam-se os valores obtidos para as situações de exploração mais desfavoráveis, ou seja, aquelas para as quais se espera maior variação das propriedades do maciço. As zonas mais susceptíveis da exploração correspondem à zona do pilar (devido às suas pequenas dimensões) e aos cantos da escavação (zonas de transição entre os hasteais e o tecto ou o piso), como tal, serão os locais a que se dará um maior destaque em termos de análise.

4.1 Variação da tensão segundo σ_1 (vertical)

Obtêm-se valores para σ_1 entre 1,46 MPa a 2,03 MPa, na zona do pilar, e 2,55 MPa nos cantos da cavidade que são as zonas submetidas à maior concentração de esforços (figura 5). Estas tensões são essencialmente condicionadas pelo peso do maciço sobrejacente e, uma vez que a exploração situa-se à profundidade de 40 metros, os valores obtidos são regra geral baixos.

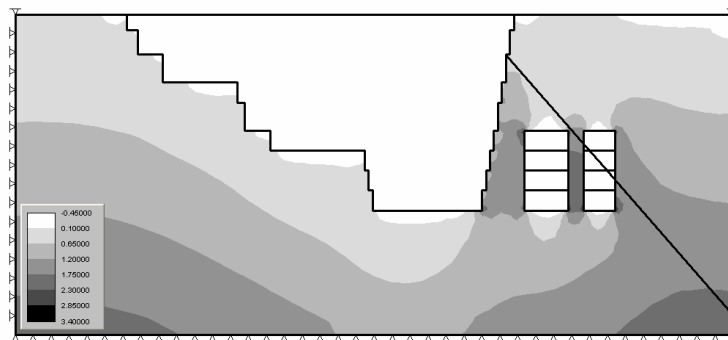


Figura 5 – Distribuição da tensão segundo a direcção σ_1 (vertical).

A distribuição das tensões segundo as duas direcções perpendiculares (σ_3 e σ_z) assume contornos semelhantes mas valores inferiores, facto que se justifica igualmente pela pouca profundidade da exploração e pela existência contígua da exploração a céu aberto.

4.2 Variação dos deslocamentos

A aplicação de uma solicitação externa pode originar, em zonas de maior susceptibilidade, o deslocamento dos nós que compõem a malha de elementos finitos. Estes, podem ser obtidos segundo a direcção x, correspondendo a alterações horizontais, e segundo a direcção y, que coincide com os movimentos verticais. Os deslocamentos totais obtêm-se através da resultante dos movimentos descritos. Na figura 6 obtêm-se o diagrama representativo dos deslocamentos totais e respectiva deformada que representa a alteração da forma da escavação e dos seus limites externos.

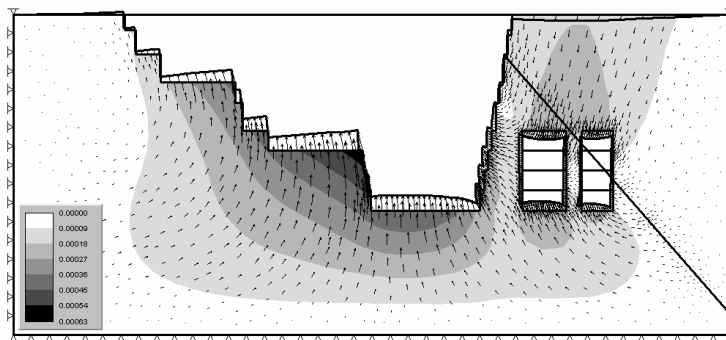


Figura 6 – Deslocamentos totais e deformada do maciço.

Os deslocamentos originados pelo peso do terreno são essencialmente descendentes e atingem valores de cerca de 0,25mm sobre o tecto da escavação; os deslocamentos originados pela perda de pressão de material confinante anteriormente existente, ocorrem ascendentemente e atingem valores máximos de 0,55mm.

4.3 Variação do factor de segurança

O factor de segurança (FS) exprime o quociente entre as forças resistentes e as forças aplicadas em cada ponto da malha de elementos finitos, o que significa que, se este valor for igual ou próximo de um, corresponde a uma situação limite de estabilidade. Uma vez que foi utilizado o critério de rotura de Mohr-Coulomb a análise de rotura do maciço é feita por comparação da resistência à tracção do maciço e das tensões de tracção desenvolvidas devido às solicitações impostas. Enquanto a circunferência de Mohr correspondente às tensões principais extremas se mantiver abaixo da envolvente, não poderá haver ruína, esta ocorrerá logo que se verifique tangência [8].

Efectuaram-se diagramas da variação do factor de segurança para diversas fases de exploração, não se verificando alterações significativas. Assim, para as situações de maior susceptibilidade, obteve-se FS=7 na zona do pilar e FS=12 na periferia da escavação (figura 7).

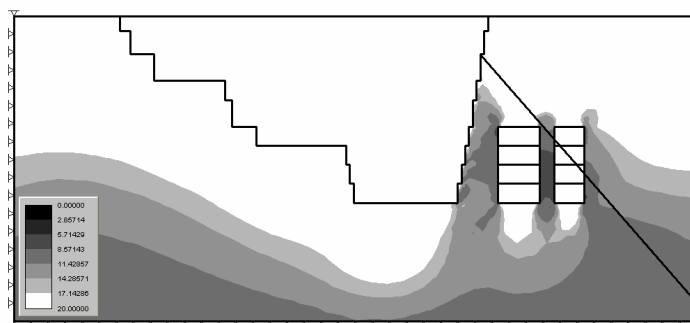


Figura 7 – Variação do factor de segurança.

A análise segundo um perfil perpendicular aos anteriormente expostos, não salientou nenhuma situação mais desfavorável. Assim, mesmo para um cenário que considera a exclusão do pilar (situação bastante favorável para o desenvolvimento da exploração), não se obtiveram decréscimos significativos do factor de segurança (figura 8).

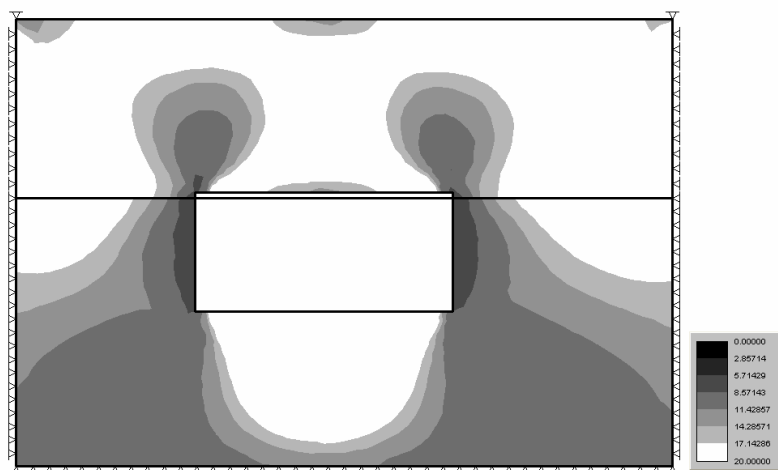


Figura 8 – Variação do factor de segurança.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Da análise dos diagramas anteriormente representados verifica-se que o rebaixo de dois pisos na exploração subterrânea não provoca alterações significativas na estabilidade da exploração. A variação das tensões, segundo as direcções principais, não é significativa. Apesar de existir uma área mais perturbada na periferia da escavação, os valores máximos da tensão calculada com o modelo não põem em causa a estabilidade das cavidades.

As representações correspondentes à distribuição do factor de segurança são bastante optimistas dado que os valores obtidos são elevados mesmo sobre os pilares e arestas da escavação, que correspondem a áreas teoricamente de maior instabilidade.

Deve-se, no entanto, ter em atenção que esta análise foi efectuada segundo o critério de Mohr-Coulomb que considera que a rotura ocorre por corte ao longo de superfícies coincidentes com a tensão principal intermédia, o que significa que outras situações de rotura originadas unicamente por compressão uniaxial não foram consideradas como, por exemplo, a rotura por lasqueamento que pode ocorrer na zona dos pilares.

A análise efectuada não considera a existência de descontinuidades, contudo, estas devem ser consideradas uma vez que contribuem para a instabilidade do maciço favorecendo a rotura do material. Apesar de não terem sido cartografadas, verifica-se a existência de fracturas sub-horizontais na pedraira “Texugo”, facto pelo qual devem ser consideradas em análise posterior. Como tal, para avaliar o seu efeito, fez-se uma determinação analítica a partir da teoria das vigas encastradas que postula que, a tensão máxima de tracção a meio de uma viga de vão **B** e espessura **a** é dada por:

$$\sigma_{\max} = \frac{\gamma B^2}{2a} \quad (1)$$

Considerando o factor de segurança (FS) e a tensão máxima de tracção da rocha (σ_t), o vão seguro das câmaras é dado por [9]:

$$B = \sqrt{\frac{2a\sigma_t}{\gamma FS}} \quad (2)$$

Na expressão anterior, fazendo variar a espessura da viga de modo a simular cenários problemáticos de fracturação do maciço, e fixando o vão em doze metros (dimensão das galerias) obtiveram-se os factores de segurança (figura 9).

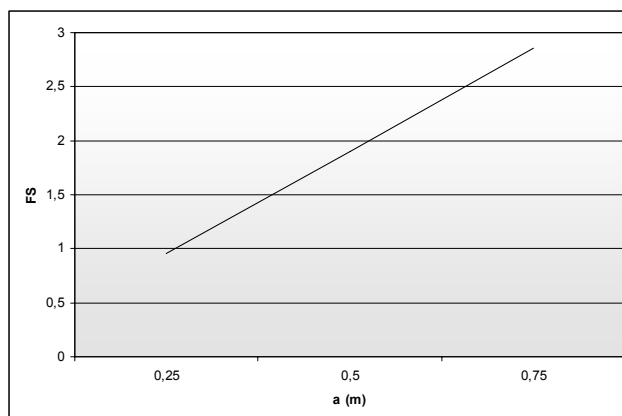


Figura 9 – Variação do factor de segurança com a espessura da viga para um vão constante de 12 metros.

Como se pode analisar na figura 9, o factor de segurança é directamente proporcional à espessura da viga considerada, o que de acordo com a comparação realizada significa que, quanto mais compartimentado for o maciço, menor será o factor de segurança. Pela comparação efectuada, se existirem fracturas sub-horizontais a menos de 0,25m, ocorrerá rotura do tecto com a consequente queda de blocos.

6. CONCLUSÕES

Através da análise realizada obtiveram-se resultados bastante optimistas. No entanto, apesar do software ser uma ferramenta útil no dimensionamento admite determinadas simplificações, como a isotropia e o comportamento elástico do maciço, que impedem a tradução exacta do seu comportamento *in situ*, obtendo-se valores excessivamente elevados para o coeficiente de segurança face as condições do maciço.

Para além dos aspectos anteriormente expostos existem outros relacionados com os parâmetros utilizados na análise. Com excepção do estado de tensão, os parâmetros obtiveram-se laboratorialmente o que significa que na realidade, devido à existência de fracturação, o maciço apresenta menor resistência e maior deformabilidade.

Para validar o modelo devem ser realizados ensaios *in situ* e monitorização da exploração. Por comparação dos valores experimentais com os valores teoricamente esperados avalia-se o grau de fiabilidade dos resultados obtidos.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Guerreiro, H.; Oliveira, J.; Martins, N.; Bonito, N.; Pereira, S. & Sobreiro, S. (2000) – Plano de Lavra da Pedreira Texugo, CEVALOR, Borba.
- [2] Reynaud, R. & Vintém, C. (1994) – Estudo da Jazida de Calcários Cristalinos de Estremoz-Borba-Vila Viçosa – Sectores Lagoa-Vigária e Borba, Instituto Geológico e Mineiro, Volume Nº31, Boletim de Minas. Lisboa.
- [3] Mendes, F. (1985) – Geomecânica Aplicada à Exploração Mineira Subterrânea. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Hidromineira – Consultores de Minas e Geomecânica, Lda. Lisboa.

- [4] Rocscience (1998) – Phase2 User’s Guide.
- [5] Hoek, E. (2000) – Practical Rock Engineering. Rocscience.
- [6] Guerreiro, H. (2000) – Exploração Subterrânea de Mármore – Aspectos Geotécnicos”. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- [7] Zienkiewicz, O. (1977) – The Finit Element Method, Mc Graw-Hill, New York.
- [8] Rodrigues, F. (1984) – Introdução à Geomecânica, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [9] Obert, L. & Duvall, W. (1967) – Rock Mechanics and Design of Structures in Rock, John Wiley & Sons. New York.