



Joel Manuel Brazão da Silva

Licenciado em Engenharia Geológica

**Caracterização e análise de indicadores
geotécnicos para a extração de blocos e
planeamento da exploração de uma
pedreira de mármore: um caso de estudo
na pedreira Texugo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica

Orientador: Doutor José António de Almeida, FCT-UNL

Co-orientador: Eng.^a Joana Fonseca Pita, Bloco B

Júri

Presidente: Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Prof.^a Auxiliar – FCT/UNL

Arguentes: Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

Vogais: Engenheira Joana Fonseca Pita, Bloco B



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro 2021

Caracterização e análise de indicadores geotécnicos para a extração de blocos e planeamento de uma pedreira de mármore: um caso de estudo na pedreira Texugo

Copyright © Joel Manuel Brazão da Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em formato digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao meu orientador professor Doutor José António de Almeida pela disponibilidade e apoio, o meu muito obrigado.

À empresa Bloco B pela oportunidade de poder desenvolver este estudo, em especial á Engenheira Joana Pita pelo auxílio e ajuda, e ao Encarregado da pedreira pela disponibilidade prestada em me receber sempre que necessitei.

Ao professor Doutor Pedro Lamas pela disponibilidade e apoio prestado nos ensaios laboratoriais.

À Eduarda pela sua disponibilidade e ajuda.

Este trabalho teve o apoio da empresa Seequent por disponibilizar licenças de Leapfrog Geo e EDGE para este trabalho.

À minha família, ao meu pai e a minha irmã, por estarem sempre presentes na minha vida. Por ouvirem os meus desabafos ao longo deste percurso e me acalmarem sempre com as suas palavras sábias de força e tranquilidade.

Ao meu colega de casa, que deixou de ser colega e passou a ser família (uma espécie de irmão mais velho) o meu muito obrigada pelo seu companheirismo, pela enorme amizade que se criou, pela paciência, pelos seus sábios conselhos e por tudo o que fez por mim ao longo destes 5 longos anos.

Aos meus colegas de curso em especial ao Fred, Catarina e Camilo que com a sua contagiante boa disposição sempre me animaram naqueles dias mais complicados e pela nossa amizade. Ao Camilo queria agradecer ainda o seu companheirismo constante e a sua total disponibilidade para me ajudar em tudo o que necessitei ao longo da tese o meu muito obrigado.

Ao meu grande amigo Tiago pela ajuda, pelo apoio e por estar sempre presente na minha vida ao longo dos últimos 8 anos.

Resumo

A extração de blocos de mármore numa pedreira de rocha ornamental recorre às operações unitárias perfuração e corte de rocha. A produtividade horária destas técnicas e o desgaste das ferramentas que lhes estão associadas, como os bits e o fio diamantado, é muito dependente da resistência à compressão da rocha (RCU) e da fração de sílica presente na rocha. Para além destas duas variáveis com influência no desempenho da extração dos blocos, a orientação e a intensidade da fracturação instalada no maciço condicionam a dimensão e o esquadriamento dos blocos e a quantidade de rocha desperdiçada.

Em conjunto, as variáveis RCU, fração de sílica e intensidade e orientação da fracturação funcionam como indicadores geotécnicos que permitem sintetizar as principais características geotécnicas do maciço de mármore, quer relativamente à extração de blocos quer relativamente ao planeamento da exploração.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia destinada a avaliar de forma expedita estes três indicadores nas frentes de trabalho de uma pedreira de mármore. Para a RCU, estabeleceu-se uma calibração entre as RCU medidas em laboratório e os resultados do martelo de Schmidt. Relativamente à fração em sílica fizeram-se leituras com um XRF portátil e com um LIBS. Finalmente, em relação à fracturação utilizou-se a aplicação informática FTRIAN desenvolvida na FCT-NOVA para a simulação condicional da fracturação num volume em estudo e o cálculo do volume de rocha que pode ser recuperado como blocos de rocha já cortados à esquadria.

Os resultados obtidos permitem o zonamento destes indicadores. Observa-se que a RCU diminui em profundidade, já a quantidade de sílica não evidencia qualquer tendência espacial. Relativamente à fração de rocha recuperada em consequência da fracturação instalada, os resultados das simulações com o programa FTRIAN apontam para valores médios de 28,53 %, sendo que a mesma pode aumentar se as frentes de exploração estiverem orientadas com os pontos cardeais.

Palavras-chave: pedreira de mármore; perfuração e corte; planeamento da exploração; modelação de fracturas; zonamento

Abstract

The extraction of marble blocks in an ornamental rock quarries uses rock drilling and rock cutting unitary operations. The hourly productivity of these techniques and the tool wearing associated with them, as bits and diamond wire, is highly dependent on the resistance of the rock (RCU) and the fraction of silica present in the rock. In addition to these two variables with influence on the performance of the extraction of the blocks, the orientation and intensity of the fracture installed in the massif conditions the dimension and squaring of the blocks and the amount of wasted rock.

Together, the RCU variables, the fraction of silica and intensity and fracture orientation works as geotechnical indicators that allow synthesizing as the main geotechnical characteristics of the marble massif, as to the extraction of blocks as in relation to the exploration planning.

This work presents a methodology designed to evaluate these three indicators on the work fronts of a marble quarry. For the RCU, was established a calibration between the RCU measured in the laboratory and the results of the Schmidt hammer. Regarding the fraction on silica, readings were made with a portable XRF and a LIBS. Finally, in relation to fracturing, the FTRIAN computer application developed at FCT-NOVA was used for the conditional simulation of fracturing in a volume under study and the calculation of the volume of rock that can be recovered as blocks of rock already cut to the frame.

The results obtained allows the zoning of these indicators. The results shows that RCU decreases in depth and the amount of silica does not exhibit any trend. Regarding the fraction of the recovered rock as a result of the installed fracture, the results of the simulations with the FTRIAN program point to values of 28.53%, which may increase if the exploration fronts are oriented with the cardinal points.

Keywords: marble quarry; drilling and cutting; exploitation planning; joint modelling; zoning

Índice

1	Introdução	1
1.1	A exploração dos mármore em Portugal	1
1.2	Enquadramento e relevância do estudo para a exploração do mármore	3
1.3	Objetivos e organização da dissertação	4
2	Estado de arte	7
2.1	Aptidão da rocha à perfuração.....	7
2.2	Aptidão da rocha ao corte com fio diamantado	8
2.3	Modelação de fracturas e avaliação da dimensão dos blocos.....	12
3	Caracterização geomecânica de maciços rochosos para a exploração de rochas ornamentais	21
3.1	Ensaio geomecânicos	21
3.1.1	Resistência à compressão uniaxial	21
3.1.1.1	Ensaio laboratorial	21
3.1.1.2	Ensaio <i>in situ</i>	23
3.1.2	Velocidade das ondas P e S	25
3.2	Ensaio geoquímicos.....	26
3.2.1	Análise química com XRF	27
3.2.2	Análise química com LIBS.....	29
3.3	Estudo da fracturação e dimensão dos blocos.....	30
3.3.1	Metodologia proposta.....	30
3.3.2	Levantamento de fracturas “ <i>in situ</i> ”	32
3.3.3	Modelação de fracturas e avaliação da dimensão dos blocos (<i>software FTRIAN</i>)	35
4	Caso de estudo – Pedreira Texugo	41
4.1	Enquadramento da pedreira	41

4.1.1	Enquadramento geográfico	41
4.1.2	Enquadramento geológico regional e local.....	42
4.1.3	Enquadramento tectónico	44
4.2	Descrição das tecnologias de exploração do mármore na pedreira em estudo..	45
4.2.1	Perfuração e corte.....	45
4.2.2	Derrube, esquadrejamento e/ou esquadriamento.....	47
4.2.3	Transporte.....	48
4.3	Enquadramento da área de estudo na pedreira	49
5	Análise e discussão dos resultados da prospeção geológica e geomecânica in situ	51
5.1	Levantamento da fracturação	51
5.2	Recolha de amostras e resultados obtidos	54
5.2.1	Resistência à compressão uniaxial	56
5.2.2	Velocidade de propagação das ondas sísmicas.....	59
5.2.3	Concentrações e concentração de silício	60
5.3	Zonamento geomecânico	63
5.4	Zonamento geoquímico	64
6	Modelação de fracturas e avaliação da dimensão dos blocos	67
6.1	Parâmetros de entrada no modelo.....	67
6.2	Resultados.....	68
7	Considerações finais.....	75
7.1	Conclusões.....	75
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	76
	Referências bibliográficas.....	79

Índice de figuras

Figura 1.1. Estimativa da produção bruta (quantidade total extraída) e líquida (quantidade de rocha extraída com valor económico) de rocha ornamental (adaptado de DGEG, 2020).....	2
Figura 1.2. Exportações de mármore entre 2004 e 2019 (adaptado de Quintas, 2020)	3
Figura 2.1. Porosidade (adaptado de Servet et al., 2014)	8
Figura 2.2. Peso volúmico (adaptado de Servet et al., 2014)	8
Figura 2.3. Resistência à compressão uniaxial (adaptado de Servet et al., 2014).....	8
Figura 2.4. Dureza de Schmidt (adaptado de Servet et al., 2014)	8
Figura 2.5. Ângulos formados entre os planos de corte e os planos de foliação (adaptado de Ozcelik e Yilmazkaya, 2011)	12
Figura 2.6. Qualidade dos blocos de rocha (BQD) das 11 pedreiras de calcário (adaptado de Elci e Turk, 2014)	14
Figura 2.7. Exemplo dos resultados do software 3D-BlockExpert, com as respetivas visualizações das faces do modelo, e das secções bidimensionais do seu interior (adaptado de Mosch et al., 2011).....	16
Figura 2.8. Processo de extração de um bloco de grandes dimensões numa pedreira de rocha ornamental (adaptado de Yarahmadi et al., 2018).....	17
Figura 2.9. Comparação dos blocos formados nas quatro direções em análise (adaptado de Yarahmadi et al., 2018).....	18
Figura 2.10. Exemplo da abordagem de pequena escala (adaptado de Yarahmadi et al., 2018)	19
Figura 3.1. Provete de rocha após a realização do ensaio.....	22
Figura 3.2. Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão uniaxial no laboratório de Mecânica das Rochas do DCT FCT-NOVA.....	22
Figura 3.3. Ábaco de Miller (adaptado de Vallejo et al., 2004)	24
Figura 3.4. Medição da velocidade de propagação das ondas P.	25
Figura 3.5. Resultado de uma medição realizada pelo <i>PunditLab+</i>	25
Figura 3.6. Instrumento portátil de XRF utilizado para a medição das concentrações dos elementos presentes nas amostras (Fonte: ThermoFisher SCIENTIFIC, 2018).....	27

Figura 3.7. Instrumento LIBS Z-300 utilizado (Fonte: SciAps, 2019).....	29
Figura 3.8. Etapas da metodologia proposta para avaliação da blocometria e da taxa de recuperação.....	31
Figura 3.9. Método das <i>scan-lines</i> (adaptado de Luís et al., 2005).	32
Figura 3.10. Processo de formação do plano de uma fractura através de 2 triângulos adjacentes (quadrado).	36
Figura 3.11. Exemplo dos planos de fractura criados para uma família de fracturas com uma intensidade de fracturas por metro linear (P10) de 0,69.....	37
Figura 3.12. Exemplo da representação espacial dos planos de fractura importados (esquerda); respetiva projeção estereográfica das fracturas importadas (direita).....	38
Figura 3.13. Exemplo da blocometria existente num modelo com uma com uma intensidade de fracturas por metro linear (P10) de 0,69 (esquerda); malha de cubos presente num bloco (direita).	39
Figura 3.14. Exemplo dos cubos com códigos de 0 e 1 presentes num modelo com uma intensidade de fracturas por metro linear (P10) de 0,69.....	39
Figura 4.1. Localização da pedreira em Portugal (esquerda) e regionalmente (direita) (adaptado do Google Earth).....	41
Figura 4.2. Enquadramento geológico do Anticlinal de Estremoz (adaptado de Moreira e Lopes, 2019).....	43
Figura 4.3 Lage polida de mármore, denominada comercialmente por Two Tones (Fonte: B Stone - Marble, 2016).....	44
Figura 4.4 Lage polida de mármore, denominado comercialmente por Calacatta (Fonte: B Stone - Marble, 2016).....	44
Figura 4.5. Operações unitárias de perfuração realizadas na pedreira (Fonte: B Stone - Marble, 2016).....	45
Figura 4.6. Máquina estacionária de esquadrear blocos (mono fio) utilizada na pedreira (Fonte: B Stone - Marble, 2016).....	48
Figura 4.7. Enquadramento da área de estudo na pedreira.	50
Figura 5.1. Linhas de amostragem (SL) presentes na área de estudo 2	51
Figura 5.2. Linhas de amostragem (SL) presentes na área de estudo 3	51

Figura 5.3. Projeção estereográfica dos polos na rede de Schmidt com o <i>software</i> Leapfrog	52
Figura 5.4. Frequência relativa das famílias de fracturas	52
Figura 5.5. Localização espacial nas áreas de estudo das amostras de mármore recolhidas e das medições realizadas com o martelo de Schmidt.....	54
Figura 5.6. Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial, a castanho provetes realizados segundo a direcção horizontal e a azul na vertical	57
Figura 5.7. Relação entre a dureza de Schmidt e a resistência à compressão uniaxial (modelo não linear)	58
Figura 5.8. Relação entre a dureza de Schmidt e a resistência à compressão uniaxial (modelo linear)	58
Figura 5.9. Resultados da anisotropia presente nas amostras	60
Figura 5.10. Matriz de correlação dos elementos químicos com os componentes principais	62
Figura 5.11. Análise dos componentes principais (ACP) dos elementos químicos	62
Figura 5.12. Resultados das concentrações de Si presentes em cada amostra.....	62
Figura 5.13. Relação entre o LIBS e o XRF na avaliação da sílica presente nas amostras de mármore recolhidas na pedreira	63
Figura 5.14. Resultado do zonamento geomecânico	64
Figura 5.15. Resultado do zonamento geoquímico	65
Figura 6.1. Histograma do número de blocos formados nas simulações da área 2	69
Figura 6.2. Histograma do número de blocos formados nas simulações do modelo geral da pedreira	69
Figura 6.3. Histograma do número de blocos formados nas simulações da área 3	70
Figura 6.4. Ilustração da dimensão dos blocos que podem ser retirados de um macrobloco na área 2 para uma realização aleatória (<i>software</i> Leapfrog)	70
Figura 6.5. Histograma do número de blocos formados na área 2	71
Figura 6.6. Ilustração da dimensão dos blocos que podem ser retirados de um macrobloco no modelo geral da pedreira para uma realização aleatória (<i>software</i> Leapfrog)	71

Figura 6.7. Histograma do número de blocos formados no modelo geral da pedreira.	72
Figura 6.8. Ilustração da dimensão dos blocos que podem ser retirados de um macrobloco na área 3 para uma realização aleatória (<i>software</i> Leapfrog)	72
Figura 6.9. Histograma do número de blocos formados na área 3	73
Figura 6.10. Resultados das 20 simulações para as 3 situações em estudo.....	73
Figura 6.11. Histograma com a mediana das taxas de recuperação registadas em cada modelo para os dois cenários	74

Índice de tabelas

Tabela 1.1. Distribuição das pedreiras ativas de rochas, ornamentais, em Portugal continental, por tipo de rocha, explorada (adaptado de DGEG, 2020).....	2
Tabela 1.2. Pedreiras de classe 1 e 2 presentes no distrito de Évora (adaptado de DGEG, 2020).....	2
Tabela 2.1. Parâmetros que influenciam o rendimento do corte com fio diamantado (adaptado de Ozcelik et al., 2004).....	10
Tabela 5.1. Orientação das famílias de fracturas.....	52
Tabela 5.2. Coeficiente de Fisher das 4 famílias principais de fracturas.....	53
Tabela 5.3 Densidade linear medida por família, em termos das linhas de amostragem e no global.....	53
Tabela 5.4. Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial da rocha e da velocidade de propagação das ondas P e S.....	55
Tabela 5.5. Resultados dos ensaio de fluorescência de raios X (XRF).....	56
Tabela 5.6. Resultados das velocidades médias de propagação das ondas sísmicas.....	59
Tabela 5.7. Velocidade média de propagação das ondas P para provetes com e sem vergada.....	60
Tabela 5.8. Concentração média (ppm) dos elementos químicos analisados nos 22 nos 22 provetes.....	61
Tabela 6.1. Parâmetros de entrada relativos às famílias de fracturas amostradas.....	67
Tabela 6.2 Mediana das taxas de recuperação dos 3 modelos (em %).....	74

1 Introdução

1.1 A exploração dos mármore em Portugal

O conceito mármore aplicado no âmbito das rochas ornamentais define-se como toda a rocha cristalina, de origem sedimentar ou metamórfica, com composição carbonatada, a qual é possível extrair sob a forma de blocos com boas características de corte e apetência para a execução de um adequado polimento (Moreira e Lopes, 2019).

A exploração de mármore em Portugal iniciou-se no tempo do império romano, com aplicação do mesmo em muitos dos monumentos do sudoeste da Península Ibérica, como o Teatro de Mérida, em Espanha no ano de 18 A.C, ou o Templo de Diana, em Portugal, no séc. II D.C. A utilização desta rocha em muitos dos castelos e monumentos nacionais prolongou-se ao longo de vários séculos (Moura et al., 2007).

Além-fronteiras, a empregabilidade do mármore data do século XV, durante o período da Expansão Portuguesa, com evidências da sua presença em vários monumentos em África, Índia e Brasil (Moura et al., 2007).

A industrialização do setor das rochas ornamentais em Portugal só ocorre no século XIX, impulsionada por uma procura crescente das rochas nacionais pelo mercado internacional. Tal procura deveu-se essencialmente a uma elevada qualidade do material, associado a preços baixos (Moura et al., 2007).

As reservas portuguesas de mármore são caracterizadas por permitirem a obtenção de blocos de grandes dimensões, com elevada homogeneidade textural e cromática. O contínuo crescimento da indústria conduziu, na década de 70 do século XX, à modernização dos processos de extração da pedra com a aplicação de novos métodos de desmonte e de serragem, bem como a aplicação de novas técnicas de transformação e acabamento (Moura et al., 2007).

A exploração de rocha ornamental em Portugal representava em termos de valor económico, aproximadamente 18 milhões de euros, enquanto que a sua tonelagem tem exibido um crescimento constante nas últimas décadas que se prevê que perdure no ano de 2020 (Figura 1.1). O número de pedreiras presentes no setor no ano de 2015 era de 324, das quais cerca de 97% correspondiam à exploração de granito, calcário e mármore (Tabela 1.1) (DGEG, 2020). Este setor desempenha um papel fundamental na

economia nacional em termos de riqueza gerada, assim como do número de pessoas que emprega (Barros et al., 2014).

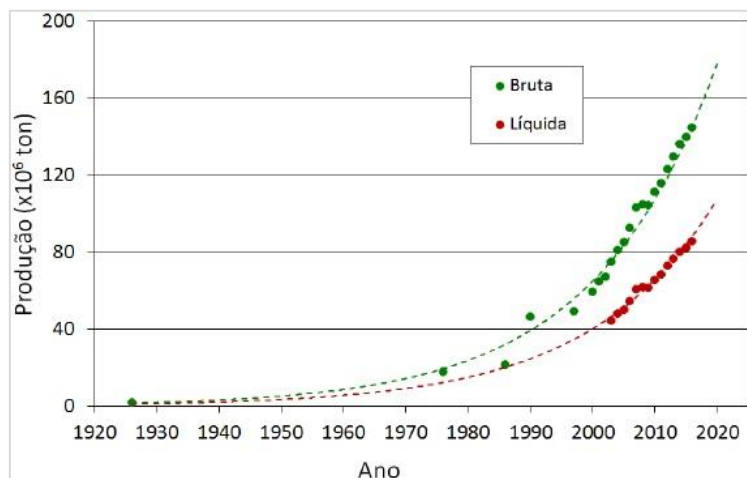


Figura 1.1. Estimativa da produção bruta (quantidade total extraída) e líquida (quantidade de rocha extraída com valor económico) de rocha ornamental (adaptado de DGEG, 2020).

Tabela 1.1. Distribuição das pedreiras ativas de rochas, ornamentais, em Portugal continental, por tipo de rocha, explorada (adaptado de DGEG, 2020).

Tipo de rocha ornamental	Número de pedreiras ativas
Granito	143
Calcário	108
Mármore	63
Xisto	8
Sienito nefelínico	2
Total	324

No que respeita ao caso particular dos mármore, a sua exploração desenrola-se na sua grande maioria no distrito de Évora, com destaque para os concelhos de Vila Viçosa, Borba e Estremoz, sendo que se verifica uma menor expressão no valor global extraído relativamente a algumas pedreiras no distrito de Beja nos concelhos de Serpa e Beja (Sobreiro, 2002). A exploração no distrito de Évora associada ao Anticlinal de Estremoz no ano de 2019 ocorria em 49 pedreiras (Tabela 1.2) (DGEG, 2020).

Tabela 1.2. Pedreiras de classe 1 e 2 presentes no distrito de Évora (adaptado de DGEG, 2020).

Concelho	Em exploração/recuperação
Borba	6
Estremoz	8
Vila Viçosa	35
Total	49

A grande maioria da rocha ornamental, extraída destina-se à exportação, representando receitas de cerca de 109 milhões de euros, correspondentes à exploração de 413 mil toneladas no ano de 2019 (Figuras 1.2 e 1.3). Desde 2004, os valores apresentam algumas oscilações destacando-se, nos anos a seguir a 2009, um decréscimo impulsionado pela crise económica sentida nesse ano (Figuras 1.2 e 1.3) (Quintas, 2020).

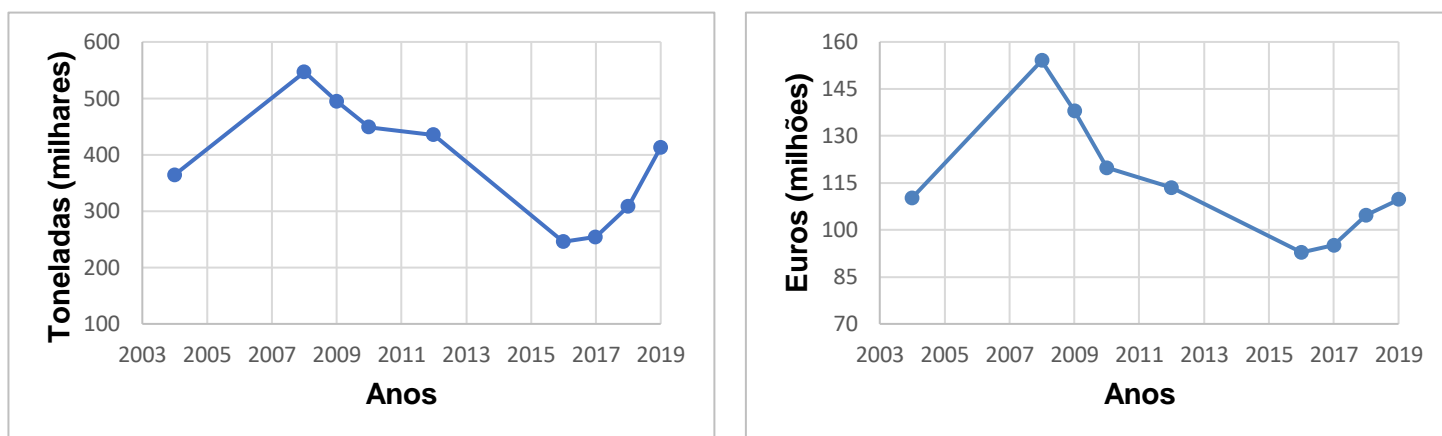


Figura 1.2. Exportações de mármore entre 2004 e 2019. (Esquerda) Toneladas; (Direita) Euros. (adaptado de Quintas, 2020).

Em 2019, cerca de 43% do mármore vendido teve como destino final a sua aplicação em obra, por outro lado 36% encontrava-se no seu estado bruto, sob a forma de blocos, e 21% já se encontrava serrado em chapas. Cada um destes tipos apresenta diferentes mercados preferenciais, com a China a ter uma elevada preponderância na importação de mármore português em blocos, enquanto a Arábia Saudita e a Espanha se destacam com a compra de peças serradas ou tendo como destino final a sua utilização em obra (Quintas, 2020).

1.2 Enquadramento e relevância do estudo para a exploração do mármore

A exploração e o planeamento de uma pedreira de mármore, designadamente o desempenho da extração dos blocos, são afetados pelas características intrínsecas do maciço rochoso onde esta se insere. Entre estas, destaca-se o sistema de fracturas instalado no maciço e duas propriedades intrínsecas das rochas: a sua resistência à compressão uniaxial (RCU) e a quantidade de sílica presente.

O sistema de fracturas presente numa pedreira condiciona o tamanho máximo e a forma dos blocos extraídos, sendo que os blocos de maior dimensão reúnem maior aceitação e maior valor comercial nos mercados internacionais, os principais

compradores do mármore português. Relativamente à forma dos blocos, as pedreiras preferem explorar e comercializar blocos com faces regulares e ortogonais, minimizando assim gastos de tempo acrescidos em operações adicionais de esquadramento.

Desta forma, o conhecimento da orientação e intensidade de fracturação é indispensável no planeamento das explorações, pois permite às empresas escolher o melhor posicionamento das frentes de exploração com vista a um maior aproveitamento dos blocos extraídos, diminuindo-se assim a produção de estéreis que se iriam acumular em escombreliras, o que aumentaria os impactos ambientais da pedreira no meio envolvente.

A extração dos blocos de mármore numa pedreira de rochas ornamentais realiza-se com base nas operações unitárias de perfuração como, por exemplo, com martelos pneumáticos ligeiros e perfuradoras rotopercussivas, e corte, a sua grande maioria com fio diamantado. A resistência à compressão uniaxial da rocha condiciona estas operações unitárias na medida em que determina a produtividade horária das mesmas, sendo que resistências à compressão uniaxial elevadas constituem a situação mais penalizadora, aumentando consideravelmente a duração destas operações unitárias.

A quantidade de sílica presente nos mármore relaciona-se diretamente com a magnitude do desgaste produzido nas ferramentas que contactam com a rocha, como o fio diamantado e o bit de perfuração. O desgaste produzido em cada operação leva a que o tempo de vida útil destas ferramentas diminua, originando assim a necessidade de substituição das ferramentas num tempo mais curto e acarretando custos operacionais maiores para as empresas. A informação relativa a esta propriedade permite às empresas antecipar custos e escolher as ferramentas mais adequadas a cada frente de trabalho.

Dada a relevância destes três indicadores geotécnicos nas explorações de mármore, apresenta-se neste trabalho uma metodologia destinada a avaliar estes indicadores de forma expedita nas frentes de exploração.

1.3 Objetivos e organização da dissertação

Na presente dissertação é proposta uma metodologia que permite avaliar, de forma expedita, as concentrações de sílica presentes nos mármore, a sua resistência à compressão uniaxial e a orientação e intensidade da fracturação nas frentes de uma

pedreira. Esta metodologia foi aplicada à pedreira Texugo que constitui o caso de estudo de suporte deste trabalho.

A avaliação da resistência à compressão uniaxial da rocha foi efetuada *in situ* com o martelo de Schmidt, onde os ressaltos medidos foram convertidos em resistências á compressão por calibração efetuada entre as RCU anteriormente medidas em laboratório e os valores obtidos no martelo de Schmidt.

A concentração de sílica apresentada pelos mármores determinou-se em laboratório, através da análise química de amostras recolhidas na pedreira com o XRF portátil. Para além desta análise, as amostras foram ainda submetidas ao ensaio LIBS, de maneira a perceber se este pode ser empregue na avaliação desta propriedade *in situ*. Tanto o LIBS como o XRF são equipamentos expeditos e portáteis, ainda que o LIBS seja mais expedito.

No que respeita às fracturas levantadas nas frentes de exploração, por meio da aplicação informática FTRIAN (FCT-NOVA) procedeu-se à sua simulação no interior de um bloco representativo do volume do maciço em estudo e ao cálculo do número de blocos formados com faces regulares que podem ser aproveitados.

A dissertação em causa está estruturada em sete capítulos.

No primeiro capítulo faz-se a introdução ao tema da tese e o seu enquadramento, importância e os objetivos a alcançar.

No segundo capítulo desenvolve-se o estado de arte, no qual são abordados os principais aspetos que condicionam as operações de corte e perfuração. É ainda referido em que consiste a modelação das fracturas e a avaliação da blocometria, além da apresentação de três métodos que permitem efetuar a sua avaliação.

No capítulo 3 descrevem-se todos os métodos utilizados na determinação dos indicadores, designadamente os ensaios laboratoriais (geoquímicos e geomecânico), os ensaios *in situ* (martelo de Schmidt), e como se procedeu à modelação das fracturas e avaliação da blocometria.

No capítulo 4 faz-se o enquadramento da pedreira Texugo onde se baseou o caso de estudo, em termos geográfico, geológico e tectónico, e é também mencionado como se efetua a exploração da pedreira em relação às técnicas e aos equipamentos envolvidos.

Os capítulos 5 e 6 contém todos os resultados obtidos, bem como a sua discussão. Por último, no capítulo 7 são referidas as conclusões retiradas do trabalho

realizado e são perspetivados trabalhos futuros. Na parte final da dissertação, encontram-se listadas todas as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

2 Estado de arte

2.1 Aptidão da rocha à perfuração

A perfuração é uma das operações unitárias presentes na fase de exploração de uma pedreira de mármore. Consiste no quebrar de rocha através de forças externas transmitidas por um bit, como o impulso e o torque. Durante a operação, os fragmentos de rocha produzidos vão sendo conduzidos para fora do furo por fluidos de limpeza (ar ou água) (Bhatnagar et al., 2011).

O correto planeamento desta fase permite diminuir os custos operacionais relacionados com o desgaste do bit, uma vez que é prolongado o seu tempo de vida útil (Bhatnagar et al., 2011).

Os fatores condicionantes do rendimento da perfuração podem ser classificados em três grupos (Servet et al., 2014; Bhatnagar et al., 2011):

- Características intrínsecas da rocha: propriedades físico-mecânicas, orientação da foliação, descontinuidades, composição mineral (tendo o quartzo como maior penalizante, devido à sua elevada abrasividade).
- Características do equipamento: tipo e forma do bit, magnitude das forças a atuar na interface bit-rocha, fatores relacionados com o fluido de circulação.
- Parâmetros operacionais: método de perfuração (martelo à cabeça ou fundo de furo), manutenção da máquina e experiência do operador.

Das investigações realizadas sobre a influência das características geológicas na taxa de perfuração, destaca-se o trabalho realizado por Servet et al., 2014, em que estes autores analisaram a influência das propriedades físico-mecânicas na realização de vários furos, com orientação horizontal e vertical, em dois tipos diferentes de mármore turcos, branco e bege. As propriedades em análise consistiram na resistência à compressão uniaxial (RCU), à tração (ensaio brasileiro), ao impacto e à abrasão de Bohme, velocidade das ondas P, porosidade, peso volúmico, dureza de Schmidt, e índice de fragilidade. Destas, sobressai a influência da porosidade e do peso volúmico em ambos os tipos de perfuração, em que a relação estabelecida entre estas propriedades e a taxa de perfuração se traduz por coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,96 (Figuras 2.1 e 2.2). Esta estrita correlação explica-se pelo facto destas duas características traduzirem a presença de vazios na rocha, facilitando a perfuração.

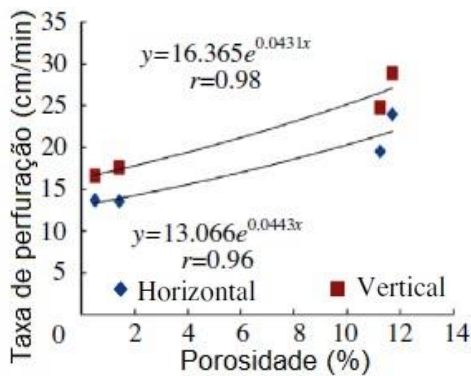


Figura 2.1. Porosidade (adaptado de Servet et al., 2014).

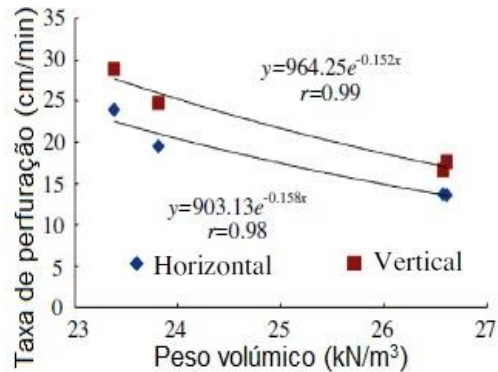


Figura 2.2. Peso volúmico (adaptado de Servet et al., 2014).

À exceção da dureza de Schmidt, nas restantes propriedades estudadas verifica-se o estabelecimento de correlações relativamente significativas com uma ligeira relevância da resistência à compressão uniaxial, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,77 e 0,84 para os dois tipos de perfuração (Figura 2.3). No caso particular da dureza de Schmidt, o autor não observou qualquer relação entre esta e a taxa de perfuração, Figura 2.4.

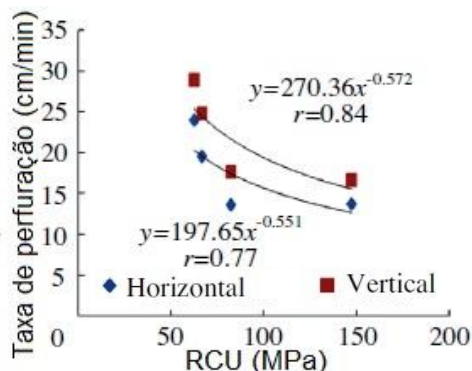


Figura 2.3. Resistência à compressão uniaxial (adaptado de Servet et al., 2014).

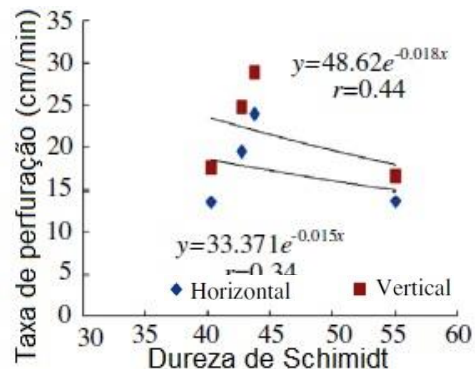


Figura 2.4. Dureza de Schmidt (adaptado de Servet et al., 2014).

Neste estudo, constata-se ainda que os furos horizontais têm menor taxa de avanço do que os furos verticais, o que aumenta o tempo de perfuração. Tal situação pode explicar-se por um aumento da tensão vertical e do coeficiente de Poisson originado pela espessura de rocha acima do furo.

2.2 Aptidão da rocha ao corte com fio diamantado

O corte de rocha realizado nas pedreiras de mármore portuguesas é efetuado principalmente com fio diamantado. Este método é utilizado em todas as fases de

exploração da pedreira, nos momentos iniciais, quando estão a ser extraídos os blocos das bancadas, ou então em fases mais adiantadas, em que são trabalhadas as faces dos blocos explorados, de forma irregular, atribuindo aos mesmos uma geometria comercial à esquadria.

Quando a operação é realizada na bancada da pedreira, é sempre necessário efetuar primeiramente dois furos, um vertical e outro horizontal, formando um ângulo de 90° e intersectando-se nas extremidades. Posteriormente, o fio passa pelo interior dos dois furos e por uma roldana, sendo então as pontas ligadas de modo a perfazer um circuito fechado (Ozcelik et al., 2004).

A roldana encontra-se ligada a uma máquina que se vai movimentar ao longo de um carril, fazendo com que o fio que está a sofrer tensão se desloque pela superfície de contacto com a rocha. Isto conduz a um desgaste desta por abrasão e, por conseguinte, leva ao corte da mesma. O fio diamantado é composto por um cabo de aço acoplado com pequenas pérolas diamantadas e intercaladas com separadores posicionados em intervalos constantes (Ozcelik et al., op. cit.).

Um correto uso do fio diamantado, ou seja, na perspetiva de uma procura máxima de eficiência, promove um menor gasto em custos operacionais por parte das empresas, dado que ocorre um menor desgaste do fio, proporcionando-lhe um maior tempo de vida útil (Yilmazkaya e Ozcelik, 2015).

Para planear o processo de corte, é necessário primeiramente estabelecer os parâmetros não controlados intervenientes neste, os quais se encontram ligados às propriedades físicas, mecânicas e texturais da rocha, sintetizadas na Tabela 2.1. Com o conhecimento destas, é então possível ajustar os parâmetros controlados, relacionados com a máquina, o fio e o operador, de modo a atingir o objetivo principal de máxima eficiência (Ghaysari et al., 2012).

O rendimento da operação encontra-se ainda dependente do tipo de corte efetuado. Os cortes verticais, regra geral, tendem a ter uma maior velocidade de corte em comparação com os realizados segundo a horizontal, nos quais o líquido de refrigeração conduz a fenómenos de aquaplanagem, dificultando o corte da rocha por abrasão (Marcon et al., 2012). Para além disso, para evitar possíveis interferências da gravidade no corte de um bloco, as operações realizadas segundo a horizontal devem anteceder sempre as de orientação vertical (Ozcelik et al., 2004).

Tabela 2.1. Parâmetros que influenciam o rendimento do corte com fio diamantado (adaptado de Ozcelik et al., 2004).

Parâmetros não controlados	Parâmetros controlados	
Propriedades da rocha	Propriedades da máquina de corte	Condições operacionais
<ul style="list-style-type: none"> • Dureza da rocha • Resistência da rocha • Teor em água • Grau de alteração • Descontinuidades • Composição mineralógica e textura 	<ul style="list-style-type: none"> • Potência da máquina • Velocidade do fio • Estrutura do fio diamantado • Dimensão do bloco • Geometria do fio durante o corte • Vibração da máquina • Consumo de água 	<ul style="list-style-type: none"> • Experiência do operador • Técnica usada (p. ex. corte ascendente ou descendente)

O estudo dos parâmetros não controlados foi alvo de várias investigações ao longo dos últimos anos, destacando-se os trabalhos de Ozcelik et al. (2004), Ghaysari et al. (2012), Ozcelik e Yilmazkaya (2011) e Zichella et al. (2017).

Ozcelik et al. (2004) analisaram a influência de algumas propriedades mineralógicas e texturais no desgaste das pérolas diamantadas. Para tal, analisaram amostras de mármore em superfícies finas de forma a avaliar o tamanho dos seus grãos, percentagem de calcite e conteúdo em mineral opaco.

Estes autores concluíram que estas três propriedades se encontram correlacionadas com o desgaste produzido no fio, na medida em que maiores dimensões do grão e elevadas percentagens de calcite e de minerais opacos na rocha conduzem a uma degradação mais rápida do fio.

Mais tarde, investigações conduzidas por Ghaysari et al. (2012) estudaram a influência das propriedades texturais da rocha na taxa de corte e analisaram, através do método de regressão dos mínimos quadrados, a relação entre ambas. Este estudo concluiu que a produção horária diminui com o aumento da área dos grãos, assim como para perímetros e diâmetro equivalentes elevados. Verificaram ainda a existência de uma relação linearmente negativa entre a homogeneidade do tamanho dos grãos e a taxa de corte.

Mais recentemente, Zichella et al. (2017) criaram uma metodologia de forma a auxiliar as empresas na avaliação da apetência ao corte da rocha com fio diamantado. A metodologia em causa teve por base a caracterização de diferentes tipos de rocha ao

nível da sua composição mineralógica, propriedades físicas e mecânicas, avaliadas através de testes de microdureza (método de Knoop) e medição da velocidade das ondas P e S.

Durante o processo de avaliação da apetência das rochas ao corte, Zichella et al. (2017) constataram que o desgaste do fio não é exclusivamente afetado pelo conteúdo em sílica, mas também pela compactação do material, que pode ser avaliada com a medição da velocidade das ondas P e S. Para além disso, tendo em consideração os resultados do método de Knoop, no qual é avaliada a abrasão dos minerais presentes nas rochas, os autores verificaram que, quando as mesmas apresentam minerais com baixas durezas a sua trabalhabilidade aumenta.

No que respeita à avaliação da influência das propriedades mecânicas da rocha no processo de corte, destaque-se ainda o trabalho de Ozcelik e Yilmazkaya (2011) onde se relaciona a influência da anisotropia e da resistência à compressão uniaxial dos mármore no desgaste produzido nas pérolas diamantadas, na energia despendida pela máquina e na taxa de corte.

A anisotropia presente nos mármore leva a que ocorram variações das propriedades físicas e mecânicas segundo a direção em análise. As discrepâncias existentes entre as direções podem ser ampliadas em função da presença de fissuras ou vergadas nos mármore. A presença de tal propriedade na rocha deve-se ao facto de esta ser composta essencialmente por minerais anisotrópicos, tais como a calcite, dispostos segundo uma orientação preferencial (Weiss et al., 2002).

De forma a descobrir a influência desta propriedade Ozcelik e Yilmazkaya (2011) realizaram vários cortes na rocha segundo diferentes orientações, que variam de paralelas a perpendiculares aos planos de foliação das rochas (Figura 2.5). Estes observaram a existência de uma relação linearmente positiva entre o desgaste das pérolas diamantadas e o ângulo formado, bem como no caso da energia despendida. Por outro lado, a correlação com a taxa de corte é linearmente negativa.

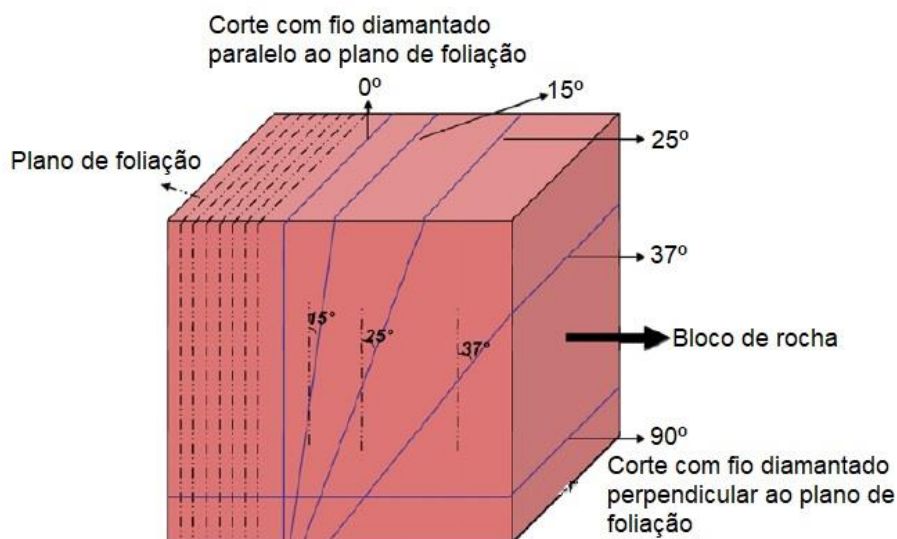


Figura 2.5. Ângulos formados entre os planos de corte e os planos de foliação (adaptado de Ozcelik e Yilmazkaya, 2011).

Ao nível da resistência à compressão uniaxial da rocha, estes autores concluíram que para resistências elevadas são registrados maiores gastos de energia e desgastes das pérolas, no entanto, para valores reduzidos, a taxa de corte é superior.

Para além dos estudos dos parâmetros não controlados referidos, existem ainda algumas investigações relacionadas com as propriedades da máquina (parâmetros controlados). Destes, salienta-se o trabalho de Jain et al. (2013), focando-se na preponderância da velocidade periférica e do impulso dado ao fio no corte de três tipos diferentes de mármore dolomíticos, com diferentes durezas. De um modo geral este afirma que, independentemente do tipo de mármore, quanto maior for a velocidade periférica ou impulso, maior será o desgaste produzido nas pérolas diamantadas, bem como para impulsos elevados ocorrem maiores taxas de corte.

Jain et al. (op. cit.) observaram também que as velocidades periféricas mais elevadas são aconselhadas no corte de mármore mais macios, enquanto que para durezas mais elevadas, os valores utilizados devem ser inferiores, de forma a obter um maior rendimento no corte.

2.3 Modelação de fracturas e avaliação da dimensão dos blocos

A dimensão dos blocos (blocometria) é um dos parâmetros mais importantes no domínio da exploração das rochas ornamentais, sendo que pode levar ao encerramento

de uma exploração, ou condicionar o seu início (Elci e Turk, 2014). O conhecimento desta propriedade possibilita também a gestão e minimização dos desperdícios decorrentes do processo de extração da rocha (Yarahmadi et al., 2018).

As dimensões de cada bloco vão condicionar as dimensões das lajes comercializadas obtidas na fase de processamento. Regra geral, a largura determina quantas lajes são possíveis de obter, já o seu comprimento e altura, definem a área das lajes (Mosch et al., 2011).

Perante tal relevância, os blocos potencialmente extraídos numa pedreira devem ser devidamente caracterizados em termos da sua geometria e volume máximo por localização na pedreira. Na generalidade dos casos, são sempre pretendidos pelas empresas blocos de grande volume, na ordem dos 6 a 8 m³. Em termos geométricos, os blocos devem apresentar faces regulares, de maneira a evitar possíveis perdas de tempo e custos acrescidos com a regularização das faces antes de entrarem na fase de processamento (Mosch et al., 2011).

A esquadria natural dos blocos encontra-se associada à interseção dos planos das discontinuidades com os planos de corte executados na frente de exploração. É assim necessária a caracterização dos planos de fractura ao nível da direção e inclinação, bem como do espaçamento entre fracturas sucessivas (Yarahmadi et al., 2018).

Os levantamentos de fracturação efetuados *in situ* em pedreiras a laborar são tradicionalmente efetuados segundo o método de janelas de amostragem, no qual são dispostas *scan-lines* ao longo de uma frente de extração, com orientação vertical ou horizontal (Yarahmadi et al., 2018). Nos últimos anos, surgiram novos meios de aquisição de dados como o Laser e o veículo aéreo não tripulado (VANT), mas usualmente são preteridos pelas empresas em função do método tradicional, devido ao seu baixo custo.

O sistema de fracturas pré-existente nos maciços rochosos condiciona fortemente a compartimentação do maciço rochoso em blocos, sendo então preferível sistemas com fracturas relativamente espaçadas, e onde os ângulos formados entre os planos de fractura com diferentes orientações sejam o mais próximo possível de 90°. Esta situação fomenta o aparecimento de blocos de grandes dimensões cujas faces apresentam poucas irregularidades (Mosch et al., 2011).

No âmbito da exploração de rocha ornamental têm sido realizados vários trabalhos ao nível da avaliação da blocometria, com o intuito de ajudar as empresas na tomada de decisão, numa fase antecedente à exploração (Elci e Turk, 2014), durante o processo de extração (Mosch et al., 2011), ou então em ambas as fases (Yarahmadi et al., 2018).

Elci e Turk (2014) focaram a sua investigação na avaliação da qualidade dos blocos de rocha (BQD). Estes aplicaram este critério em 11 pedreiras de calcário, situadas na Turquia, das quais 6 encontravam-se ativas enquanto que as restantes 5 estavam encerradas.

Os autores avaliaram a qualidade dos blocos de rocha de uma determinada massa rochosa, através da seguinte equação:

$$BQD \% = 100 \Sigma S_{\geq 1m} / L \quad (2.1)$$

onde L é o comprimento total da *scan-line* (m) e $\Sigma S_{\geq 1m}$ é o somatório dos espaçamentos entre descontinuidades, superiores ou iguais a 1 m. O BQD pode apresentar valores compreendidos entre 0 e 100.

Para a aplicação da equação 2.1, é necessário caracterizar as fracturas existentes, e nesse trabalho foram retiradas diversas fotografias às bancadas das pedreiras, as quais permitiram identificar os espaçamentos entre fracturas, iguais ou superiores a 1 m, existentes em cada linha de amostragem.

Após o cálculo do BQD, o autor verificou existir uma relação entre este e o funcionamento das pedreiras, na medida em que empresas no ativo apresentam valores superiores a 50 %, enquanto nas situações onde não ocorre exploração estes são inferiores a 50 %.

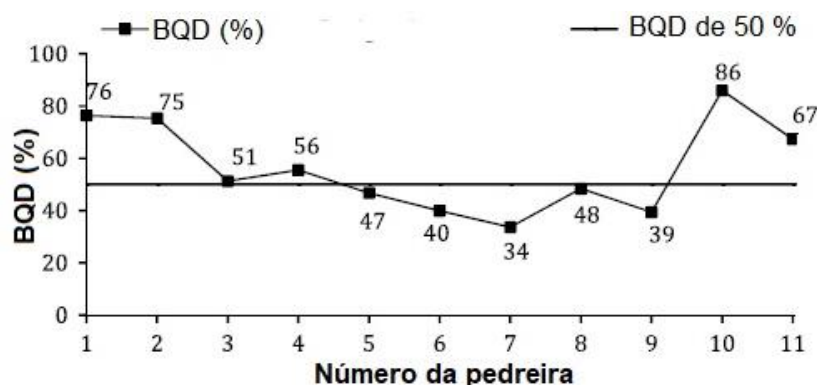


Figura 2.6. Qualidade dos blocos de rocha (BQD) das 11 pedreiras de calcário (adaptado de Elci e Turk, 2014).

Esta metodologia em análise mostrou ser um bom indicador da potencialidade de um maciço rochoso por explorar, sendo o fator de decisão para avançar ou não para a extração a existência de um BQD superior ou igual a 50 %. Através da equação 2.2, Elci e Turk (2014) conseguiram estimar o volume médio dos blocos existentes no maciço:

$$V_i = 1,88 \beta (BQD)^6 \times 10^{-12} \quad (2.2)$$

sendo V_i o volume médio dos blocos, β o fator da forma do bloco (geralmente considerado como sendo de 36) e BQD a qualidade dos blocos de rocha.

Contrastando com o método descrito anteriormente, Mosch et al. (2011) centraram os seus estudos na avaliação da blocometria em tempo real, no decurso da exploração, criando uma representação tridimensional dos blocos existentes numa determinada área da pedreira.

Esta representação só é possível com o recurso ao *software* 3D-BlockExpert desenvolvido por Nikolayew et al. (2007), Siegesmund et al. (2007) e Mosch et al. (2009) que, através da modelagem matemática do sistema de fracturas existente na frente de exploração, consegue criar uma representação aproximada dos blocos existentes *in situ*, permitindo avaliar a forma e o volume dos mesmos.

A modelagem do *software* passa pela criação de um paralelepípedo com dimensões iguais à frente de estudo, preenchido por pequenas células, designadas de *voxels*. A largura dos paralelepípedos encontra-se relacionada com a quantidade de secções bidimensionais criadas, paralelas à face em análise, cujo número é condicionado pela quantidade de *voxels* definidos para os modelos. No modelo gerado, o *software* atribui *voxels* de igual cor para cada um dos blocos e também os utiliza na criação dos planos de fractura, definidos no espaço com o recurso a três pontos, com coordenadas (x, y e z).

O resultado da modelação pode ser visualizado como um todo, ou então são observadas apenas as faces do modelo, ou o seu interior. Com base no conhecimento da forma e volume dos blocos, as empresas podem realizar um zonamento da pedreira ao nível das áreas onde não é rentável efetuar a exploração e, por outro lado, possibilita a estas ajustar os processos de extração, no sentido de um maior rendimento.

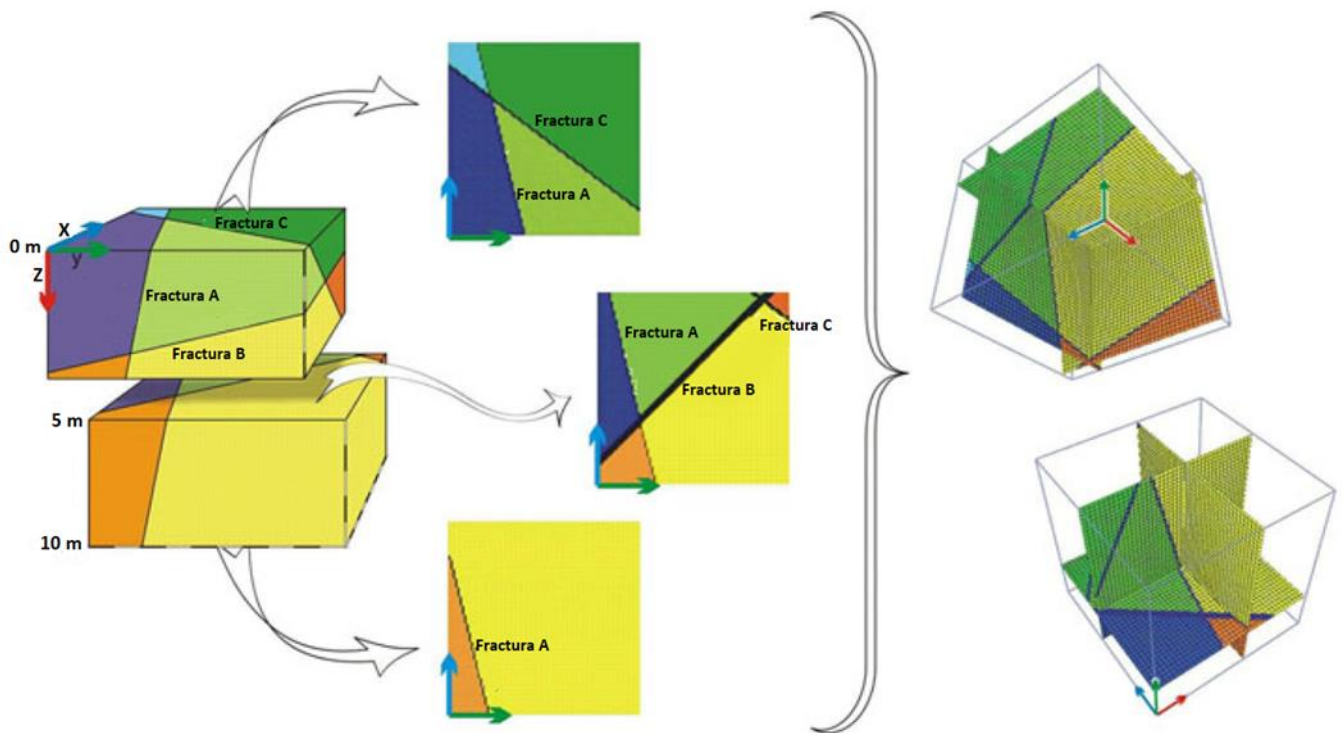


Figura 2.7. Exemplo dos resultados do software 3D-BlockExpert, com as respectivas visualizações das faces do modelo, e das secções bidimensionais do seu interior (adaptado de Mosch et al., 2011).

Como alternativa ao método proposto por Mosch et al. (2011) no acompanhamento da exploração em tempo real existe também o algoritmo proposto por Yarahmadi et al. (2018), 3DQuarryOptimizer, desenvolvido em MATLAB, para a avaliação da blocometria.

O presente método emprega na modelação do sistema de fracturas, o algoritmo de base numérica caracterizado por Jafari et al. (2013), que considera tanto as fracturas aleatórias, como as pertencentes a uma determinada família. O 3DQuarryOptimizer, tendo por base o sistema de fracturas modelado, realiza a avaliação da blocometria existente no modelo criado, em termos da sua forma e volume.

A avaliação da forma de cada bloco é conseguida através da atribuição de um fator de forma (BSF), o qual contabiliza a semelhança em termos de forma existente entre um qualquer bloco da pedra e um bloco padrão com faces retangulares (RRB). O cálculo do fator BSF é traduzido pela equação:

$$BSF_i = \frac{A_{RRB}}{A_{bi} + \sum \min A_{f > 6}} \quad (2.3)$$

onde BSF_i é o fator de forma para o i -ésimo bloco, A_{RRB} é a área de superfície de um bloco padrão de faces retangulares e A_{bi} é a área de superfície do i -ésimo bloco. Para blocos com mais de 6 faces, $\Sigma minA_{f>6}$ é o somatório da área das 6 menores faces.

No que respeita ao volume, o algoritmo após realizar o cálculo do mesmo para cada bloco, atribui a estes uma determinada cor, consoante a classe pertencente. A definição das classes de volume existentes é definida *a priori* como dado de entrada.

De acordo com os objetivos pretendidos pelas empresas para a modelação, são estipulados diferentes parâmetros de entrada para o programa. Se o objetivo for testar qual a melhor direção de extração a seguir, deve ser adotada uma abordagem de grande escala em que são tidos como parâmetros de entrada as características das três famílias principais de fracturas: direção, inclinação e espaçamento entre fracturas, presentes na área de estudo.

São também estabelecidas as características correspondentes aos padrões de corte (Figura 2.8), nomeadamente as dimensões das células que compõem a malha da área de estudo, e os critérios de classificação dos blocos, valores dos volumes estabelecidos de cada classe.



Figura 2.8. Processo de extração de um bloco de grandes dimensões numa pedreira de rocha ornamental (adaptado de Yarahmadi et al., 2018).

Consoante os dados de entrada, o *software* vai modelar várias direções de extração, até encontrar aquela que apresenta melhores blocos em termos de volume e de forma, definindo assim a melhor superfície segundo a qual se desenrolará a extração.

Na Figura 2.9, encontra-se representado um exemplo de aplicação do método para uma abordagem de grande escala, em que são ilustradas quatro direções de avanço possíveis para ser efetuada a extração perante o mesmo sistema de fracturas.

Dos blocos representados, os de melhor qualidade correspondem aos de cor verde, seguida da azul e amarela, enquanto os de cor vermelha não têm qualquer aproveitamento económico.

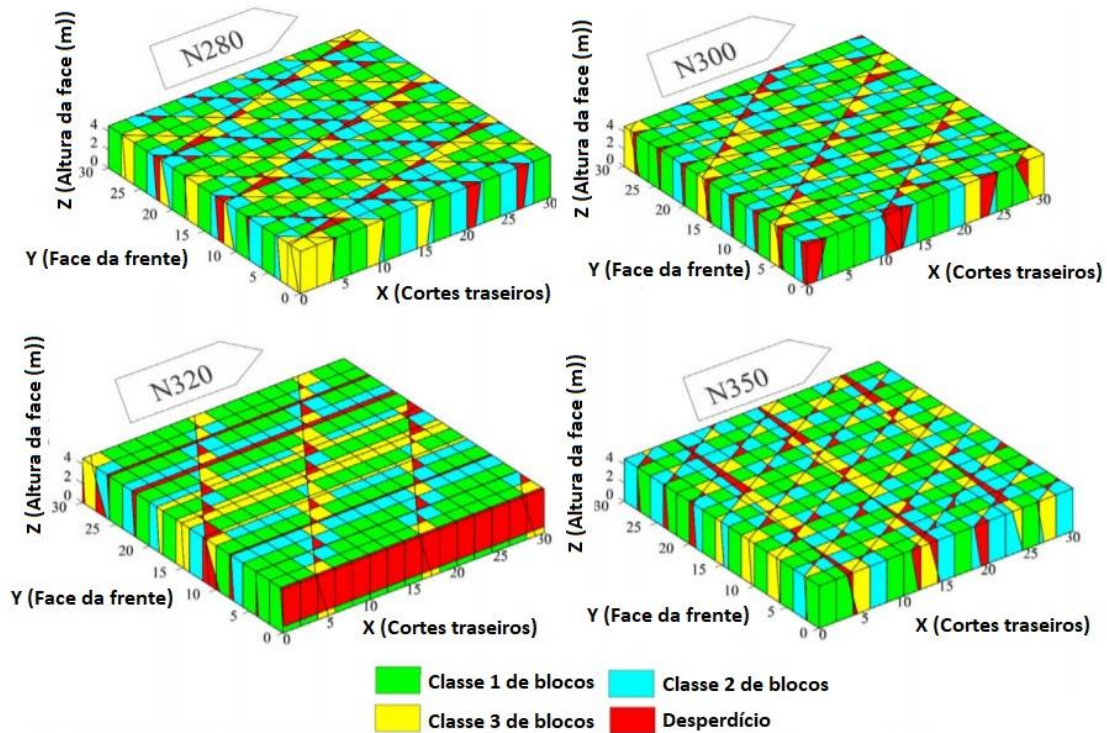


Figura 2.9. Comparação dos blocos formados nas quatro direções em análise (adaptado de Yarahmadi et al., 2018).

Por outro lado, o algoritmo efetua também análises de pequena escala, adequado para avaliar o melhor padrão de corte para uma determinada bancada, em que o algoritmo identifica o espaçamento ideal entre os planos de corte. Neste tipo de abordagem, os dados de entrada passam a ser as fracturas presentes na face de estudo e a menor e maior distância entre planos de corte admitida pelas empresas.

Na Figura 2.10, é ilustrado um exemplo de aplicação do algoritmo numa frente de exploração, cujos blocos formados resultam dos cortes efetuados segundo intervalos de 3 em 3 m, espaçamento considerado ideal pelo algoritmo.

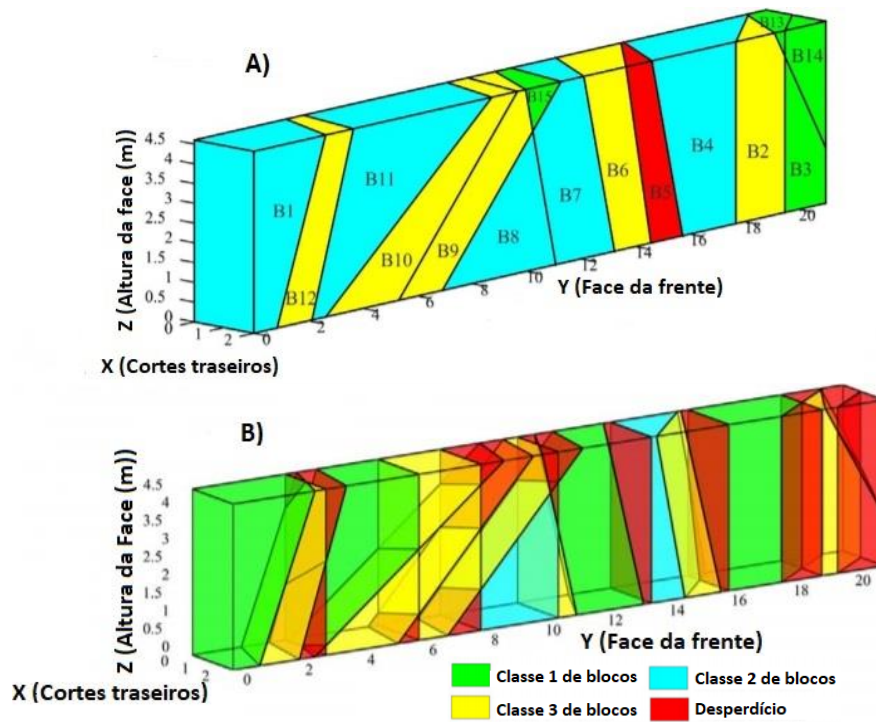


Figura 2.10. Exemplo da abordagem de pequena escala. (A) Blocos presentes na frente de estudo; (B) Blocos formados após a identificação do padrão de corte ideal para a frente de estudo (adaptado de Yarahmadi et al., 2018).

3 Caracterização geomecânica de maciços rochosos para a exploração de rochas ornamentais

3.1 Ensaios geomecânicos

A realização dos presentes ensaios teve como principal objetivo a caracterização geomecânica dos mármore explorados na pedreira estudada. A georreferenciação dos valores de resistência à compressão uniaxial (RCU) da rocha, obtidos nos ensaios, permitiu efetuar o zonamento do maciço segundo esta propriedade.

A resistência à compressão uniaxial da rocha foi determinada em laboratório com base no ensaio de provetes cilíndricos, provenientes de amostras retiradas da área de estudo. A totalidade das amostras apresenta provetes realizados segundo a orientação vertical e podem exibir ou não provetes orientados na horizontal.

Dado o insuficiente número de amostras para elaborar um zonamento extenso do maciço, efetuou-se *in situ* a estimação indireta desta propriedade, recorrendo-se ao ensaio com o martelo de Schmidt. Uma vez que o parâmetro obtido no ensaio se trata de uma dureza, foi necessário converter estas em resistências à compressão uniaxial. No presente trabalho, a conversão dos dados realizou-se estabelecendo uma equação que traduz a relação existente entre os valores de RCU e os do martelo de Schmidt, medidos na mesma amostra.

Apesar da velocidade das ondas P e S não ter sido considerada no zonamento do maciço, complementarmente realizou-se a sua medição, possibilitando assim uma caracterização mais exaustiva do ponto vista geomecânico dos mármore explorados na pedreira.

3.1.1 Resistência à compressão uniaxial

3.1.1.1 Ensaio laboratorial

A resistência à compressão uniaxial da rocha (RCU), obtida laboratorialmente, consistiu em submeter os provetes de rocha de forma progressiva a esforços de compressão simples, levando estes a desenvolverem deformações axiais até atingirem a rotura (Figura 3.1). Os provetes utilizados apresentam 4,9 cm de diâmetro, dimensão

equivalente ao diâmetro da caroteadora. A escolha deste diâmetro para a caroteadora deveu-se ao facto de as amostras utilizadas apresentarem dimensões reduzidas e formas irregulares. A altura dos provetes encontra-se compreendida entre os 9,8 cm e os 12,25 cm.



Figura 3.1. Provetes de rocha após a realização do ensaio.



Figura 3.2. Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão uniaxial no laboratório de Mecânica das Rochas do DCT FCT-NOVA.

O ensaio decorreu segundo as condições estipuladas pela norma NP EN 1926. 2006, mediante velocidades baixas de aplicação da carga por parte da prensa (Figura 3.2) até ser atingida a rotura dos provetes. Nesse momento, a prensa regista a carga máxima suportada pelos mesmos.

O valor da resistência à compressão uniaxial (kPa) é calculado pela seguinte equação:

$$RCU = \frac{F_c}{A} \quad (3.1)$$

onde F_c corresponde à carga aplicada (kN) e A representa a área da face do provete em (m^2).

Os valores obtidos em cada ensaio dependem da natureza da rocha, no que respeita ao seu estado de meteorização e á presença de discontinuidades como fracturas ou planos de foliação. As condições em que decorre o ensaio, como a direcção de aplicação da carga em rochas anisotrópicas, velocidade de aplicação desta e ajuste efetuado pelos pratos da máquina à superfície dos provetes, também tendem a influenciar os resultados (Vallejo et al., 2004)

O ajuste efetuado no início do ensaio pelos pratos é de elevada importância, pois garante uma distribuição uniforme da carga ao longo da face, impedindo assim a cedência do provete antes de ser atingida a carga máxima admitida pelo mesmo. Para minimizar tal situação, os provetes submetidos a ensaio apresentavam a sua superfície o mais regular possível.

3.1.1.2 Ensaio *in situ*

A resistência à compressão uniaxial da rocha foi estimada *in situ*, de forma expedita, com o auxílio do esclerómetro portátil, tradicionalmente conhecido como Martelo de Schmidt. A sua utilização permitiu uma melhor caracterização da variação dos valores de resistência ao longo de toda a área de estudo dado que, com elevada rapidez e facilidade de manuseamento se efetuaram várias medições, num curto espaço de tempo.

O aparelho apresenta uma ponta retrátil que, ao ser pressionada de encontro à rocha, vai acionar uma mola no seu interior cujo movimento é anotado ao longo de uma escala de 10 a 100 (sem unidades) existente na parte exterior do aparelho, indicadora da dureza da rocha

Antes de ser efetuada qualquer medição, submeteu-se a superfície da rocha a uma lixa de forma a eliminar qualquer rugosidade, grãos soltos ou pequenas camadas de material meteorizado que pudessem influenciar as leituras. Para além disso, sempre que foram efetuadas medições na vertical, garantiu-se a existência de uma certa distância entre a zona de medição e os limites dos pisos. Este procedimento minimiza possíveis dissipações da energia de impacto, que levariam à obtenção de valores inferiores à realidade (Cargill e Shakoor, 1990).

Por cada ponto do maciço em análise, realizaram-se 10 medições sucessivas com o esclerómetro posicionado perpendicularmente em relação à superfície de amostragem, em conformidade com a norma (ISRM, 1981). Esta norma determina ainda a eliminação das 5 leituras mais baixas, enquanto as restantes são usadas no cálculo da média das leituras, correspondente ao valor da dureza de Schmidt para a localização em causa.

Tradicionalmente, cada valor obtido pode ser convertido numa determinada resistência à compressão uniaxial através do ábaco de Miller, onde esta é lida no eixo das ordenadas. O ábaco tem como dados de entrada a dureza de Schmidt, segundo a

posição em que se encontrava o martelo em relação à superfície de amostragem, e a densidade da rocha (Vallejo et al., 2004).

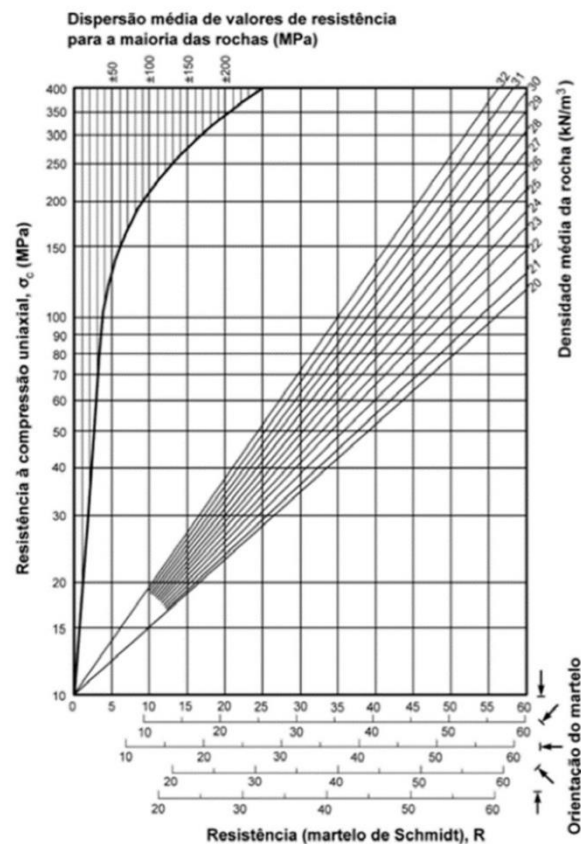


Figura 3.3. Ábaco de Miller (adaptado de Vallejo et al., 2004).

Mais recentemente, autores como Aydin e Basu (2005); Aliabdo e Elmoaty (2012); e Liu et al., (2019), defendem que a conversão das durezas de Schmidt em resistências deve ser realizada com base na relação existente entre os RCUs obtidos em laboratório e as durezas medidas com o esclerómetro. A precisão dos resultados depende da correlação observada entre estas 2 medições, dureza de Schmidt e RCU.

No caso particular dos mármore, Aliabdo e Elmoaty (2012) constataram a existência de uma correlação razoável entre ambas as medições, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,65 para um modelo linear, aumentando para 0,76 num modelo não linear. Enquanto Liu, Zhang e Li (2019), nos seus estudos, tal correlação apresenta um R^2 de 0,61 para um modelo linear.

Atendendo ao facto de os valores obtidos, nestes estudos, para o coeficiente de determinação, serem relativamente significativos, adotou-se uma abordagem semelhante no presente trabalho, para a estimação da RCU. A correlação estabelecida

para a área de estudo teve em conta os valores de dureza, medidos antes da retirada das amostras, e o RCU dos provetes realizados segundo a orientação vertical.

3.1.2 Velocidade das ondas P e S

Na medição da velocidade das ondas P e S utilizou-se o dispositivo *PunditLab+*, o qual foi ligado a dois pares de transdutores com diferentes características consoante o tipo de onda a medir, mas em que o princípio de medição é o mesmo. As amostras utilizadas consistiram nos provetes que viriam a ser submetidos ao ensaio de resistência à compressão uniaxial, mencionados na secção 3.1.1.1.

Em ambos os casos, as medições efetuam-se segundo o maior eixo do provete, colocando em contacto com as suas extremidades dois transdutores, onde um destes induz um pulso de onda no provete, enquanto o outro identifica o momento da chegada da onda à face oposta (Figura 3.4). O tempo de chegada é então medido pelo *PunditLab+* (Proceq SA, 2017). Dado o comprimento dos provetes ser inserido no instrumento antes da realização do ensaio, este calcula automaticamente a velocidade de propagação das ondas P (Figura 3.5).



Figura 3.4. Medição da velocidade de propagação das ondas P.



Figura 3.5. Resultado de uma medição realizada pelo *PunditLab+*.

No caso das ondas S, a velocidade de propagação não é visualizada diretamente no ecrã do *PunditLab+*, sendo necessário utilizar o *software PunditLink* para a obtenção da velocidade. O *software* permite visualizar o gráfico de chegada das ondas, em que a primeira onda registada com uma elevada amplitude corresponde a uma onda S (Proceq SA, 2013). Após a identificação desta no gráfico, o *PunditLink* indica o tempo de chegada da mesma e a sua velocidade.

Antes de se proceder aos ensaios, as superfícies dos provetes foram devidamente limpas para impedir a presença de pequenas impurezas e ainda barradas com uma pequena camada de vaselina, proporcionando desta forma uma boa ligação entre os provetes e os transdutores. Nesta fase, o instrumento foi também calibrado com um provete fornecido pelo fabricante, apresentando um tempo de propagação de ondas P conhecido (Proceq SA, 2017).

Na medição das ondas P, os transdutores utilizados apresentavam 54 kHz de frequência, enquanto para as ondas S a frequência era de 250 kHz. Durante os ensaios os transdutores careceram de estar sempre segundo a mesma direção e, além disso, foi necessário exercer pressão nos mesmos de encontro aos provetes.

O conhecimento da velocidade de propagação das ondas P permitiu caracterizar os mármores da pedreira ao nível da sua anisotropia. O cálculo desta propriedade foi efetuado para cada amostra que apresentava provetes realizados segundo diferentes orientações. Das amostras cartearam-se provetes segundo uma direção vertical e outra horizontal ou uma direção vertical e duas horizontais, perpendiculares entre si.

Em ambas as situações, a anisotropia calculada, denominada de anisotropia sísmica (A_{VP}), resulta da seguinte equação:

$$A_{VP} = \frac{V_{Pmax} - V_{Pmin}}{V_{Pmax}} \quad (3.2)$$

onde V_{Pmin} e V_{Pmax} , são as velocidades mínima e máxima das ondas P registadas nas direções em análise (Liu et al., 2019).

3.2 Ensaio geoquímicos

No presente trabalho, os ensaios geoquímicos desenvolvidos permitiram analisar a composição química dos mármores, identificando os elementos químicos presentes e a sua concentração. Dos elementos caracterizados estudou-se mais pormenorizadamente a presença de sílica, pois foi com base nesta que se realizou o zonamento do maciço, em termos do desgaste potencialmente produzido nas ferramentas envolvidas nas operações de corte e perfuração.

As amostras analisadas consistiram em pastilhas prensadas representativas de cada um dos provetes, submetidas aos ensaios mencionados na secção 3.1.1, em que

por cada provete foram feitas duas pastilhas. A análise química destas realizou-se por meio do ensaio de fluorescência de raios-X (XRF) através de um equipamento portátil.

Metade das pastilhas realizadas foi, ainda, analisada mediante um dispositivo portátil de espectroscopia de rotura induzida por laser (LIBS) que, quando comparada com o XRF, é mais expedita e rápida. A realização desta dupla análise das amostras permitiu estabelecer uma correlação entre os valores obtidos para a sílica nos ensaios LIBS e XRF.

O conhecimento desta relação, no presente estudo, visa aferir se a ferramenta LIBS consegue estimar com elevada precisão as concentrações de sílica. E caso tal aconteça, demonstra-se que a mesma pode ser utilizada *in situ* pelas pedreiras, na determinação desta propriedade.

3.2.1 Análise química com XRF

O ensaio de fluorescência de raios-X (XRF) consistiu na emissão por parte de uma pistola de um feixe de raios-X de alta energia, de encontro às amostras analisadas, originando a excitação dos átomos presentes nas mesmas. No interior dos átomos ocorre a movimentação de eletrões entre as diferentes orbitais, o que leva à libertação de energia, fenómeno designado de fluorescência (Jones et al., 1997).



Figura 3.6. Instrumento portátil de XRF utilizado para a medição das concentrações dos elementos presentes nas amostras (Fonte: ThermoFisher SCIENTIFIC, 2018).

A energia libertada é então recolhida pela pistola sobre a forma de um espectro de raios-X, onde cada linha espectral representa um determinado elemento químico presente na amostra. Dado cada elemento apresentar um intervalo de energias

característico para a emissão de raios-X, foi possível identificar os mesmos (Newman e Loendorf, 2005).

Dos elementos químicos presentes na tabela periódica, a ferramenta utilizada está calibrada para identificar 25 destes, com números atômicos compreendidos entre o enxofre e o urânio, sendo ainda possível, com a criação de uma atmosfera de hélio, reconhecer elementos leves adicionais como Mg, Al, Si (ThermoFisher SCIENTIFIC, 2018).

O dispositivo realiza ainda a leitura da intensidade, quantidade de raios-X produzidos por segundo com uma determinada energia, para cada uma das linhas espectrais que compõe o espectro. A intensidade medida depende da concentração do elemento presente na amostra, com a qual estabelece uma relação diretamente proporcional (Jones et al., 1997).

Com o emprego de uma correta calibração, o conjunto das intensidades registadas para cada elemento são utilizadas no cálculo da concentração do mesmo. No presente trabalho a calibração é realizada automaticamente pelo software, com base no método dos parâmetros fundamentais (SciAps, 2019).

As amostras utilizadas consistiram em pequenas pastilhas com 2 cm de diâmetro, resultando da aplicação de uma carga de 12 toneladas sobre um resíduo, com o recurso a uma prensa. O resíduo em causa consistiu na mistura de um volume de 10 ml de pó de rocha com 2 gotas de moviol, utilizado como aglomerante. De modo a salvar a representatividade da amostra de pó, esta foi espalhada num tabuleiro e dividida em quatro quadrantes, sendo retirado de cada um destes uma pequena quantidade até perfazer o volume aproximado de 10 ml.

Cada par de pastilhas representa um dos provetes utilizados nos ensaios geomecânicos, os quais foram britados e deram origem ao pó utilizado. Com o aparelho realizaram-se duas medições por pastilha, na parte superior e inferior desta, no interior de uma câmara de hélio, com uma duração total de 360 segundos. As concentrações dos elementos presentes nas pastilhas resultam da média das duas medições, enquanto os valores obtidos por provete corresponderam à média das pastilhas representativas dos mesmos.

As leituras, ao serem efetuadas em amostras compactadas, diminuíram os ruídos criados no espectro que levariam à leitura de menores intensidades e atribuição de concentrações inferiores aos valores reais (Jones et al., 1997).

3.2.2 Análise química com LIBS

A espectroscopia de rotura induzida por laser (LIBS) é um ensaio alternativo ao descrito na secção 3.2.1, que foi utilizado na análise de metade das pastilhas submetidas ao ensaio de XRF. Este ensaio, quando comparado com o XRF tem, como principais vantagens, o facto de ser mais sensível e expedito.



Figura 3.7. Instrumento LIBS Z-300 utilizado
(Fonte: SciAps, 2019).

O modo de funcionamento do LIBS traduz-se pela emissão de um pulso laser de alta energia, de encontro às pastilhas analisadas. O laser, ao entrar em contacto com a amostra leva ao aquecimento da sua superfície, originando um plasma de altas temperaturas, na ordem dos 10000 K, que acaba por libertar radiação num curto intervalo de tempo (Costa et al., 2019).

Os vários comprimentos de onda que compõe uma radiação emitida são recolhidos pelo dispositivo e compilados num único espectro, composto por vários picos (SciAps, 2019).

O *software* presente na ferramenta, com base na identificação dos comprimentos de onda correspondentes a cada pico, atribui a cada um destes um determinado elemento químico. A análise efetuada, só foi possível devido ao facto de o *software* possuir uma base de dados espectral NIST (National Institute of Standards and Technology), onde se encontram descritos os comprimentos de onda característicos destas emissões de todos os elementos químicos da tabela periódica. (Gondal et al., 2009).

A elevada sensibilidade do instrumento permite-lhe captar uma grande variedade de comprimentos de onda compreendidos entre os 180 nm e os 961 nm, possibilitando assim a identificação de praticamente todos os elementos da tabela periódica.

Para além da análise qualitativa das amostras, a ferramenta LIBS realiza o estudo quantitativo das mesmas, com base no cálculo da intensidade média dos picos identificados no espectro, como pertencentes a um determinado elemento (assinatura). Uma vez que os valores obtidos se referem a intensidades, é necessário estabelecer uma correta calibração dos dados de modo a converter estas em concentrações. A calibração é conseguida a partir dos valores medidos por outros métodos, como o XRF (SciAps, 2019). No presente trabalho, tal calibração não foi necessária, dado que apenas se pretende descobrir se as concentrações de sílica medidas pelo XRF e as intensidades lidas no LIBS, para o mesmo elemento, são correlacionáveis. Caso esta situação se verifique, prova-se que a ferramenta LIBS é adequada para realizar a medição *in situ* das concentrações de sílica, necessitando apenas de uma calibração inicial para o caso de estudo.

3.3 Estudo da fracturação e dimensão dos blocos

3.3.1 Metodologia proposta

A metodologia proposta tem como finalidade a avaliação da taxa de recuperação presente na pedra. Na Figura 3.8 é apresentado o fluxograma da metodologia proposta, com a identificação das suas etapas principais.

A presente metodologia inicia-se com a recolha *in situ* da informação relativa às fracturas, através do método das *scan-lines*, onde é identificada a orientação de todas as fracturas que interseccionam as linhas de amostragem.

Posteriormente, é realizado o tratamento dos dados recolhidos com a projeção dos polos das fracturas num diagrama de Schmidt, conseguindo-se assim identificar as principais famílias de fracturas existentes no maciço. Na mesma etapa é efetuada a caracterização das famílias de fracturas ao nível da sua orientação (azimute e inclinação), do parâmetro Fisher (k) e da sua frequência. Para além disso, é calculada ainda a densidade linear, por família e global (para todas as fracturas).

Seguidamente, tendo como dados de entrada a orientação e frequência de cada família e a densidade linear global de fracturas, o software FTRIAN, desenvolvido na FCT - NOVA (Almeida e Barbosa, 2008), realiza a modelação 3D do sistema de fracturas,

através de uma modelação por objetos. Concluído o processo de criação de fracturas, o algoritmo avalia a blocometria existente no modelo gerado.

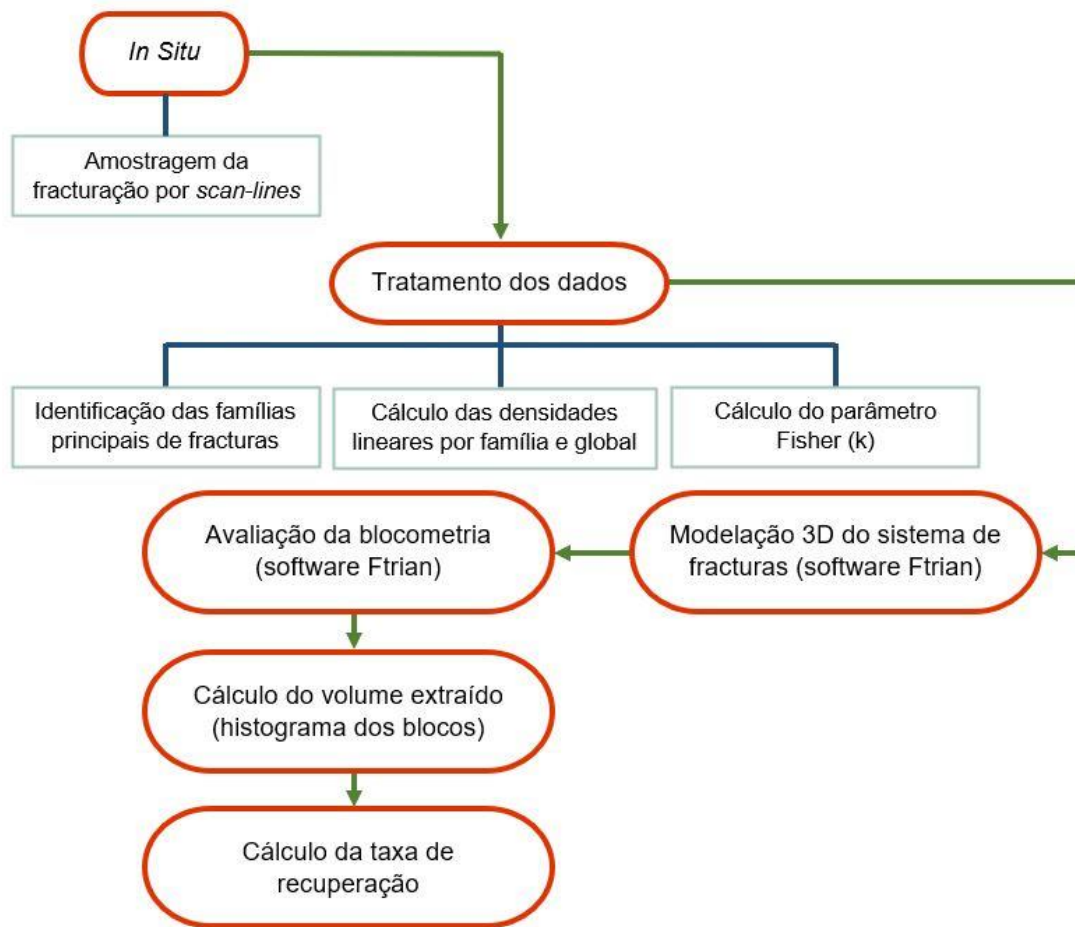


Figura 3.8. Etapas da metodologia proposta para avaliação da blocometria e da taxa de recuperação.

A metodologia descrita é finalizada com a determinação da taxa de recuperação, calculada com base no volume dos blocos identificados pelo software.

No estudo em causa a taxa de recuperação foi avaliada para 3 situações, em que por cada uma destas foram efetuadas pelo software FTRIAN 20 realizações com a mesma probabilidade de ocorrência, de forma a conseguir-se estabelecer perante os mesmos dados de entrada, qual seria o intervalo de recuperações possíveis de se obter nas situações em análise.

Para além da avaliação da recuperação esperada na pedra, foi ainda analisado um outro cenário, em que os planos das frentes de exploração se encontravam orientados de acordo com os pontos cardeais. O posicionamento das frentes, segundo os pontos cardeais, implicou um ajuste por rotação de 45° na direção das mesmas.

Para o novo cenário, mais uma vez, foram realizadas 20 simulações por modelo, onde a mediana da taxa de recuperação das simulações foi comparada com o valor obtido no cenário existente na pedreira, de modo a compreender se esta nova opção seria mais vantajosa para a exploração.

3.3.2 Levantamento de fracturas “*in situ*”

O processo de levantamento realizado nas frentes de exploração visa o conhecimento do sistema de fracturas presente no maciço rochoso, contemplando o estender de um segmento de reta, tradicionalmente conhecido como *scan-line*, ao longo da superfície de amostragem, no qual são identificadas todas as fracturas intersectadas pela linha (Figura 3.9) (Almeida et al., 2003). Idealmente, a disposição das linhas deve ser condicionada pela orientação das fracturas presentes na frente, possibilitando assim um ajuste praticamente perpendicular entre as discontinuidades e a linha de amostragem (Vallejo et al., 2004).

Esta situação acaba por ser impraticável na medida em que num maciço existe uma grande heterogeneidade relativa à orientação das fracturas, implicando a colocação de um elevado número de linhas de amostragem (Vallejo et al., 2004). Perante tais condicionalismos, autores como Almeida et al. (2003), aconselham sempre que possível a colocação de 2 linhas de amostragem com orientação vertical e horizontal por frente de estudo, permitindo o mapeamento de fracturas horizontais e verticais.

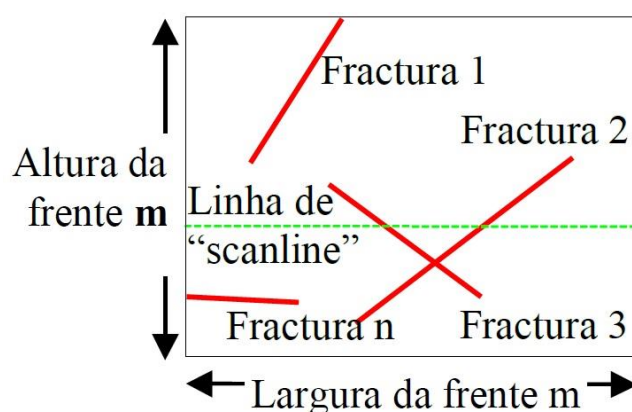


Figura 3.9. Método das *scan-lines* (adaptado de Luís et al., 2005).

No trabalho em causa, o levantamento efetuou-se com base em 4 linhas de amostragem a 1,3 m de altura do piso, segundo uma orientação horizontal, não sendo

necessário uma segunda linha com orientação vertical, uma vez que após a observação das superfícies de amostragem constatou-se que não ocorriam fracturas horizontais.

Tentou-se que todas as scan-lines apresentassem dimensões semelhantes, de forma a que o peso de cada fractura identificada fosse igual no cálculo da densidade linear das diferentes linhas. As zonas alvo de análise localizam-se nos pisos da pedreira, tendo sido consideradas duas superfícies de amostragem por cada um daqueles com uma configuração perpendicular. Ao ser definido *scan-lines* com diferentes orientações, tentou mapear-se todas as direções de fracturas presentes no maciço com igual representatividade.

Na medição da orientação das fracturas foi utilizada a bússola de geólogo quer para a identificação do azimute, traduzido pela diferença de direção existente entre a linha de maior declive presente no plano de descontinuidade e o Norte, quer no registo da inclinação do plano a partir da horizontal (Vallejo et al., 2004).

A caracterização das fracturas ao nível da orientação permite agrupar as mesmas em famílias quando apresentam semelhantes azimutes e inclinações, ou então não se enquadram em nenhum dos conjuntos definidos e designam-se de fracturas com orientação errática. A presença de fracturas erráticas não deve ser descorada, pois podem conduzir a uma maior compartimentação do maciço (Luís et al., 2005).

A análise dos dados, relativa às orientações levantadas *in situ*, foi efetuada no *software* Leapfrog, que representa os polos dos planos de fractura num diagrama de Schmidt e, posteriormente, cria um mapa de cores ilustrativo da densidade de polos presentes em cada zona do diagrama. Com o conhecimento das regiões com maiores concentrações, é possível ao utilizador definir as famílias de fracturas presentes. Concluído tal processo, o programa classifica cada polo relativamente à família a que este pertence, assim como atribui aos conjuntos definidos uma determinada orientação.

O *software* Leapfrog calcula ainda a dispersão dos valores de orientação das fracturas pertencentes a uma determinada família, através de um dos parâmetros da distribuição Fisher, usualmente conhecido como o valor de Fisher (k). Este parâmetro é determinado com base na seguinte equação:

$$k = \frac{(n-1)}{(n-R)} \quad (3.3)$$

onde R representa o comprimento do vetor orientação média do conjunto em análise e N o número de polos pertencentes ao mesmo (Fisher et al., 1993).

O comprimento do vetor orientação média do conjunto em análise traduz o comprimento do somatório dos vários vetores individuais representativos de cada um dos polos do conjunto, sendo este expresso na seguinte equação:

$$R = \sqrt{(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2 + (\sum Z_i)^2} \quad (3.4)$$

em que X, Y e Z são as coordenadas cartesianas dos vetores (Mardia, 1972).

As coordenadas cartesianas dos vetores individuais são calculadas com base no seguinte conjunto de equações:

$$X = \cos(\text{Azimute}) \cos(\text{Inclinação}) \quad (3.5)$$

$$Y = \sin(\text{Azimute}) \cos(\text{Inclinação}) \quad (3.6)$$

$$Z = \sin(\text{Inclinação}) \quad (3.7)$$

sendo *Azimute* e *Inclinação* a orientação da fractura representada (Mardia, 1972).

Identificadas as famílias é então possível definir o sistema de fracturas presente no maciço, para posterior avaliação da blocometria. Segundo Luís et al. (2005), existem três formas de caracterizar o mesmo:

- Consideração de um número fixo de famílias, geralmente 3 a 4.
- Consideração de todas as famílias presentes no maciço, em que um elevado número torna o estudo inviável.
- Consideração de um número fixo de famílias e ainda um grupo adicional com todas as fracturas não englobadas em famílias.

Dado ser utilizado na modelação de fracturas, o programa FTRIAN mencionado na secção 3.3.3, e este considerar apenas informações provenientes de conjuntos de fracturas, optou-se por caracterizar o sistema de fracturas como apresentando quatro famílias principais e um quinto conjunto com todas as fracturas erráticas (não classificadas).

Para além do conhecimento da orientação das fracturas, deve ser tido ainda em consideração a sua densidade linear, descrita como a razão existente entre o número de fracturas e o comprimento da linha de amostragem (Luís et al., 2005). No presente trabalho, a densidade linear de fracturação foi calculada condicionalmente para todas

as famílias de fracturas. Calculou-se ainda a densidade linear global presente nas áreas de estudo e o valor médio existente na pedreira.

3.3.3 Modelação de fracturas e avaliação da dimensão dos blocos (software FTRIAN)

O *software* FTRIAN é um algoritmo escrito na linguagem C, desenvolvido no DCT da FCT-NOVA, que efetua a modelação 3D das fracturas existentes num maciço rochoso, através de uma malha de triângulos. A aplicação deste método na área das rochas ornamentais permite avaliar a blocometria presente nas pedreiras, essencial para o cálculo da taxa de recuperação das mesmas.

O volume do maciço da pedreira em análise é interpretado pelo programa como sendo um paralelepípedo com coordenadas e dimensões X, Y e Z, sendo no seu interior gerado um conjunto aleatório de vários pontos (sementes). Cada semente encontra-se associada a uma fractura com um determinado azimute e inclinação, de acordo com a família que lhe foi atribuída. O número de pontos por família criados no modelo respeita as frequências das mesmas definidas *a priori* (Gomes e Almeida, 2006).

De forma aleatória, o algoritmo escolhe uma das sementes e inicia a formação do plano da primeira fratura correspondente a um quadrado ou retângulo, através do desenvolvimento do vetor \vec{u} de direção igual ao plano de fractura e do vetor \vec{v} , perpendicular a \vec{u} , cuja origem é a semente (I) (Figura 3.10) (Almeida e Barbosa, 2008). O tamanho do vetor \vec{u} é condicionado pela área simulada para o plano da fratura. (Amaro, 2018)

Após o estabelecimento dos vetores, é gerada uma rotação de valor aleatório (θ), em torno de \vec{v} , com origem na terminação de \vec{u} (II), a qual é finalizada com a definição do primeiro vértice, V1 (Almeida e Barbosa, 2008). A formação dos restantes vértices, V2, V3 e V4, no caso do plano de fractura ser um quadrado, correspondem a três rotações sucessivas de 90° a partir do vértice V1 (Figura 3.10), onde $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$, enquanto que, num retângulo, θ_1 é igual a θ_3 e inferior a 90° e θ_2 é igual a θ_4 , mas superior a 90° .

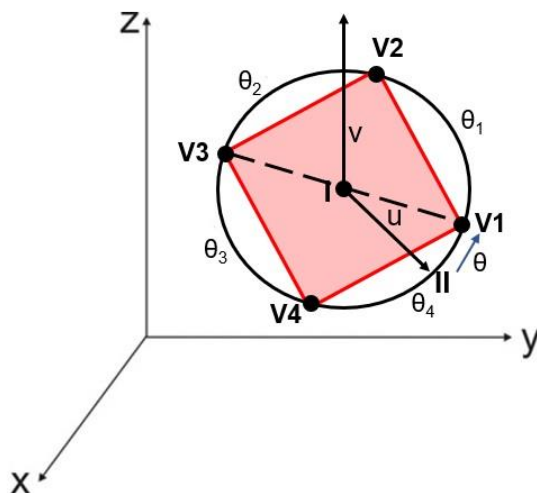


Figura 3.10. Processo de formação do plano de uma fratura através de 2 triângulos adjacentes (quadrado).

Seguidamente, o *software* FTRIAN avalia se os vértices do plano da fratura gerada se encontram todos no interior do volume em estudo e, caso tal não aconteça, o mesmo é redesenhado de forma a que todos os seus limites fiquem contidos no modelo (Amaro, 2018).

Finalizada a construção da superfície de uma fratura, correspondente a uma iteração no algoritmo, o *software* avalia a densidade linear das fracturas já modeladas nas iterações anteriores, através do traçar de várias linhas de amostragem localizadas aleatoriamente, ao longo do mesmo, e apresentando orientações iguais às efetuadas no trabalho de campo.

O valor medido é então comparado com a densidade linear amostrada *in situ*, definida como dado de entrada. Caso este seja inferior, o programa passa para a iteração seguinte, com a escolha aleatória de uma outra semente e, por sua vez, levando ao desenvolvimento de um novo plano de fratura. O processo iterativo em causa só termina quando após conclusão de uma iteração for medida no modelo uma densidade superior à amostrada *in situ*.

Concluída a geração das fracturas (retângulos ou quadrados), o algoritmo particiona o volume de estudo numa malha de pequenos blocos (micro blocos), com vista à estimação da blocometria existente no maciço. Os blocos criados apresentam todas as suas arestas iguais, estando as dimensões destas compreendidas no intervalo estipulado pelo utilizador como dado de entrada.

O processo de criação dos blocos, efetuado pelo *software*, contempla o desenvolvimento destes no espaço livre existente entre fracturas adjacentes, onde o

algoritmo tenta colocar um conjunto de blocos com a maior dimensão possível de aresta, mas sem nunca intersectar os planos das fracturas.

Após a finalização de uma simulação, o *software* FTRIAN apresenta os resultados da mesma em 4 ficheiros, encontrando-se em dois destes resumidas as informações relativas às fracturas criadas, enquanto os restantes se referem a avaliação da blocometria existente no modelo

Os dados alusivos às fracturas podem ser importados no *software* Leapfrog, permitindo assim a visualização 3D dos planos de fractura modelados (Fig. 3.11) através de uma malha de triângulos, em que a localização espacial dos seus vértices se encontra discriminada num dos ficheiros.

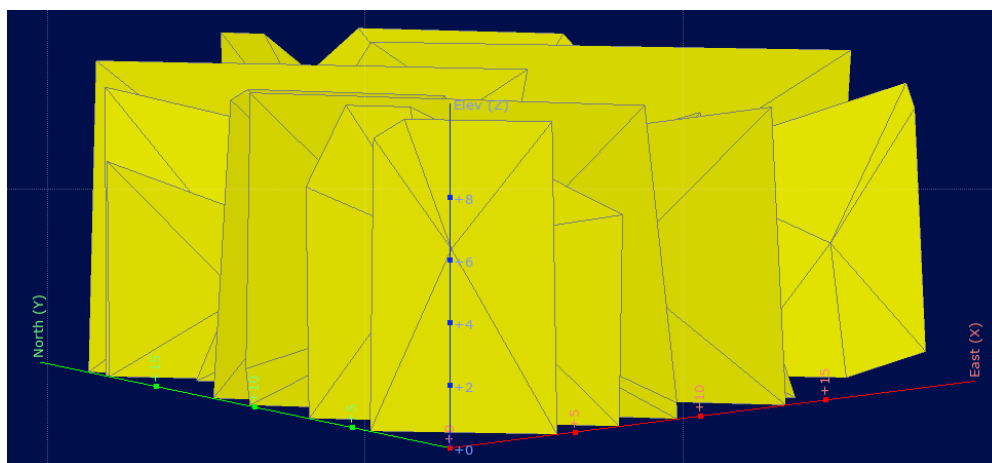


Figura 3.11. Exemplo dos planos de fractura criados para uma família de fracturas com uma intensidade de fracturas por metro linear (P10) de 0,69.

Para além disso, é também possível realizar a análise estatística das fracturas modeladas tendo por base o outro arquivo criado referente às fracturas, no qual cada linha deste representa uma fractura com as coordenadas do seu centro de gravidade, a família pertencente, e o seu azimute e inclinação. Os dados ao serem importados pelo *software* são visualizados sobre a forma de discos orientados de acordo com a direção da fractura que representam, Figura 3.12 (esquerda).

Importada a informação consegue-se realizar a projeção estereográfica das fracturas (Figura 3.12 (direita)), permitindo assim a obtenção da tabela estatística de Fisher, a qual apresenta a informação por família em termos da orientação média, parâmetro Fisher e número de fracturas. O conhecimento da mesma revela alguma importância, pois permite validar uma simulação, através da comparação dos valores modelados com os dados de entrada estipulados para cada conjunto.

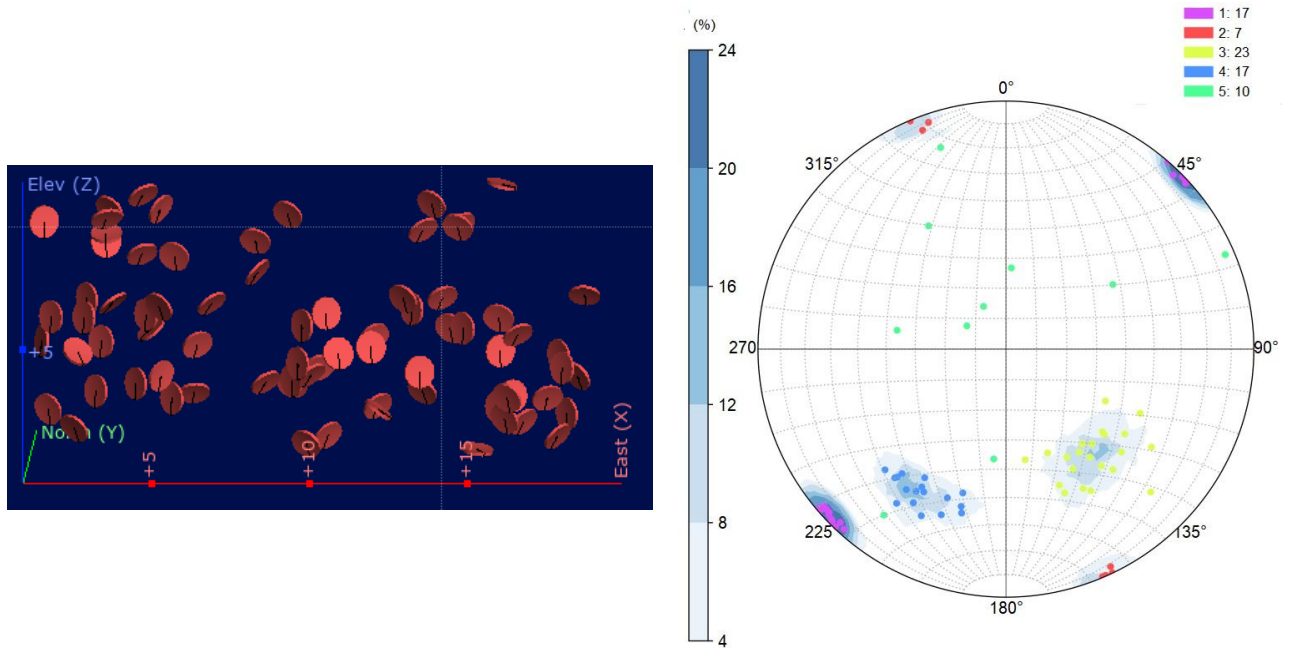


Figura 3.12. Exemplo da representação espacial dos planos de fractura importados (esquerda); respetiva projeção estereográfica das fracturas importadas (direita).

No que respeita aos resultados da blocometria, num dos ficheiros originados é reportada a informação relativa ao número de blocos formados em função da dimensão das suas arestas. Tendo por base tal informação, é então possível calcular o volume extraído na zona de estudo com base na seguinte equação:

$$\text{Volume extraído} = \Sigma ((a_1)^3) \times n) + ((a_2)^3) \times n) \dots \quad (3.8)$$

onde a é o tamanho da aresta do bloco e n representa o número de blocos sem fracturas com este comprimento de aresta.

Por conseguinte, é calculada a taxa de recuperação presente no modelo, expressa na seguinte equação:

$$\text{Taxa de recuperação} = \frac{V_e}{V_t} \times 100\% \quad (3.9)$$

sendo V_e o volume extraído e o V_m o volume total do modelo.

O outro arquivo gerado relativo à blocometria é importado no *software* Leapfrog, possibilitando a visualização 3D da blocometria existente no maciço (Figura 3.13 (esquerda)). Por cada linha deste, encontra-se um código numérico e a descrição da posição espacial do centroide de um cubo, em que as dimensões das suas arestas correspondem à resolução do modelo. O número de linhas presentes no mesmo é

determinada pela quantidade de cubos necessários para descrever o volume total do modelo criado.

Os cubos formadores de um determinado bloco vão apresentar iguais códigos numéricos (Figura 3.13 (direita)) sendo atribuído aos blocos aproveitados presentes no modelo, valores iguais ou superiores a 2.

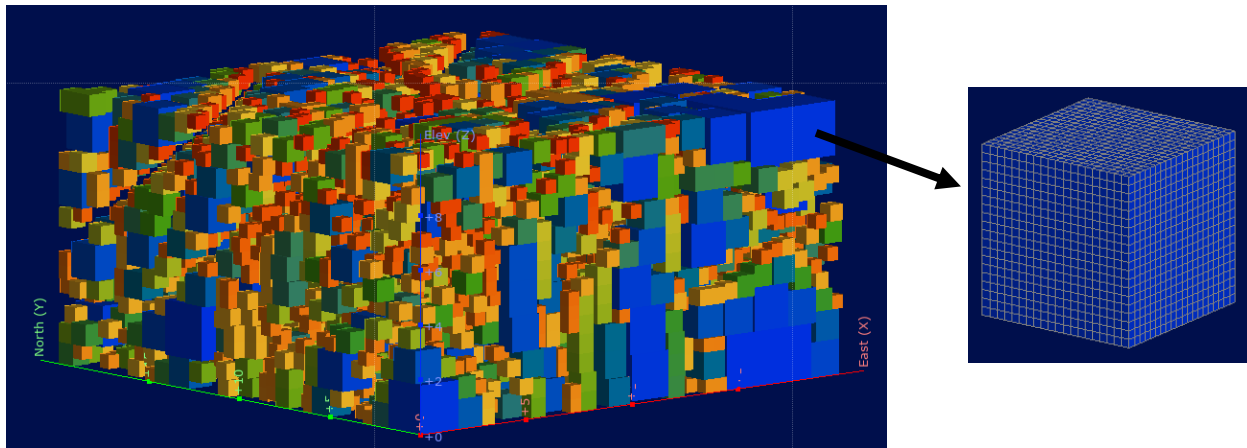


Figura 3.13. Exemplo da blocometria existente num modelo com uma intensidade de fracturas por metro linear (P10) de 0,69 (esquerda); malha de cubos presente num bloco (direita).

Por outro lado, os códigos atribuídos aos cubos pertencentes a blocos com dimensões inferiores às exploradas na pedreira, têm o valor de 0, enquanto os utilizados para discriminar os planos de fracturas são iguais a 1 (Figura 3.14).

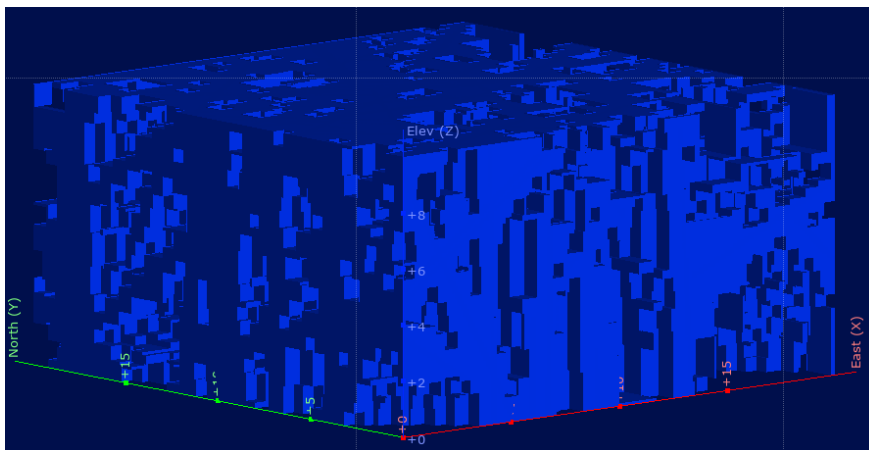


Figura 3.14. Exemplo dos cubos com códigos de 0 e 1 presentes num modelo com uma intensidade de fracturas por metro linear (P10) de 0,69.

4 Caso de estudo – Pedreira Texugo

4.1 Enquadramento da pedreira

4.1.1 Enquadramento geográfico

A Pedreira Texugo pertence a empresa Bloco B, do grupo J Silva, e encontra-se sediada na região do Alentejo, mais concretamente na freguesia de Nossa Senhora da Conceição e São Bartolomeu, concelho de Vila Viçosa, distrito de Évora (Figura 4.1).

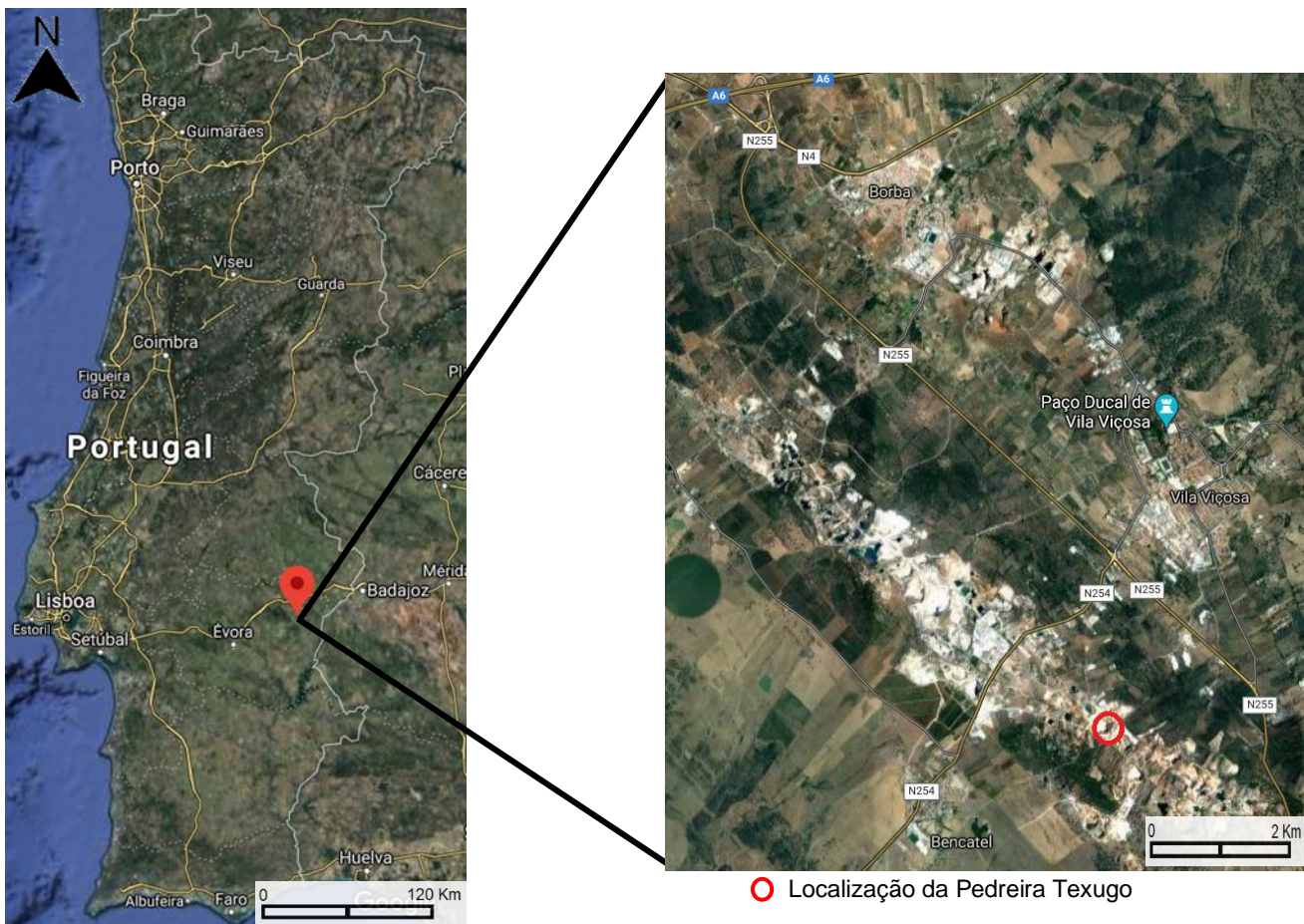


Figura 4.1. Localização da pedreira em Portugal (esquerda) e regionalmente (direita) (adaptado do Google Earth).

Em termos de acessos, a pedreira localiza-se numa posição privilegiada rodeada de várias vias, como as estradas nacionais nº4, 254 e 255, e ainda pela autoestrada A-6. Esta localização privilegiada facilita o escoamento dos blocos para a fábrica transformadora, situada a poucos quilómetros de distância, e onde os blocos extraídos vão ser processados, ou são expeditos diretamente da pedreira para o comprador.

A área concessionada à pedreira para exploração de rocha ornamental faz parte da Área Cativa de exploração de mármore do Anticlinal de Estremoz, instituída pela portaria 441/90 do Ministério da Indústria e Energia e regulamentada pelo plano Regional de Ordenamento do Território da Zona dos Mármore (PROZOM), mais precisamente pertencente à unidade de Ordenamento nº4 (UNOR 4), usualmente denominada de Lagoa (B – EXPLORE, Extração de Mármore e Inertes, Lda., 2018).

4.1.2 Enquadramento geológico regional e local

A pedreira Texugo encontra-se inserida no Anticlinal de Estremoz, que é uma estrutura com cerca de 42 Km de extensão por 8 Km de largura, com uma orientação NW-SE, (Figura 4.2 (B)), e intersectando vários concelhos do distrito de Évora, Sousel, Estremoz, Borba, Vila Viçosa e Alandroal (Lopes, 2007).

O anticlinal apresenta uma dispersão aproximadamente simétrica das suas camadas, sendo o seu núcleo composto pela formação mais antiga, Formação de Mares de idades Neoproterozoicas, composta por xistos negros, metagrauvauques, metachertes negros, que podem ser vislumbrados a norte de Estremoz e entre Vila Viçosa e Borba (Moreira e Lopes, 2019).

Em discordância com a camada anterior, aparece uma pequena lentícula de conglomerados e arcoses pertencentes à formação dolomítica, de idade Câmbria Inferior, a qual apresenta ainda metavulcanitos ácidos e básicos, calcários dolomíticos e calcíticos, extinguindo-se com a presença de um horizonte silico-ferruginoso (Moreira e Lopes, 2019).

Os mármore explorados na pedreira estudada fazem parte do Complexo Vulcano-Sedimentar-Carbonatado de Estremoz (CVSCE) localizado no topo da formação dolomítica e de idade Ordovícica. Para além destes, o complexo é composto não só por metavulcanitos ácidos e básicos, como também por rochas ígneas intrusivas (Figura 4.2 (B)). A presença de eventos, de natureza ígnea, foi importante no estabelecimento da diversidade cromática existente nos mármore, desde mármore brancos a rosa (Lopes, 2007).

A circunscrever a envolvência exterior do anticlinal, existem as Formações dos Xistos com Nódulos e dos Xistos Raiados com idades Devónico-Silúricas (Moreira e Lopes, 2019).

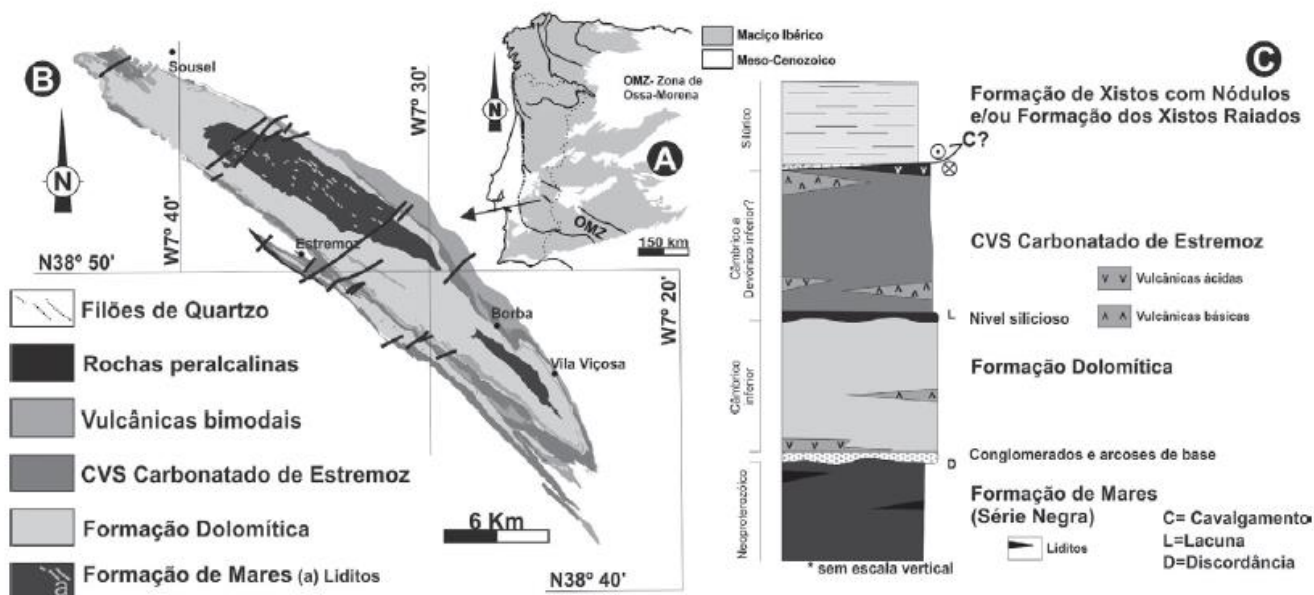


Figura 4.2. Enquadramento geológico do Anticlinal de Estremoz. (A) Localização do Anticlinal de Estremoz no Maciço Ibérico; (B) Mapa geológico simplificado do Anticlinal de Estremoz; (C) Coluna estratigráfica simplificada do anticlinal de Estremoz (adaptado de Moreira e Lopes, 2019).

Localmente, de acordo com a posição da pedreira no flanco sudoeste do anticlinal de Estremoz, é possível encontrar mármore com três tonalidades, azul, creme e rosa, que podem apresentar na sua constituição algumas vergadas de variadas dimensões. Os estratos dos quais fazem parte apresentam direção N80W com inclinações de 20° a 50° para SW (Branco, 2015).

Os mármore de cor azul ocorrem no topo da sequência dos mármore do CVSCE e apresentam na sua composição, aproximadamente, 95% de calcite, 5% de dolomite e a fração restante são minerais acessórios, na sua grande maioria quartzo. A sua cor encontra-se relacionada com a elevada presença de matéria orgânica nas suas camadas (Henriques et al., 2006)

Abaixo destes, com pureza superior aos mármore azuis, existem os de tonalidade creme, exibindo vergada castanha a avermelhada, em algumas zonas da pedreira, Figura 4.3 e 4.4 (Martins et al., 2017).

Finalmente, na base, isto é, no contacto com os metadolomitos vislumbrados na zona NE da pedreira, ocorrem mármore rosa devido à presença de maiores concentrações de titânio, magnésio e ferro (Moreira e Lopes, 2019). Estes são intersetados pelos mármore cremes, assim como por uma pequena lentícula azul (Martins et al., 2017).



Figura 4.3. Lage polida de mármore, denominada comercialmente por Two Tones (Fonte: B Stone - Marble, 2016).



Figura 4.4. Lage polida de mármore, denominado comercialmente por Calacatta (Fonte: B Stone - Marble, 2016).

4.1.3 Enquadramento tectónico

O anticlinal de Estremoz situa-se no Sector de Estremoz-Barrancos, Zona de Ossa Morena, afetada pela orogenia Hercínica, em que os processos de deformação associados a esta se encontram materializados no maciço da pedra através de duas fases de deformação (Lopes e Silva, 2006).

Na primeira fase de deformação, todos os materiais que se encontram na, até então, bacia de sedimentação foram alterados e deformados, levando ao aparecimento do bandado metamórfico existente nos mármore. Para além disso, nesta etapa, desenrolou-se ainda a formação de dobras com orientação axial aproximadamente N-S, no andar estrutural inferior (Lopes, 2007).

Posteriormente, na segunda etapa a deformação apresenta carácter mais frágil, registando-se o aparecimento de dobras com planos axiais sub-verticais em andar estrutural superior, assim como ocorre o desenvolvimento de clivagem de fractura nos mármore (Lopes, 2007). Esta etapa é ainda responsável pela configuração noroeste-sudoeste do anticlinal de Estremoz (Lopes e Silva, 2006).

Ao longo do maciço, nos instantes finais de deformação do anticlinal, ocorreu intensa compartimentação, através do desenvolvimento de fracturação com orientação NNE-SSW, resultantes da reativação de zonas de cisalhamento de antigas dobras previamente formadas (Lopes, 2007).

Para além destas falhas, existem também fendas de tração sub-verticais de orientação ENE-WSW, contemporâneas da última fase de dobramentos, que se encontram preenchidas por filões doleríticos (Lopes e Silva, 2006).

4.2 Descrição das tecnologias de exploração do mármore na pedreira em estudo

4.2.1 Perfuração e corte

Na pedreira Texugo, as operações unitárias perfuração e corte desenvolvem-se nas três fases da exploração da pedreira, que são: (a) o rebaixamento do piso (para início de outro piso), onde decorrerá a exploração; (b) abertura do canal e (c) avanço em bancada.

Nestas operações, são utilizados três métodos de perfuração (Figura 4.5), como o martelo pneumático ligeiro (Atlas Copco), a perfuradora pneumática rotopercussiva (Benetti) e o Jumbo de perfuração. Já no corte é utilizado, exclusivamente, a máquina de fio diamantado (Manuel Martins – Serviços de Engenharia, Lda, 2016).



Figura 4.5. Operações unitárias de perfuração realizadas na pedreira (Fonte: B Stone - Marble, 2016).

Os processos de rebaixamento têm como objetivo a criação de novos pisos, possibilitando a obtenção de espaço para o posicionamento das máquinas de perfuração e de corte através da abertura de uma cavidade no maciço rochoso, conhecida por caixa. A cavidade é desenvolvida, geralmente, numa zona de fraca qualidade ornamental, ou seja, num local do maciço em que a rocha se encontra bastante meteorizada ou com um elevado número de fracturas (Branco, 2015).

Para a abertura da caixa, são efectuados 4 furos verticais (poços mestres), com o recurso de um jumbo de perfuração, o qual garante a verticalidade dos mesmos ao

longo de toda a sua extensão. A intersectar as faces com maiores dimensões da caixa, vão ser realizados com a perfuradora pneumática rotopercussiva dois furos na diagonal e com origem na parte superior de um furo e terminação na parte inferior do outro. O delinear destes furos leva à divisão da cavidade em duas secções em forma de cunha (Manuel Martins – Serviços de Engenharia, Lda, 2016).

Uma vez que não é possível retirar individualmente cada uma das cunhas, é necessário efetuar novas operações de perfuração com o recurso a um martelo pneumático ligeiro, realizando um conjunto de furos em cada uma das secções de modo a dividir cada cunha em várias talhadas que serão, posteriormente, cortadas (Branco, 2015).

O corte de cada conjunto de talhadas é efetuado de forma faseada com o fio diamantado na medida em que, primeiramente, é retirado o material pertencente à cunha superior e só depois da parte inferior, sendo para tal necessário a realização de dois novos furos horizontais no fundo da caixa com a perfuradora pneumática rotopercussiva (Manuel Martins – Serviços de Engenharia, Lda, 2016).

O processo de corte em cada uma das secções respeita uma determinada sequência iniciada com os cortes verticais de topo, seguidos dos cortes diagonais ou horizontais, consoante a secção superior ou inferior das talhadas e, por último, os cortes laterais (Manuel Martins – Serviços de Engenharia, Lda, 2016).

Concluída a retirada do material da “caixa”, é possível avançar para a abertura de um canal, perpendicularmente a uma das faces livres com maiores dimensões. É, então, essencial a realização de dois furos horizontais, com a configuração de um triângulo, efetuados com a perfuradora pneumática rotopercussiva, e um outro vertical a intersectar o vértice do triângulo (Branco, 2015).

Para além deste furo vertical, é fundamental a realização de vários conjuntos de furos verticais com o martelo pneumático, dispostos paralelamente à face livre de maneira a delimitar cada talhada. Para finalizar a etapa, são efetuados com o fio diamantado três tipos de corte, corte horizontal, seguido dos cortes das talhadas e dos laterais (Branco, 2015).

Com esta operação, é possível obter duas superfícies livres num determinado piso fomentando, assim, o avanço da exploração em bancada, segundo uma orientação perpendicular às paredes do canal aberto anteriormente.

O avanço começa com a utilização da perfuradora pneumática rotopercussiva na elaboração de um furo horizontal ao longo da base de toda a bancada, acompanhado de vários furos perpendiculares a este, de igual orientação, e que definem as talhadas a explorar. Na intersecção de ambos, procede-se à execução de perfuração vertical através de um martelo pneumático ligeiro, de modo a facilitar a passagem do fio no corte das talhadas (Branco, 2015).

O processo de corte contempla a realização de uma operação na base da bancada, seguido de uma outra vertical, no decorrer da face do piso, e finalizado com várias operações verticais de individualização de cada talhada (Manuel Martins – Serviços de Engenharia, Lda, 2016).

4.2.2 Derrube, esquadrejamento e/ou esquadriamento

No seguimento das operações unitárias mencionadas anteriormente, torna-se indispensável proceder-se à retirada do material da frente de exploração. Para tal, os blocos provenientes de cada talhada devem apresentar dimensões passíveis de serem transportadas pelos meios destinados a este fim.

A dimensão dos blocos encontra-se condicionada pelo padrão de corte e ainda pela rede natural de fracturas presente em cada talhada. De maneira a salvaguardar as dimensões naturais dos blocos, antes da fase de derrube são espalhados detritos no piso da frente a desmontar, cuja principal função consiste em suavizar o impacto dos blocos ao caírem.

Para efetuar o derrube de cada talhada, são introduzidos colchões hidráulicos nas fissuras criadas previamente durante o corte. O enchimento dos colchões promove o afastamento do bloco e permite a introdução do *riper*. Este encontra-se acoplado a uma escavadora de rastos posicionada sobre a bancada a desmontar, a qual movimenta o *riper* e, por sua vez induz o deslocamento descendente da talhada de encontro à base do piso (Manuel Martins – Serviços de Engenharia, Lda, 2016).

Uma vez derrubadas as talhadas, estas são caracterizadas ao nível da volumetria dos blocos e, caso estes não se encontrem de acordo com os padrões admissíveis pela pedreira, são submetidos a uma fase adicional de esquadrejamentos. Esta contempla a divisão do bloco em volumetrias mais baixas que permitam o transporte, sendo empregue na partição ferramentas como cunhas, martelo pneumático

ligeiro ou o fio diamantado, consoante as dimensões do corte a serem executados (Branco, 2015).

Posteriormente, e caso se justifique, os blocos são conduzidos do parque de blocos para uma outra zona da pedreira, onde são trabalhados em termos da sua forma, com o recurso a uma máquina estacionária de esquadrear blocos (monofio) (Figura 4.6).



Figura 4.6. Máquina estacionária de esquadrear blocos (monofio) utilizada na pedreira (Fonte: B Stone - Marble, 2016).

4.3.4 Transporte

Toda a rocha explorada nas frentes da pedreira é conduzida a um local de depósito temporário consoante a sua finalidade. Os blocos de rocha com valor comercial são encaminhados para o parque de blocos, já os detritos desprovidos de qualquer interesse económico são direcionados para um aterro, designado de escombreira.

O movimento dos blocos na pedreira, realizam-se tendencialmente com uma pá carregadora acoplada com patolas. No entanto, quando se trata de realizar o transporte destes para a fábrica ou para o comprador, este processa-se através de camião. Para elevar os blocos dos pisos da pedreira para a superfície é empregue uma grua.

Quando se trata da remoção de detritos da zona de extração, os meios envolvidos geralmente são a pá carregadora, bem como escavadoras de rastos, auxiliando na colheita destes para o *dumper*, que transporta os mesmos para a zona de aterro.

4.4. Enquadramento da área de estudo na pedreira

O estudo do maciço rochoso desenvolveu-se ao longo de 5 áreas de estudo denominadas de área 1, 2, 3, 4, 5 (Figura 4.7). Cada uma destas áreas corresponde a um determinado piso da pedreira, com diferentes altitudes onde a área 1 regista valores mais baixos e área 5 os valores mais elevados.

Das áreas analisadas, duas encontram-se cartografadas na planta da pedreira correspondendo aos pisos 6 e 5, com cotas de 356,68 m e 350,08 m respetivamente, enquanto as restantes três áreas ainda não se encontravam cartografadas na planta à data de execução deste trabalho.

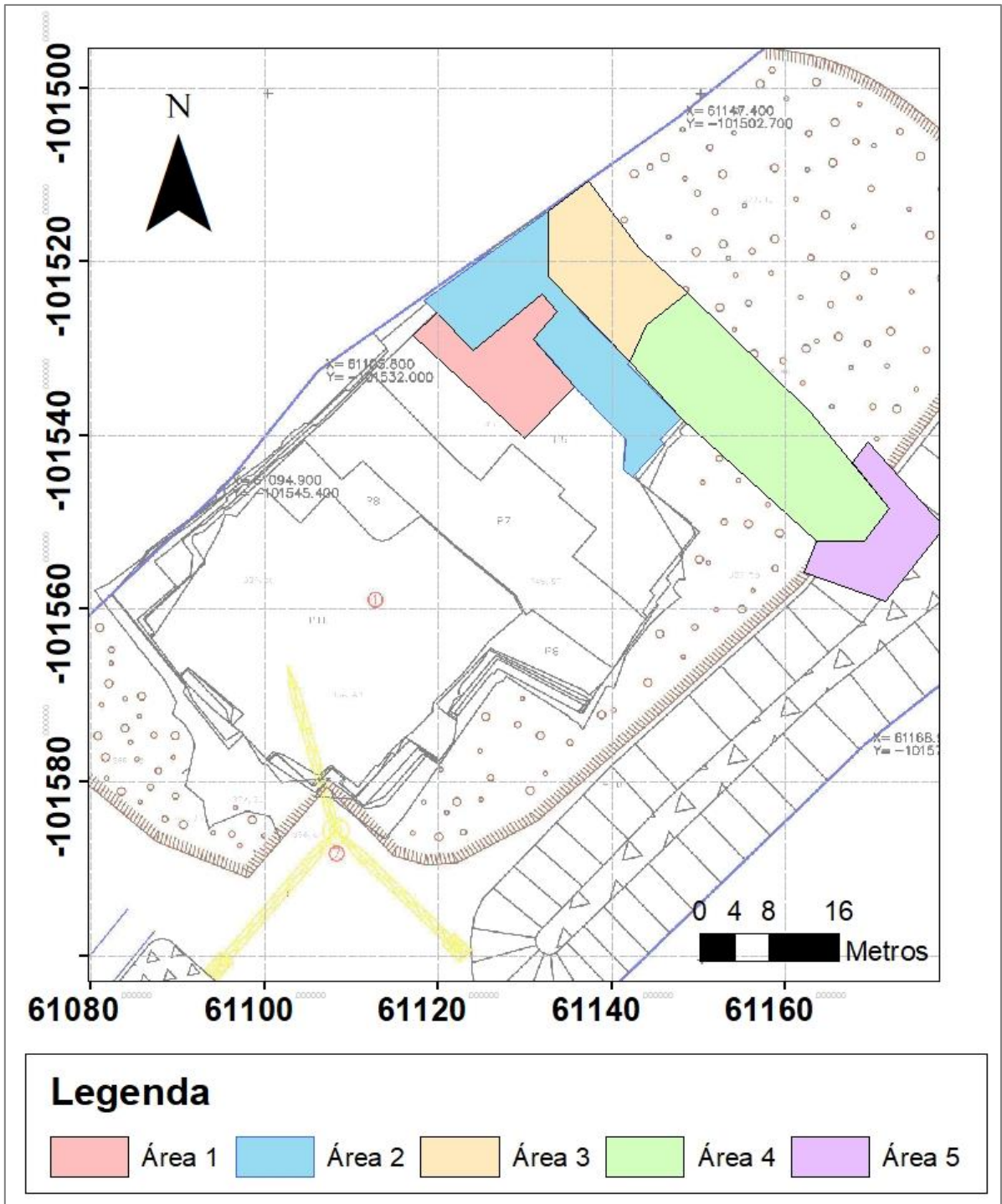


Figura 4.7. Enquadramento das 5 áreas de estudo na pedreira Texugo (vista em planta).

5 Análise e discussão dos resultados da prospeção geológica e geomecânica in situ

5.1 Levantamento da fracturação

Espacialmente, a informação recolhida nas duas áreas de estudo foi sintetizada nas (Figuras 5.1 e 5.2), onde se encontra registado o contorno destas, correspondente às faces das bancadas da pedra. No contorno das áreas de estudo foram identificados o início e o fim de cada linha de amostragem e as fracturas amostradas com indicação da família a que pertenciam.

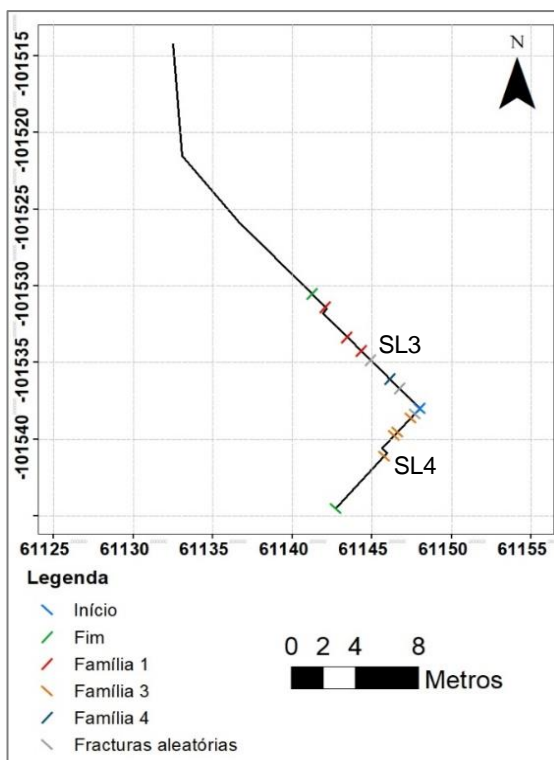


Figura 5.1. Linhas de amostragem (SL) presentes na área de estudo 2.

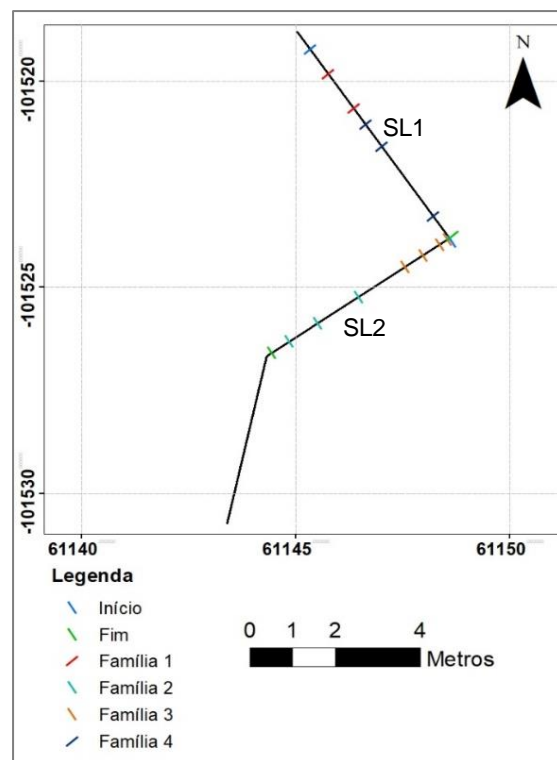


Figura 5.2. Linhas de amostragem (SL) presentes na área de estudo 3.

A informação proveniente dos levantamentos da fracturação encontra-se sintetizada na Figura 5.3, na qual se encontra representada a projeção estereográfica dos polos das 23 fracturas amostradas, ao longo das quatro linhas de amostragem.

O agrupamento destas em famílias teve por base a identificação das regiões da rede com maior densidade de polos, sendo possível constatar a existência de 4 famílias principais de fracturas no maciço, bem como a presença de algumas fracturas aleatórias (Tabela 5.1). As atitudes das famílias em termos da sua inclinação variam entre pouco

inclinadas, famílias 3 e 4, a muito inclinadas, em que as fracturas presentes nestes conjuntos se encontram praticamente na vertical, família 1 e 2.

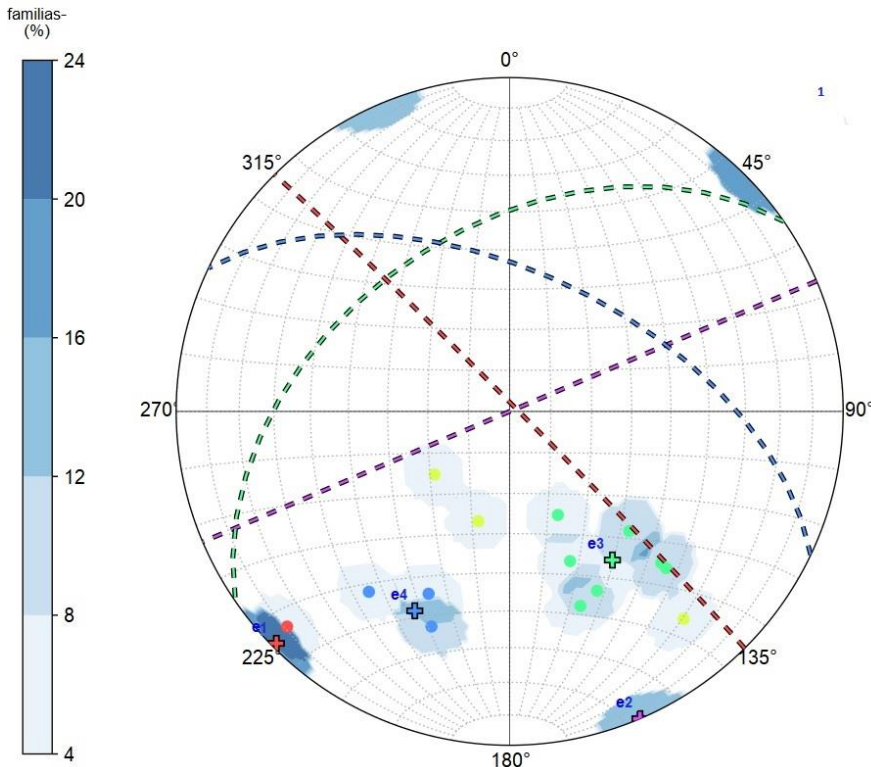


Tabela 5.1 Orientação das famílias fracturas

Legenda	Famílias	Orientação
● (Red)	1	N45E88
● (Purple)	2	N23W90
● (Green)	3	N35W45NE
● (Blue)	4	N25E56SE
● (Yellow)	Fracturas aleatórias	

Figura 5.3. Projeção estereográfica dos polos na rede de Schmidt com o *software* Leapfrog.

Através da análise da Figura 5.4, observa-se que o conjunto mais representativo corresponde à família 3, com cerca de 8 das 23 fracturas amostradas, seguida da família 1 com 5 e as famílias 4 e 2 representadas por 4 e 3 fracturas, respetivamente. Para além destes, no conjunto amostrado, existem ainda 3 fracturas com orientação aleatória.

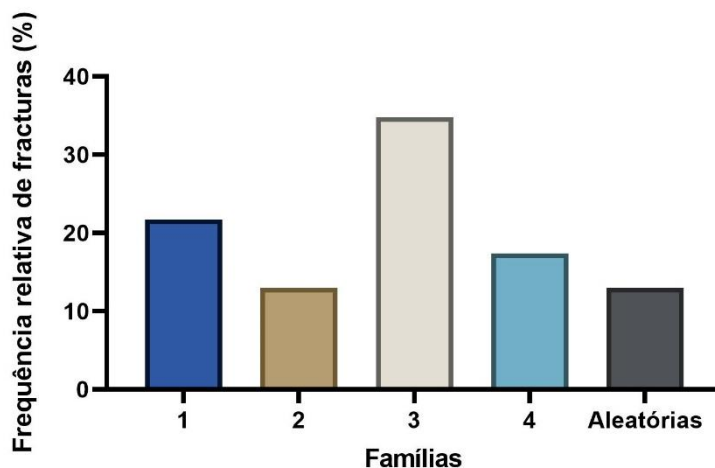


Figura 5.4. Frequência relativa das famílias de fracturas

Verifica-se ainda que, na família 1, as diferenças entre as orientações das fracturas existentes é mínima, por outro lado, nas famílias 3 e 4, as variações presentes são mais elevadas, pois apresentam coeficientes de Fisher baixos (Tabela 5.2). Na

família 2, dado a orientação das fracturas amostrada ser igual, esta não apresenta coeficiente de Fisher. No entanto, foi arbitrado para a mesma um coeficiente, uma vez que o *software* FTRIAN utilizado na modelação das fracturas necessita deste parâmetro como dado de entrada. O valor arbitrado foi de 500, já que coeficientes elevados representam uma maior semelhança entre a orientação das fracturas, pertencentes a uma determinada família.

Tabela 5.2. Coeficiente de Fisher das 4 famílias principais de fracturas.

Famílias	Coeficiente de Fisher (k)
1	505,53
2	500,00
3	42,06
4	97,94

O resultado das densidades lineares calculadas para cada família em relação às diferentes linhas de amostragem encontra-se presente na Tabela 5.3. Tendo por base a análise da mesma, constata-se que a família 1 e 4 só se encontram presentes nas linhas de amostragem SL1 e SL3, enquanto a família 3 é referenciada nas linhas SL2 e SL4. Tal situação deve-se ao facto de SL1 e SL3 apresentarem uma igual orientação, assim como SL2 e SL4. Por outro lado, a família 2 é apenas identificada na SL2 e as fracturas aleatórias só se encontram presentes na área de estudo 2, SL3 e SL4.

Das densidades medidas, destaque-se a família 3 com maiores valores, uma vez que a mesma apresenta um maior número de fracturas, contrastando com a família 4 que exhibe valores mínimos, devendo-se a um menor número de fracturas registado em linhas de amostragem com dimensões mais elevadas.

Tabela 5.3. Densidade linear medida por família, em termos das linhas de amostragem e no global.

Scan-lines	Número de fracturas					Densidades (P10)				
	SL1	SL2	SL3	SL4	Total	SL1	SL2	SL3	SL4	Total
Comprimento (m)	5,63	5,02	9,28	6,62	26,55	5,63	5,02	9,28	6,62	26,55
F1	2	0	3	0	5	0,36	0	0,32	0	0,19
F2	0	3	0	0	3	0	0,6	0	0	0,11
F3	0	4	0	4	8	0	0,8	0	0,60	0,30
F4	3	0	1	0	4	0,53	0	0,11	0	0,15
Aleatórias	0	0	2	1	3	0	0	0,22	0,15	0,11
Total	5	7	6	5	23	0,89	1,39	0,65	0,76	0,87

5.2 Recolha de amostras e resultados obtidos

Para determinar o RCU e a análise química de silício, no presente trabalho, foram recolhidas, em 9 localizações georreferenciadas, 9 amostras de mármore da pedreira nas 5 áreas da pedreira (Figura 5.5), com diferentes tamanhos e formas. Procedeu-se também à realização de medições *in situ* com o martelo de Schmidt, nos locais onde foram recolhidas as amostras, bem como em outras 14 localizações. (Figura 5.5).

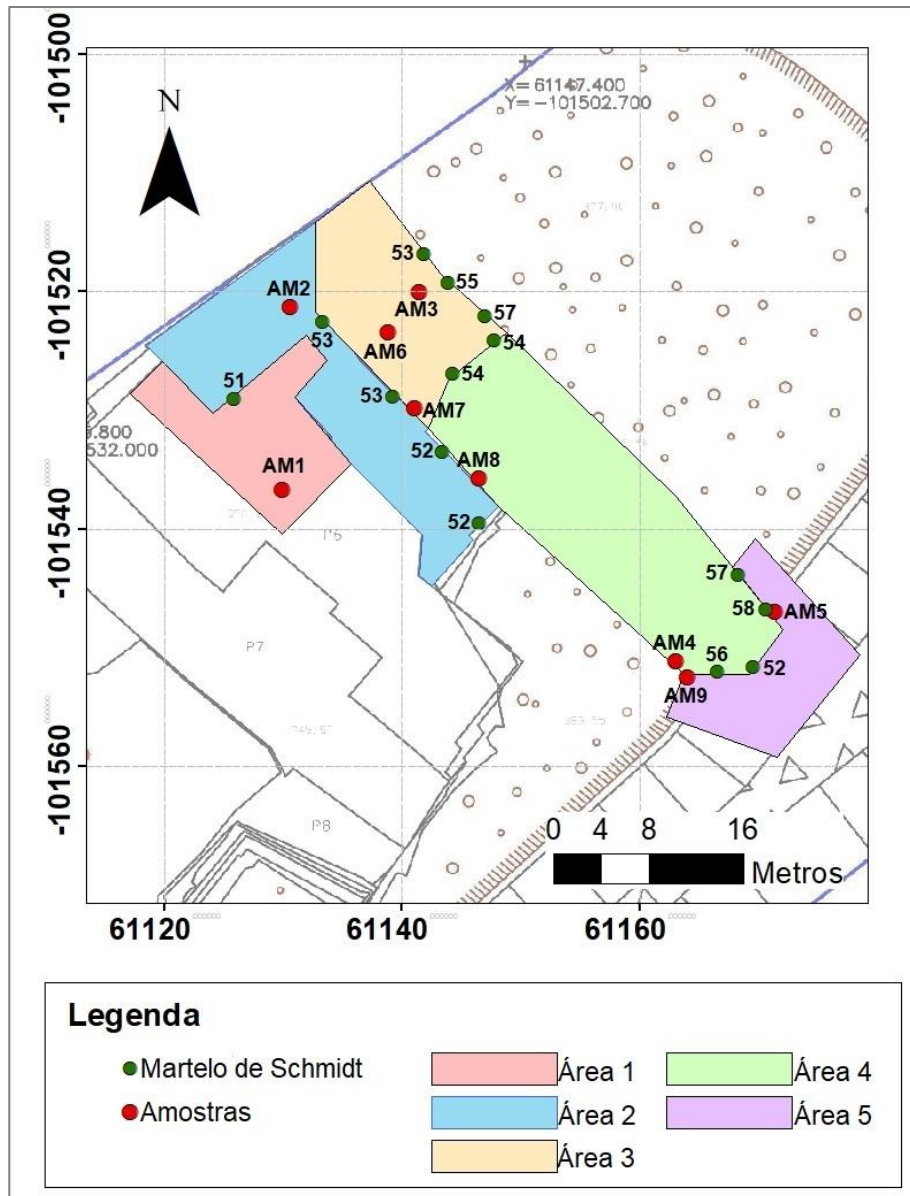


Figura 5.5. Localização espacial nas áreas de estudo das amostras de mármore recolhidas e das medições realizadas com o martelo de Schmidt.

Em laboratório, com recurso a uma caroteadora e a uma serra elétrica prepararam-se 22 provetes cilíndricos, com base nas 9 amostras recolhidas na pedreira,

com orientação vertical e horizontal, sendo que o número destes por amostra é condicionado pelas suas dimensões. Estes 22 provetes foram submetidos a ensaios de resistência à compressão uniaxial e de velocidade de propagação das ondas P e S. Os resultados destes ensaios encontram-se sintetizados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial da rocha (RCU) e da velocidade de propagação das ondas P e S.

Amostras	Martelo de Schmidt	Número do provete	Orientação	RCU (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
AM1	49	1	V	57,4	5772	4038
		2	V	38,1	5392	2918
AM2	49	3	H	42,3	4560	2977
		4	H	30,8	5227	4440
		5	V	30,7	4274	2890
AM3	52	6	V	48,2	5587	3891
AM4	51	7	V	28,1	5587	3205
		8	H	49,3	5726	3797
AM5	52	9	V	57,0	5779	3433
		10	H	40,7	5876	3904
		11	H	43,0	6379	4111
AM6	53	12	V	60,2	5130	2836
		13	H	31,3	5562	2268
		14	H	54,9	4975	2531
		15	H	29,2	4685	2516
AM7	53	16	V	33,4	5360	2419
		17	H	29,7	4837	2385
AM8	49	18	V	50,9	5272	3036
		19	H	31,9	5506	2972
AM9	53	20	V	63,7	5556	2950
		21	H	17,8	5223	2425
		22	V	26,2	5433	2854

A análise química dos provetes foi efetuada com o ensaio de fluorescência de raios-X (XRF) (Tabela 5.5) onde são determinadas as concentrações dos principais elementos químicos presentes e identificados pelo equipamento.

Tabela 5.5. Resultados do ensaio de fluorescência de raios X (XRF).

Amostras	Número do provete	Ca (ppm×10 ⁴)	Si (ppm)	K (ppm)	Fe (ppm)	Ba (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Cr (ppm)	Zn (ppm)	Zr (ppm)
AM1	1	46 (99%)	1569	1283	2269	194	187	115,5	20,2	2,0	3,7
	2	45 (99%)	1443	1635	1001	214	160	100,8	21,0	8,0	4,4
AM2	3	45 (98%)	3720	2173	1436	217	84	78,7	35,8	7,1	7,6
	4	45 (98%)	4448	1573	1060	275	115	78,8	0	7,1	5,3
	5	44 (98%)	4793	2648	1647	208	64	79,6	47,4	2,6	7,4
AM3	6	46 (99%)	1019	748	501	221	97	90,5	38,2	8,9	2,1
AM4	7	42 (96%)	7507	4525	2815	216	118	100,1	53,5	3,4	13,5
	8	45 (98%)	3191	2152	1586	221	47	103,3	31,9	4,9	8,6
AM5	9	48 (99%)	1249	1082	849	202	297	100,3	50,8	109,4	4,1
	10	46 (99%)	817	871	796	208	103	99,8	43,9	9,7	3,7
	11	46 (99%)	601	597	761	194	106	107,0	40,1	2,2	1,6
AM6	12	48 (99%)	2231	1076	670	185	135	88,0	50,7	5,3	3,0
	13	47 (98%)	5553	2607	1181	226	112	90,2	53,9	12,5	7,1
	14	49 (99%)	1368	450	442	229	81	89,2	61,7	0	1,1
	15	49 (99%)	1309	477	480	198	111	90,8	0	12,9	2,5
AM7	16	49 (99%)	1739	1186	942	217	132	122,0	45,3	15,1	3,3
	17	49 (99%)	1280	721	778	211	113	117,1	24,0	9,6	1,2
AM8	18	45 (98%)	3473	2444	1507	235	108	80,9	55,5	0	9,2
	19	46 (99%)	3400	1702	1208	193	90	85,4	46,6	10,0	7,1
AM9	20	49 (99%)	1277	526	452	200	155	113,0	22,5	10,2	1,5
	21	49 (99%)	1143	593	479	187	135	112,5	50,8	12,4	2,8
	22	49 (99%)	1609	791	434	216	174	109,7	29,8	6,0	1,5

5.2.1 Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial (RCU) foi obtida em laboratório com base no ensaio dos 22 provetes realizados. Os valores resultantes dos ensaios permitiram concluir que os mármores presentes nas áreas de estudo apresentam resistências à compressão compreendidas entre os 17,8 MPa e os 63,7 MPa, com um valor médio de 40,7 MPa (Figura 5.6). Estes apresentam um desvio padrão relativo de 32%, traduzindo a existência de alguma heterogeneidade entre os valores medidos.

Quando analisados os valores medidos segundo a orientação horizontal e vertical, constata-se que os provetes orientados na vertical apresentam um valor médio

de 44,9 MPa, valor este superior aos 36,4 MPa obtidos para os provetes com orientação horizontal. O desvio padrão registado para estas duas situações apresenta valores similares, próximos de 30%, revelando uma relativa dispersão nos valores medidos em cada orientação.

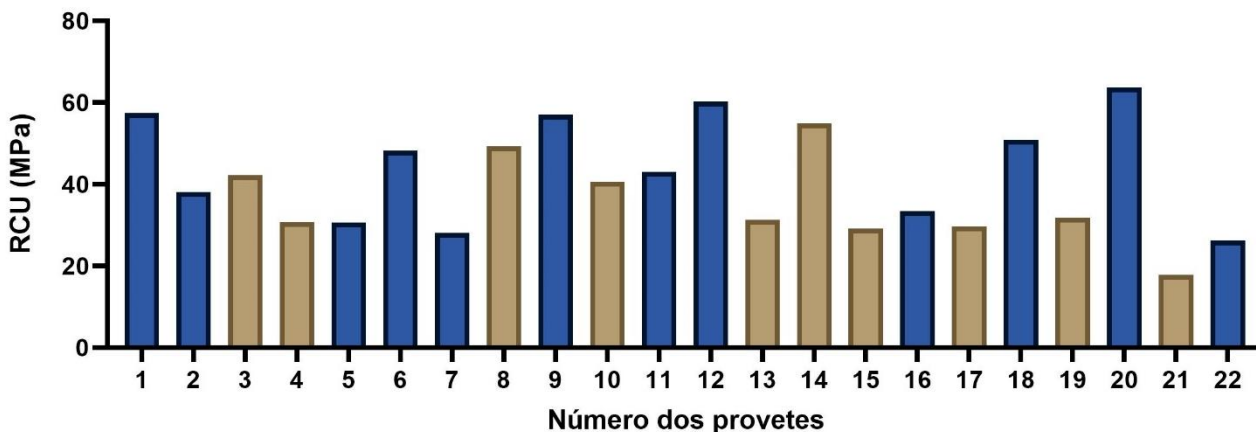


Figura 5.6. Resultados do ensaio de RCU, a castanho provetes realizados segundo a direcção horizontal e a azul na vertical.

As diferenças existentes nas resistências observadas devem-se à conjugação de vários fatores como o grau de meteorização exibido pelos mármores, a anisotropia inerente à própria rocha e ao facto dos provetes apresentarem ou não vergadas, dado que a ocorrência destas segundo a orientação vertical é a situação mais penalizadora.

Com base nos valores de resistência à compressão uniaxial medidos nos provetes realizados segundo a orientação vertical, foi estabelecida a correlação existente entre esta e a dureza de Schmidt. No estabelecimento da mesma foram utilizadas apenas os valores referentes a 7 das 9 amostras uma vez que, em duas destas, os provetes exibiam a presença de fissuras, conduzindo à obtenção de resistências bastante inferiores às apresentadas na realidade pela rocha intacta, 28 e 33 MPa.

A relação existente entre a resistência à compressão uniaxial e a dureza de Schmidt, pode ser representada graficamente através de um modelo não linear, polinomial, com um coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 0,7 (Figura 5.7) ou, então, mediante um modelo linear com um R^2 de 0,68 (Figura 5.8).

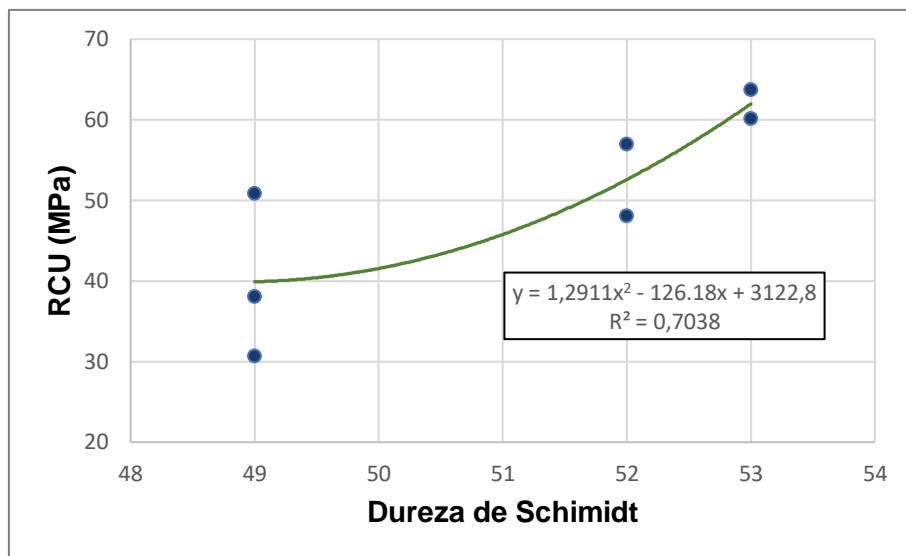


Figura 5.7. Relação entre a dureza de Schimidt e a resistência à compressão uniaxial (modelo não linear).

Quando comparados os modelos, constata-se que para valores de dureza elevados o modelo não linear realiza estimações da resistência muito altas, chegando em algumas situações a ser 3 vezes superior ao valor máximo de resistência à compressão uniaxial registrado em laboratório, enquanto no modelo linear as discrepâncias existentes são na ordem de uma a duas dezenas. Desta forma, apesar de o modelo não linear apresentar um coeficiente de determinação superior, optou-se pelo modelo linear para traduzir a relação existente entre as duas variáveis (Fig. 5.8).

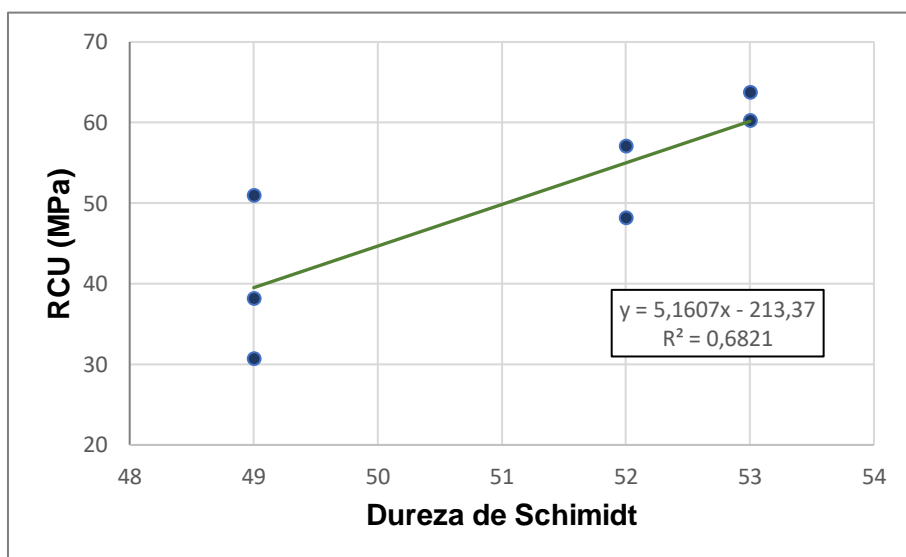


Figura 5.8. Relação entre a dureza de Schimidt e a resistência à compressão uniaxial (modelo linear).

5.2.2 Velocidade de propagação das ondas sísmicas

Os 22 provetes submetidos ao ensaio de resistência à compressão uniaxial foram primeiramente analisados em termos da sua velocidade de propagação das ondas sísmicas. As velocidades medidas para as ondas P encontram-se compreendidas entre os 4274 m/s e os 6379 m/s, tendo como valor médio 5375 m/s e um desvio padrão relativo de 9 %, indicador de uma relativa homogeneidade entre os valores medidos (Tabela 5.6).

Relativamente à velocidade das ondas S, estas apresentam como valor mínimo os 2268 m/s e máximo os 4440 m/s, com uma média de 3200 m/s e um desvio padrão relativo de 20 %, revelando uma maior heterogeneidade nos valores medidos quando comparado com as ondas longitudinais (Tabela 5.6).

Na generalidade das amostras, constatou-se também a existência de uma correlação entre os valores medidos para as ondas de corte e longitudinais, na medida em que provetes com maiores velocidades de propagação das ondas P, tendem a registar também elevadas velocidades de ondas S.

Tabela 5.6. Resultados das velocidades de propagação das ondas sísmicas.

	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	Média (m/s)	Desvio padrão relativo (%)
Ondas P	4274	6379	5375	9
Ondas S	2268	4440	3200	20

As velocidades medidas de propagação das ondas P permitiram caracterizar os provetes ao nível do seu estado de alteração, onde para maiores meteorizações são esperadas menores velocidades. Tendo por base os estudos de Sheremeti-Kabashi e Snethlage (2000); e Weiss et al. (2002), foi possível aferir que 80 % dos provetes não deviam evidenciar qualquer tipo de alteração, dado apresentarem velocidades superiores a 5000 m/s, enquanto nos restantes 20 %, correspondentes a velocidades inferiores 5000 m/s, é esperado que os provetes exibam uma ligeira meteorização, traduzida por um ligeiro aumento da porosidade.

Para além da avaliação da meteorização, o conhecimento da velocidade das ondas longitudinais permitiu também perceber a influência das vergadas nas características mecânicas dos mármore. Tais influências encontram-se ilustradas na (Tabela 5.7), na qual se observa que mármore com vergada apresentam em média menores velocidades de propagação das ondas P. A orientação em que estas ocorrem

nos provetes também apresenta interferências, sendo a situação mais penalizadora, quando as vergadas se encontram na horizontal, criando planos que dificultam a passagem das ondas.

Tabela 5.7. Velocidade média de propagação das ondas P para provetes com e sem vergada.

	Sem vergada	Com vergada	Vergada Horizontal	Vergada Vertical
Nº de provetes	13	9	5	4
Velocidade média (m/s)	5459	5192	5131	5269

Tendo em conta a velocidade das ondas P, avaliou-se também a anisotropia presente em 7 amostras. A mesma apresenta flutuações entre os 2,4 % e os 9,8 %, com um valor médio de 7,4 % e a presença de um valor anômalo de 18 % (Figura 5.9). Podendo-se, assim, constatar que os mármore explorados apresentam um baixo grau de anisotropia. As variações existentes entre amostras devem-se, sobretudo, à presença ou não de vergadas na rocha, as quais conferem tendencialmente um maior grau de anisotropia às mesmas.

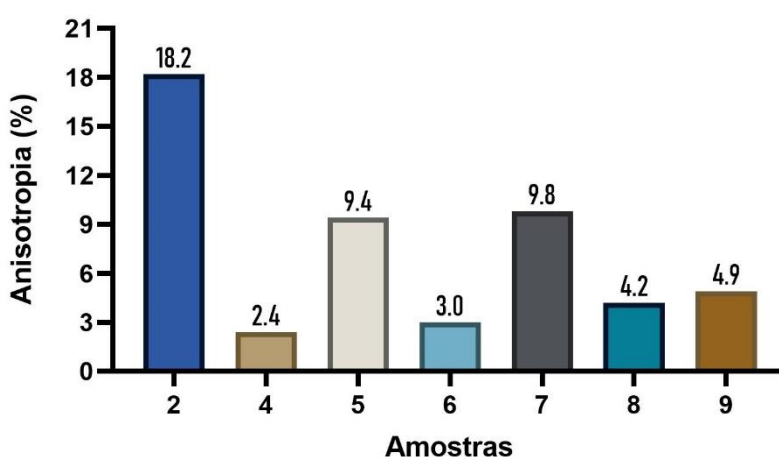


Figura 5.9. Resultados da anisotropia presente nas amostras.

5.2.3 Concentrações e concentração de silício

A análise química dos mármore realizada através do ensaio de espectroscopia por fluorescência de raios-X (XRF) permitiu analisar os elementos presentes nos 22 provetes, dos quais se destaca como principal constituinte o cálcio (Ca) com concentrações compreendidas entre os 424665,3 ppm e os 492173,5 ppm. Estes valores, correspondem a cerca de 96 a 99 % da composição química dos provetes.

Também representada em todos os provetes encontra-se a silício (Si), sendo este o segundo elemento mais representativo, com valores cerca de 200 vezes inferiores aos do cálcio, e correspondendo a uma concentração média de 2500 ppm. Na mesma ordem de grandeza, existe ainda o potássio (K) e o ferro (Fe) com valores médios de 1500 e 1060 ppm, respetivamente. Na generalidade das amostras com uma baixa expressão, é possível ainda encontrar a presença de bário (Ba), manganês (Mn), estrôncio (Sr) e vestígios na ordem de 1 a 5 dezenas de ppm de crómio (Cr), zinco (Zn) e zircónio (Zr) (Tabela 5.8).

Presentes apenas em alguns dos 22 provetes, onde ocorrem com alguma expressão o titânio (Ti) em 17 destes, com valores médios de 240 ppm, e o enxofre (S) em 13, com uma concentração média de 540 ppm.

Tabela 5.8. Concentração média (ppm) dos elementos químicos analisados nos 22 provetes.

Elemento químico	Ca	Si	K	Fe	Ba	Mn	Sr	Cr	Zn	Zr
Concentração média (ppm)	467145,6	2488,2	1448,2	1058,9	212,1	123,7	97,9	37,4	11,8	4,7

A elevada concentração do cálcio deve-se a uma elevada pureza dos mármore explorados na região da pedreira, constituídos essencialmente por calcite e tendo como principal mineral acessório o quartzo, levando a que estes apresentem também concentrações significativas de silício.

Estudos realizados por Lopes e Martins (2015) corroboram a presença de alguns dos elementos encontrados nos provetes, pois estes identificam óxidos de ferro, magnésio, potássio e titânio, em mármore do Complexo Vulcano-Sedimentar-Carbonatado de Estremoz. Dias (2020), nos seus trabalhos realizados com XRF, identificaram, para além destes elementos, o estrôncio, crómio, zinco e zircónio.

As relações estabelecidas entre os diferentes elementos identificados também foram alvo de análise, encontrando-se sintetizadas na Figura 5.8, nas quais se verifica que, quanto maior for a quantidade de cálcio na rocha, menor vai ser a concentração de silício, uma vez que maiores purezas do mármore condicionam a presença de minerais acessórios. Esta tendência é igualmente verificada para elementos como o zircónio, potássio e ferro. Por outro lado, estes encontram-se bastante correlacionados com o silício, estabelecendo com o mesmo uma relação linearmente positiva (Figura 5.11).

Dos elementos identificados, o único que estabelece alguma relação linear positiva com a concentração de cálcio é o enxofre, ou seja, mármore com mais cálcio geralmente apresentam também maior quantidade de enxofre (Figura 5.10).

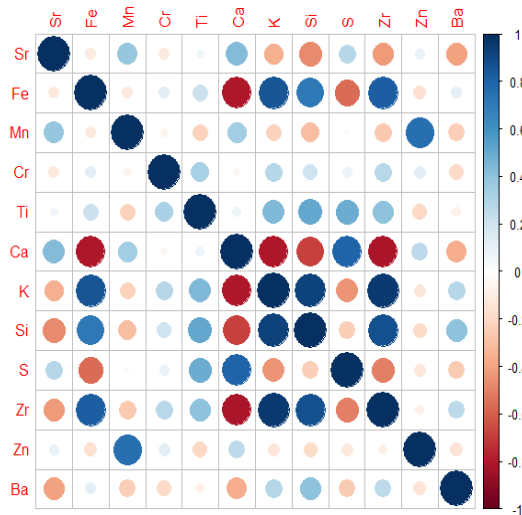


Figura 5.10. Matriz de correlação dos elementos químicos com os componentes principais.

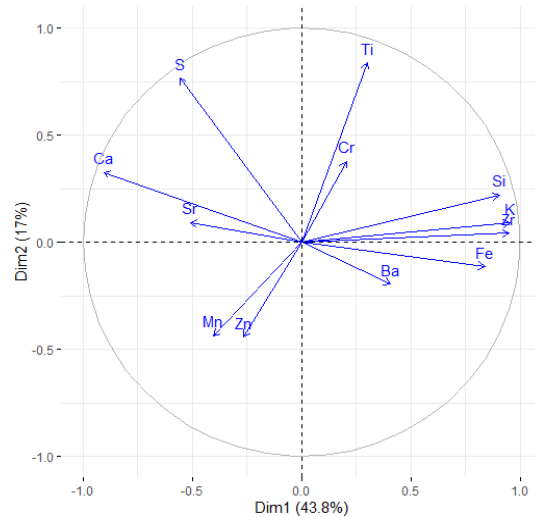


Figura 5.11. Análise dos componentes principais (ACP) dos elementos químicos.

No que respeita às concentrações de silício, as diferenças registadas entre as amostras são relativamente significativas, refletindo-se tal situação na obtenção de um desvio padrão relativo bastante elevado, cerca de 65 % para o conjunto amostrado. Dos valores medidos, destacam-se as concentrações registadas nas amostras 2, 4, 6 e 8, na ordem dos 3 a 5 milhares de ppm (0,3 a 0,5 %), enquanto as restantes apresentam valores em torno de 1 milhar (0,1%) (Figura 5.12).

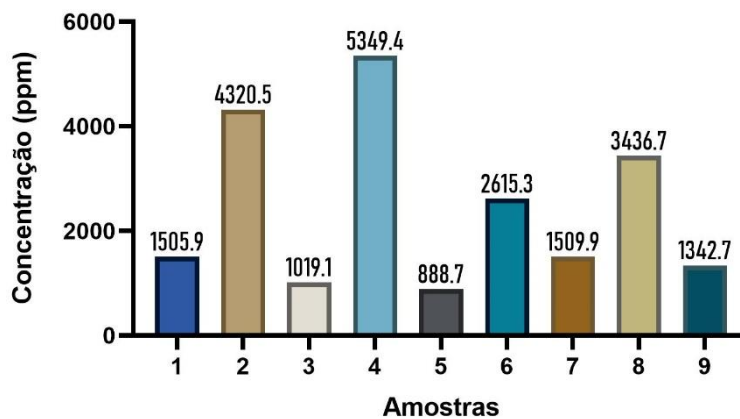


Figura 5.12. Resultados das concentrações de Si presentes em cada amostra.

Relação entre o XRF e o LIBS na avaliação do silício:

A relação existente entre o ensaio de XRF e LIBS foi estabelecida com base na análise química de 11 provetes. A sua representação gráfica encontra-se sintetizada na Figura 5.13, na qual se observa a existência de uma relação representada através de um modelo linear positivo, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9. O valor do coeficiente de determinação ao ser próximo de 1 indica a existência de uma correlação bastante elevada entre os valores medidos para a sílica nos dois ensaios. Demonstra-se, assim, que o ensaio LIBS é adequado para efetuar a estimação da concentração de sílica.

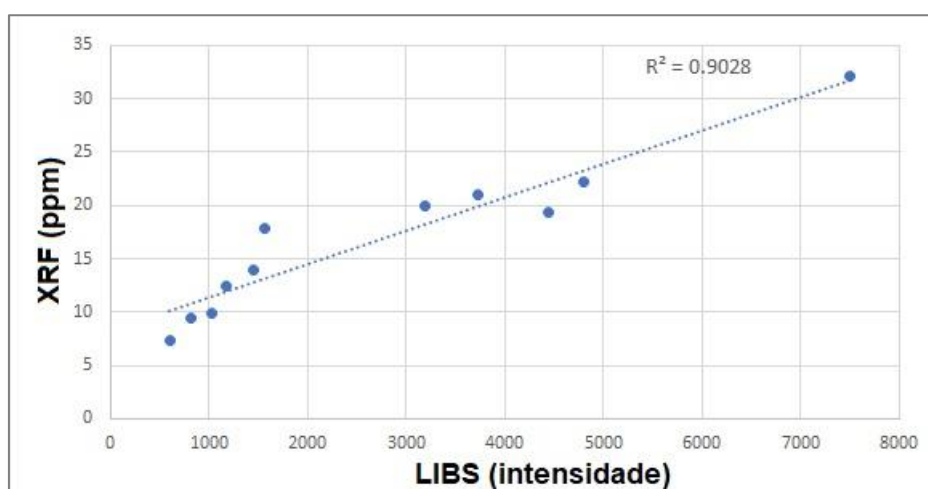


Figura 5.13. Relação entre o LIBS e o XRF na avaliação do silício presente nas amostras de mármore recolhidas na pedreira.

5.3 Zonamento geomecânico

A distribuição espacial dos valores de RCU medidos em laboratório e os estimados localmente com o martelo de Schmidt, permitiu zonar o maciço em termos geomecânicos. No zonamento efetuado, apresentado na Figura 5.14, é possível constatar que a área 5 regista as maiores resistências, seguida da área 4. Por outro lado, as áreas de 1 e 2 são as que apresentam valores mais baixos. De um modo geral, observa-se que, para cotas menores, o valor de resistência à compressão uniaxial registado é menor.

Consequentemente pode-se afirmar que as velocidades de corte e perfuração registadas nas áreas 1 e 2 serão tendencialmente mais elevadas, visto que a resistência apresentada pela rocha é menor. Pelo contrário, na área 5, é expectável o registo de

menores velocidades de corte e perfuração, devido aos elevados valores de resistência evidenciados pela rocha.

Dentro de cada zona, através das medições realizadas com o martelo de Schmidt, evidenciam-se algumas tendências de variação da resistência que permitem zonar as mesmas, destacando-se, na área 2, o crescimento da resistência no sentido NW e, na área 3, a ocorrência de um aumento no sentido SE.

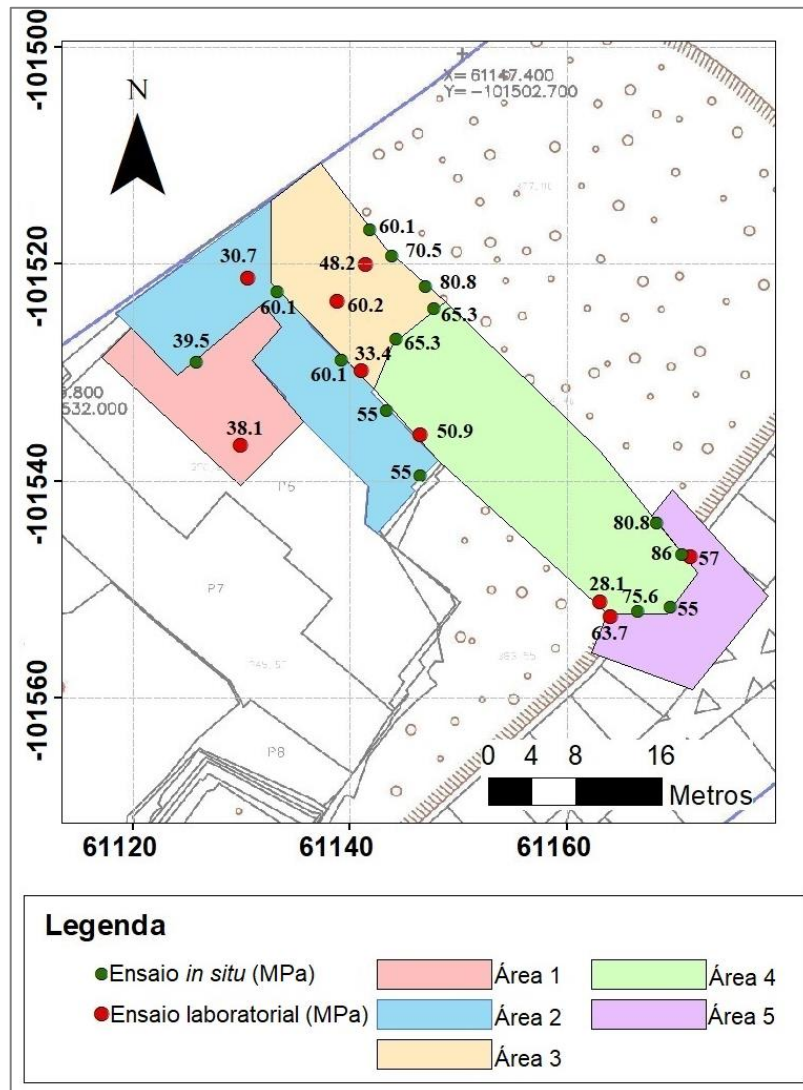


Figura 5.14. Resultado do zonamento geomecânico.

5.4 Zonamento geoquímico

O zonamento geoquímico teve por base a representação da concentração de silício nas 9 localizações georreferenciadas, ao longo das 5 áreas de estudo. Através

da análise da Figura (5.15), constata-se que as áreas 2 e 4 registam as maiores concentrações de silício, cerca de 2 a 3 vezes superiores aos valores registados nas restantes áreas, com concentrações mínimas na área 5.

Verifica-se também que amostras realizadas na mesma área de estudo apresentam valores semelhantes. Posto isto, pode afirmar-se que as discrepâncias existentes nas concentrações de silício se devem, sobretudo, às diferentes cotas apresentadas por cada área de estudo.

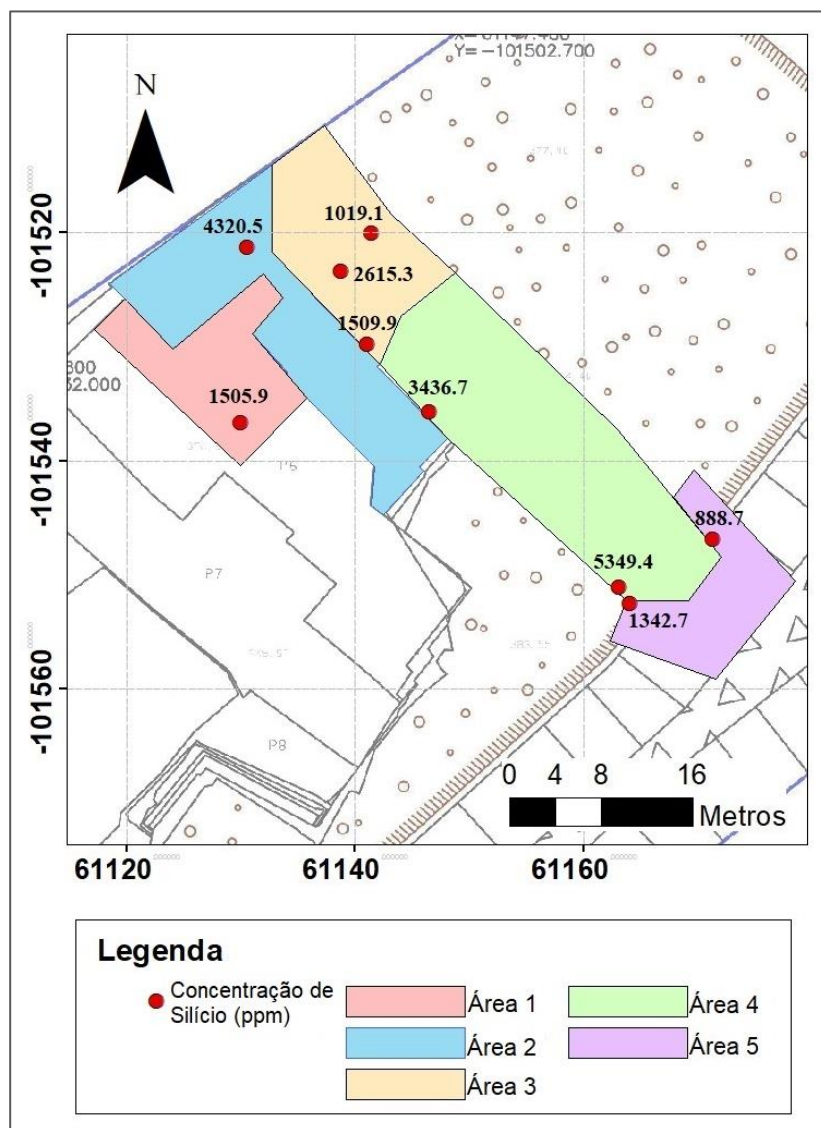


Figura 5.15. Resultado do zonamento geoquímico.

Tendo em conta o zonamento realizado, é expectável que as ferramentas utilizadas nas operações unitárias de corte e perfuração, como o bit de perfuração e o fio diamantado, exibam diferentes desgastes consoante a área onde decorre a

operação. É esperada a ocorrência de maiores desgastes das ferramentas nas operações a realizar nas áreas 2 e 4, devido à elevada concentração de silício presente na rocha. Por outro lado, na área 5 registam-se valores mínimos de silício nos mármore, levando a que estes apresentem uma menor abrasividade e por sua vez conduzindo a um menor desgaste das ferramentas.

6 Modelação de fracturas e avaliação da dimensão dos blocos

6.1 Parâmetros de entrada no modelo

Os dados de entrada utilizados pelo software FTRIAN na modelação das fracturas e posterior avaliação da blocometria encontram-se sintetizados em três ficheiros com informações referentes ao sistema de fracturas, ao modelo a gerar e ao processamento dos dados. Dado que, no presente trabalho, foram efetuados três tipos de modelos referentes às áreas 2, 3 e um outro representativo de toda a pedreira, é necessário enquadrar os dados de acordo com cada uma das situações representadas.

Dos ficheiros utilizados, dois possuem informações transversais para as três situações, uma vez que o sistema de fracturas a ser modelado é sempre o mesmo. Num dos arquivos, encontra-se estipulada a dimensão mínima e máxima da área admitida para os planos de fractura modelados, 25 m² e 250 m² respetivamente, enquanto no outro é sintetizada a informação proveniente das 4 famílias de fracturas principais medidas *in situ*, em termos da sua orientação, azimute e inclinação, coeficiente Fisher e a sua frequência (Tabela 6.1).

Este apresenta ainda os dados relativos às fracturas aleatórias agrupadas numa quinta família, em que a orientação estipulada para a mesma é arbitrada aleatoriamente e o valor de k-Fisher atribuído é aproximadamente 0, de maneira a garantir a máxima heterogeneidade possível na direção das fracturas criadas. No conjunto em causa, o único valor estipulado que se encontra de acordo com o amostrado *in situ* é a sua frequência (Tabela 6.1).

Tabela 6.1. Parâmetros de entrada relativos às famílias de fracturas amostradas.

Famílias	Azimute (°)	Inclinação (°)	Coefficiente de Fisher	Frequência relativa de fracturas
1	45,20	88,41	505,53	0,217
2	337,00	90,00	500,00	0,130
3	325,31	45,02	42,06	0,349
4	25,52	55,78	97,94	0,174
Aleatórias	25,52	55,78	0,001	0,130

A informação presente neste arquivo vai ser apenas alterada na modelação de um novo cenário, direção das frentes de exploração de acordo com os eixos cardeais, em que são somados aos azimutes de todas as famílias 45° .

No terceiro ficheiro importado pelo software com dados de entrada, são caracterizadas as dimensões do modelo com base na definição das coordenadas espaciais X, Y e Z do mesmo, com valores mínimos de 0 e máximos de 20 em todos os modelos.

No que respeita às propriedades do modelo são, ainda, introduzidas as dimensões mínimas e máximas das arestas dos blocos considerados pelo *software* na avaliação da blocometria, sendo estas de 0,5 e 2 m respetivamente. É definida também a resolução deste 0,10 m, correspondente ao tamanho das partículas que compõem o modelo.

Este documento contém igualmente os parâmetros relativos ao processamento dos dados, em que é estipulado que uma iteração efetuada pelo programa corresponde à criação de uma fractura. É definido ainda que, por cada modelo criado, só podem ser realizadas no máximo 500 iterações até ser atingido o critério de paragem, a ultrapassagem da densidade objetivo.

O valor de densidade objetivo definido varia consoante o tipo de modelo a realizar, considerando-se, nas áreas 2 e 3, uma densidade linear de fracturas de 0,69 e 1,13, respetivamente, enquanto que, no modelo global da pedra esta é de 0,941. Neste ficheiro é também estipulado que serão utilizadas 1000 linhas de amostragem na avaliação da densidade presente nos modelos.

6.2 Resultados

As 20 simulações efetuadas para as áreas de estudo 2 e 3 e para o modelo geral da pedra possibilitaram a avaliação da blocometria presente em cada uma destas situações. As curvas relativas aos histogramas da blocometria das simulações realizadas para as 3 situações em estudo, sintetizadas nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, permitem constatar que a forma das curvas de todas estas é bastante similar, sendo que, em simulações de igual situação, as mesmas são praticamente coincidentes.

Esta forma transversal da curva para todas as situações em estudo é explicada por uma diminuição do número de blocos à medida que a dimensão das suas arestas

aumenta, passando de quantidades de aproximadamente 2 milhares para tamanhos de aresta mais pequenos, para 2 a 3 dezenas de blocos simulados com elevadas dimensões de aresta.

Da análise das curvas, é possível aferir que os blocos com arestas compreendidas entre os 0,5 m e os 0,9 m, nas simulações da área 2 representam 90,2% a 93,1% dos blocos gerados, enquanto na área 3 estes apresentam valores compreendidos entre os 93,7% e os 95,8%. No modelo geral, os blocos com menores dimensões de aresta exibem valores entre os 92 % e os 94,5%.

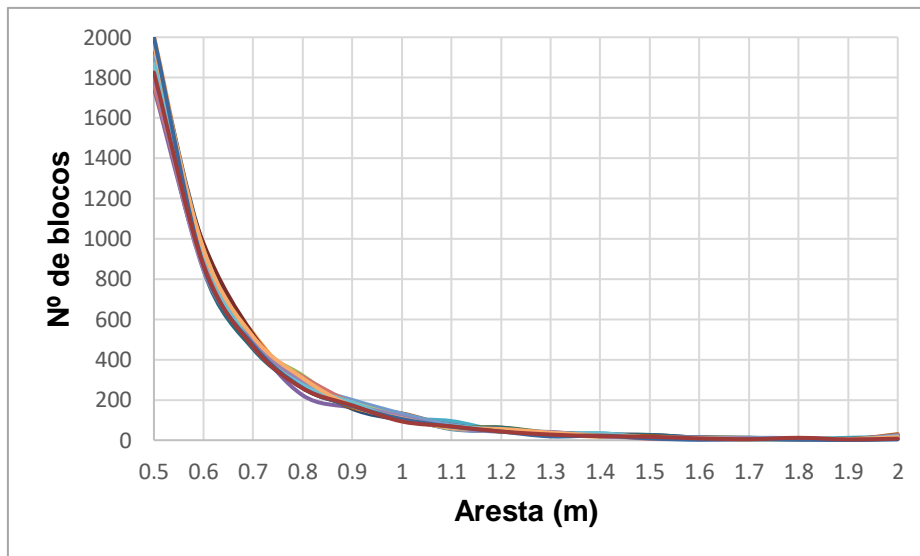


Figura 6.1. Histograma do número de blocos formados nas simulações da área 2.

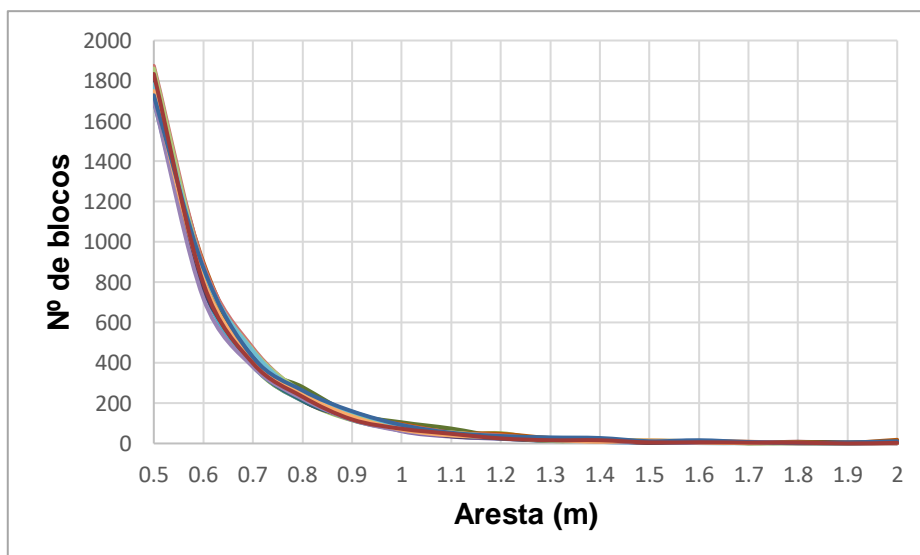


Figura 6.2. Histograma do número de blocos formados nas simulações do modelo geral da pedraira.

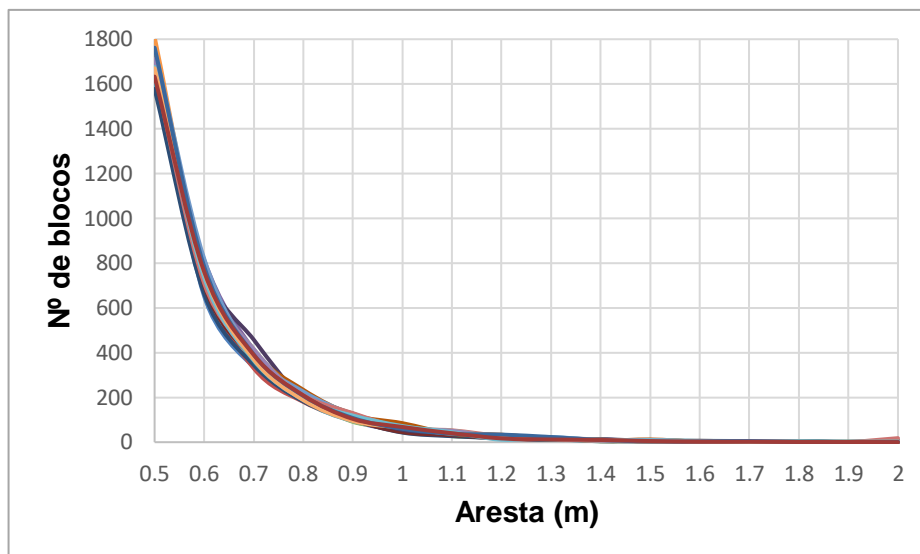


Figura 6.3. Histograma do número de blocos formados nas simulações da área 3.

Na representação 3D da blocometria presente em cada uma das 3 situações, foi considerado como representativo uma simulação com uma taxa de recuperação próxima da mediana das 20 simulações.

Na Figura 6.4, observa-se a representação 3D da área 2 que contemplou a criação de 3896 blocos num volume de 4000 m³ em que destes, 91,5% apresentam dimensões compreendidas entre os 0,5 m e os 0,9m (Figura 6.5) e 39 blocos apresentam tamanho de aresta compreendido entre os 1,7 m e os 2 m (Figura 6.5).

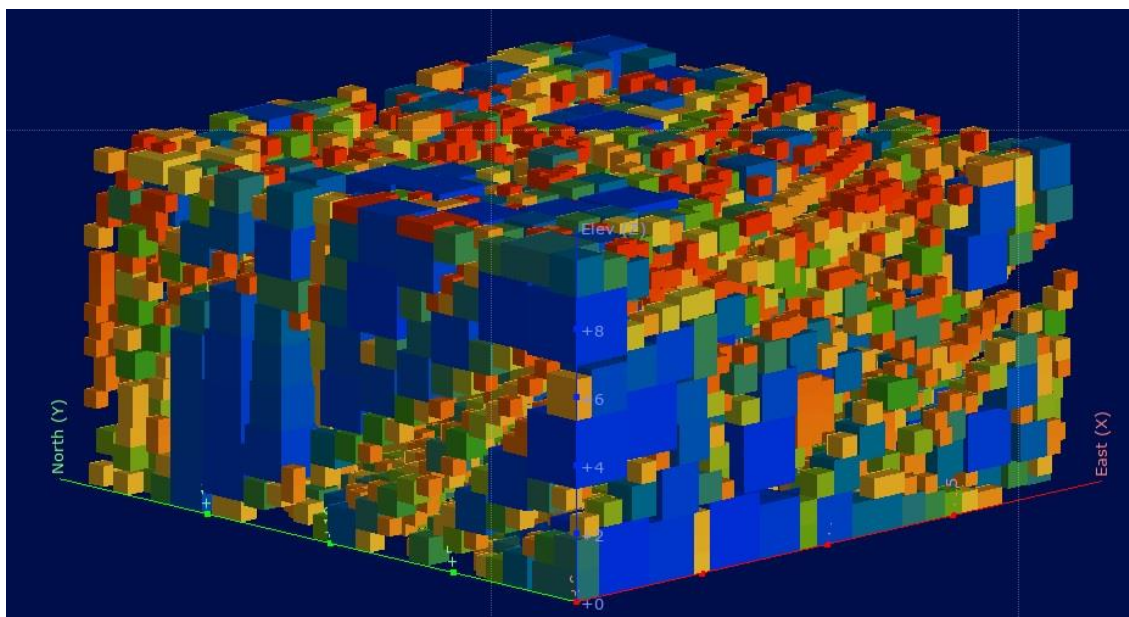


Figura 6.4. Ilustração da dimensão dos blocos que podem ser retirados de um macrobloco na área 2 para uma realização aleatória (*software Leapfrog*).

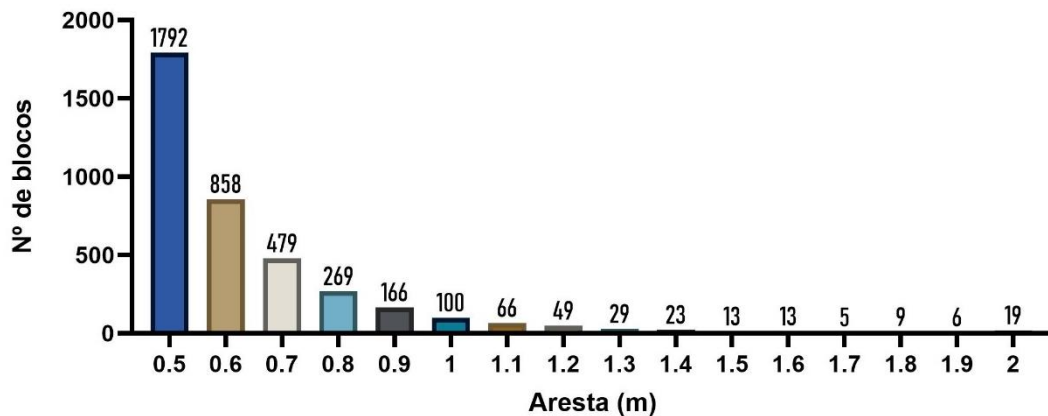


Figura 6.5. Histograma do número de blocos formados na área 2.

O modelo geral da pedreira, ilustrado na Figura 6.6, quando comparado com a área 2, apresenta um menor número total de blocos formados, 3496, e de blocos com maiores dimensões de aresta, 11 (Figura 6.7), devido à presença de uma maior densidade linear de fracturas. No entanto, dada a existência de um menor espaço entre fracturas adjacentes, a percentagem de blocos gerados com menores dimensões de aresta é maior, 93,8% (Figura 6.7).

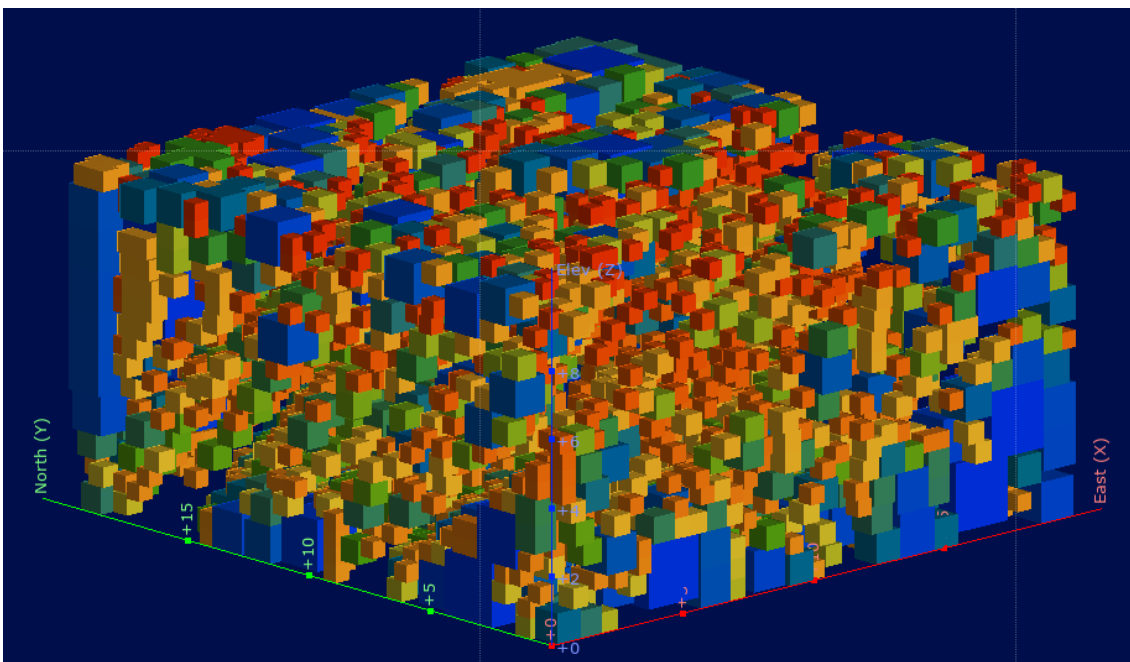


Figura 6.6. Ilustração da dimensão dos blocos que podem ser retirados de um macrobloco no modelo geral da pedreira para uma realização aleatória (*software Leapfrog*).

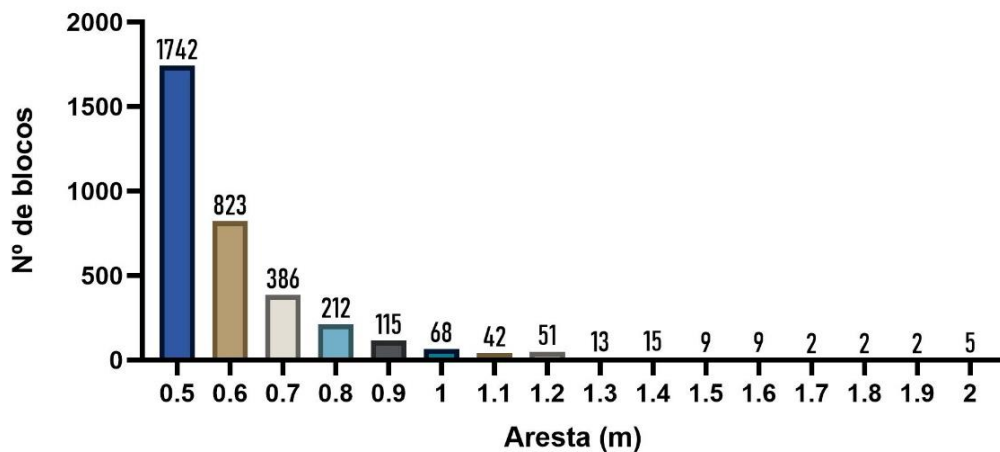


Figura 6.7. Histograma do número de blocos formados no modelo geral da pedraira.

Por último, a área 3, ilustrada na Figura 6.8, apresenta um número total de blocos formados mais baixo, 3463, um menor número de blocos com dimensões de aresta entre os 1,7 e os 2 m, 6 e uma maior percentagem de blocos com menores dimensões 95,3 % devido ao facto de, nesta área, se verificar uma maior densidade linear de fracturação das 3 situações (Figura 6.9). Espacialmente, no modelo criado, visualiza-se com maior evidência os vazios existentes no volume de estudo representativos dos planos das fraturas (Figura 6.8).

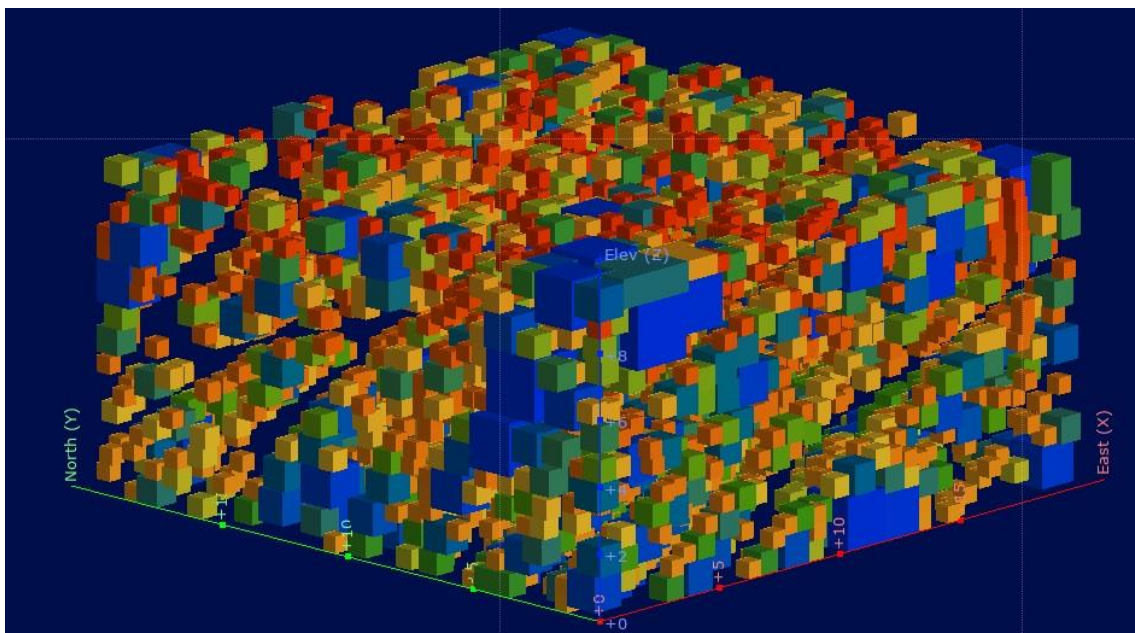


Figura 6.8. Ilustração da dimensão dos blocos que podem ser retirados de um macrobloco na área 3, para uma realização aleatória (*software Leapfrog*).

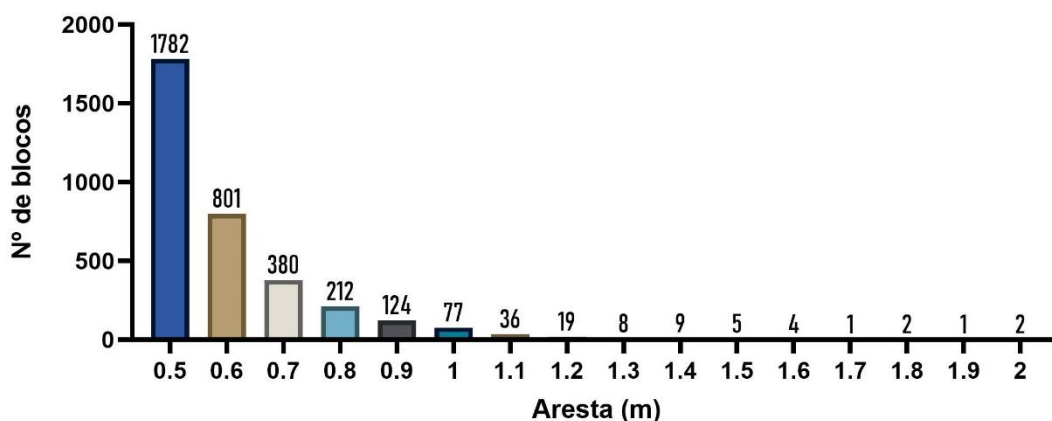


Figura 6.9. Histograma do número de blocos formados na área 3.

Tendo por base os resultados relativos à blocometria presente nas 20 simulações realizadas para cada um dos 3 modelos, calculou-se a taxa de recuperação presente nas mesmas. As taxas de recuperação obtidas nas simulações dos modelos encontram-se representadas nas Figuras 6.10, havendo valores compreendidas entre os 33,69% e os 44,64% para a área 2, na área 3, entre os 20,85 e 29,10%, e no modelo geral da pedraira, situa-se entre os 26,21% e os 36,52%.

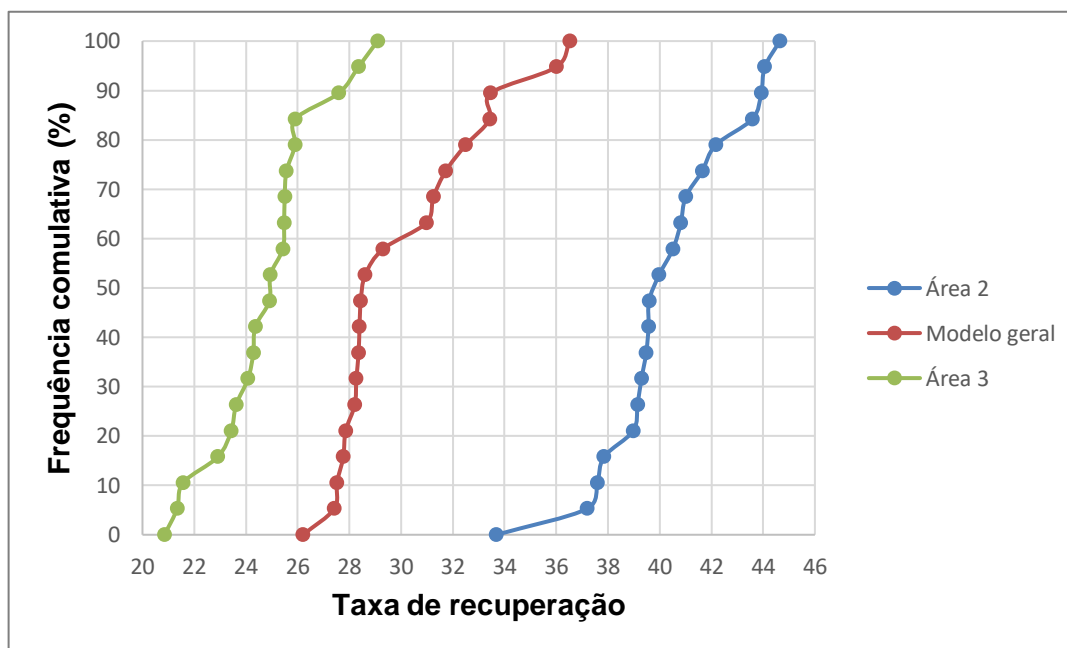


Figura 6.10. Resultados das 20 simulações para as 3 situações em estudo.

Quando comparadas as medianas das taxas de recuperação dos 3 modelos, verifica-se que a área 2 apresenta maiores recuperações, seguida do modelo geral da pedraira e da área 3, conforme Tabela 6.2. Os maiores valores registados na área 2

devem-se à presença de uma menor densidade de fracturação existente nesse piso de 0,69, contrastando com os 0,941 do modelo geral e 1,13 da área 3 (Tabela 6.2).

Tabela 6.2. Mediana das taxas de recuperação dos 3 modelos (em %).

Modelo	Mediana	Densidades
Área 2	39,78	0,69
Geral	28,53	0,941
Área 3	24,93	1,13

No que respeita ao novo cenário, em que os planos da frente de exploração se encontram alinhados com os eixos cardeais, verifica-se que este apresenta melhores taxas de recuperação (Figura 6.13).

As melhorias existentes nos três modelos são bastante similares, com valores de 4,4 % na área 2, 3,7% na área 3 e 5,4 % no modelo geral da pedraira. Há também a mencionar a tendência ocorrida no cenário, acima referida, registando-se maiores recuperações na área 2 e menores na área 3.

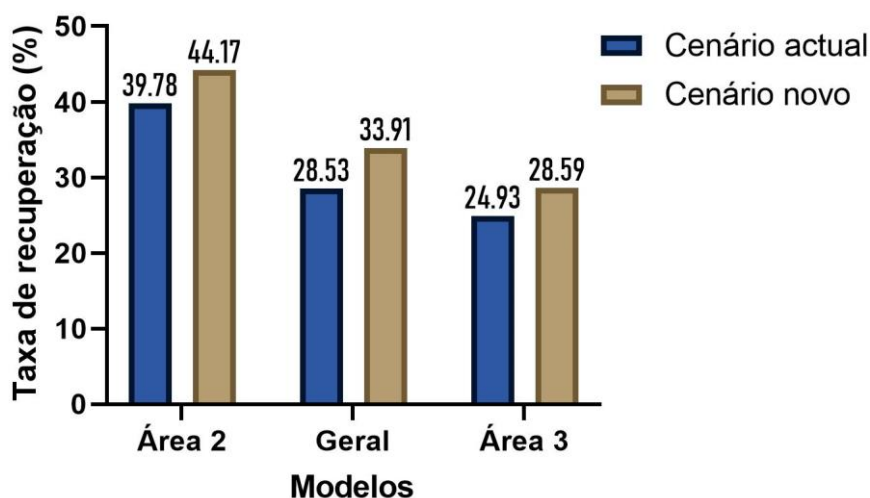


Figura 6.11. Histograma com a mediana das taxas de recuperação registadas em cada modelo para os dois cenários.

7 Considerações finais

7.1 Conclusões

O desenvolvimento do presente trabalho teve como principais objetivos a determinação expedita de três indicadores das principais características geotécnicas do maciço rochoso da pedreira Texugo, que são a resistência à compressão uniaxial da rocha, a concentração de sílica presente no mármore e o estudo do sistema de fracturas instalado no maciço.

O zonamento geoquímico realizado para o Si permite antever que o desgaste produzido nos bits de perfuração e no fio diamantado durante as operações a realizar nas áreas 2 e 4 será mais elevado, enquanto na área 5 apresentará valores mais baixos e nas áreas 1 e 3 registrar-se-á uma situação intermédia.

Tendo em conta a análise química efetuada para os mármorees pelo XRF, é possível concluir que, apesar destes serem compostos essencialmente por cálcio, apresentam concentrações importantes de silício com uma elevada variabilidade, permitindo, assim, validar a consideração desta como indicador geotécnico do desgaste produzido nas ferramentas. Posto isto, a relação estabelecida para os mármorees entre o XRF e o LIBS na avaliação do silício assume uma maior relevância, pois esta prova, com base num coeficiente de determinação bastante elevado de 0,91, que o instrumento portátil LIBS pode ser considerado para a avaliação da mesma, de forma mais expedita que o XRF. Isto possibilita um mapeamento mais minucioso das concentrações de sílica no maciço, o que leva a uma previsão mais precisa do desgaste produzido nas ferramentas.

Relativamente ao zonamento efetuado para a resistência à compressão uniaxial da rocha, evidencia-se uma tendência de diminuição desta em profundidade, permitindo concluir que a produtividade das técnicas de perfuração e corte aumenta em profundidade. À semelhança das concentrações de sílica, existe também uma variabilidade considerável nas resistências da rocha tanto nos ensaios laboratoriais como nos realizados *in situ*, devendo-se, sobretudo, a diferentes graus de meteorização dos mármorees e pela presença ou não de vergadas. Esta variabilidade faz com que a resistência à compressão uniaxial seja um indicador geotécnico a ter em conta na previsão das velocidades de perfuração e corte.

Para além disso, conclui-se também que, apesar dos coeficientes de determinação não serem muito elevados, apresentam valores significativos de 0,68 que permitem utilizar o ensaio do martelo de Schmidt na avaliação expedita da resistência á compressão uniaxial da rocha nas frentes de exploração

Em relação ao estudo da orientação das fracturas e da sua intensidade, observa-se que a recuperação média da pedreira é de 28,53 %. Este valor representa a mediana das 20 simulações realizadas pelo *software* FTRIAN para o modelo geral da pedreira. Ao considerar-se os valores registados nos restantes modelos, é ainda plausível aferir que a densidade linear de fracturação condiciona a recuperação presente na pedreira na medida em que maiores densidades conduzem a menores recuperações, evidenciando-se tal situação na área de estudo 3.

Para além da densidade linear de fracturação, infere-se ainda que a recuperação é afetada de igual maneira pela orientação das frentes de exploração, onde uma rotação destas em 45° conduziu nos três modelos a um crescimento médio da recuperação em 5%, porque a orientação das fracturas fica mais bem alinhada com os eixos coordenados.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

No presente estudo evidenciaram-se alguns resultados que devem ser estudados mais minuciosamente em trabalhos futuros e cuja realização seria relevante para toda a pedreira.

Ao nível da avaliação da resistência à compressão uniaxial da rocha, um dos trabalhos a desenvolver seria a recolha de mais amostras em diferentes zonas do maciço de forma a conseguir identificar-se o maior número possível de resistências à compressão uniaxial da rocha presentes na pedreira. Por conseguinte, obter-se-ia um maior coeficiente de determinação para o modelo que traduz a relação existente entre a resistência à compressão uniaxial e a dureza de Schmidt, conduzindo a menores erros na estimação da resistência medida *in situ*.

Adicionalmente, seria importante validar as previsões realizadas para a produtividade horária das operações unitárias, sendo aconselhada a realização da cronometragem dos tempos de corte e perfuração nos diferentes locais onde havia sido estimada a sua velocidade.

Um dos trabalhos futuros passaria pela medição da concentração de sílica *in situ* ao longo de todo o maciço da pedreira com o instrumento LIBS, conseguindo-se, assim, uma previsão mais detalhada do desgaste produzido nas ferramentas de corte e perfuração.

Os trabalhos a desenvolver relativamente à avaliação da recuperação consistiriam na realização de um novo levantamento da fracturação segundo um maior número de superfícies de amostragem em que as orientações destas apresentavam uma elevada variabilidade. Isto possibilitaria caracterizar melhor o sistema de fracturas presente no maciço em termos da orientação e densidade linear das famílias de fracturas ocorrentes. Complementarmente, efetuar-se-ia o estudo da recuperação para diferentes orientações das frentes de estudo, conhecendo-se, assim, qual seria a melhor orientação que as frentes de exploração da pedreira deveriam apresentar.

Referências bibliográficas

Aliabdo, A. A. E. e Elmoaty, A. E. M. A. (2012). Reliability of using nondestructive tests to estimate compressive strength of building stones and bricks. *Alexandria Engineering Journal*. Faculty of Engineering, Alexandria University, 51(3), pp. 193–203

Almeida, J. A. e Barbosa, S. (2008). 3D Stochastic Simulation of Fracture Networks Conditioned Both To Field Observations and a Linear Fracture Density. In *Oitavo Congresso Internacional de Geoestatística*, pp. 129–136.

Almeida, J. A., Vintém, C., Luís, A. G. e Lopes, M. (2003). Modelação estocástica e compartimentação dos mármorees na unidade de Borba. In *A Geologia da Engenharia e os Recursos Geológicos*, pp. 309–321.

Amaro, L. B. H. C. (2018). *Caracterização de reservatórios fraturados – simulação de fracturas por objetos e avaliação da Porosidade e do tensor de permeabilidade* (Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa).

Aydin, A. e Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1), pp. 1–14

Barros, S., Rosa, L. R., Paulino, P. T., Leitão, C., Agostinho, P., Leite, S. S., Bidarra, M., Botelho, J. M. e Luís, C. (2014) Produção de Rochas Ornamentais. Análise setorial. *Novo Banco, publicação online, novobanco.pt*.

Sci Aps (2020) SciAps Handheld LIBZ Analyzer. Sci Aps, *publicação online, sciaps.com*

B – EXPLORE, Extração de Mármorees e Inertes, Lda. (2018). *Programa de trabalhos de pesquisa da Pedreira “Traz-os-Montes N°3” – N°4874*

B Stone - Marble 2016, visto 6 Outubro 2020, url:<
<https://www.facebook.com/bstone.marble> >

Bhatnagar, A., Khandelwal, M. e Rao, K. U. M. (2011). Laboratory investigations for the role of flushing media in diamond drilling of marble. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(3), pp. 349–356.

Branco, E. T. (2015). *Acompanhamento Técnico e Elaboração do Plano de Lavra da Pedreira Texugo, da Empresa Lugramar, Lda.* (Tese de Mestrado, Universidade de Évora).

Cargill, J. S. e Shakoor, A. (1990). Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 27(6), pp. 495–503.

Costa, V. C., Augusto, A. S., Castro, J. P., Machado, R. C., Andrade, D. F., Babos D. V., Seperança, M. A., Gamela, R. R., Pereira-Filho E. R. (2019). Laser Induced-Breakdown Spectroscopy (LIBS): Histórico, Fundamentos, Aplicações E Potencialidades. *Química Nova*, 42(5), pp. 527–545.

DGEG (2020). Boletim de Minas. Tema em destaque Rochas Ornamentais. *Direcção Geral de Energia e Geologia, publicação online, dgeg.gov.pt*.

Dias, L. C. R. (2020). *STONECOLOR: Color of commercial marbles and limestone - causes and changes*. (Tese de Doutoramento, Universidade de Évora).

Elci, H. e Turk, N. (2014). Rock mass block quality designation for marble production. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier, 69, pp. 26–30.

El-Taher, A. (2012). Elemental analysis of granite by instrumental neutron activation analysis (INAA) and X-ray fluorescence analysis (XRF). *Applied Radiation and Isotopes*. Elsevier, 70(1), pp. 350–354.

EN 1926 (2006). Determinação da resistência à compressão uniaxial

Fisher, N. I., Lewis, T. e Embleton, B. J. J. (1993). Statistical analysis of spherical data. *Cambridge university press*

Ghaysari, N., Ataei, M., Sereshki, F., Mikaiel, R. (2012). Prediction of Performance of Diamond wire saw with respect to texture characteristics of rock. *Archives of Mining Sciences*, 57(4), pp. 887–900.

Gomes, D. e Almeida, J. A. (2006). Modelação tridimensional de um sistema de fracturas em explorações de rocha ornamental exploitations. In *VII Congresso Nacional de Geologia*, pp. 1–4

Gondal, M. A., Nasr, M. M., Ahmed, Z., Yamani, Z. H. (2009). Determination of trace elements in volcanic rock samples collected from cenozoic lava eruption sites using LIBS. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 44(5), pp. 528–535.

Henriques, P. F., Carvalho, J. M. F., Falé, P. e Luís, A. G. (2006). Estudos Geológicos Aplicados à Indústria Extractiva de Mármore no Anticlinal de Estremoz - o Caso do Núcleo de Pardais. *Comunicações Geológicas*, (93), pp. 159–184.

ISRM (1981) Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18: 85 - 110

Jafari, A., Khishvand, M. e Rahami, H. (2013). Developing an algorithm for reconstruction blocky systems in discontinuous media: three-dimensional analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37, pp. 661-684.

Jain, D. S. C., Rathore, D. S. S. and Jain, D. H. K. (2013) Investigation the effects of machine parameters on cutting performance of diamond wire saw machine. In Cutting of marble Bench. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(4), pp. 2213–2219.

Jones, G. T., Bailey, D. G. e Beck, C. (1997). Source Provenance of Andesite Artefacts Using Non-Destructive XRF Analysis. *Journal of Archaeological Science*, 24(10), pp. 929–943.

Liu, J. bin, Zhang, Z. jian e Li, B. (2019). Microscopic and macroscopic characterizations of Beijing marble as a building material for UNESCO heritage sites: New insights into physico-mechanical property estimation and weathering resistance. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 225, pp. 510–525.

Lopes, L. (2007). O triângulo do mármore. Estudo geológico. *Revista Monumentos*, (27), pp. 158–167.

Lopes, L. e Martins, R. (2012). Marbles from Portugal. *naturstein, publicação online, naturalstone-online.com*.

Lopes, L. e Martins, R. (2015). Global Heritage Stone: Estremoz Marbles, Portugal. *Geological Society Special Publication*, 407(1), pp. 57–74.

Lopes, L. e Silva, J. B. (2006). Constrangimentos geológicos na exploração de mármore no anticlinal de Estremoz. In *VII Congresso Nacional de Geologia*, pp. 1027–1030.

Luís, A. A. G., Sousa, A. J. e Almeida, J. A. (2005). Modelação da blocometria de uma pedra de mármore. In *XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros*, pp. 1–10.

Manuel Martins – Serviços de Engenharia, Lda (2016). *Plano de Segurança e Saúde, Pedreira Texugo – Nº 5234*

Marcon, D. B., Peiter, C. C. e Castro, N. F. (2012). Utilização de fio diamantado na lavra de granitos comerciais. In *XX – Jornada de Iniciação Científica-CETEM*, pp. 1–4.

Mardia, K. V. (1972). *Statistics of directional data*. Academic Press Inc, London, LTD.

Martins, R. V., Lopes, L. e Branco, E. (2017). Underground Marble Exploitation - A Portuguese Case Study. Technical Aspects. In *IV. International Stone Congress*, pp. 65–83.

Moreira, N. e Lopes, L. (2019). Caracterização dos Mármore de Estremoz no contexto dos mármore da Antiguidade clássica da Zona de Ossa-Morena. In *Mármore 2000 Anos de História. Da Antiguidade à Idade Moderna*. Theya Edit, pp. 13–54.

Mosch, S., Nikolayev, D., Ewiak, O., Siegesmund, S. (2009). Optimierung der Werksteingewinnung mit 3D-BlockExpert. *Steinbruch Sandgrube 5*, pp 8–11

Mosch, S., Nikolayew, D. e Ewiak, O. (2011). Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sciences*, 63(7), pp. 1911–1924.

Moura, A., Carvalho, C., Almeida, I. A., Saúde, J. G., Ramos, J. M. F., Augusto, J. P., Rodrigues, J. D., Carvalho, J., Martins, L., Matos, M. J., Machado, M. J., Sobreiro, M. J., Peres, M., Martins, N. A., Bonito, N., Henriques, P., Sobreiro, S. (2007). *Mármore e calcários ornamentais de Portugal*. Gestão de Artes Gráficas SA, Amadora.

Newman, B. e Loendorf, L. (2005). Portable x-ray fluorescence analysis of rock art pigments. *Plains Anthropologist*, 50 (195), pp. 277–283.

Nikolayew, D., Siegesmund, S., Mosh, S. e Hoffmann, A. (2007). Modellbased prediction of unfractured rock masses. *Z dt Ges Geowiss*, 158(3), pp. 483–490

Ozcelik, Y., Polat, E., Bayram, F. e Ay, A. M. (2004). Investigation of the effects of textural properties on marble cutting with diamond wire. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (SUPPL. 1), pp. 1–7

Ozcelik, Y. e Yilmazkaya, E. (2011). The effect of the rock anisotropy on the efficiency of diamond wire cutting machines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier, 48(4), pp. 626–636.

Proceq SA (2013) Operating Instructions Shear Wave Transducers 250 kHz, p.4

Proceq SA (2017). Operating Instructions Pundit Lab / Pundit Lab + Ultrasonic Instrument. p. 32.

Quintas, A. (2020). Os mármoreos do Alentejo em perspectiva histórica: de meados do século XIX a 2020. *História e Economia*, 23, pp. 93–116.

SciAps 2019, LIBS, consultado a 25 de Setembro de 2020, url:<
<https://www.sciaps.com/LIBS-handheld-laser-analyzers/z-series/>>

SciAps 2019, XRF, consultado a 15 de Setembro de 2020, url:<
<https://www.sciaps.com/xrf-handheld-x-ray-analyzers/>>

Servet, D., Sengun, N., Ibrahim, U., Tamer, E., Deniz, A. e Rasit, A. (2014). Variation of vertical and horizontal drilling rates depending on some rock properties in the marble quarries. *International Journal of Mining Science and Technology*. China University of Mining & Technology, 24(2), pp. 269–273

Sheremeti-Kabashi, F. e Snethlage, R. (2000). Determination of structural anisotropy of Carrara Marble with ultrasonic measurements. *In Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, pp. 247–253.

Siegesmund, S., Nikolayev, D., Hoffmann, A. e Mosch, S. (2007). 3DBlockExpert. *Naturstein* 5, pp. 102–107

Sobreiro, M. J. (2002). Produção Nacional e Comércio Externo de Mármoreos e Calcários. *DGEG*, pp. 1–22.

ThermoFisher SCIENTIFIC 2019, consultado a 15 de Setembro de 2020, url:<
<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/10131166#/10131166>>

Vallejo, L. I. G., Ferrer, M. e Ortuño, L. (2004). *Ingeniería Geológica*. 1ª Edição, Pearson Italia Spa

Weiss, T., Rasolofosaon, P. N. J. e Siegesmund, S. (2002). Ultrasonic wave velocities as a diagnostic tool for the quality assessment of marble. *Geological Society Special Publication*, 205, pp. 149–164.

Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S. G. e Sousa, L. M. O. (2018). Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries. *Engineering Geology*. Elsevier B.V, 232, pp. 22–33.

Yilmazkaya, E. e Ozcelik, Y. (2015). Development of Cuttability Chart for a Marble Cutting with Monowire Cutting Machine. *In International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM)*, pp. 73–85.

Zichella, L., Bellopede, R., Marini, P., Tori, A. e Stocco, A. (2017). Diamond wire cutting: A methodology to evaluate stone workability. *Materials and Manufacturing Processes*. Taylor & Francis, 32(9), pp. 1034–1040.