

Callipole

Revista de Cultura

N.º 27 | 2021



Município de Vila Viçosa
Câmara Municipal

EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES ALGUNS ASPECTOS TÉCNICOS

Ruben Varela Martins¹, Luís Lopes^{1,2*}, Emanuel Branco^{3**}

¹Universidade de Évora, Departamento de Geociências

²Instituto de Ciências da Terra – FCT, Évora, Portugal.

*rubenvm@uevora.pt; **llopes@uevora.pt; ***etbranco@gmail.com

RESUMO

A exploração subterrânea de rochas ornamentais tem as suas especificidades, de acordo com o tipo de rocha a ser extraída e as características geológicas do maciço rochoso. Por razões económicas e de segurança, a opção pela exploração subterrânea apenas deve ser tomada se a exploração a céu aberto for completamente impossível. Este estudo faz uma breve introdução histórica ao tema, apresenta os fundamentos técnicos que o sustentam e apresenta o estudo de um caso de aplicação de exploração subterrânea de mármore no anticlinal de Estremoz, Portugal.

Palavras-chave: Exploração subterrânea; Mármore; Mármore de Estremoz.

ABSTRACT

The underground exploitation of ornamental rocks (dimension stones) has its own specificities, according to the type of rock to be extracted and the geological characteristics of the rock mass. For economic and security reasons, the option to go for underground exploitation should only be taken if an open pit is completely impossible. A brief

historical introduction to the subject is presented, as well as the technical foundations that support it and presents a study case application of underground marble exploitation in the anticlinal of Estremoz, Portugal.

Keywords: Underground exploitation; Marbles; Estremoz Marbles.

1. Introdução

A exploração subterrânea de rochas ornamentais (*dimension stones*, na terminologia anglo-saxónica) tem as suas especificidades conforme o tipo de rocha a ser explorada e as características geológicas do maciço. Por razões económicas e de segurança, a opção pela exploração subterrânea só deve ser tomada se for completamente impossível a exploração a céu aberto.

Porquê a opção por uma exploração subterrânea?

Os principais factores a favor de uma exploração subterrânea de rocha ornamental são:

- a) Rocha de elevado valor comercial e excelente qualidade ornamental jacente por baixo de uma grande massa estéril;
- b) Impossibilidade de alargamento da pedreira e/ou de remoção das camadas superficiais;
- c) Forte pressão ambiental e se a exploração se desenvolve em áreas de grande valor ecológico;
- d) Regiões de relevos acentuados;
- e) Regiões de condições climatéricas adversas.

Independentemente do tipo de exploração que se opte, a decisão passará sempre por uma análise detalhada de diversos factores. No caso da exploração subterrânea a avaliação do maciço rochoso deverá ser de grande detalhe atendendo às características específicas de um espaço confinado. Assim, apontam-se como fundamentais: o estudo geológico; a avaliação das características estruturais da jazida; a avaliação das características geomecânicas do maciço; o estado da tensão *in situ*; as dimensões possíveis para a cavidade; a previsão do rendimento a obter ao longo da exploração, e a continuidade a tridimensional da jazida. Na exploração subterrânea adquire particular importância o dimensionamento dos pilares e o seu incremento à medida que se baixa de piso e se avança para profundidades maiores, bem como a realização periódica de medições dos deslocamentos diferenciais com sinais luminosos ou acústicos, medições extensiométricas e geofísicas. Em resumo, como uma exploração subterrânea de rocha ornamental se pode considerar de carácter definitivo, as preocupações de segurança a ter são muito semelhantes às que se verificam na construção de

túneis. Assim, as características geomecânicas dos maciços rochosos permitem-nos definir o método de desmonte subterrâneo que deverá garantir um equilíbrio delicado de três factores fundamentais para o sucesso de uma exploração: factor económico, redução da indução da fracturação à medida que se avança na exploração e a garantia da estabilidade da cavidade durante a exploração.

A lavra subterrânea de rochas ornamentais tem-se desenvolvido em diversos países como Itália, Espanha, Portugal, Croácia, Grécia, França, Eslovénia, Turquia e USA. A maior pedreira subterrânea do mundo localiza-se em Vermont, USA (pertence à empresa R.E.D. GRANITI and Vermont Quarries antes pertencia à Vermont Marbles Company) encontrando-se em laboração há mais de 200 anos. Possui seis níveis de extracção, tendo sido montada uma unidade de transformação dentro da própria cavidade, o que permite a laboração e processamento primário de blocos durante todo ano, ao abrigo dos rigorosos invernos típicos da região.

2. Um Pouco de História

Os pioneiros da extracção subterrânea de mármore foram os egípcios, os gregos e os romanos, particularmente em maciços calcários com estratificação sub-horizontal bem definida, onde desenvolviam trabalhos mineiros em poços e galerias.

Um exemplo é a pedreira do Vale Jordão (Fig. 1A) que foi descoberta pelo Prof. Adam Zertal e pela sua equipa da Universidade de Haifa. Esta pedreira está localizada no deserto, a norte de Jericó, 10 metros abaixo da superfície. A



Figura 1: A – Pedreira do Vale Jordão; B – Algarismos romanos e provável datação da pedreira. <http://ancient-tides.blogspot.com/2009/07/huge-manmade-cavern-found-in-jordan.html> e <https://www.gettyimages.es/fotos/adam-zertal?family=editorial&phrase=adam%20zertal&sort=mostpopular>, acedidas em 10 de fevereiro de 2021.

cavidade tem cerca de 0,4 hectares e a câmara principal possui 22 pilares onde se encontram gravados vários símbolos, incluindo cruces bizantinas, um símbolo do zodíaco e algarismos romanos (Fig. 1B). Um galhardete gravado da legião romana indica que foi usado pelo exército romano. A cavidade foi escavada há cerca de 2000 anos e serviu como uma grande pedreira durante o Período Romano. Calcula-se que tenha estado activa entre 400 e 500 anos.

O mármore de Pentelikon foi empregue na construção do Parthenon, Erechtheum, Propylaea, Theseum, no Templo de Zeus em Olímpia (Fig. 2) e noutras grandes obras. Foi o primeiro mármore a ser extraído de uma pedreira subterrânea. Na Grécia antiga, o mármore estatuário da ilha de Paros foi também ele explorado em pedreira subterrânea.

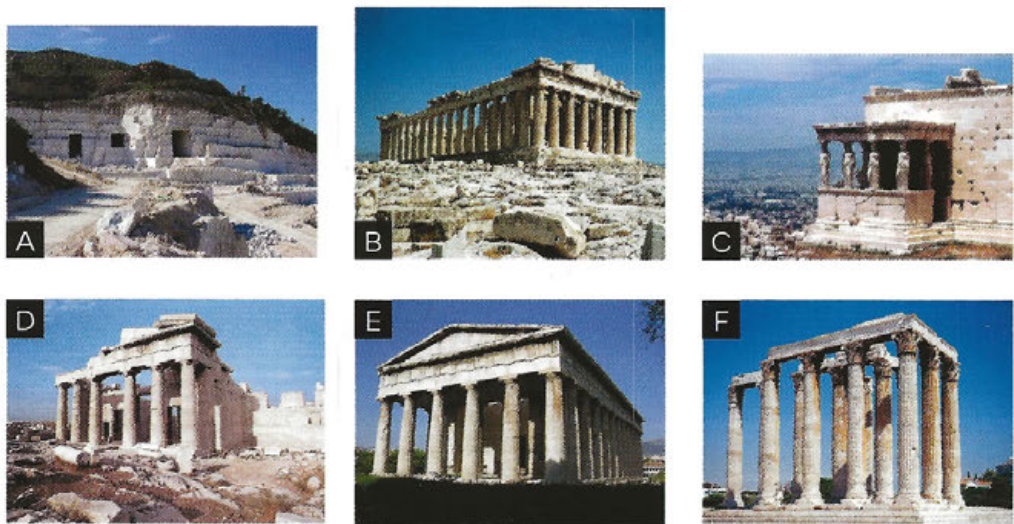


Figura 2: A - Pentelikon; B - Parthenon; C - Erechtheum; D - Propylaea (Acropolis de Atenas); E - Theseum e, F - Templo de Zeus em Olímpia.

Fontes das imagens: <https://maroudis-marbles.com/quarries.html>; https://pt.wikipedia.org/wiki/Templo_romano, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Partenon>, [https://en.wikipedia.org/wiki/Propylaea_\(Acropolis_of_Athens\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Propylaea_(Acropolis_of_Athens)) e referências incluídas.

Durante a época romana, a pedreira de calcário, a Aurisina (Fig. 3), na região de Carso, perto de Trieste, tornou-se famosa, laborando a céu aberto. De facto, alguns dos actuais centros produtores de mármore na região tiveram início há mais de 2000 anos.

O mármore de Lunese (Fig. 4) foi intensamente extraído durante o Império Romano, nos períodos dos imperadores Augusto e Marco Aurélio, havendo vestígios dessa exploração em Carrara, onde pontifica Colonnata, uma antiga colónia de escravos, Miseglia e Torano Fornaro & Bosticco (1995).

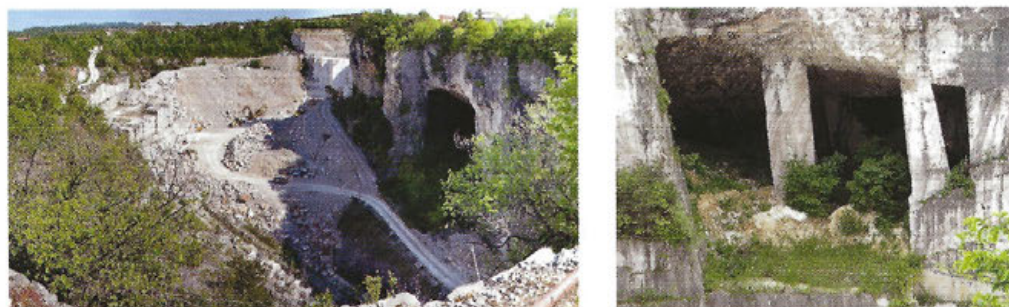


Figura 3 – Pedreira de calcário, Aurisina. Fontes das imagens: <https://www.uni3trieste.it/wp-content/uploads/2020/05/Aurisina.pdf> e <https://mapio.net/pi-c/p-36100657/>

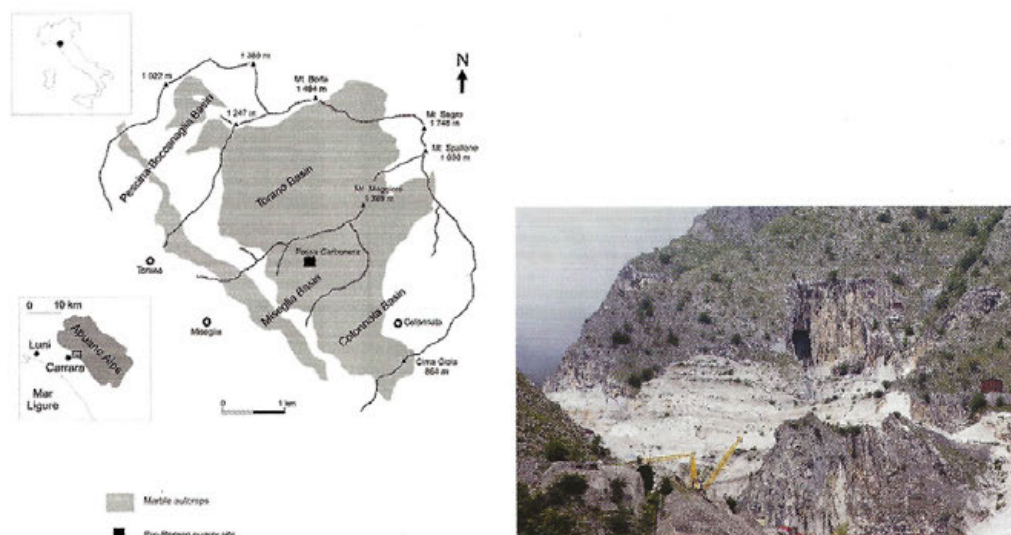


Figura 4 – Representação dos Alpes Apuanos e exemplo de uma exploração em Carrara, adaptada de Fornaro & Bosticco (1995).

Relativamente às técnicas de exploração, os romanos aprenderam e melhoraram as técnicas de extracção inventadas pelos gregos e egípcios (Adam, 1994).

Nas antigas Roma e Grécia, a técnica de corte, conhecida como “corte romano” era utilizada tanto em céu aberto como em subterrâneo, baseando-se na introdução de cunhas de madeira molhadas nas fissuras naturais da pedra. Todo o trabalho era manual com recurso a martelos, marretas, picaretas e cinzéis.

Os “cortadores” usavam muitas vezes picaretas para fazerem sulcos e dividirem os blocos. Para além das cunhas também eram usados barrotes de madeira que depois de embebidos exerciam uma pressão lateral destacando o bloco (Fig. 5). Este método era particularmente simples principalmente nas pedreiras de

calcário estratificado, onde as descontinuidades horizontais tornavam mais fácil o destaque dos blocos, sendo um factor natural que determinava as suas dimensões.

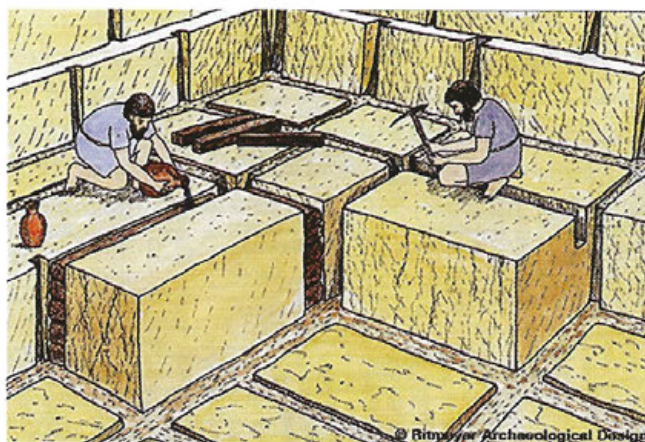


Figura 5 – Método antigo de separação de blocos. Fonte: <https://www.ritmeyer.com/wp-content/uploads/2008/05/quarrying.jpg>, acedido em 10 de fevereiro de 2021.

A qualidade do mármore de Estremoz também despertou o interesse de vários povos, desde a antiguidade, daí que se tenham encontrado vestígios de exploração a céu aberto, da Época Romana (Fig. 6), onde os registos da laboração, evidentes na pedra, revelam a utilização de ferramentas e técnicas da antiguidade. Apesar de não haver notícia de explorações subterrâneas datadas da Época Romana, graças ao facto de o mármore ser aflorante e a topografia da região se apresentar relativamente plana, as técnicas empregues foram semelhantes às retratadas noutras partes da Europa.



Figura 6 – Vestígios de exploração romana encontrados numa pedreira de mármore em Vila Viçosa, Portugal e estudados por alunos de Engenharia Geológica da Universidade de Évora.

2.1. Exploração Subterrânea

Na região de Portoro, La Spezia, Itália, na antiguidade, o mármore era escavado com recurso à força humana. As operações de desmonte consistiam, inicialmente, na criação de um túnel baixo (Fig. 7) para localizar a jazida, através do uso do escopro e da marreta. Depois de aberto o túnel, a largura dos blocos era definida através da execução de dois rasgos laterais que possibilitavam que dois homens com uma serra de ferro temperado grande e sem dentes fizessem os golpes inferior e posterior. A acção de corte era auxiliada pela introdução de água e de areia siliciosa. A remoção do bloco fazia-se com recurso a cunhas de madeira ou de ferro (Del Soldato & Pintus, 1985, *in* Guerreiro, H. 2000).

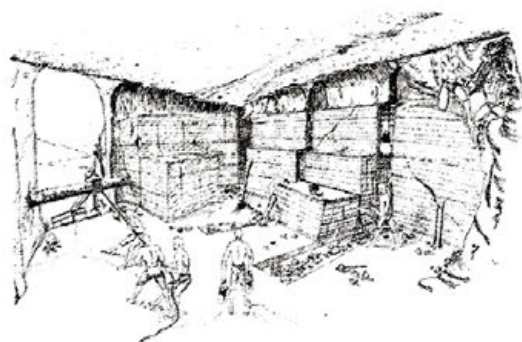


Figura 7 – Modelo de exploração subterrânea na antiguidade. Adaptada de Del Soldato & Pintus (1985), *in* Guerreiro, H. (2000).

A deslocação do bloco para fora da cavidade era feita com o recurso à gravidade (Lizza, Carrara) (Fig. 8), sendo o movimento controlado por homens munidos de cordas enroladas em barrotes de madeira.



Figura 8: A – Monumento ao “Cavatore”, Colonnata, Carrara, Itália; B – Vestígios da “Lizza” em Carrara. Fotos dos autores.

2.2. Esquadreamento de Blocos

Dos sistemas mais antigos de serragem de pedra era executado penosamente por dois escravos, utilizando corda de sisal, areia e água.

O mesmo método permaneceu até hoje, com o sisal sendo substituído por ferro e ligas metálicas e a criação de dispositivos mecânicos tornou o corte mais rápido, menos penoso, proporcionando golpes mais perfeitos.

Acredita-se que a serra de Hierápolis (Fig. 9) seja uma serra inventada pelos romanos, para cortar pedra, com recurso à água, tendo sido descoberta em Hierápolis, Ásia Menor (actual Turquia). Datada da segunda metade do século III dC, a serra é considerada a primeira máquina conhecida a combinar uma manivela com uma biela, embora ainda não tenham sido encontrados nem os manuscritos antigos, nem os desenhos de engenharia, para apoiar esta teoria.

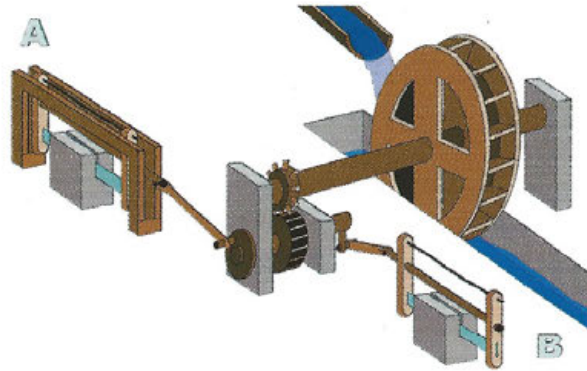


Figura 9 – Serra de Hierápolis constituída por duas monolâminas. (adaptado Grewe, Klaus, 2010)

O esquema desta máquina que tem por base um moinho de água está representado por um baixo relevo existente no sarcófago de Marcus Aurelius Ammianus, um moleiro local (http://www.traianvs.net/pdfs/2010_15_grewe.pdf) (Fig. 10). Uma nora de água alimentada por um canal impulsionava através de um trem de engrenagem duas monolâminas que cortavam os blocos retangu-



Figura 10 – Baixo relevo da serra de Hierápolis (Grewe, 2010).

lares por meio de biela. A inscrição que acompanha está em grego e atribui o mecanismo às “habilidades de Ammianos com rodas”.

3. Métodos de Desmonte Subterrâneo

Apesar de haver muitos métodos de exploração subterrânea, particularmente nas explorações de minérios metálicos, consideremos apenas três tipos de desmontes tradicionais:

- a) Desmonte com enchimento;
- b) Desmonte com desabamento;
- c) Desmonte com abandono de pilares (câmaras e pilares).

Na exploração subterrânea de rochas ornamentais a blocometria é um fator fundamental para a viabilidade económica da unidade extractiva, assim a seleção do método é de crucial importância. Assim, o método por desabamento não é aconselhável atendendo ao facto de incrementar a fracturação do maciço levando inevitavelmente à redução da blocometria. O desmonte com enchimento não se afigura favorável na maioria das explorações subterrâneas de rochas ornamentais por questões técnicas da evolução da exploração e devido às áreas relativamente pequenas, no entanto admite-se o recurso a este método em casos pontuais para redução de problemas relacionados com instabilidade ou de abandono de locais por esgotamento da reserva.

Nas explorações subterrâneas para rochas ornamentais, o melhor método é o de câmaras e pilares (Fig. 11), método esse difundido por todo o mundo, no qual os pilares naturais se tornam elementos de suporte e contenção dos tectos. A projeção da localização desses pilares, bem como o seu dimensionamento deverá

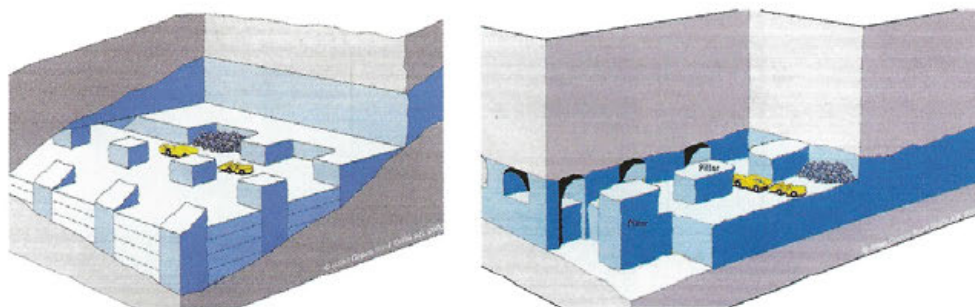


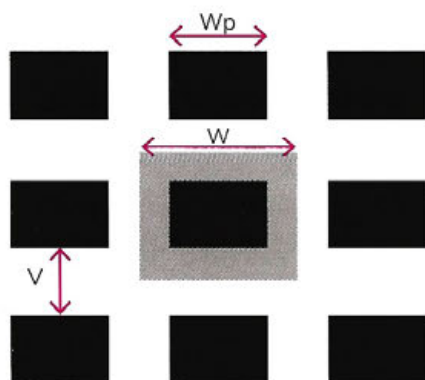
Figura 11 – Método de câmaras e pilares em exploração subterrânea.
Adaptado de Atlas Copco; Mining Methods, Case Study (<https://www.atlascopco.com/>).

ser feito tendo em atenção locais com rocha de menor qualidade ornamental e no sentido de reduzir a possibilidade de fracturação induzida devido à abertura das cavidades. A distribuição espacial dos pilares poderá ser irregular devido à heterogeneidade da formação rochosa.

3.1. Dimensionamento dos Pilares

O dimensionamento dos desmontes pode ser efetuado através da teoria da área tributária ou por métodos de análise numérica, com recurso a programas informáticos usando o método dos elementos finitos e das diferenças finitas.

Um dos métodos mais utilizados para o dimensionamento de câmaras e pilares através do método da área tributária (área de influência) (Fig. 12), considera o pilar sujeito a tensões verticais litostáticas correspondentes à área que ele suporta. Este método compara a tensão aplicada ao pilar com a sua resistência à compressão, não contemplando, no entanto, a orientação das descontinuidades que pode alterar a distribuição das tensões (Guerreiro, 2000).



Legenda:
V – Vão das câmaras;
W – Largura da área total;
W_p – Largura do pilar.

Figura 12 – Área de influência para dimensionamento das câmaras e pilares.
Para o cálculo do vão (V) sugere-se a utilização da seguinte fórmula:

$$V_s = \sqrt{\frac{2a\sigma_t}{(\gamma + \frac{P}{a})F_s}}$$

V_s – Vão seguro do tecto.

a – Espessura da laje de cobertura.

σ_t – Resistência à tração da laje que forma o tecto.

F_s – Fator de segurança.

γ – Peso específico do material.

P – Pressão externa devido ao ar, água, etc.

O fator de segurança é determinado pela seguinte expressão matemática:

$$F_s = \frac{\sigma_r}{\sigma_a}$$

Onde: σ_r – Tensão de ruptura; σ_a – Tensão de trabalho ou atuante.

Outro fator importante é a esbelteza (Tabela 1).

Considerando “Wp” a largura do pilar e “Hp” a uma altura, verifica-se segundo Salamon e Oravecz (1976) que:

- Para “Wp” constante, a resistência diminui com o aumento da altura “Hp” (maior esbelteza);
- Para “Hp” constante, a resistência diminui com a diminuição da largura “Wp” (maior esbelteza).

Nota: Para pilares em que $H_p/W_p < 3$ o enfraquecimento devido à esbelteza pode ser desprezável (Fornaro e Bosticco, 1995).

Tabela 1 - Valores da resistência à compressão uniaxial para o mármore português.

Esbelteza	Resistência à compressão uniaxial σ_c (MPa)
$h/w = 2$	69,6
$h/w = 3$	62,7
$h/w = 4$	57,8
$h/w = 5$	54,0

4. Um exemplo de Exploração Subterrânea – Pedreira do Texugo

A zona dos mármore pertence a uma região com relevos pouco acentuados, pelo que à primeira vista, a exploração subterrânea não se afigura como a melhor opção, no entanto, existem alguns exemplos deste tipo de exploração, particularmente quando o mármore de elevada qualidade se encontra por baixo de uma espessura considerável de outro tipo de rocha sem valor ornamental.

A pedreira do Texugo é apresentada como um caso de estudo. Possui uma exploração de carácter misto, com uma área a céu aberto e outra subterrânea. A pedreira situa-se no concelho de Vila Viçosa, distrito de Évora, fazendo parte da Área Cativa de exploração de mármore do Anticlinal de Estremoz. A referida pedreira situa-se no flanco sudoeste do anticlinal que é uma estrutura geológica de forma elíptica, com cerca de 42 km de comprimento, 8 km de largura máxima e uma orientação NW-SE (Fig. 13).

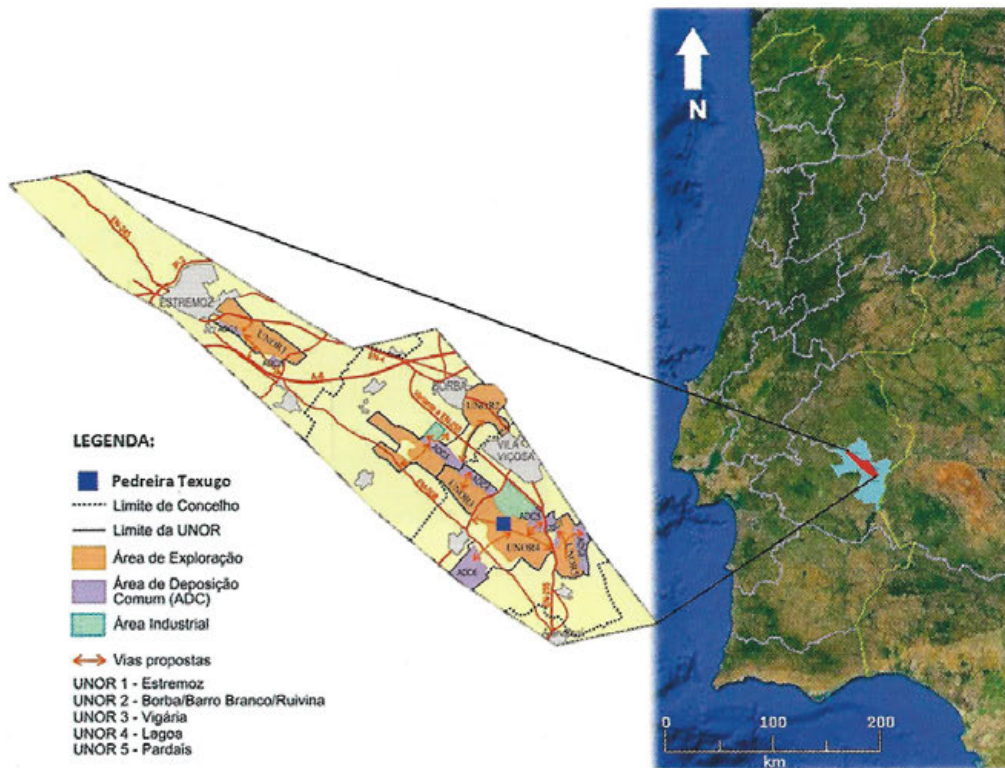


Figura 13 – Localização da pedreira do Texugo, licença DRE 5243, no flanco sudoeste do anticlinal de Estremoz. Cevalor (2001). Plano de Lavra da pedreira Lugramar.

Em 1972 deu-se início à exploração em céu aberto com a empresa *Bertos Internacional*. Em 1987 a pedreira tinha dois pisos e foi comprada pela empresa Lugramar, Lda. Em 2000 teve início a exploração em subterrâneo com a abertura de duas galerias em simultâneo no 6º piso e uma galeria no 5º piso. Desde essa data que a exploração tem um carácter misto, desenvolvendo-se simultaneamente em subterrâneo e a *céu aberto*. Em 2015 a pedreira foi comprada pela empresa Bloco B, Lda. A exploração continua a ter carácter misto desenvolvendo-se a céu aberto, pelo método de degraus direitos e em subterrâneo, através do método de câmaras e pilares, há, no entanto, intenção da empresa de eliminar a exploração subterrânea. A cota inferior da pedreira a céu aberto corresponde ao 10º piso estando a 65 m da superfície. O subterrâneo tem atualmente 7 pisos sendo a cota inferior de 71 m (Fig. 14).

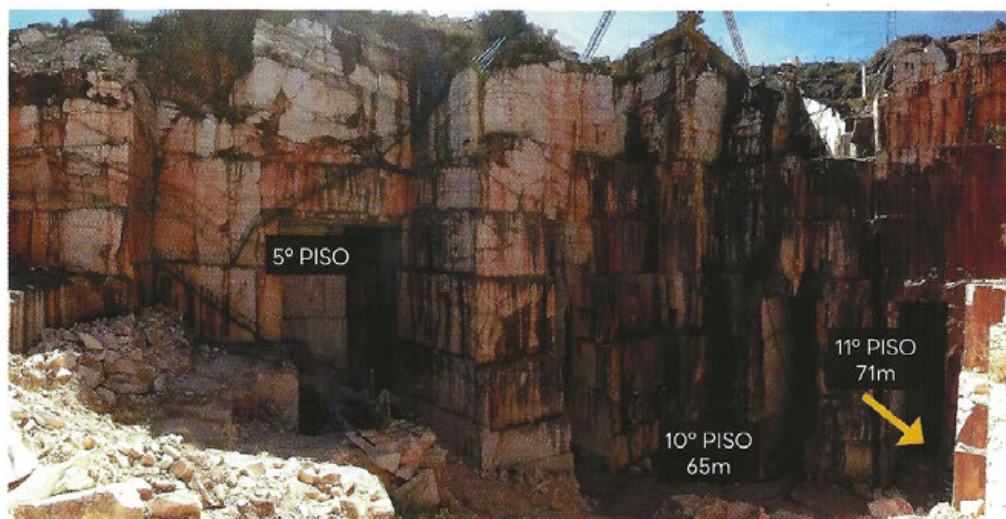


Figura 14 - Pedreira do Texugo, vista geral para sul em 2015.

4.1. Alguns parâmetros geotécnicos e de qualidade ornamental do mármore explorado na pedreira do Texugo

Inicialmente foram criadas zonas ornamentais com base nas características cromáticas da pedra (Fig. 15).

Zona 0 – Dolomito – Nenhuma aptidão ornamental.

Zona I – Mármore Azul – Fraca ou nenhuma aptidão ornamental.

Zona II – Mármore com alguma vergada – Boa aptidão ornamental.

Zona III – Mármore creme e rosa com pouca ou nenhuma vergada – Muito boa aptidão ornamental.

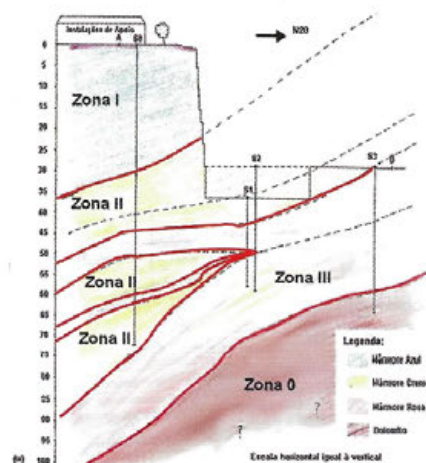


Fig. 15 – Pedreira do Texugo: zonas de qualidade ornamental. Cevalor (2001). Plano de Lavra da pedreira Lugramar.

No zonamento geotécnico foram identificadas três zonas com comportamento geomecânico diferente (Tabela 2). Para esse zonamento foram utilizados os seguintes parâmetros:

1. Classificação geomecânica de Bieniawski (RMR);
2. Resistência à compressão uniaxial, onde provetes cilíndricos são comprimidos paralelamente ao seu eixo longitudinal;
3. RQD – Rock Quality Designation (determina o grau de fracturação do maciço);
4. Análise da fracturação (espaçamento, rugosidade e humidade).

Tabela 2 – Zonas geotécnicas. Cevalor (2001). Plano de Lavra da pedra Lugramar.

Zona Geotécnica	Características					Classificação ¹
Zona A Maciço rochoso de qualidade média	Mármore azul muito fraturado					RMR = 42 Maciço médio
	$\sigma_c = 64\text{MPa}$	RQD 25-50%	Espaçamento 200-600mm	Fracturas ligeiramente rugosas e alteradas	Presença de água nas fracturas	
	Mármore claro com vergada muito fraturado					RMR = 47 Maciço médio
	$\sigma_c = 61\text{MPa}$	RQD 25-50%	Espaçamento 200-600mm	Fracturas levemente rugosas e levemente alteradas	Humidade nas fracturas	
	Mármore claro com pequenos veios, muito fraturado					RMR = 47 Maciço médio
	$\sigma_c = 94\text{MPa}$	RQD 25-50%	Espaçamento 200-600mm	Fracturas levemente rugosas e levemente alteradas	Humidade nas fracturas	
Zona B Maciço rochoso de qualidade média a boa	Mármore claro com pequenos veios, moderadamente fraturado					RMR = 57 Maciço médio
	$\sigma_c = 61\text{MPa}$	RQD 50 - 75%	Espaçamento 0,6 - 2m	Fracturas levemente rugosas e levemente alteradas	Humidade nas fracturas	

¹ Classificação com base no valor da RMR da classificação de Bieniawski.

Zona Geotécnica	Características				Classificação ¹
Zone C Maciço rochoso de boa qualidade	Mármore azul com pequenas fracturas				RMR = 61 Maciço sólido
	$\sigma_c = 64\text{MPa}$	RQD 75 - 90%	Espaçamento 0,6 - 2m	Fracturas levemente rugosas e levemente alteradas	Humidade nas fracturas
	Mármore claro com poucos veios e poucas fraturas				RMR = 61 Maciço sólido
	$\sigma_c = 94\text{MPa}$	RQD 75 - 90%	Espaçamento 0,6 - 2m	Fracturas levemente rugosas e levemente alteradas	Humidade nas fracturas
	Dolomite				RMR = 64 Maciço sólido
	$\sigma_c = 78\text{MPa}$	RQD 75 - 90%	Espaçamento 0,6 - 2m	Fracturas levemente rugosas e levemente alteradas	Humidade nas fracturas

Tendo em conta as várias zonas ornamentais e geotécnicas definiram-se qualitativamente as zonas do jazigo (Fig. 16), do ponto de vista da exploração subterrânea.

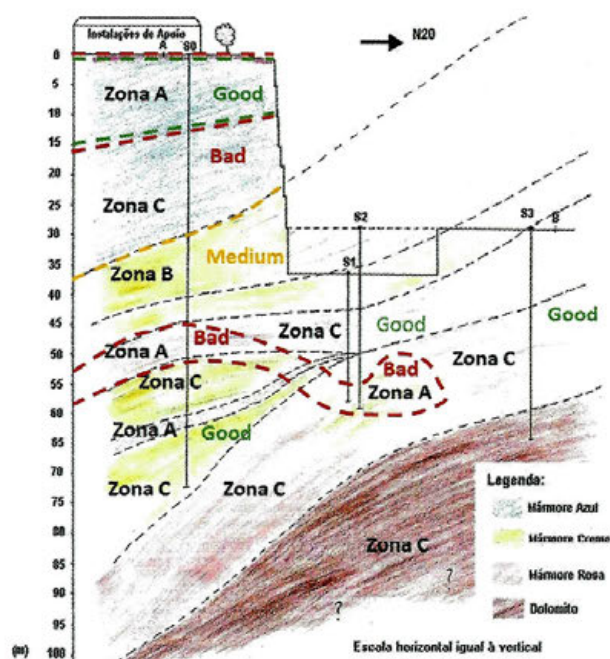


Figura 16 – Pedreira do Texugo: zonas qualitativas para exploração subterrânea. Adaptado de: Cevalor, 2001. Plano de Lavra da pedreira Lugamar.

Dos ensaios realizados foi determinada a tensão vertical $\sigma_v = 1,34 \text{ MPa}$

A resistência do pilar deverá ser 70% do valor médio menos o desvio padrão da resistência à compressão da rocha (mármore com vergada) = 37 MPa.

Atendendo à dimensão da roçadora usada, esta permite avanços de 3 m, optando-se por uma altura de galeria de 4,5 m e uma largura de 6 m, levando posteriormente a uma dimensão dos vãos de 12 m.

Considerando um fator de segurança $F_s \geq 5$, chegou-se a uma largura dos pilares de 9 m o que leva a uma taxa de recuperação de 82,5%.

Para a dimensão das câmaras adotou-se a teoria das vigas encastradas.

A tensão máxima de tração a meio de uma viga de vão "B" e espessura "a" é:

$$\sigma_{\text{máx}} = (\gamma B^2)/2a \quad B = \sqrt{(2a\sigma_t)/(\gamma.F.S)}$$

Para vãos de 12 m, a segurança do tecto em relação a fenómenos de flexão está garantida, uma vez que se tem uma espessura de material de cobertura a funcionar como viga muito superior a 0,5 m (situação limite) para uma resistência à tração de 4 MPa. No caso da pedra do Texugo existe uma espessura de rocha de cobertura aproximadamente de vinte e cinco metros (25 m).

4.2. Avanço em Galeria

Tradicionalmente o avanço em galeria é efetuado usando a técnica da cruz descentrada (Fig. 17) com o auxílio de uma roçadora de cinta diamantada ou de carboneto de tungsténio. Primeiro realizam-se os golpes horizontais, com 2 m de profundidade e espaçamento de 2,5 m entre o corte inferior e o intermédio e de 1 m entre este e o corte superior. De seguida fazem-se os cortes verticais, com 1 m entre o corte esquerdo e o intermédio e com 5 m entre este e o corte da direita. Depois dos cortes estarem feitos ficam individualizados os blocos um, dois, três e quatro estando presos ao maciço rochoso pela parte posterior. Os blocos um e dois são desprendidos da parte posterior colocando um colchão de água na base do segundo bloco, enchendo-o com água até que se dê o desprendimento. A remoção dos blocos um e dois é feita por exemplo com recurso a uma escavadora de rastos. De seguida procede-se ao corte posterior das maiores massas que constituem os blocos três e quatro, com uma máquina de fio diamantado, sendo removidos da mesma forma. Termina-se assim um ciclo de avanço de uma galeria.

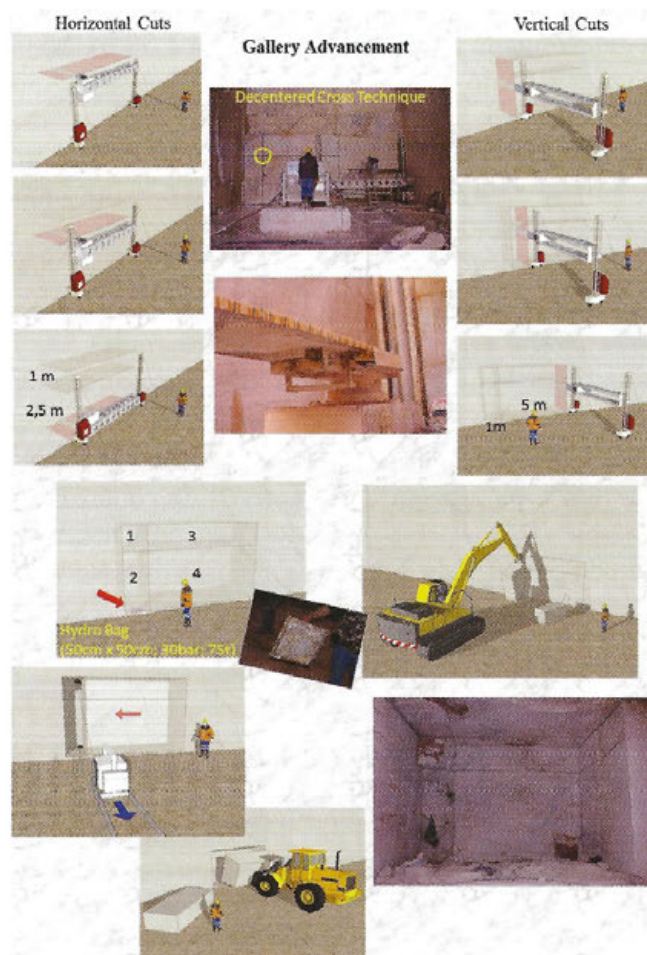


Figura 17 – Avanço em galeria utilizando a técnica da cruz descentrada. Ilustração gráfica original de Emanuel Branco.

4.3. Abaixamento de Piso

Depois de se obter uma câmara suficientemente ampla com a correcta distribuição dos pilares, inicialmente projectados, inicia-se o processo de abaixamento de piso (Fig. 18). Executam-se quatro furos de seis metros de comprimento, com jumbo de perfuração e com bit de duzentos e vinte milímetros de diâmetro. De seguida fazem-se dois furos diagonais com a perfuradora pneumática rotopercussiva, com bit de noventa milímetros de diâmetro, a partir do topo de um dos furos já executados até interceptar a base do furo oposto. Na fase seguinte são definidas as larguras das fatias com furos verticais executados com martelos pneumáticos ligeiros e diâmetro de trinta milímetros. Os cortes com máquina de fio diamantado são executados pela seguinte ordem:

1. Corte vertical de topo. Realizado de forma tradicional com poleias de fundo do furo com diâmetro de duzentos milímetros e poleia motriz da máquina com diâmetro de oitocentos milímetros devido à elevada velocidade periférica que se observa nas poleias de menores dimensões;
2. Corte diagonal;
3. Corte das fatias;
4. Cortes laterais.

Fica assim destacada uma cunha superior que é removida fatia a fatia, com auxílio de grua móvel, começando-se pelas fatias de menor dimensão.

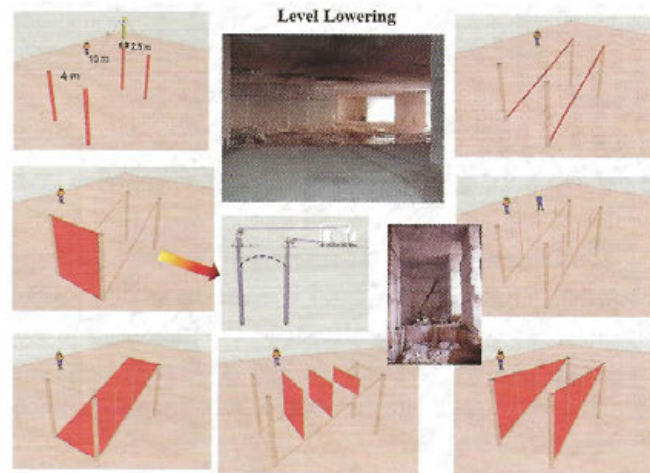


Figura 18 – Sequência dos trabalhos para abaixamento de piso.
Ilustração gráfica original de Emanuel Branco.

Para destacar e remover a cunha inferior a sequências dos processos é semelhante (Fig. 19). Porém, antes da execução dos furos horizontais é necessário remover-se a ponta da cunha para colocação da perfuradora pneumática. No final teremos uma caixa de abaixamento de piso, a partir da qual se desenvolverão canais e desmonte em bancada por degraus direitos, tal como se processa a céu aberto, diferindo apenas no facto de se tratar de uma exploração em câmaras e pilares.

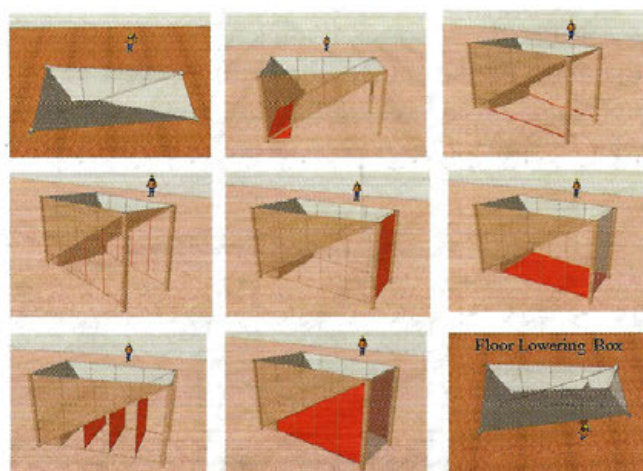


Figura 19 – Destaque e remoção da cunha inferior. Ilustração gráfica original de Emanuel Branco.

5. E Agora, a Grande Questão: qual a melhor opção?

Considerando uma determinada área de exploração possuindo o mesmo cenário geológico, no qual é comum a diversidade litológica, a densidade de fracturação e graus de alteração do maciço. De um lado assinala-se a opção de uma exploração subterrânea, em 2000 pela empresa Lugramar, do outro, a opção de uma exploração a céu aberto pela empresa António Galego & Filhos – Mármore, S.A. (Fig. 20).



Figura 20 – Exploração subterrânea versus exploração a céu aberto.

A opção da exploração em subterrâneo, ao fim de dezanove anos, deixou para sustentação dos tectos, cinco pilares com as dimensões referidas na figura

21 e num total de 19 965 m³. Considerando o rendimento médio da exploração a céu aberto de 22 %, obter-se-ia 4392 m³ de pedra comercializável. Tendo em conta o valor médio do bloco na ordem de 325€/m³, obter-se-ia um valor comercial para a massa total de 1427400€.

Porém sendo a actual zona subterrânea, uma zona de muito boa qualidade, onde prevalecem os mármorem cremes claros e rosas, obtendo-se por média cerca de 40 % de rendimento, é expectável, caso se tivesse desenvolvido a exploração a céu aberto que o rendimento nesta zona fosse superior a 22 %.

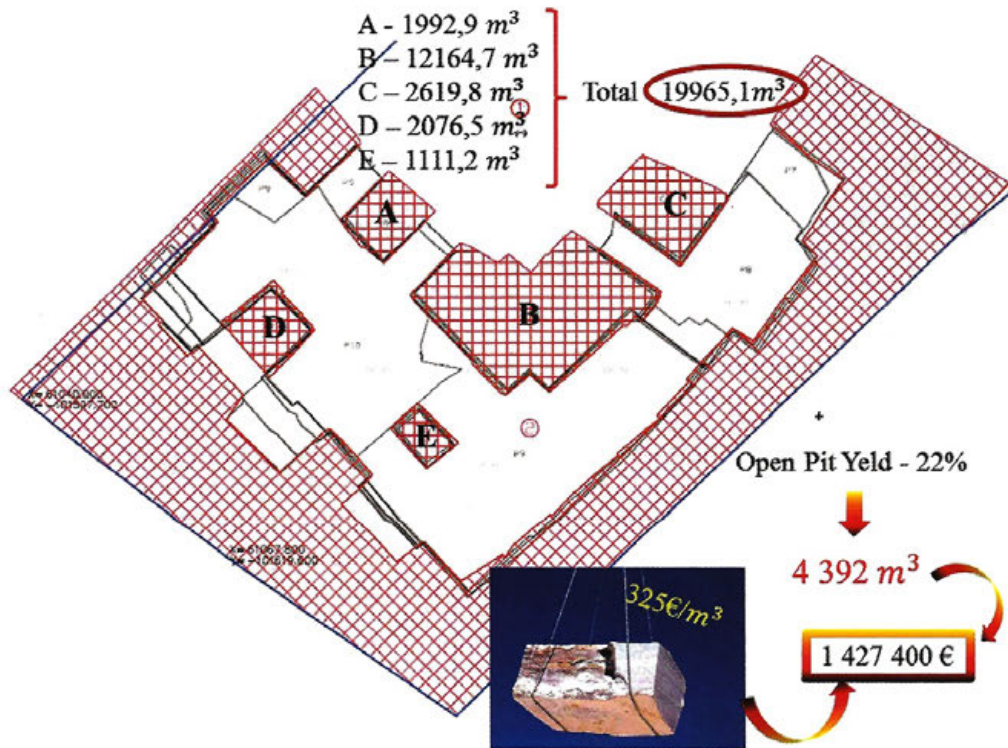


Figura 21 – Planta da pedreira do Texugo e rendimento expectável.

A empresa António Galego & Filhos – Mármorem, S.A., optou por remover 250000 m³ de massa estéril e mármorem escuros de pouco valor. Em quatro anos removeu cerca de 30% da massa, restando 70% que, ao ritmo actual de exploração e um planeamento mineiro adequado prevê-se que demorará entre nove e dez anos até remover-se a totalidade da capa superior.

O piso zero é constituído pelos primeiros 6 m de espessura e teve rendimento zero.

Os dois pisos e meio de 7 m de altura cada, tiveram rendimentos até 10% (Fig. 22).



Figura 22 - Evolução da pedra da empresa António Galego.

Terminamos, deixando o leitor com a pergunta suspensa: qual a melhor opção? Ambas são válidas, e qualquer interpretação que se faça actualmente sobre opções passadas deve ser interpretada à época. A dinâmica do sector, os elevados ritmos extractivos com que actualmente se explora graças a avanços tecnológicos notáveis, a componente geológica e geotécnica que se revelam determinantes para a projecção de uma unidade extractiva e o próprio enquadramento legal cada vez mais apertado, são factores que concorrem para que cada caso, seja um caso. Antes de se optar por qualquer opção, devem ser ponderados detalhadamente todos os factores que foram analisados ao longo deste texto e nunca avançar precipitadamente. Só assim se conseguirá uma exploração rentável, duradoura e com elevados níveis de segurança.

6. Bibliografia

- Adam, Jean-Pierre, (1994) Roman Building: Materials and Techniques. London-New York, Routledge, 360 p. 746 fig. ISBN 0-415-20866-1
- Cevalor (2001). Plano de Lavra da pedra Lugramar.
- Fornaro, M.; Bosticco, L. (1995) Underground Stone Quarrying In Italy. Its Origins, The Present Day and Prospect (Part 3). Editrice Promorama SRL. Marmo Machine International. N.º 8. Jennaio/Marzo. pp. 32 - 56.

- Grewe, Klaus (2010) La máquina romana de serrar piedras: la representación en bajorrelieve de una sierra de piedras de la antigüedad, en Hierápolis de Frigia y su relevancia para la historia técnica. Las técnicas y las construcciones en la ingeniería romana, 2010, ISBN 978-84-614-3758-0, págs. 381-402.
- Guerreiro, H., (2000) Exploração Subterrânea de Mármore, Aspectos Geotécnicos; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia; Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico; Lisboa, 2000; p. 231.
- Instituto Geológico e Mineiro (2000) Projecto de Execução para a Exploração Subterrânea de Mármore na Região de Pardais; Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2000.
- Salamon, M. D. G. and Oravec, K. I. (1976) Rock mechanics in coal mining, Chamber of Mines of South Africa, PRD Series No 198

7. Webgrafia

Nota: todas as páginas aqui indicadas foram acedidas, pela última vez, em 10 de fevereiro de 2021.

<http://ancient-tides.blogspot.com/2009/07/huge-manmade-cavern-found-in-jordan.html>

[http://geomuseu.ist.utl.pt/OG2009/Documentos%20Complementares/Congresso%20Geotecnia%20\(resumos\)/Congresso_Actas%20\(D\)/Volume%203/V3-08.pdf](http://geomuseu.ist.utl.pt/OG2009/Documentos%20Complementares/Congresso%20Geotecnia%20(resumos)/Congresso_Actas%20(D)/Volume%203/V3-08.pdf)

http://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA2894/rnt_eia_portela-das-salgueiras2016615115357.pdf

<http://www.biblicalarchaeology.org/daily/biblical-sites-places/temple-at-jerusalem/the-stones-of-herod%E2%80%99s-temple-reveal-temple-mount-history/>

http://www.traianvs.net/pdfs/2010_15_grewe.pdf

http://www.visaconsultores.com/pdf/Tese_MSc_HG.pdf

https://en.wikipedia.org/wiki/Ancient_underground_quarry,_Jordan_Valley

https://en.wikipedia.org/wiki/Hierapolis_sawmill

[https://en.wikipedia.org/wiki/Propylaea_\(Acropolis_of_Athens\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Propylaea_(Acropolis_of_Athens))

<https://mapio.net/pic/p-36100657/>

<https://maroudis-marbles.com/quarries.html>

https://pt.wikipedia.org/wiki/Templo_romano <https://pt.wikipedia.org/wiki/Partenon>

<https://www.atlascopco.com/>

<https://www.gettyimages.es/fotos/adam-zertal?family=editorial&phrase=adam%20zertal&sort=mostpopular>

<https://www.ritmeyer.com/wp-content/uploads/2008/05/quarrying.jpg>

<https://www.sciencedaily.com/releases/2009/06/090622103831.htm>

<https://www.uni3trieste.it/wp-content/uploads/2020/05/Aurisina.pdf>