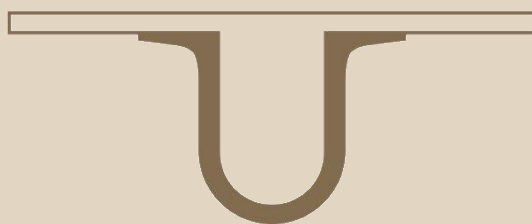




UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Nuno José de Sousa Coelho

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE UM
MACIÇO DE ROCHAS CARBONATADAS COM APLICAÇÃO
DA TÉCNICA DE FOTOGRAMETRIA
CASO DE ESTUDO APLICADO A UMA PEDREIRA DE ROCHA
INDUSTRIAL**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências com especialização em Recursos
Geológicos

orientada pelo Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo e pelo
Professor Doutor Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade

Apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

Fevereiro de 2019

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Ciências da Terra

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE UM MACIÇO DE ROCHAS CARBONATADAS COM APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FOTOGRAMETRIA

CASO DE ESTUDO APLICADO A UMA PEDREIRA DE ROCHA
INDUSTRIAL

Nuno José de Sousa Coelho

Tese no âmbito do Mestrado em Geociências com Especialização em Recursos Geológicos orientada pelo Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo e pelo Professor Doutor Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2019



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



“Fifty years ago, Geology was in its infancy; there were but few who cultivated it as a Science ... If an unfortunate lover of nature was seen hammering in a stone quarry, he was generally supposed to be slightly demented.”

Peter Bellinger Brodie, 1858

Agradecimentos

Com o terminar de mais uma etapa académica, quero aqui deixar expresso o agradecimento às pessoas que tornaram tudo isto possível, nomeadamente:

Aos professores orientadores, Doutor Fernando Pedro Figueiredo e ao Doutor Pedro Andrade por todos os ensinamentos, toda a disponibilidade e humildade mostrada.

Ao Doutor João Duarte por tudo o que me ensinou e pela oportunidade de poder trabalhar associado à empresa IQGeo.

Ao Professor Doutor Gil Rito Gonçalves por todo o tempo, material e ensinamento disponibilizado.

Ao engenheiro Hugo Pereira, e à empresa Fassa Bortolo por me terem recebido e permitirem o acesso à pedreira “Cabeço da Moita Negra”.

Ao meu pai, à minha mãe, ao meu irmão e avó por toda a ajuda financeira e apoio que me ofereceram durante todo o percurso académico.

À minha namorada Dora pela enorme paciência e ajuda durante a elaboração deste trabalho.

A todos os meus amigos cujas amizades se criaram através da convivência académica, pelo apoio e pela partilha de momentos e sentimentos durante todo percurso.

A todo o Departamento de Ciências da Terra e todos os seus docentes com quem tive a oportunidade e gosto de trabalhar. Um especial obrigado aos seus auxiliares, nomeadamente a Sra. Conceição da biblioteca que sempre se mostrou muito prestável.

Mais uma vez, e para todos, um muito obrigado.

Resumo

Este trabalho teve como principais objetivos caracterizar parte do maciço rochoso da pedreira “Cabeço da Moita Negra”, localizada na freguesia de Fátima, através de métodos tradicionais de levantamento geológico e de levantamentos fotogramétricos com base em levantamentos fotográficos e aerofotogramétricos da pedreira onde se insere a frente de estudo. A comparação dos dados obtidos por estas duas metodologias foi também um dos objetivos da presente dissertação.

O trabalho inicia-se com a obtenção dos dados necessários para a caracterização do maciço rochoso, sejam estes recolhidos *in situ* ou através de ensaios laboratoriais. Os levantamentos fotográficos e de pontos de controlo são também realizados numa primeira fase dos trabalhos de campo. A frente de estudo foi dividida em 12 setores.

A modelação dos dados fotográficos foi posteriormente realizada através de programas informáticos de modo a obter-se uma nuvem de pontos densa de onde se definiram os dados relativos à fraturação do maciço. Da fotogrametria foram também estabelecidos os Modelos Digitais de Elevação (MDE), os ortofotomapas e as plantas topográficas.

No levantamento manual *in situ* foram caracterizadas 130 fraturas na frente do maciço. Este conjunto foi dividido em 3 famílias de fraturas, as Famílias F, L e T têm como coordenadas geológicas, respetivamente, N50°W; 83°NE, N39°E; 76°NE e N40°W; 7°NE.

Através dos dados obtidos foi calculado para cada setor o *Rock Quality Designation* (RQD) através das metodologias propostas por Palmstrom (1982) e também por Priest & Hudson (1979). Foi também determinado o índice classificativo *Rock Mass Rating* (RMR) para cada setor.

O setor 3 da frente foi selecionado para ser comparado através do método fotogramétrico, nele foi retirada informação sobre a fraturação da família F e realizaram-se medições de espaçamento da fraturação. O RQD, obtido de acordo com Priest & Hudson (1979), para o setor 3 e calculado a partir do espaçamento definido *in situ* foi de 61%, enquanto que pelo método fotogramétrico foi de 68%.

Palavras chave: Classificação Geomecânica; Fotogrametria; Calcários; VANT; Modelação.

Abstract

The main objectives of this work were to characterize the rock mass of the "Cabeço da Moita Negra" quarry, located in the parish of Fatima, through traditional methods of geological survey and photogrammetric methods based on photographic and aerophotogrammetric surveys of the quarry. The comparison of the data obtained by these two methodologies was also one of the objectives of the present dissertation.

The work begins by obtaining the necessary data for the characterization of the rock mass, whether collected *in situ* or through laboratory tests. Photographic surveys and the ground control points survey were also carried out in the first phase of field work. The study front was divided into 12 sectors.

The modeling of the photographic data was later carried out by means of computer programs to obtain a dense point cloud from which the data on the fracturing of the rock mass were defined. From the photogrammetry were also established the Digital Elevation Models (MDE), orthophotomaps and topographic plants.

In the manual *in situ* approach 130 fractures were characterized in the rock mass. This set was divided into 3 families of fractures, Families F, L and T have geological coordinates, respectively, N50°W; 83°NE, N39°E; 76°NE and N40°W; 7°NE.

Through the data obtained, the Rock Quality Designation (RQD) was calculated through the methodologies proposed by Palmstrom (1982) and by Priest & Hudson (1979). The Rock Mass Rating (RMR) rating for each sector was also determined.

The front sector 3 was selected to be studied through the photogrammetric methods, information was collected on the fracture of the F family, and fracture spacing measurements were taken. The RQD, obtained according to Priest & Hudson (1979), for sector 3 and calculated from the spacing defined *in situ* was 61%, whereas by the photogrammetric methods it was 68%.

Keywords: Geomechanical Classification; Photogrammetry; Limestone; UAV; Modulation.

Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice.....	VII
Capítulo 1 - Considerações Iniciais.....	1
1.2 – Objetivos	1
1.3 – Estrutura e organização da dissertação.....	2
1.4 – Estado da arte	3
Capítulo 2 - Enquadramento Geográfico e Geológico	8
2.1 – Enquadramento Geográfico.....	8
2.2 – Enquadramento Geológico	9
2.2.1 – O Maciço Calcário Estremenho.....	11
2.2.1.1 – Falhamentos	17
2.2.1.2 – Dobramentos	17
2.2.1.3 – Hidrogeologia.....	17
2.3 – Pedreira “Cabeço da Moita Negra”	19
Capítulo 3 – Metodologia de trabalho	21
3.1 – Introdução	21
3.2 – Sistema Classificativo Rock Mass Rating	22
3.2.1 – Determinação da resistência, massa volúmica e da porosidade aberta do material rochoso	25
3.2.2 – Rock Quality Designation.....	28
3.2.3 – Espaçamento entre descontinuidades	29
3.2.4 – Características das descontinuidades.....	30
3.2.5 – Presença de água.....	34
3.2.6 – Orientação das descontinuidades	35
3.3 – Fotogrametria	36

3.3.1 – Levantamento fotográfico da frente de estudo	37
3.3.2 - Levantamento aerofotográfico da pedreira.....	38
3.3.3 – Georreferenciação	40
3.3.4 – Processamento dos dados fotogramétricos	41
3.3.4.1 – Modelação (<i>Agisoft PhotoScan Professional</i>).....	43
3.3.4.2 – Extração dos elementos (<i>CloudCompare</i>).....	46
Capítulo 4 – Resultados e discussão	48
4.1 - Introdução	48
4.2 – Determinação da massa volúmica e porosidade aberta	48
4.3 – Classificação Rock Mass Rating (RMR)	50
4.3.1 - Descrição dos diferentes setores	50
4.3.2 - Resistência do material rochoso	54
4.3.3 - Rock Quality Designation (RQD)	55
4.3.4 - Espaçamento das descontinuidades.....	57
4.3.5 - Características das descontinuidades.....	57
4.3.6 - Presença de água.....	58
4.3.7 - Orientação das descontinuidades	59
4.3.8 Índice RMR	62
4.4 – Utilização da Fotogrametria.....	64
4.4.1 – Processamento dos dados.....	65
4.4.2 – Levantamento dos pontos de controlo	66
4.4.3 – Ortofotomapa e Modelo Digital de Elevação	68
4.4.4 – Dados de Fraturação	72
4.4.5 – Cálculo do RQD	78
Capítulo 5 – Considerações finais.....	80
5.1 – Conclusões	80
5.2 – Trabalhos futuros	83
Referências bibliográficas	84

Índice de figuras

Figura 1- Localização da área de trabalho, adaptado de Google Earth (2018).....	8
Figura 2 - Localização da pedreira num extrato da Folha nº319, Minde, da Carta Militar de Portugal à escala de 1:25 000 elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1968).	9
Figura 3 - Representação da Bacia Lusitânica, adaptado de Silva et al. (2011).	10
Figura 4 - Carta geológica simplificada do Maciço Calcário Estremenho (MCE) com definição das principais unidades morfoestruturais (FAr - Falha do Arrife, FAlv - Falha de Alvados, FC - Falha dos Candeeiros, FCi - Falha do Cidral, FMe - Falha da Mendiga, FMi - Falha de Minde, FMo - Falha de Moleanos, FRF - Falha de Reguengo do Fetal e FRM-PM - Falha de Rio Maior – Porto de Mós, delimitada por linha de cor vermelha representa-se a área onde se localiza a pedreira “Cabeço da Moita Negra”; adaptação de Carvalho (2013).	12
Figura 5 - Extrato da Carta Geológica de Portugal, 1: 50 000, folha 27-A Vila Nova de Ourém elaborada pelo IGM (2000). A – Formação detrítica e de terra rossa do Maciço Calcário Estremenho (MCE), J ³ _{CM} – Camadas de Cabaços e de Montejunto, J ² _{MI} – Calcários de Moleanos, J ² _{SA} – Calcários micríticos da Serra de Aire, J ² _{FA} – Calcários oolíticos de Fátima, J ² _{VS} – Calcários de Vale da Serra.....	13
Figura 6 - Coluna litostratigrafica referente à Formação de Serra de Aire, retirado de Azerêdo (2007).	14
Figura 7 - Coluna cronostratigráfica correspondente à Formação de Santo António-Candeeiros, (Azerêdo 2007).	15
Figura 8 - Cronostratigrafia do Maciço Calcário Estremenho, retirado de Carvalho (2013) Representado a vermelho encontra-se a formação aflorante na área de estudo, Formação de Serra de Aire.....	16
Figura 9 - Área da propriedade e licenciada da exploração relativa à Pedreira e “Cabeço da Moita Negra”; área de ampliação proposta em 2010, retirado de Visa Consultores (2010).	20
Figura 10 - Fluxograma da metodologia utilizada.	21
Figura 11 - Ábaco adaptado de Deere & Miller (1966) para correlação de valores de dureza de Schmidt e do peso específico do material rochoso com a resistência à compressão uniaxial.	27
Figura 12 - Tipos de discontinuidades em relação à abertura e largura (ISRM, 1981). ...	31
Figura 13 - Perfis de rugosidade e classes correspondentes, adaptado de ISRM (1978).	33

Figura 14 - Representação esquemática das propriedades geométricas das descontinuidades pertencentes a famílias distintas, adaptado de Vallejo et al. (2002).....	35
Figura 15 - Medida da orientação da descontinuidade, adaptado de Vallejo et al. (2002).	36
Figura 16 - Metodologia utilizada para a fotogrametria. Adaptado de Duarte (2018).	37
Figura 17 - Extrato de 4 imagens sucessivas adquiridas de uma porção da frente de estudo.....	38
Figura 18 - VANT utilizado para o levantamento aerofotogramétrico.	39
Figura 19 - Extrato de 4 fotografias consecutivas adquiridas pela câmara do VANT.....	40
Figura 20 - Fotografia captada pelo VANT onde é visível o par de pontos de controlo em que A é o circular e B o retangular.....	41
Figura 21 - Fluxograma representativo do desenvolvimento do trabalho no Agisoft PhotoScan, adaptado de Duarte (2018).....	43
Figura 22 - Visualização da nuvem de pontos proveniente do alinhamento das fotografias no Agisoft PhotoScan.	44
Figura 23 - Visualização da nuvem de pontos densa que foi obtida.	45
Figura 24 - Fluxograma da metodologia usada no programa CloudCompare, adaptado de Duarte (2018).....	46
Figura 25 - Representação em planta da frente estudada e respetivos setores identificados através da numeração (1 – 11).	50
Figura 26 - Representação dos setores 1 a 5.1 identificados na frente de estudo. As linhas vermelhas a tracejado limitam os setores.	52
Figura 27 - Representação dos setores 6 a 11 identificados na frente de estudo. As linhas vermelhas a tracejado limitam os setores.	53
Figura 28 - Projeção da família de fraturas L. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.....	59
Figura 29 - Projeção da família de fraturas T. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.....	60
Figura 30 - Projeção da família de fraturas F. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.....	61
Figura 31 - Projeção de todas as fraturas ocorrentes na frente de estudo. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.	62
Figura 32 - Localização das câmaras e sobreposição de imagens.....	65

Figura 33 - Localização dos pontos de controlo na área da pedreira.	67
Figura 34 - Sobreposição de ambas as nuvens de pontos densas. No centro com a cor mais escura e melhor definição encontra-se a nuvem de pontos densa correspondente à frente de estudo. Na envolvente encontra-se parte da nuvem de pontos densa da pedreira.	68
Figura 35 – a) Representação do ortofotomapa georreferenciado pertencente à pedreira. b) Sobreposição do ortofotomapa gerado nas imagens de satélite fornecido pelo Google Earth (2018).....	69
Figura 36 - Modelo digital de superfície construído da Pedreira “Cabeço da Moita Negra”.	70
Figura 37 - a) Representação de planta topográfica gerada através do Modelo Digital de Superfície. b) Planta topográfica com os diversos elementos causadores de ruído identificados.....	70
Figura 38 - Representação da planta topográfica contruída com base no Modelo Digital de Terreno.....	71
Figura 39 - Projeção da família de fraturas F caracterizadas in situ no setor 3. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.....	73
Figura 40 - Representação gráfica dos planos de fraturação retirados manualmente (sombreado) e através do FACETS (amarelo).....	74
Figura 41 - Projeção estereográfica da família de fraturas F medidas manualmente na nuvem de pontos densa no setor 3. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.....	75
Figura 42 - Projeção estereográfica da família de fraturas F medidas automaticamente na nuvem de pontos densa no setor 3. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.....	76

Índice de quadros

Quadro 1 - Parâmetros da classificação RMR com respectivos valores. Adaptado de Bieniawski (1989).	23
Quadro 2 - Condições das descontinuidades com respectivos intervalos e valores ponderados, adaptado de Bieniawski (1989).	24
Quadro 3 - Efeito da orientação das descontinuidades, adaptado de Bieniawski (1989).25	
Quadro 4 - Classificação dos maciços rochosos com base no seu índice RMR, adaptado de Bieniawski (1989).....	25
Quadro 5 - Classes de rochas relacionadas com a resistência à compressão uniaxial e índices de campo. Adaptado de ISRM (1981).....	28
Quadro 6 - Qualidade do maciço rochoso de acordo com os valores do RQD.....	29
Quadro 7 - Classificação da persistência das descontinuidades, adaptado da ISRM (1978).	31
Quadro 8 - Classificação da abertura das descontinuidades, adaptado da ISRM (1981).	32
Quadro 9 - Caracterização da alteração no maciço, adaptado de ISRM (1978).....	34
Quadro 10 - Especificações da máquina fotográfica digital utilizada.	37
Quadro 11 - Especificações do sensor acoplado ao VANT.	38
Quadro 12 - Resultados dos ensaios laboratoriais para a determinação da massa volúmica e porosidade aberta.	48
Quadro 13 - Classificação dos valores de massa volúmica e porosidade com a correspondente descrição e classe, adaptada de IAEG (1979).....	49
Quadro 14 - Resultados dos ensaios in situ realizados com o Martelo de Schmidt.	54
Quadro 15 - Espaçamento médio da fraturação por família e por setor, valores do Rock Quality Designation (RQD) de acordo com as expressões de Palmstrom (1982) e Priest & Hudson (1979).	56
Quadro 16 - Valores de índice RMR e respetiva classificação para os diferentes setores e frente de estudo.....	63
Quadro 17 - Erros de georreferenciação associados ao processo de projeção.....	67
Quadro 18 - Dados obtidos através das diferentes metodologias.....	77
Quadro 19 - Resultados das coordenadas geológicas da fraturação obtidas através das várias metodologias.	77
Quadro 20 - Espaçamento médio da fraturação por família e respetivo cálculo do RQD para o setor 3, através dos métodos in situ e da fotogrametria.	78

Lista de abreviaturas

RQD	Rock Quality Designation
RMR	Rock Mass Rating
CC	<i>CloudCompare</i>
CV	Coeficiente de Variação
et al.	<i>et alia</i> (“e outros”)
GCP	Ground Control Points
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance.
IA	Inteligência Artificial
IAEG	International Association Engineering Geology
IGM	Instituto Geológico e Mineiro
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISRM	International Society for Rock Mechanics
Jv	Índice de fraturação volumétrica
KMZ	Keyhole Markup language Zipped
MCE	Maçço Calcário Estremenho
MDE	Modelo Digital de Elevação
m_{dry}	Massa do provete seco
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
m_{sat}	Massa do provete saturado
m_{sub}	Massa do provete submerso
n (%)	Porcentagem de vazios
PDA	Personal Digital Assistant. Assistente Pessoal Digital
pix	Pixel
R	Valore de Dureza de Schmidt

RCU	Resistência à compressão uniaxial
RGB	Red, Green and Blue
SCE	Serviços Cartográficos do Exército
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLR	Single-lens Reflex
TDEM	Time Domain Electromagnetic Method
UAV	U manned Aerial Vehicle
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VMA	Valore Máximo Admissível
VMR	Valore Máximo Recomendado
ρ_d	Massa Volúmica

Capítulo 1 - Considerações Iniciais

A caracterização de um maciço rochoso é de elevada importância, sendo que tal estudo permite, entre outros, a medição e caracterização da fraturação intrínseca no maciço, a definição das principais famílias de descontinuidades e outros aspetos geotécnicos que definem a integridade, qualidade e comportamento do maciço rochoso.

O principal processo para realizar a caracterização de um maciço rochoso é feito *in situ* através de medições e ensaios. Estes dados podem ser completados com resultados obtidos de ensaios laboratoriais realizados com amostras provenientes do maciço rochoso em estudo.

Com o avanço das geotecnologias e da deteção remota, existe atualmente a possibilidade de realizar parte do levantamento geológico e estrutural de um maciço através de métodos inovadores que tenham uma relação custo/benefício elevada e ofereçam maior segurança pessoal.

Com o desenvolvimento da tecnologia é também possível realizar o levantamento geológico e estrutural do maciço através da fotogrametria e construção de modelos 2D, 2,5D e 3D. Com recurso a estes métodos inovadores existe a possibilidade de identificar planos de descontinuidade, realizar medições e avaliar certas propriedades do maciço de forma rápida, com custo reduzido e em zonas de difícil acesso (Coggan *et al.*, (2007); Dewez *et al.* (2016); Salvani *et al.* (2017); Duarte (2018); Tung *et al.* (2018)).

1.2 – Objetivos

Deste modo, esta dissertação tem 3 objetivos principais:

- 1- Realização do levantamento, e caracterização geológica e estrutural de uma frente de pedreira, com a medição de direções e pendores das fraturas, de modo a definir as principais famílias de fraturas, avaliar as características das descontinuidades e classificar o maciço com base no método de *Bieniawski* (Sistema “Rock Mass Rating”).
- 2- Utilização de técnicas de fotogrametria para construção de um modelo de fraturação, ortofotomapas e modelos digitais de elevação.
- 3- Comparação e verificação de dados homólogos provenientes das técnicas *in situ* com as técnicas fotogramétricas, nomeadamente os dados de levantamento da fraturação e cálculo do RQD.

1.3 – Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação de mestrado teve início com uma vasta pesquisa bibliográfica que serviu para aprofundar conhecimentos como a geologia do local de estudo e toda a metodologia que foi aplicada, seja esta parte da geologia de engenharia ou da fotogrametria.

Os procedimentos práticos cujos resultados foram utilizados nesta dissertação foram executados na pedreira de calcário industrial com o nome “Cabeço da Moita Negra”, propriedade da empresa *FassaLusa – Produção e Comercialização de Materiais de Construção, Lda.*, onde foi escolhida uma frente de pedreira, a fim de desenvolver o estudo apresentado.

Na frente da pedreira em estudo foi executado o levantamento cartográfico da fracturação e as suas características para definir o RQD, assim como o ensaio de determinação da dureza com o martelo de Schmidt *in situ* com o objetivo de calcular a resistência à compressão simples e, posteriormente valores de RMR.

Aplicaram-se também técnicas de fotogrametria para realização da cartografia da fraturação da frente de pedreira com o objetivo de comparação entre este método e o método tradicional de levantamento *in situ*.

Com toda esta informação é essencial que esta dissertação tenha uma organização limpa e perceptível, assim sendo, a mesma é dividida nos seguintes capítulos:

Capítulo I: Considerações iniciais. Nesta parte inicial do trabalho inserem-se todas as informações para a compreensão da dissertação. Este primeiro capítulo foi dividido em introdução, principais objetivos da dissertação, organização da dissertação e estado da arte.

Capítulo II: Caracterização física da área de estudo. Neste capítulo insere-se o enquadramento geográfico, enquadramento geológico, tectónico e hidrogeológico da região e local, e ainda uma breve descrição geral da pedreira.

Capítulo III: Metodologias. Uma vez que neste trabalho foram utilizadas várias classificações de maciços rochosos, neste capítulo incluiu-se toda a metodologia utilizada de modo a atingir os objetivos pretendidos. A própria fotogrametria também segue uma metodologia que se apresenta neste capítulo.

Capítulo IV: Resultados e discussão. Neste capítulo apresentam-se todos os resultados obtidos dos diferentes ensaios e levantamentos realizados, assim como as comparações e discussão do trabalho realizado.

Capítulo V: Considerações finais. Este capítulo contém as conclusões e os principais resultados obtidos, assim como algumas observações e justificações para os mesmos. A sugestão de trabalhos futuros é também inserida neste capítulo.

1.4 – Estado da arte

Um dos principais objetivos desta dissertação é a caracterização geomecânica do maciço calcário de uma pedreira de rocha industrial. Com essa finalidade, é efetuado o estudo da fracturação do maciço para se proceder á utilização do sistema classificativo RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989).

Segundo Lima & Menezes (2008), as classificações geotécnicas são empregues para caracterizar os maciços rochosos através de propriedades definidas por observação direta e pela realização de ensaios *in situ* ou em amostras obtidas através de sondagens. Existem múltiplas classificações geotécnicas distintas sendo que estas diferem nos elementos geotécnicos a observar. Estas diferentes classificações são utilizadas conforme a finalidade que se pretende aplicar no maciço considerado.

Anteriormente a 1970 não existiam classificações aplicadas a maciços rochosos que fossem adotadas de modo sistemático a nível internacional. Com o objetivo de definir um sistema de classificação aceite internacionalmente, foram criados dois grupos de trabalho, um em 1972, no âmbito da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) e outro em 1975, sob a égide da Associação Internacional de Geologia e Engenharia (IAEG) (Lima & Menezes, 2008).

A classificação RMR criada por Bieniawski em 1973, tem por base vários parâmetros observados no maciço rochoso. Na aplicação de uma classificação geotécnica que tenha em atenção a caracterização das descontinuidades, os métodos tradicionais envolvem levantamento de campo e/ou interpretação dos resultados de sondagens. Os estudos realizados no campo são demorados e por vezes perigosos, uma vez que podem envolver a realização de medições e a permanência, por períodos de tempo, nas proximidades de taludes instáveis (Zhang *et al.*, 2018).

Barton *et al.* (1974) estabeleceram uma classificação para maciços rochosos, tendo em atenção o comportamento destes no decorrer de obras subterrâneas, e que recebeu a designação de Classificação de Barton ou Sistema Q. O índice de qualidade Q é obtido com base nos valores de 6 parâmetros que condicionam de modo determinante o comportamento de um maciço rochoso. As classificações RMR e Sistema Q, mesmo apresentando algumas limitações, são ainda hoje geralmente utilizadas em projetos de

engenharia sobretudo nos relacionados com a construção de túneis (Lima & Menezes, 2008; Barton & Bieniawski, 2008).

Na década de 1990, Hoek (1994) e Hoek *et al.* (1995) estabeleceram uma nova classificação de caracterização para maciços rochosos, o GSI (*Geological Strength Index*). Este é um sistema que pode ser utilizado na definição dos métodos de escavação, tem por base a descrição da qualidade do maciço, e está associado aos critérios de rotura de Hoek-Brown. Hoek *et al.* (2013) definiram um método, com algumas condicionantes, para calcular o GSI usando o RQD (*Rock Quality Designation*) e o parâmetro relativo às condições das descontinuidades presentes no sistema RMR.

Com o decorrer dos anos, a obtenção de parâmetros para as classificações geomecânicas dos maciços rochosos tem sofrido desenvolvimentos significativos, desde o aparecimento de novos instrumentos, o aperfeiçoamento dos sistemas empíricos, o desenvolvimento de ferramentas numéricas mais potentes e inovadoras com recurso a técnicas de Inteligência Artificial (IA) para o apoio à decisão no domínio da avaliação das propriedades geomecânicas (Miranda *et al.*, 2006).

A fotogrametria e o *laser scan* são, atualmente, técnicas de grande interesse para recolha de características das descontinuidades. O método de aquisição fotográfica para criação de modelos fotogramétricos 3D pode ser feito através de uma máquina fotográfica ou com o auxílio de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), também conhecido como, UAV (*unmanned aerial vehicle*) ou drone na língua inglesa. Os VANT's trouxeram um grande avanço na aquisição de dados geométricos e estruturais em áreas de difícil acesso, e em frentes de exploração ou taludes nos quais o levantamento realizado presencialmente envolve situações de perigosidade (Roncella *et al.* 2005; Coggan *et al.*, 2007; Salvani *et al.* 2017).

Os VANT são aparelhos que têm evoluído muito, sendo que já existem alguns com um tempo de voo de cerca de uma hora e com capacidade de carga de cerca de 1 kg (Prieto & Coelho, 2018). Deste modo, os VANT's têm sido usados com várias finalidades. Marta *et al.* (2017), com recurso a um VANT equipado com uma câmara acoplada RGB (*Red, Green and Blue*) de 24,3 megapixéis, realizaram um trabalho de construção de base de dados para a gestão inteligente de um aterro sanitário, através da criação de MDT (Modelo Digital de Terreno), MDS (Modelo Digital de Superfície) e plantas topográficas. Buffon *et al.* (2018) utilizaram os VANT's para análise de inundações em áreas urbanas, criando mapas de vulnerabilidade e risco. Os autores concluíram que o emprego dos VANT's reduziu os custos associados à aquisição de imagens aéreas, evidenciando uma maior flexibilidade na aquisição das imagens e uma melhor resolução espacial em relação

às imagens de satélite. Prieto & Coelho (2018) estudaram o potencial da utilização de VANT's na geofísica aplicada, com essa finalidade equiparam um VANT com um sistema para registrar dados e com um sensor magnético. Através do protótipo criado, no voo piloto, os autores conseguiram detetar e investigar anomalias magnéticas. Em comparação com métodos terrestres, o VANT tem a vantagem de ter um custo de mobilização mais baixo, um risco mais reduzido para o utilizador e uma produtividade muito superior.

Os modelos digitais de superfície, os ortofotomapas e os modelos 3D criados com recurso a programas informáticos segundo as fotografias captadas pelo VANT, permitem o mapeamento da fraturação do maciço com erros associados de expressão reduzida (Salvani *et al.* 2017).

Em 2007, foi realizado um trabalho por Coggan *et al.*, (2007) onde foram comparados o método manual (levantamento *in situ*), o fotogramétrico e o *laser scan* para caracterização de um maciço rochoso. Primeiramente os autores fizeram o mapeamento manual, seguido do método fotogramétrico, com o auxílio de uma máquina fotográfica SLR digital Nikon D100. Posteriormente, foi realizado o mapeamento através do *laser scan*. Durante os trabalhos, o tempo necessário para cada levantamento foi registado. De acordo com Coggan *et al.*, (2007), o método manual com recurso a uma bússola de geólogo demorou cerca de dez horas a realizar e identificaram-se 149 fraturas. O método fotogramétrico revelou 280 fraturas no seu modelo 3D, enquanto a utilização do *laser scanning* identificou apenas 235, cada um dos métodos foi realizado num período de 2 horas. Coggan *et al.*, (2007) concluíram também que o método fotogramétrico deu resultados mais próximos dos revelados pelo levantamento manual.

De modo a criar uma metodologia de deteção e definição de características das discontinuidades dos maciços rochosos aflorantes, Dewez *et al.* (2016) desenvolveram uma extensão (*plug-in*) denominada de FACETS, para um programa informativo de livre acesso, o *CloudCompare*. O FACETS identifica os planos numa nuvem de pontos 3D e fornece ao utilizador dados como o pendor e a direção de pendor destes planos, podendo agrupar a fracturação em famílias. Dewez *et al.* (2016) utilizaram a bússola de geólogo para levantamento da fracturação dos afloramentos. Posteriormente recorreram ao FACETS e concluíram que existia uma diferença não superior a 10° entre os dados digitais e os adquiridos através da bússola de geólogo. Concluíram também que o número de fraturas definidas manualmente era muito menor.

Salvani *et al.* (2017) realizaram um trabalho com a finalidade de mapear a fracturação de um maciço rochoso ocorrente numa pedreira de mármore em Itália, com o uso de um VANT. Na execução deste trabalho, os autores realizaram, em primeiro lugar,

um levantamento da fraturação com auxílio de bússola de geólogo, onde consideraram cerca de 100 fraturas, seguido de um levantamento com utilização de um VANT, onde foram definidas 236 fraturas através de detecção remota. Para garantir a fiabilidade das orientações retiradas dos modelos fotogramétricos, realizaram também um levantamento topográfico. O levantamento fotográfico realizado com o VANT foi de grande importância, pois permitiu mapear a fraturação e definir como esta se modifica em profundidade, uma vez que área de estudo de Salvani *et al.* (2017) correspondia a uma zona não explorada com uma altura considerável, cerca de 150 m, e cuja finalidade era conferir estabilidade à frente de exploração.

Duarte (2018), realizou um trabalho de contribuição para a caracterização de maciços calcários com potencial para extração de rochas ornamentais. Para este trabalho Duarte (2018) obteve e analisou dados fotogramétricos, geológicos e geofísicos. Numa primeira fase, à escala de 1:50000, o autor realizou uma avaliação litológica e estrutural utilizando um ortofotomapa elaborado a partir das fotografias aéreas existentes. Numa escala mais elevada, de modo a realizar a avaliação litologia local o autor utilizou o método geofísico Eletromagnético no Domínio do Tempo (TDEM), verificando assim a existência de fraturação, estruturas e outros aspetos estratigráficos. Duarte (2018) de modo a estabelecer uma metodologia para interpretação e modelação, utiliza um VANT para realização de levantamentos aerofotogramétricos. O próprio autor, numa das suas três zonas de estudo, realizou um levantamento estrutural *in situ* com recurso a um telemóvel e comparou-o com os dados obtidos através da fotogrametria, obtendo valores médios muito idênticos. Segundo o autor, a utilização de geotecnologias como o VANT revelou-se bastante importante, uma vez que permite a caracterização de áreas de acesso limitado utilizando tecnologias de baixo custo.

Tung *et al.* (2018) procederam igualmente à aquisição de dados de fraturação (*Dip* e *Dip Direction*) utilizando o *plug-in* FACETS e através de dados fotogramétricos obtidos com recurso a um VANT. A área de estudo correspondeu a um talude resultante da abertura de um canal destinado à passagem de água, talude este de difícil acesso para levantamentos manuais e com uma área de 27700 m². Os autores concluíram que a metodologia usada revelou dados fiáveis e exatos uma vez que se mostraram similares aos dados recolhidos manualmente.

Rusli (2018) realizou um trabalho de comparação entre os programas informáticos *Agisoft PhotoScan* e o *Pix 4D Mapper* nas suas capacidades de criação de ortofotomapas. A metodologia passou pela realização de um levantamento fotográfico com o recurso a um VANT e um levantamento de GCP (*Ground Control Points*) através de um recetor GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Rusli (2018) mencionou que ambos os programas

informáticos podem ser usados para criação de ortofotomapas, contudo, o que se revelou mais preciso foi o *Agisoft PhotoScan*. Deste trabalho foi também concluído que o aumento da qualidade nos vários passos do fluxo de execução dos programas, terá como consequência um incremento na melhoria dos resultados, no entanto isto irá traduzir-se num maior tempo de computação.

Capítulo 2 - Enquadramento Geográfico e Geológico

2.1 – Enquadramento Geográfico

A área de trabalho da presente dissertação encontra-se situada nas proximidades da localidade de Cabeço da Moita Negra (Figura 1), na freguesia de Fátima, concelho de Ourém e distrito de Santarém. A área de estudo encontra-se representada na Folha nº319, Minde, da Carta Militar de Portugal à escala de 1:25 000 elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1968) (Figura 2).

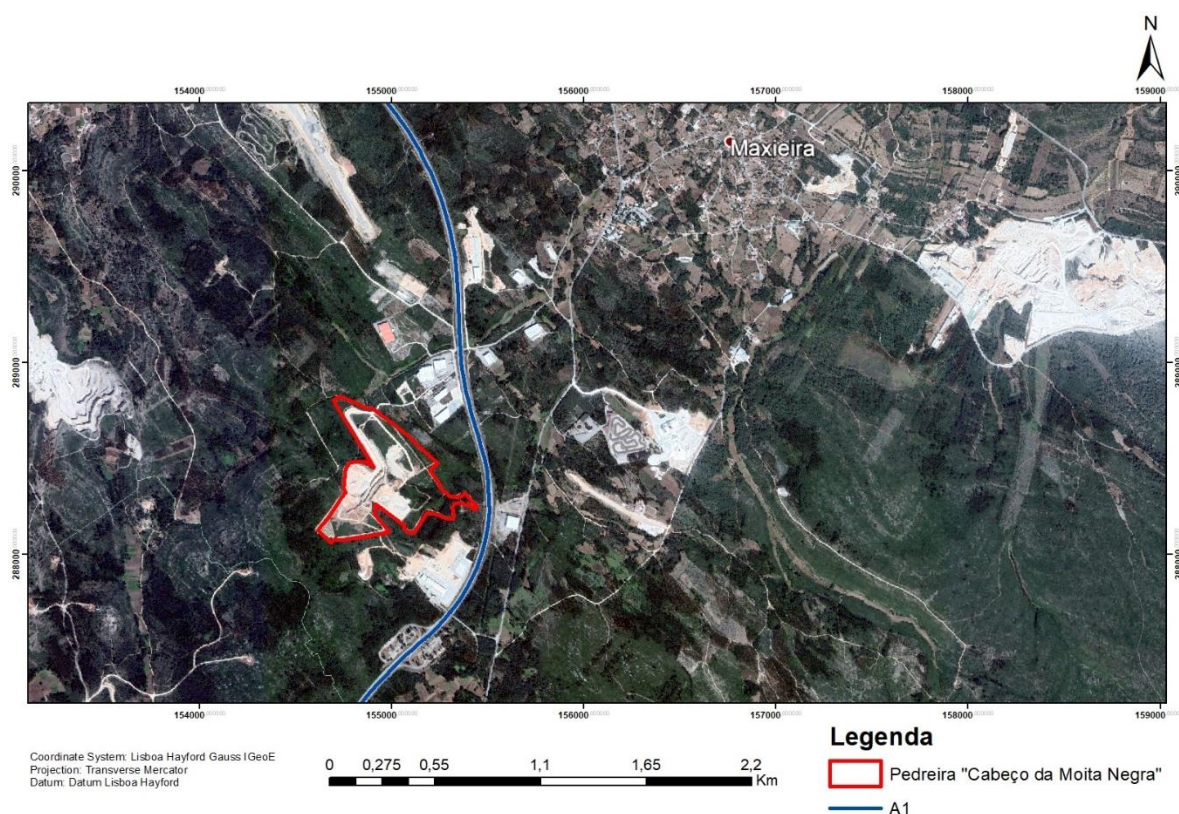


Figura 1- Localização da área de trabalho, adaptado de *Google Earth* (2018).

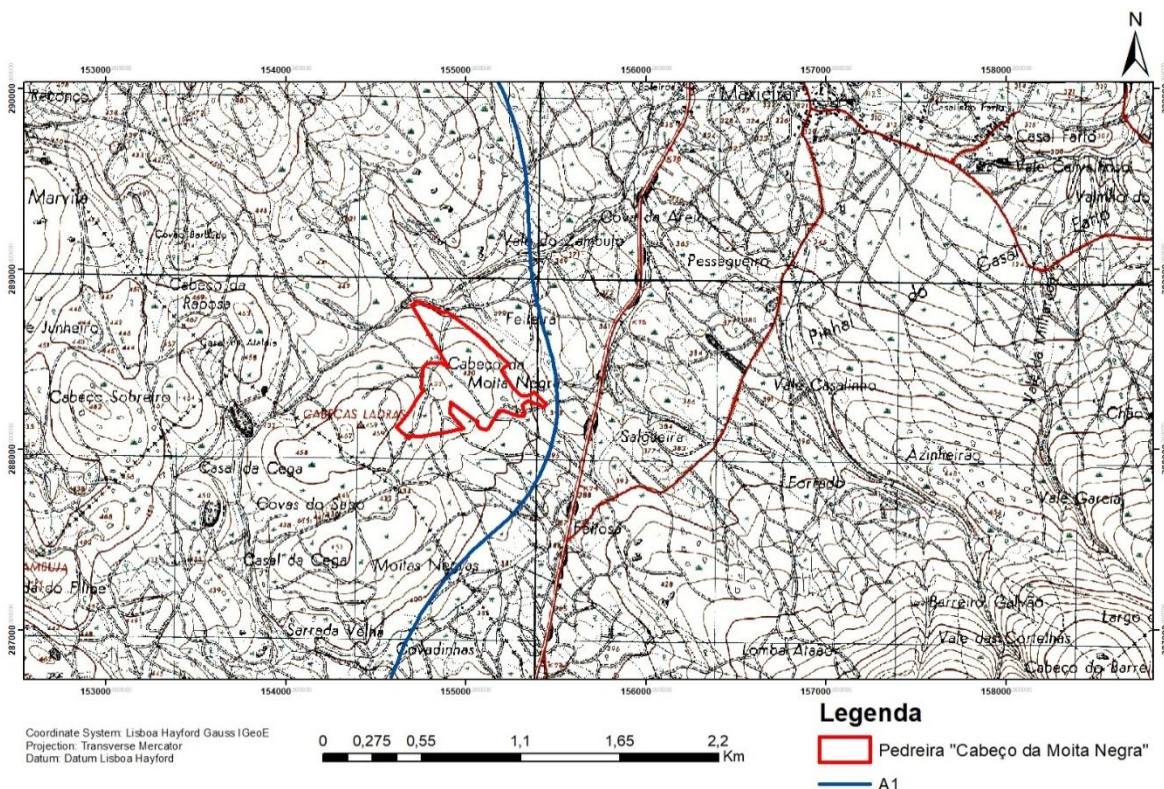


Figura 2 - Localização da pedreira num extrato da Folha nº319, Minde, da Carta Militar de Portugal à escala de 1:25 000 elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1968).

Envolventes à pedreira "Cabeço da Moita Negra" situam-se as povoações de Vale Alto, a cerca de 2,2 km para Sul, Covão do Coelho, a aproximadamente 3,5 km para Sudoeste e Maxieira a 2,5 km para Nordeste. Fátima é a sede de freguesia e localiza-se a cerca de 6,0 km a norte da pedreira.

O concelho de Ourém conta com 13 freguesias e tem uma área total 41650 ha. A maior freguesia é Fátima com uma área de 7129 ha e uma população residente de 11596 habitantes, segundo o INE (2011).

De acordo com o estudo de impacto ambiental (resumo não técnico) elaborado pela empresa Visa Consultores (2010) para o projeto de ampliação da pedreira, a área dos terrenos é de 27ha e encontra-se entra as cotas de 400 e 450 m.

2.2 – Enquadramento Geológico

Geologicamente, a área de estudo, insere-se na Bacia Lusitânica. A Bacia Lusitânica encontra-se na orla ocidental de Portugal e tem uma direção correspondente a NNW-SSE, como é visível na Figura 3. A Bacia Lusitânica tem aproximadamente 200 km de comprimento e 100 km de largura, considerando as zonas imersas. Esta bacia tem cerca

de 2/3 da sua área total emersa, sendo que a área restante se encontra imersa na plataforma continental.

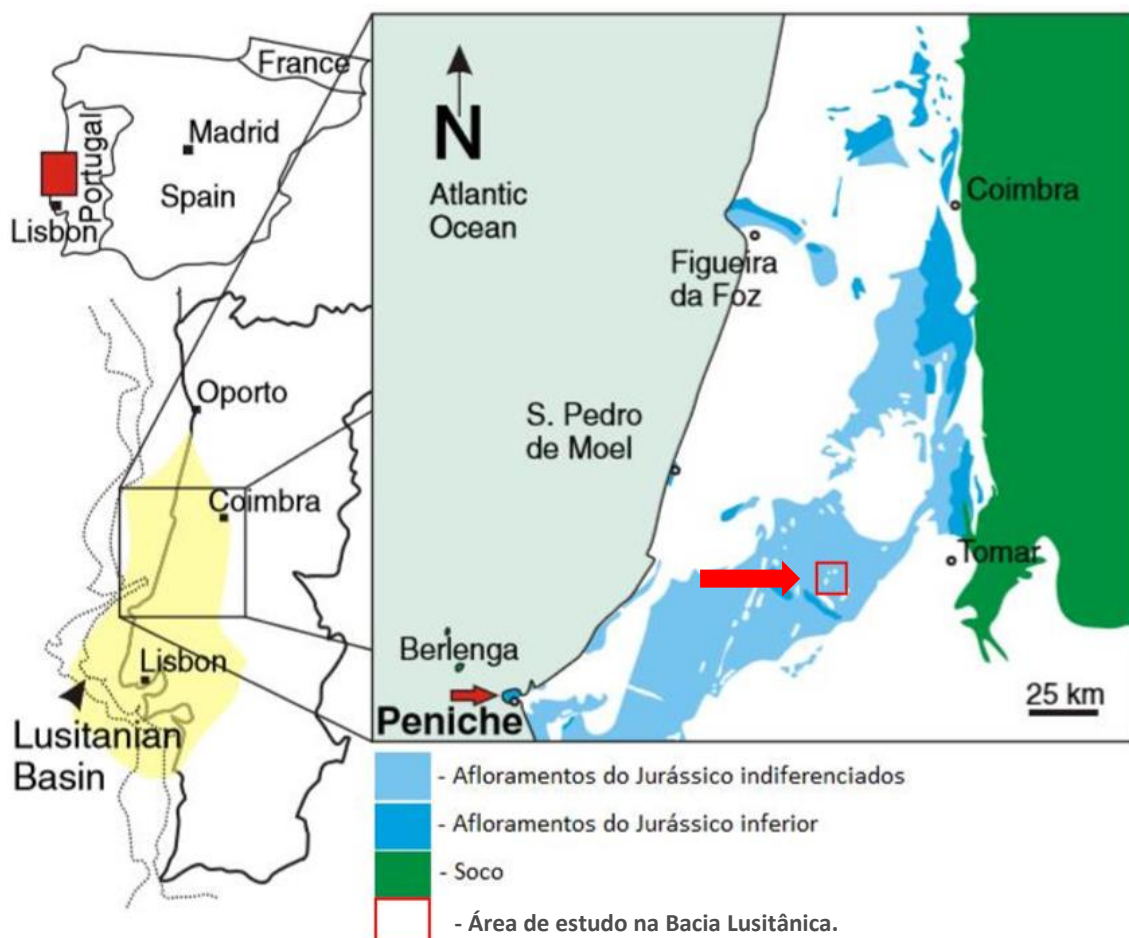


Figura 3 - Representação da Bacia Lusitânica, adaptado de Silva *et al.* (2011).

As origens da Bacia Lusitânica estão relacionadas com a rotura da Pangeia e a abertura do Atlântico Norte. Os episódios tectónicos distensivos que deram origem a abertura da Bacia Atlântica iniciaram-se no Triásico superior e terminaram no Aptiano superior (Carvalho, 2013).

Os sedimentos que formam as litologias presentes na bacia depositaram-se sobre as unidades da Zona da Ossa Morena e também sobre a Zona Sul Portuguesa, pertencentes ao Maciço Hespérico. Estima-se que a espessura máxima para o conjunto de sedimentos na Bacia Lusitânica seja de 5000 m (Kullberg *et al.*, 2013).

A evolução da Bacia Lusitânica evidencia 4 episódios de *rifting*, com algumas inversões precoces *sin-rift*, terminando com o período compressivo. A tectónica de inversão na bacia ocorre quando a Ibéria colide com a placa Africana, este episódio teve início durante o Campaniano inferior, tendo o seu máximo no final do Eocénico (Carvalho, 2013).

2.2.1 – O Maciço Calcário Estremenho

Os materiais rochosos presentes na pedreira em estudo fazem parte do Maciço Calcário Estremenho (MCE) (Figuras 4 e 5). O MCE localiza-se no setor central da Bacia Lusitânica e ocupa uma área de cerca de 750 km², encontrando-se em termos morfológicos numa posição sobrelevada relativamente às regiões adjacentes. O MCE é limitado pela Bacia Terciária do Tejo a sudeste, pela Bacia de Ourém a nordeste e ainda pela Bacia do Bombarral – Alcobaça a noroeste.

Segundo Manuppella *et al.* (2000), no Maciço Calcário Estremenho, distinguem-se três regiões elevadas: a Serra dos Candeeiros, o Planalto de Santo António e o Planalto de São Mamede e Serra de Aire (Figura 4). Estas unidades estão separadas por zonas deprimidas como a depressão da Mendiga e a depressão de Alvados e Minde.

Quanto à sua litostratigrafia, as rochas aflorantes no MCE datam desde o Hetangiano (Jurássico inferior) ao Pliocénico (Neogénico). Nas zonas sobrelevadas afloram maioritariamente rochas do Jurássico médio (Figura 4), enquanto o Jurássico superior aflora em zonas deprimidas, como a depressão de Alcobaça e a depressão da Mendiga.

A formação aflorante na área de estudo enquadra-se nas rochas ocorrentes no MCE e corresponde à Formação de Serra de Aire (Azerêdo, 2007), também conhecida como Calcários micríticos de Serra de Aire (Manuppella *et al.*, 2000) (Figuras 6).

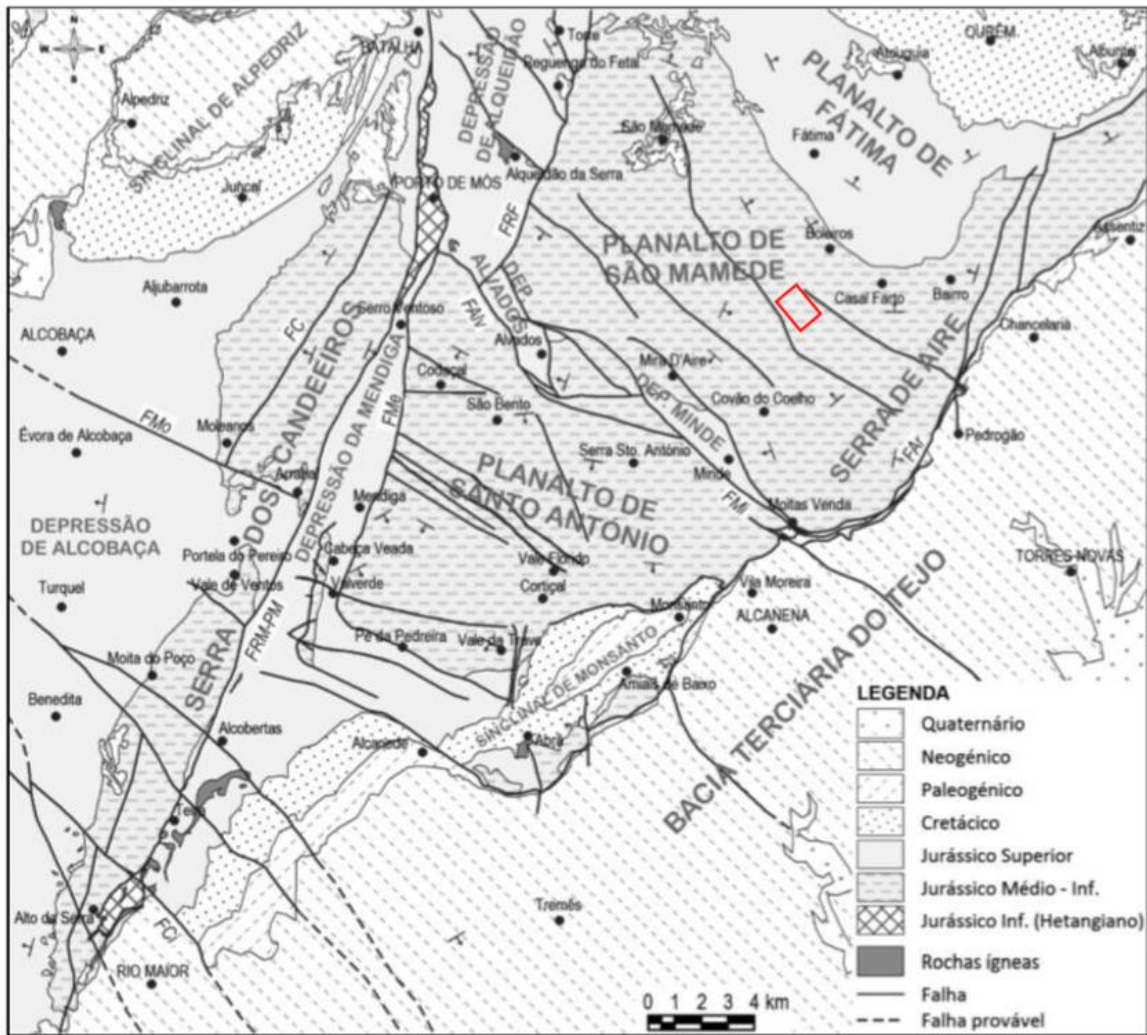


Figura 4 - Carta geológica simplificada do Maciço Calcário Estremenho (MCE) com definição das principais unidades morfoestruturais (FAr - Falha do Arrife, FAIv - Falha de Alvados, FC - Falha dos Candeeiros, FCi - Falha do Cidral, FMe - Falha da Mendiga, FMi - Falha de Minde, FMO - Falha de Moleanos, FRF - Falha de Reguengo do Fetal e FRM-PM - Falha de Rio Maior – Porto de Mós, delimitada por linha de cor vermelha representa-se a área onde se localiza a pedreira “Cabeço da Moita Negra”; adaptação de Carvalho (2013).

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE UM MACIÇO DE ROCHAS CARBONATADAS COM APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FOTOGRAMETRIA

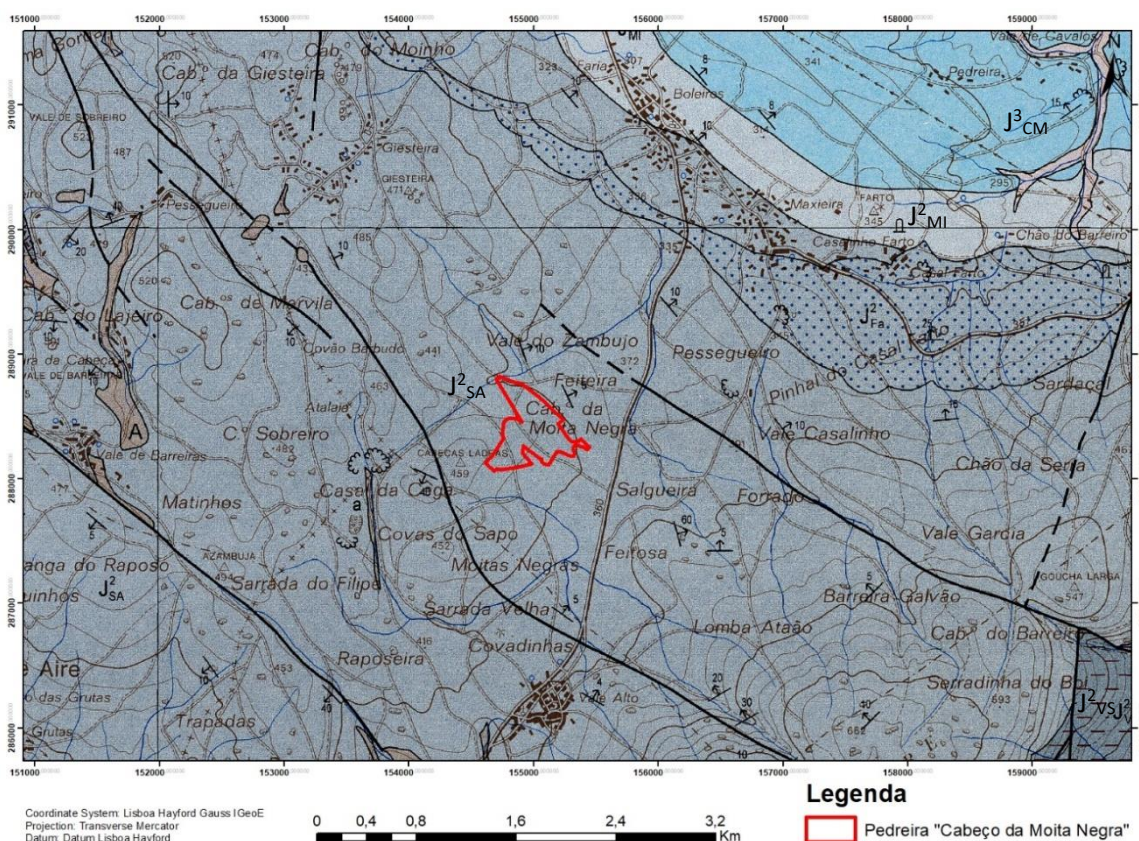


Figura 5 - Extrato da Carta Geológica de Portugal, 1: 50 000, folha 27-A Vila Nova de Ourém elaborada pelo IGM (2000). A – Formação detritica e de terra rossa do Maciço Calcário Estremenho (MCE), J³CM – Camadas de Cabaços e de Montejunto, J²MI – Calcários de Moleanos, J²SA – Calcários micríticos da Serra de Aire, J²FA – Calcários oolíticos de Fátima, J²VS – Calcários de Vale da Serra.

A Formação de Serra de Aire tem o seu limite inferior no Batoniano inferior, no qual são visíveis as primeiras ocorrências do foraminífero *Alzonella cuvillieri* Bernier & Neumann. A Formação de Serra de Aire é marcada pela passagem em continuidade de níveis dolomíticos que caracterizam a unidade subjacente (Formação de Chão de Pias), para calcários micríticos (Azerêdo *et al.*, 2003). O limite superior da Formação de Serra de Aire corresponde à desconformidade entre o Jurássico médio e o Jurássico superior.

A Formação de Chão de Pias tem uma idade compreendida entre a passagem do Bajociano inferior ao Bajociano superior e prolonga-se ao início do Batoniano, é caracteristicamente homogénea, tem uma espessura entre 70 a 80 m e bancadas decimétricas. É constituída maioritariamente por calcários amarelo-acinzentados, esporadicamente margosos (Manuppella *et al.*, 2000; Azerêdo *et al.*, 2003; 2007). Azerêdo (2007) divide a Formação de Chão de Pias em dois membros: os Calcários de Vale da Serra (Bajociano inferior a Bajociano superior) e os Dolomitos do Furadouro (Bajociano superior a Batoniano).

A Formação da Serra de Aire, onde se inserem as rochas estudadas, tem uma expressão significativa na Folha 27-A, Vila Nova de Ourém, da Carta Geológica de Portugal 1: 50 000 elaborada pelo Instituto Geológico e Mineiro (2000) (Figura 5). Esta formação apresenta espessuras na ordem de 350 a 400 m (Manuppella *et al.*, 2000), é essencialmente caracterizada por calcários micríticos, sendo que é possível distinguir três conjuntos com base na diferença de composição litológica e fossilífera, observáveis na Figura 6.

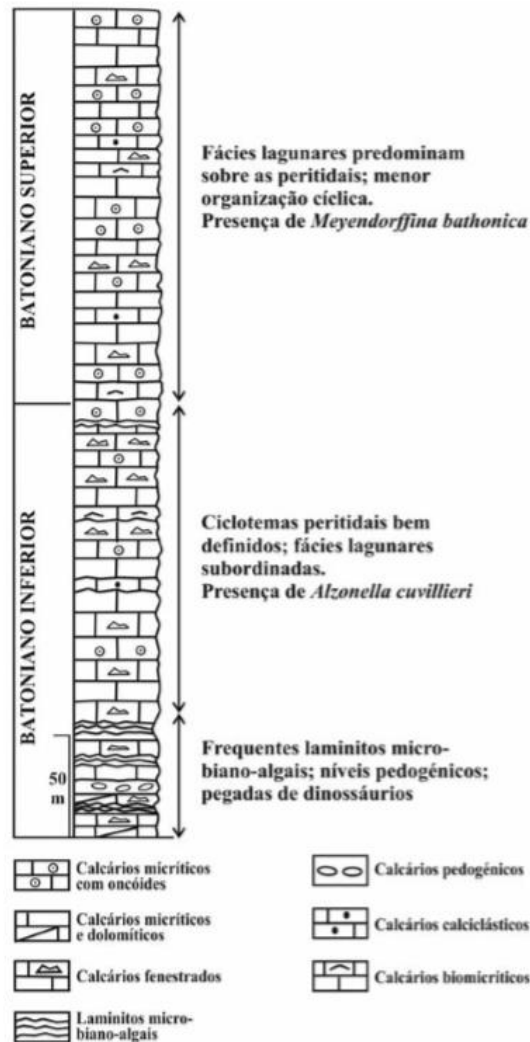


Figura 6 - Coluna litostratigráfica referente à Formação de Serra de Aire, retirado de Azerêdo (2007).

O Membro de Moleanos (Figura 7) é, segundo a coluna litostratigráfica correspondente ao MCE (Figura 8), a formação que se sobrepõe à Formação de Serra de Aire. O Membro de Moleanos é o mais recente dos 3 membros constituintes da Formação de Santo António – Candeeiros (Figura 7).

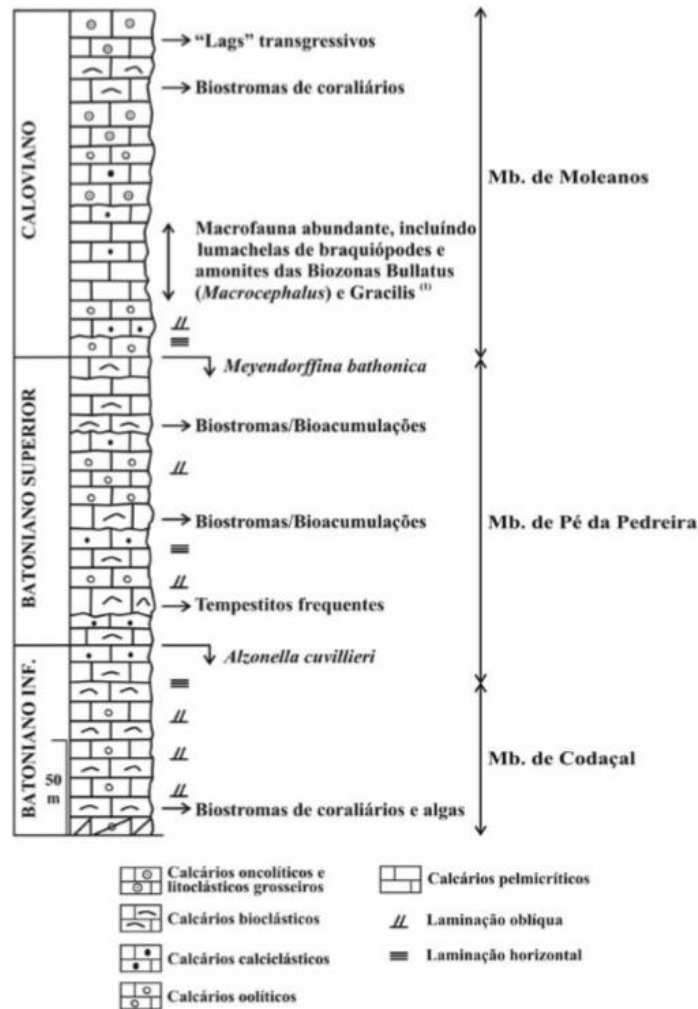


Figura 7 - Coluna cronostratigráfica correspondente à Formação de Santo António-Candeeiros, (Azerêdo 2007).

Na Folha 27-A, Vila Nova de Ourém, da Carta Geológica de Portugal 1: 50 000 (IGM, 2000) (Figura 5), o membro de Moleanos, também conhecido como Calcários de Moleanos (Manuppella *et al.*, 2000), contactam, por vezes, por falhamento com a Formação de Serra de Aire, sendo que mais próximo da área de estudo, os Calcários de Moleanos contactam normalmente com os Calcários oolíticos de Fátima. O membro de Moleanos tem uma espessura de cerca de 150 m e é constituída por calcários clásticos de cor branca ou creme com um elevado conteúdo fossilífero.

Enquadramento Geográfico e Geológico

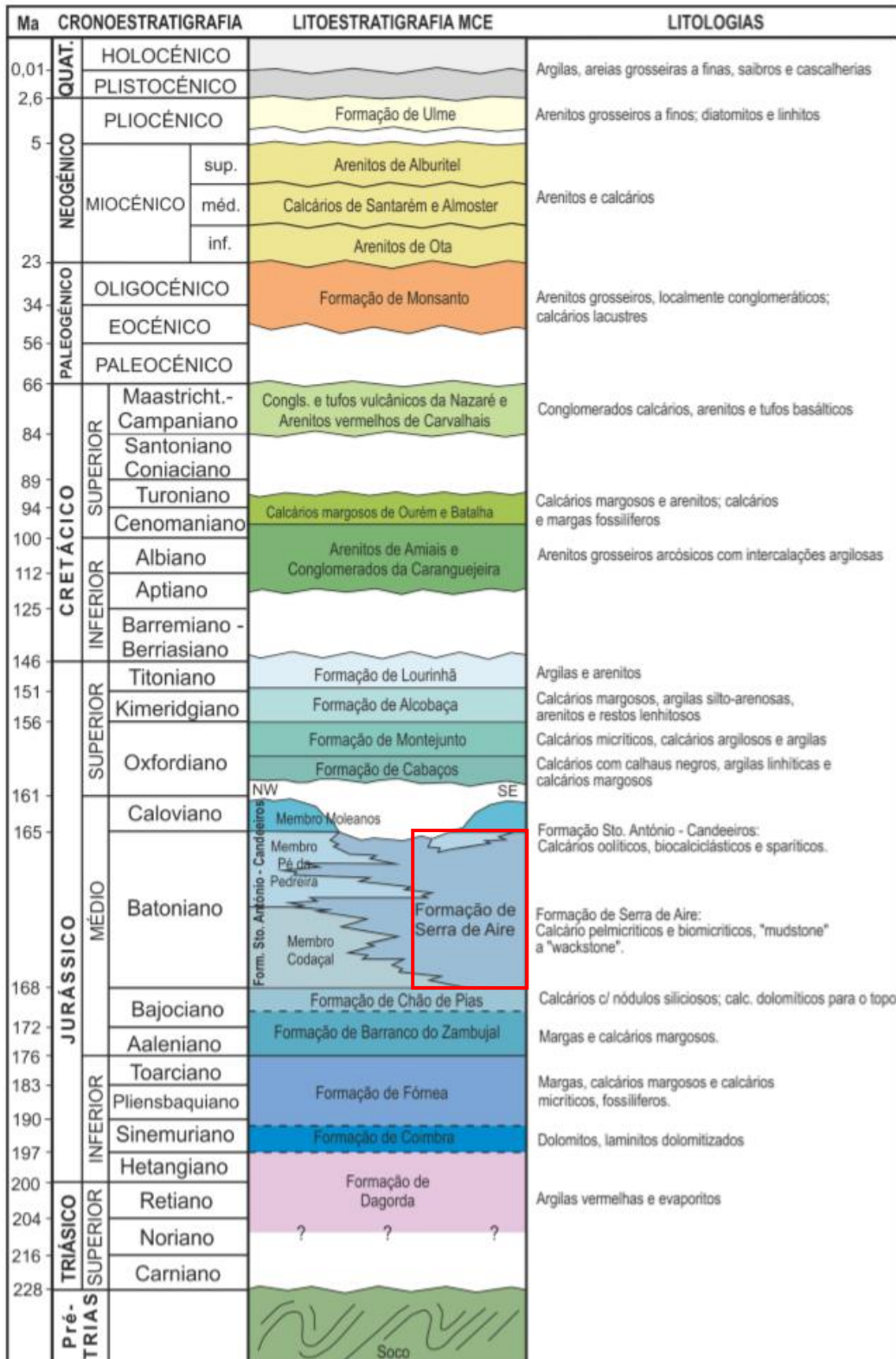


Figura 8 - Cronostratigrafia do Maciço Calcário Estremenho, retirado de Carvalho (2013) Representado a vermelho encontra-se a formação aflorante na área de estudo, Formação de Serra de Aire.

2.2.1.1 – Falhamentos

O Maciço Calcário Estremenho é afetado por falhamentos, cuja orientação apresenta três direções preferenciais: NNE-SSW, NW-SE e NE-SW (Carvalho, 2013).

Os acidentes com a direção de NNE-SSW são os mais frequentes e os que integram quatro grandes falhamentos: Falha dos Candeeiros, Falha do Reguengo do Fetal, Falha da Mendiga e Falha Rio Maior-Porto de Mós (Figura 4). Estas falhas comportaram-se como falhas normais durante as fases extensionais mesozoicas da Bacia Lusitânica, sendo que posteriormente algumas delas terão sofrido inversão no decorrer do Cenozoico (Manuppella *et al.*, 2000).

Quanto aos acidentes com a direção NW-SE, estes correspondem ao sistema de falhas escalonadas de Alvados-Minde. As Falhas de Alvados-Minde terão sido ativas como falhas normais durante o mesozoico. Aquando da inversão tectónica miocénica da Bacia Lusitânica, este sistema foi reativado como rampa lateral dextrógira do Cavalgamento do Arrife (Ribeiro *et al.* 1996; Manuppella *et al.*, 2000).

A direção NE-SW é evidenciada pela Falha do Arrife. Esta falha corresponde provavelmente a uma das falhas sinistróginas da fraturação tardivarisca. A Falha do Arrife teve a sua reativação durante a compressão tectónica miocénica, onde funcionou como falha inversa, criando o Cavalgamento do Arrife.

2.2.1.2 – Dobramentos

Manuppella *et al.* (2000), caracterizam os dobramentos como sendo de grande raio de curvatura nas áreas afastadas das principais falhas, e bastante apertadas junto das mesmas. As orientações dos eixos de dobra são principalmente NNE-SSW e NE-SW, sendo estes eixos sub-horizontais. À excepção do *roll-over* de São Mamede, que se trata de uma dobra resultante da deformação do bloco tecto da Falha de Alvados-Minde, todas as dobras estão associados à inversão tectónica miocénica. O *roll-over* de São Mamede teve a sua formação durante a distensão Jurássica.

2.2.1.3 – Hidrogeologia

Tendo por base o trabalho de Almeida *et al.* (2000), a área de estudo está inserida no Sistema Aquifero Maciço Calcário Estremenho. Este sistema aquifero ocupa uma área de 767,6 km² e representa uma das principais reservas de água subterrânea em Portugal, possuindo uma elevada importância a nível regional.

O Sistema Aquífero Maciço Calcário Estremenho tem por base uma formação impermeável, que neste caso correspondem às sequências rítmicas de litologias margosas com intercalações mais calcárias ou mais argilosas do Jurássico inferior, correspondentes à Formação da Fórnea. As formações aquíferas são as litologias correspondentes ao Jurássico médio, nestas formações predominam os calcários de maior pureza, porém carsificados. Superiormente às formações do Jurássico médio, existem as formações do Jurássico superior que funcionam como aquíferos (Carvalho *et al.*, 2011).

O MCE constitui uma unidade geomorfológica bastante afetada pela carsificação. A circulação de água é efetuada no endocarso, através das galerias e condutas. O sistema de circulação de água é muito complexo uma vez que apresenta um comportamento típico de aquífero cársico, onde existem um número reduzido de nascentes perenes mas várias nascentes temporárias com caudais muito elevados em períodos de ponta.

As cinco nascentes com maiores caudais estão localizadas no limite dos maciço, em zonas de contacto com rochas menos permeáveis do Jurássico, Cretácico ou Cenozoico. No bordo Oeste situam-se as nascentes do Liz e Chiqueda e nos bordos S e E as do Almonda, Alviela e Alcobertas (Carvalho *et al.*, 2011).

Quanto ao caudal total escoado, as três principais nascentes, Alviela, Almoda e Lis, apresentam um valor conjunto de 275 hm³/ano. A capacidade de infiltração, num ano médio tem um valor estimado de 300 hm³/ano a 350 hm³/ano. As restantes nascentes existentes no MCE debitam um total entre 25 e 75 hm³/ano (Carvalho *et al.*, 2011).

Em relação à qualidade de água para consumo humano, segundo os anexos I e VI do Decreto-Lei Nº 236/98, de 1 de Agosto, que define os Valores Máximos Admissíveis (VMAs) e os Valores Máximos Recomendados (VMRs), em nenhuma amostra existiu a violação dos VMAs. Em relação aos VMRs, 20% das amostras excedem os valores para os cloretos e 55% excedem os VMRs para a condutividade. De acordo com Almeida *et al.* (2000), a qualidade bacteriológica da água pode ser considerada deficiente pois apresenta frequentemente valores muito superiores aos admissíveis, nomeadamente em termos de coliformes fecais e totais, estreptococos e salmonelas.

Com a finalidade do uso das águas na agricultura, 95,3% percente à classe C₂S₁, que significa um perigo de salinização médio e perigo de alcalinização baixo. As restantes pertencem à classe C₃S₁, correspondendo a um perigo de salinização alto e de alcalinização baixo (Almeida *et al.*, 2000).

2.3 – Pedreira “Cabeço da Moita Negra”

A exploração da pedreira “Cabeço da Moita Negra” foi iniciada em 1999 pela empresa com a designação de *Britas da Moita Negra Unipessoal, Lda.*, apresentando nessa altura uma área total de exploração de cerca de 3,2 ha. Em 2004, a empresa *FassaLusa – Produção e Comercialização de Materiais de Construção, Lda.*, adquiriu a empresa *Britas da Moita Negra Unipessoal, Lda.*, assim como a pedreira e todos os direitos de exploração.

A pedreira “Cabeço da Moita Negra” já foi sujeita a dois projetos de ampliação, o primeiro em 2005, que pretendia ampliar a pedreira para uma área de 15,6 ha. Em 2010 foi realizado mais um projeto de ampliação que expandiu a área da pedreira para 25,1 ha (Figura 9). Esta ampliação, segundo o Decreto-Lei n.º 340/2007, colocou a pedreira na Classe 1, uma vez que esta ficou com uma área total maior ou igual a 25 ha. O objetivo desta última ampliação está relacionado com o abastecimento contínuo do centro de produção da Batalha da *FassaLusa* por um período de 37 anos.

A produção da pedreira “Cabeço da Moita Negra” é destinada ao fabrico de argamassas e cal. A produção média da pedreira, aquando a elaboração do projeto de ampliação foi estimada em 660 000 toneladas por ano, durante os 37 anos previstos para exploração.

Na pedreira “Cabeço da Moita Negra” são explorados os calcários correspondentes à Formação de Serra de Aire (Azerêdo, 2007), também conhecidos como Calcários micríticos de Serra de Aire (Manuppella *et al.*, 2000). Nas várias frentes da pedreira, o calcário apresenta uma cor creme com estratificação bem definida, com camadas métricas. As frentes estudadas apresentam-se bastante fraturadas, localizando-se entre dois planos de falhamento sub-verticais e de extensão superior a 20 m.

De acordo com o Estudo de impacte ambiental (resumo não técnico) realizado pela Visa Consultores (2010) mencionou-se que o desmonte seria efetuado com auxílio de explosivos, num total de 62 furos por mês. O desmonte foi programado em degraus que apresentam cerca de 10 m de altura máxima e 5 m de largura.

Durante o trabalho pratico realizado na pedreira foi possível constatar que os valores de altura se aproximam do apresentado, uma vez que a própria frente de estudo tem uma altura de cerca de 11 metros, no entanto, os valores de largura reais dos degraus são maiores que os esperados. O valor de 62 furos por mês também se apresenta muito elevado em relação ao real, assim como a tonelagem de exploração real por ano que, para o ano de 2018 rondou as 200 000 toneladas de rocha desmontada.

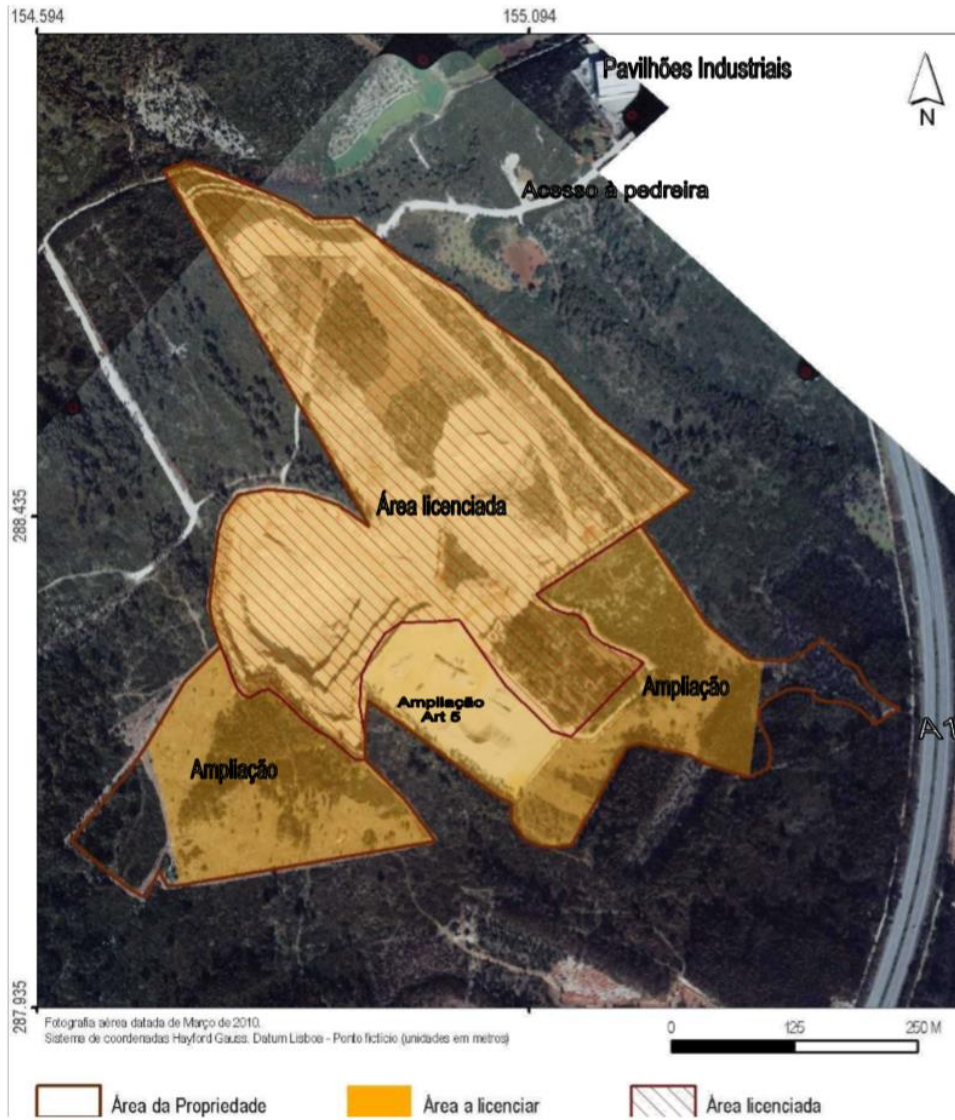


Figura 9 - Área da propriedade e licenciada da exploração relativa à Pedreira e “Cabeço da Moita Negra”; área de ampliação proposta em 2010, retirado de Visa Consultores (2010).

Capítulo 3 – Metodologia de trabalho

3.1 – Introdução

No presente trabalho para a caracterização geomecânica de frentes da pedraira “Cabeço da Moita Negra” utilizou-se o sistema classificativo Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989). De modo a caracterizar a fraturação existente nas frentes de estudo também foram empregues métodos de fotogrametria com construção de modelos 3D, ortofotomapas e Modelos Digitais de Elevação (MDE). No fluxograma da Figura 10 é apresentada a metodologia utilizada.

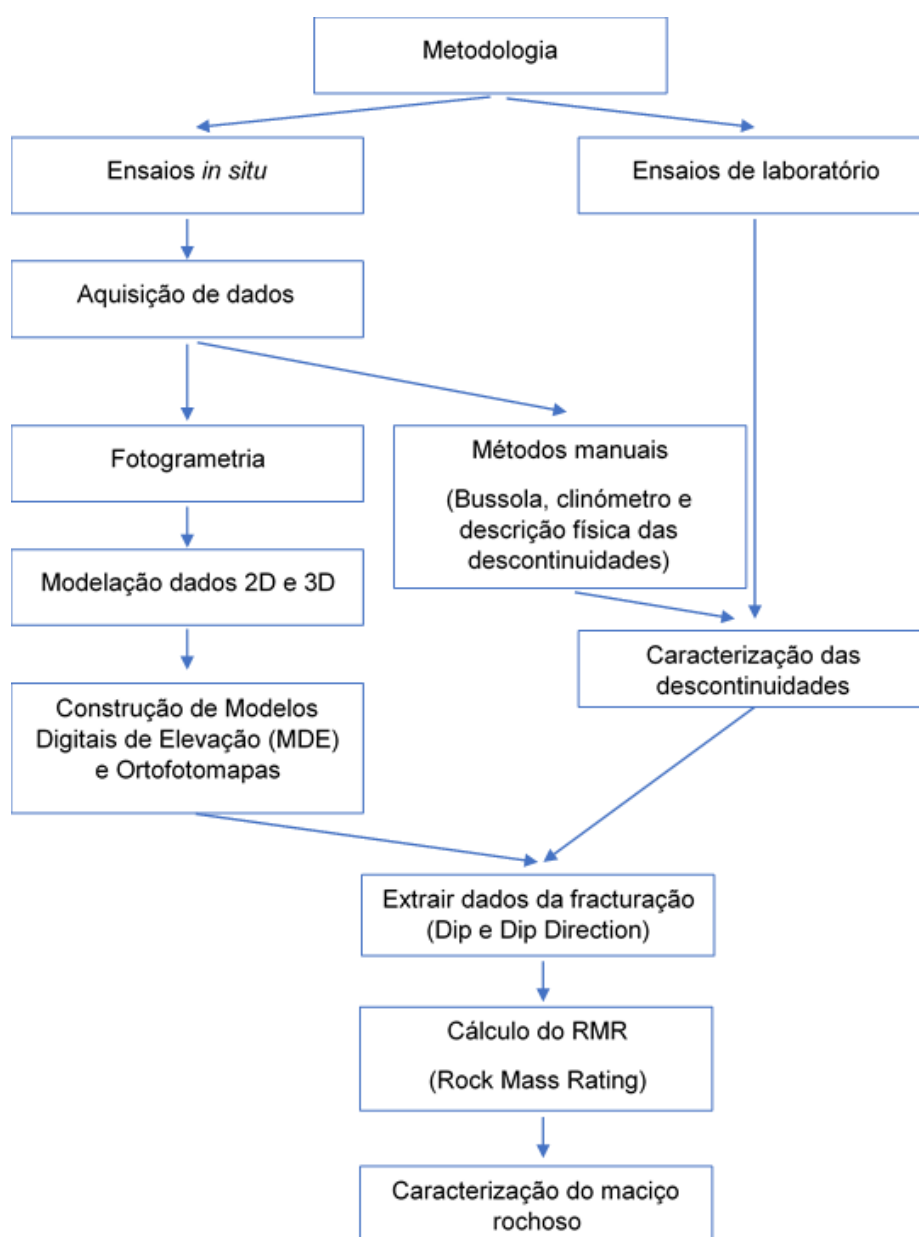


Figura 10 - Fluxograma da metodologia utilizada.

3.2 – Sistema Classificativo Rock Mass Rating

De modo que a construção das obras de engenharia se efetue com uma maior eficiência e segurança verificou-se a necessidade de caracterizar os maciços rochosos. As classificações geomecânicas são metodologias utilizadas para classificar os maciços rochosos com base nas suas características geológicas, hidrogeológicas e estruturais.

Para a realização desta dissertação foi utilizada a classificação geomecânica designada de *Rock Mass Rating* (RMR). Esta classificação foi introduzida por Bieniawski em 1973 na África do Sul, e tem aplicação em obras subterrâneas, exploração mineira, taludes e fundações de obras de engenharia (Bieniawski, 1989).

O sistema de classificação geomecânico RMR utiliza seis parâmetros para classificação do maciço rochoso, são eles:

- 1- Resistência à compressão uniaxial da rocha;
- 2- *Rock Quality Designation* (RQD);
- 3- Espaçamento das descontinuidades;
- 4- Condição das descontinuidades;
- 5- Influência da água;
- 6- Orientação das descontinuidades.

O RMR permite a atribuição de valores ponderais a cada um dos parâmetros apresentados. O somatório destes pesos constitui um índice que visa classificar o maciço de acordo com cinco classes de qualidade definidas por Bieniawski (1979, 1989).

Na caracterização de maciços rochosos heterogêneos existem inúmeras variações a considerar, deste modo é necessário dividir os maciços em várias zonas e proceder à sua classificação. As zonas são normalmente diferenciadas por diversas estruturas geológicas, tais como falhas e filões, mudanças da litologia e pelas principais famílias de fracturação. Este zonamento dos maciços é necessário para uma correta caracterização dos mesmos.

No Quadro 1 são apresentados cinco parâmetros do RMR, cada um dos quais divididos em cinco intervalos, sendo que a cada intervalo correspondem valores ponderais diferentes. Os valores mais elevados do sistema classificativo RMR estão relacionados com melhores condições do maciço rochoso.

Quanto à caracterização relativa às condições das descontinuidades estas foram definidas para o RMR de Bieniawski (1989) (Quadro 2), e podem ser utilizadas em trabalhos mais detalhados sobre as fraturas presentes nos maciços rochosos.

O valor de índice de RMR é calculado através do somatório dos valores ponderados obtidos nos vários parâmetros analisados.

Durante a realização do trabalho de campo foi possível estudar com detalhe as descontinuidades presentes no maciço rochoso estudado. Assim sendo, na caracterização geomecânica, o valor do parâmetro relativo às condições das descontinuidades foi obtido através do somatório dos cinco parâmetros presentes no Quadro 2.

Quadro 1 - Parâmetros da classificação RMR com respectivos valores. Adaptado de Bieniawski (1989).

Parâmetros			Valores						
1	Resistência da matriz rochosa intacta	Resistência à carga pontual (MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Ver compressão uniaxial		
		Resistência à Compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
	Peso	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	75 - 50	50 - 25	<25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	2 - 0,6 m	600 - 200 mm	200 - 60 mm	<60 mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Faces muito rugosas, não contínuas, sem abertura, superfícies não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, superfícies ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1 mm, superfícies muito alteradas	Superfícies polidas ou com enchimento de espessura >5mm ou juntas contínuas com separação de 1 - 5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação >5 mm		
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10m de túnel	Nenhum	<10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	>125 l/min		
		Razão entre a pressão da água com a tensão principal máxima	0	0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	>0,5		
	Condições gerais		Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimento	Entrada de água		
	Peso		15	10	7	4	0		

Quadro 2 - Condições das descontinuidades com respectivos intervalos e valores ponderados, adaptado de Bieniawski (1989).

Parâmetro	Intervalo				
Comprimento da descontinuidade	<1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	>20 m
Peso	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	<0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	>5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura <5 mm	Duro com espessura >5 mm	Mole com espessura <5 mm	Mole com espessura >5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Sem alteração	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

O sexto parâmetro (6), está relacionado com a orientação e pendor das descontinuidades relativamente à escavação ou abertura de um túnel e à execução de outras obras de engenharia, como fundações e taludes. No Quadro 3 apresentam-se os fatores de correção aplicados ao somatório do sistema classificativo RMR para as diferentes coordenadas geológicas das descontinuidades presentes nos maciços rochosos.

No Quadro 4 estão evidenciadas as diferentes classes em que se podem definir a qualidade dos maciços relativamente ao seu valor índice RMR, quanto mais elevado for este maior é a competência do maciço rochoso. No Quadro 4 estão igualmente representados também os possíveis valores de parâmetros como a coesão a e o ângulo de atrito interno da maciço rochoso.

Quadro 3 - Efeito da orientação das descontinuidades, adaptado de Bieniawski (1989).

Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		Qualquer
Avanço da escavação do túnel a favor da inclinação		Avanço da escavação do túnel do túnel contra a inclinação		Inclinação 45° - 90°	Inclinação 20° - 45°	Inclinação 0° - 20°
Inclinação 45° - 90°	Inclinação 20° - 45°	Inclinação 45° - 90°	Inclinação 20° - 45°			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Quadro 4 - Classificação dos maciços rochosos com base no seu índice RMR, adaptado de Bieniawski (1989).

Classificação RMR					
Valor índice RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	≤20
Classe	I	II	III	IV	V
Qualidade do maciço	Muito bom	Bom	Razoável	Mau	Muito mau
Coesão da massa rochosa (kPa)	>400	400 - 300	300 - 200	200 - 100	<100
Ângulo de atrito (°)	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15

3.2.1 – Determinação da resistência, massa volúmica e da porosidade aberta do material rochoso

A resistência da matriz rochosa, na realização deste trabalho, foi obtida *in situ* através da utilização do Martelo de Schmidt, seguindo as recomendações sugeridas por Aydin (2008).

A resistência à compressão uniaxial (RCU) é uma propriedade da rocha que permite classificar o material e evidenciar fenômenos com elevado interesse na mecânica dos maciços rochosos. Por norma, as rochas componentes de maciços rochosos estão expostas a uma compressão triaxial, sendo que os pilares de suporte das minas são exemplo de um caso pratico para rochas submetidas a compressões uniaxiais (Lima & Menezes, 2008).

O Martelo de Schmidt é um aparelho portátil e que permite estimar valores de resistência à compressão uniaxial do material rochoso *in situ*. O aparelho consiste num pistão sob pressão de uma mola. Esta pressão é libertada quando se pressiona o martelo contra a face do material que se pretende testar. O valor de dureza de Schmidt (R), que se pode ler no aparelho está relacionado com a resistência ao impacto provocado pela realização do ensaio, indicando que as rochas mais competentes têm valores de R mais elevados.

Para realização dos ensaios foi utilizado um martelo de Schmidt do tipo L, que tem uma energia de impacto de 0,735 N.m. No presente trabalho foi definida, para cada zona a testar, uma sequência de vinte determinações ou pontos de impacto. Para cada zona foi posteriormente definida a média, mediana, moda, máximo e mínimo das vinte determinações, conforme as sugestões do autor Aydin (2008).

Os valores de R, obtidos depois do tratamento estatístico podem ser utilizados para definir os valores de resistência à compressão simples ou uniaxial, estes últimos são obtidos através do abaco que se apresenta na Figura 11, em que se considera para além dos valores de R, a orientação do martelo de Schmidt na execução dos ensaios e o peso específico dos materiais rochosos testados.

A determinação do peso específico das amostras rochosas foi realizado através de ensaios laboratoriais, designadamente pelos métodos sugeridos pelo ISRM (1977) para a obtenção da massa volúmica e porosidade aberta através das técnicas de saturação e submersão em água. Para a realização dos ensaios foram colhidas amostras representativas nos locais onde se realizaram os ensaios com o martelo de Schmidt.

As amostras foram transportadas para o laboratório onde foram fragmentadas de modo a obterem-se 10 provetes para cada ensaio de determinação de massa volúmica e porosidade aberta. A massa mínima para cada provete é de 50g. As amostras foram posteriormente limpas, num processo em que para além de serem escovadas foram igualmente submetidas à ação de ar comprimido.

Os ensaios de determinação da massa volúmica e da porosidade aberta iniciaram-se com a colocação das amostras num exsiccador, sob a ação de vácuo, durante 3 horas. A bomba de vácuo criou uma pressão constante de -100kPa. Posteriormente, os provetes foram submersos por água mantendo-se a ação do vácuo no decorrer de mais 3 horas, em seguida

Terminado o período em que os provetes estiverem submetidos ao vácuo, procedeu-se à obtenção dos valores da massa dos provetes submersos (m_{sub}) e da massa

dos provetes saturados (m_{sat}), esta última foi determinada após as amostras serem limpas com um pano húmido para retirar a água existente nas superfícies dos provetes.

As amostras foram posteriormente inseridas numa estufa a cerca de 105°C durante 24 horas, de modo a ficarem completamente secas. Após serem retiradas da estufa foram colocadas num exsiccador para arrefecerem sem ganharem humidade. Posteriormente determinou-se a massa seca (m_{dry}) dos provetes. A partir dos valores de m_{dry} , m_{sub} e m_{sat} é possível calcular o volume de cada um dos provetes, bem como o volume de vazios, a porosidade aberta e a massa volúmica.

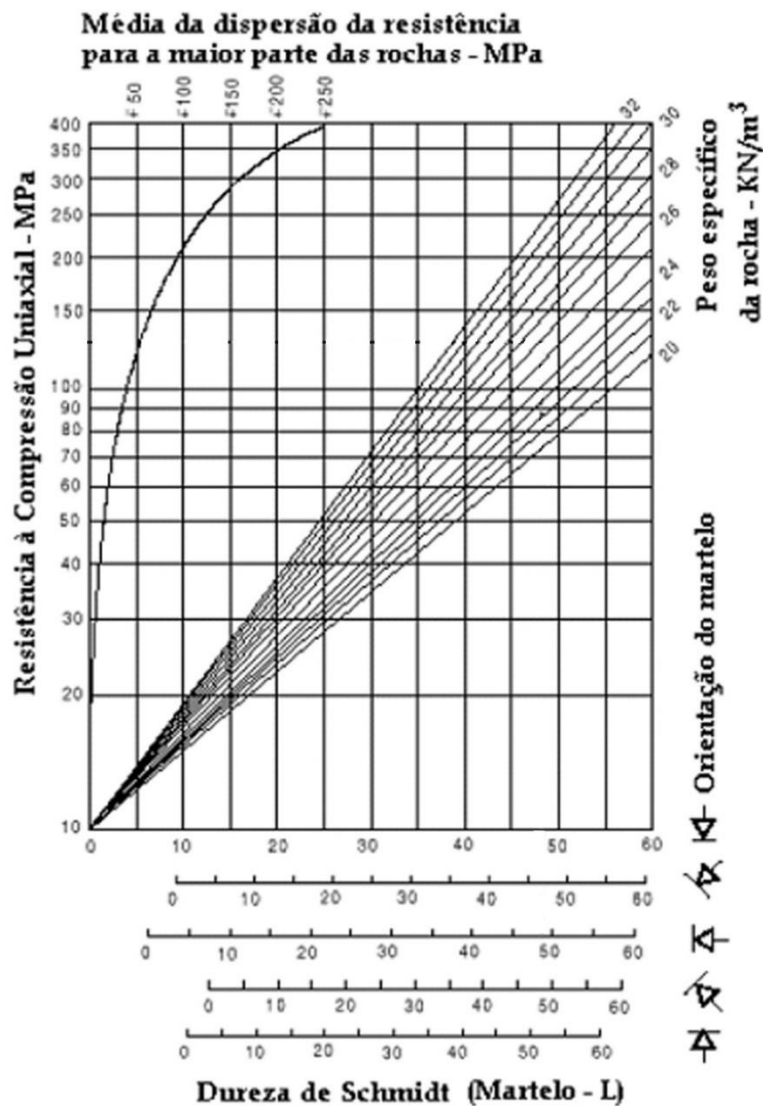


Figura 11 - Ábaco adaptado de Deere & Miller (1966) para correlação de valores de dureza de Schmidt e do peso específico do material rochoso com a resistência à compressão uniaxial.

A ISRM (1981) apresenta uma tabela que visa classificar a rocha segundo o seu valor de resistência à compressão uniaxial, conferindo-lhe uma classe e algumas características de identificação em campo (Quadro 5).

Quadro 5 - Classes de rochas relacionadas com a resistência à compressão uniaxial e índices de campo. Adaptado de ISRM (1981).

Classe	Descrição	Identificação em campo	RCU (Mpa)
R1	Rocha muito branda	A rocha desmonta ao bater com a ponta do martelo. Com uma navalha é facilmente esculpida.	1 - 5
R2	Rocha branda	Difícilmente esculpida com uma navalha. A golpear com o martelo produz marcas.	5 - 25
R3	Rocha moderadamente dura	Navalha é ineficaz. Pode fraturar com um golpe forte do martelo	25 - 50
R4	Rocha dura	É necessário mais do que um golpe de martelo para fraturar	50 - 100
R5	Rocha muito dura	Requer muitos golpes de martelo para fraturar	100 - 250
R3	Rocha extremamente dura	Martelo apenas lasca a rocha	>250

3.2.2 – Rock Quality Designation

O índice RQD (*Rock Quality Designation*) foi estabelecido por Deere (1967). Este índice visa classificar o maciço tendo em atenção a quantidade de testemunho recuperado de sondagens realizadas com recuperação contínua de amostra.

O índice RQD é obtido através da relação, em termos percentuais, entre o somatório dos troços do testemunho com uma extensão mais elevada que 10 cm (l_i) e o comprimento total de uma dada manobra da sondagem (L) (expressão 1). No Quadro 6 estão representadas as classes estabelecidas por Deere (1967) com a finalidade de definir a qualidade dos maciços rochosos tendo em atenção os valores do RQD.

$$RQD(\%) = \frac{\sum l_i(>10cm)}{L} \times 100 \quad (1)$$

Quadro 6 - Qualidade do maciço rochoso de acordo com os valores do RQD.

RQD (%)	Qualidade do maciço rochoso
0 – 25	Muito fraco
25 – 50	Fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 – 100	Excelente

No trabalho realizado por Deere (1967), o valor de RQD deveria apenas ser determinado em tarolos obtidos de sondagens com o diâmetro igual a 54.7 mm, realizada com recurso a amostradores de parede dupla ou tripla, de modo a não comprometer a integridade da amostra. Palmstrom (1982), correlacionou os valores de RQD com o índice de fraturação volumétrica (J_v), como se pode verificar na expressão 2.

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad (2)$$

O J_v , que constitui o índice de fraturação volumétrica, é determinado num maciço rochoso com três famílias de descontinuidade, através da expressão 3.

$$J_v = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} \quad (3)$$

Na expressão 3, os valores de S_1 , S_2 e S_3 correspondem ao espaçamento existente entre descontinuidades da mesma família expressa em metros.

Priest & Hudson (1979) relacionaram o RQD com a frequência de fraturação (λ), através da expressão 4.

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(1 + 0,1\lambda) \quad (4)$$

No decorrer deste trabalho, não tendo sido possível a realização de sondagens, para o cálculo do RQD foram usadas as fórmulas propostas por Palmstrom (1982) e por Priest e Hudson (1979). Na fórmula (4) proposta por Priest e Hudson (1979), o valor do índice de fraturação volumétrica (J_v) foi utilizado em substituição da frequência de fraturação (λ).

3.2.3 – Espaçamento entre descontinuidades

As superfícies ou planos de descontinuidade nos maciços rochosos tem grande importância no comportamento geomecânico do mesmo, condicionando a sua resistência e deformabilidade. As descontinuidades favorecem os processos de meteorização interna,

uma vez que permitem a água percolar no interior dos maciços rochosos (Vallejo *et al.*, 2002).

O **espaçamento** entre descontinuidades limita o tamanho dos blocos existentes. Caso o espaçamento seja grande, os blocos apresentam grandes dimensões e o maciço menos compartimentado. O caso é inverso para espaçamentos reduzidos. O espaçamento é também responsável pelo tipo de movimentos de instabilidade que podem ocorrer nos maciços.

O espaçamento das descontinuidades é medido *in situ* e perpendicularmente às faces de descontinuidade pertencentes à mesma família. No sistema classificativo RMR, de acordo com os valores encontrados no espaçamento, é atribuído o peso correspondente que pode variar entre 5 e 20 (Quadro 1).

3.2.4 – Características das descontinuidades

Na realização dos trabalhos de levantamento de campo foi possível caracterizar as descontinuidades de modo pormenorizado, pelo que se utilizou a descrição apresentada no Quadro 2. Definiu-se para cada descontinuidade considerada, o seu comprimento ou persistência, a separação ou abertura, a rugosidade, o material de preenchimento e o grau de alteração.

A **persistência** corresponde à extensão de um dado plano de descontinuidade. Este parâmetro tem uma importância significativa, uma vez que condiciona os parâmetros de resistência global dos maciços (Vallejo *et al.*, 2002).

Os afloramentos são de dimensões reduzidas relativamente à extensão das fraturas, pelo que existem limitações nas medições da persistência (ISRM, 1978).

Para classificar a persistência das descontinuidades podem utilizar-se os valores representados no Quadro 7 e sugeridos pela ISRM (1978). Os intervalos de valores de persistência usados no Quadro 7 são idênticos aos do cálculo do sistema classificativo RMR (Quadro 2).

Quadro 7 - Classificação da persistência das descontinuidades, adaptado da ISRM (1978).

Classificação ISRM (1978)	Persistência (m)	Peso RMR
Persistência muito baixa	<1	6
Persistência baixa	1 - 3	4
Persistência média	3 - 10	2
Persistência elevada	10 - 20	1
Persistência muito elevada	>20	0

A **separação ou abertura** de uma descontinuidade é determinada através da distância medida, perpendicularmente, entre as duas faces de uma dada descontinuidade. O termo abertura só é válido para descontinuidades onde não existe material de preenchimento para além de água ou ar. No caso de uma descontinuidade ser preenchida por outro elemento, então o termo correto a utilizar é largura, como visível na Figura 12. A abertura é um dos fatores que influenciam, de modo determinante, a resistência tangencial ao longo das superfícies de descontinuidade (Andrade & Saraiva, 2008).

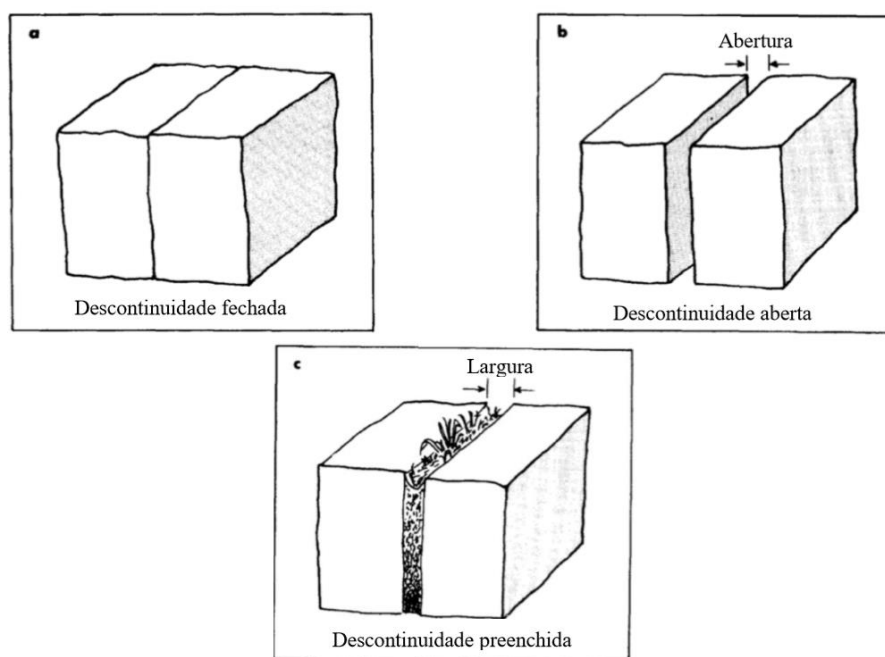


Figura 12 - Tipos de descontinuidades em relação à abertura e largura (ISRM, 1981).

A classificação da abertura das descontinuidades, neste trabalho, foi efetuada de acordo com o sistema classificativo RMR, evidenciado no Quadro 2. A ISRM (1981) também definiu uma classificação da abertura das descontinuidades que é apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Classificação da abertura das descontinuidades, adaptado da ISRM (1981).

Abertura	Descrição	
<0,1 mm	Muito apertada	Genericamente fechada
0,1 - 0,25 mm	Apertada	
0,25 - 0,5 mm	Parcialmente aberta	
0,5 - 2,5 mm	Aberta	Genericamente entreaberta
2,5 - 10mm	Moderadamente larga	
>10 mm	Larga	
1 - 10 cm	Muito larga	Genericamente aberta
10 - 100 cm	Extremamente larga	
>1 m	Cavernosa	

A **rugosidade** da descontinuidade é uma característica importante e que condiciona, de maneira muito importante, a resistência ao deslizamento sobretudo quando existem descontinuidades fechadas e onde não se verificou movimentação. A importância da rugosidade decresce com a abertura, existência de material de preenchimento e movimentações anteriores (ISRM, 1978).

A presença de irregularidades nas paredes das descontinuidades dificulta o movimento, diminuindo deste modo a possibilidade de ocorrência de deslizamentos.

Segundo o ISRM (1978), a rugosidade pode ser caracterizada pela ondulação e pela irregularidade. A ondulação é visível nas escalas decimétrica e métrica e condiciona a direção do movimento, uma vez que a rugosidade apresenta uma dimensão elevada para ser rompida no decorrer da movimentação. A irregularidade é a rugosidade observada a uma pequena escala (milimétrica e centimétrica), esta é caracterizada por saliências nas superfícies e que são determinantes na resistência tangencial ao deslizamento. As irregularidades tendem a ser esmagadas no decorrer dos movimentos.

Os vários perfis de rugosidade encontram-se representados na Figura 13. Estes podem ser classificados conforme a escala a que estão a ser estudados. No caso de escalas métricas, estes podem ser classificados como Patamar, Ondulada e Planar. A uma escala centimétrica, estas 3 classificações podem ser divididas em Rugosa, Lisa e Espelhada/ Polida.

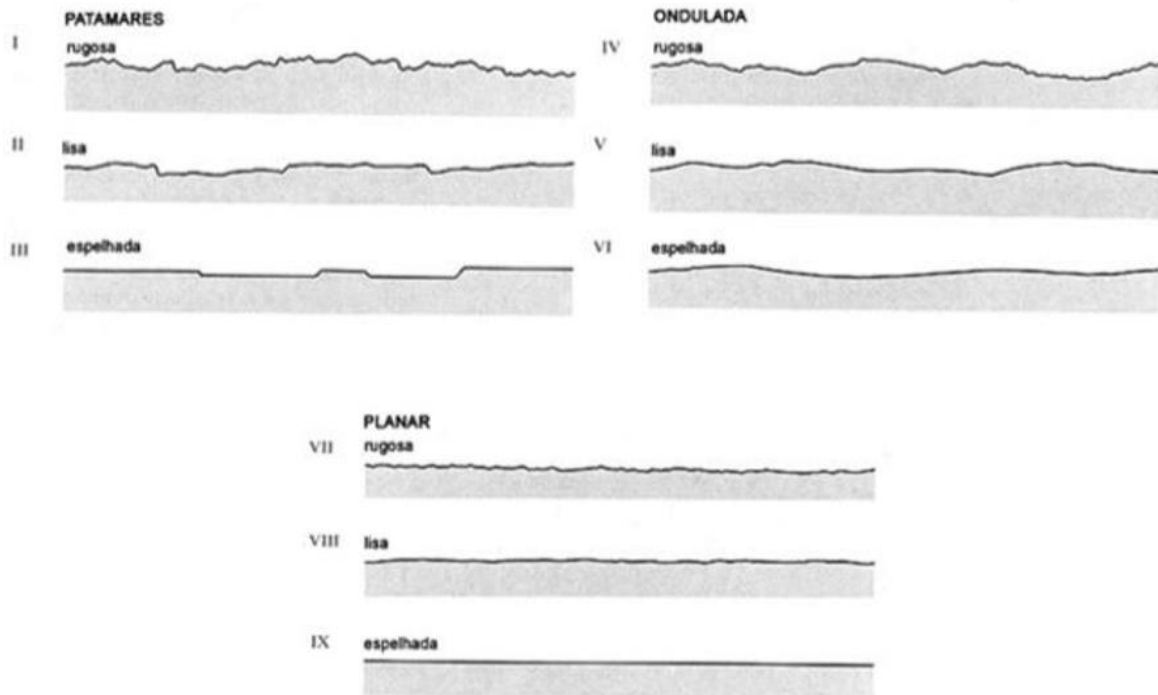


Figura 13 - Perfis de rugosidade e classes correspondentes, adaptado de ISRM (1978).

Na classificação da rugosidade com a finalidade de aplicação ao sistema RMR, foi utilizado o proposto no Quadro 2, onde são apresentados os valores ponderais para os vários tipos de rugosidade.

O **material de preenchimento** é o termo que designa o material presente entre as paredes de uma dada descontinuidade. A distância medida na perpendicular entre as paredes da descontinuidade onde existe enchimento designa-se de largura e não como abertura, a qual se determina nas descontinuidades não preenchidas (Figura 12) (ISRM, 1978).

A existência ou não de enchimento, assim como o seu tipo, condiciona de modo determinante as várias características geotécnicas de um maciço, designadamente a resistência, deformabilidade e permeabilidade (Lima & Menezes, 2008).

A classificação RMR considera o material de preenchimento como existente ou não existente. No caso de existente, este pode ser duro ou mole, ambos com espessuras maiores ou menores a 5 mm, conforme se pode verificar no Quadro 2 onde se encontram os pesos atribuídos a cada tipo de enchimento.

A determinação do **grau de alteração** do maciço rochoso é efetuada *in situ* através de observação direta, utilização do martelo de geólogo, de canivete e também por pressão manual. A qualidade do maciço rochoso é uma característica consequente do estado de

alteração do mesmo, pelo que quanto maior for o grau de alteração do maciço, menor a sua qualidade geral.

As principais características dos diferentes graus de alteração dos maciços, a sua designação, simbologia e respetivos valores ponderais utilizados no cálculo do RMR, podem ser observados no Quadro 9.

Quadro 9 - Caracterização da alteração no maciço, adaptado de ISRM (1978).

Símbolo	Peso	Designação	Características
W ₁	6	São	Sem sinais de alteração
W ₂	5	Ligeiramente alterado	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W ₃	3	Moderadamente alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso, contudo não friável
W ₄	1	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e rocha parcialmente friável
W ₅	0	Decomposto	Maciço completamente friável com comportamento de solo

3.2.5 – Presença de água

A presença de água visível nas descontinuidades dos maciços rochosos implica a existência de percolação de água no interior dos mesmos. A presença de água nos maciços tem vários efeitos negativos, como o incremento dos processos erosivos e a redução da estabilidade devido à diminuição da resistência ao deslizamento provocado pelo aumento da pressão de água ao longo das fraturas.

A percolação de água no interior de um maciço provoca a sua meteorização, a qual é muito frequente nos maciços de rochas carbonatadas. Os processos de dissolução que se enquadram na meteorização química originaram a ocorrência de algares, grutas, galerias e dolinas numa parte considerável do Maciço Calcário Estremenho, sendo este último considerado a zona cársica de maior importância a nível nacional.

Para o cálculo do índice RMR, tendo em atenção a presença de água foram utilizados os critérios evidenciados no Quadro 1, onde se podem observar as diferentes condições de existência e percolação de água nas fraturas dos maciços e respetivos pesos a considerar no sistema classificativo RMR.

3.2.6 – Orientação das descontinuidades

As descontinuidades existentes num maciço rochoso podem agrupar-se em famílias. Cada uma destas famílias é composta por fraturas sistemáticas com direções e pendores aproximadamente semelhantes (Figura 15).

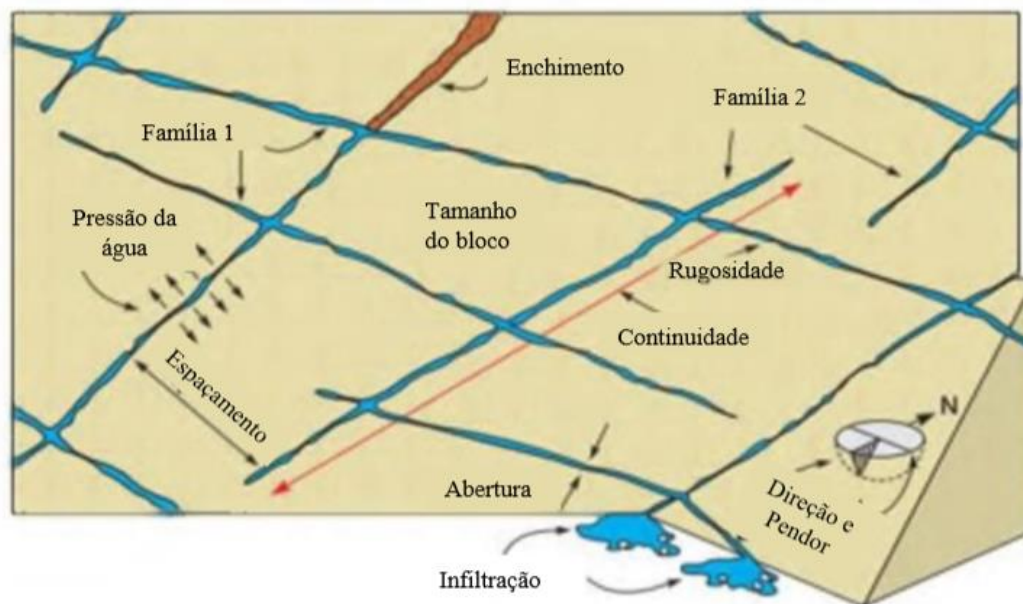


Figura 14 - Representação esquemática das propriedades geométricas das descontinuidades pertencentes a famílias distintas, adaptado de Vallejo *et al.* (2002).

De acordo com o ISRM (1978), a orientação de uma descontinuidade é definida pelo seu pendore e pela direção do pendore, esta é medida no sentido horário e em relação ao Norte. Estas medições são realizadas com uma bússola de geólogo que se encontram equipadas com um clinómetro (Figura15).

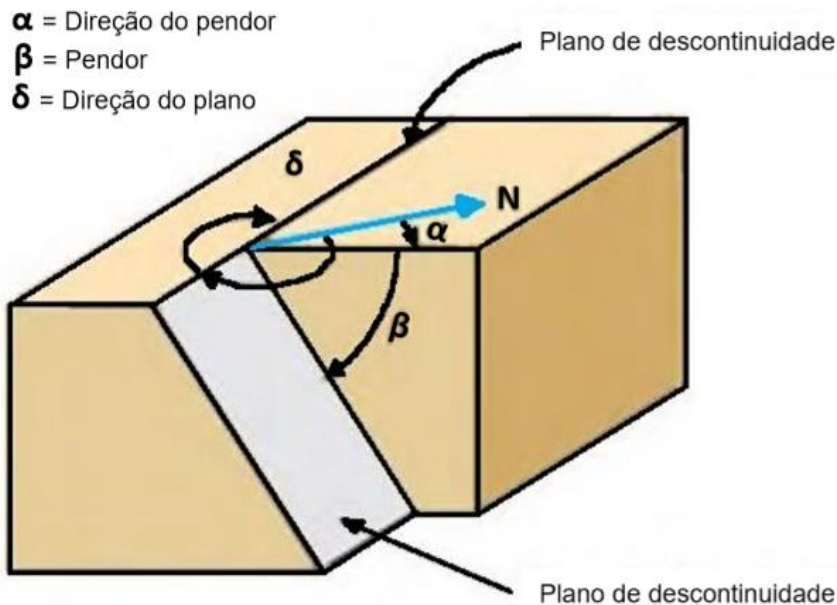


Figura 15 - Medida da orientação da descontinuidade, adaptado de Vallejo *et al.* (2002).

As medições realizadas podem ser posteriormente ser apresentadas de diversas formas, as mais conhecidas e utilizadas neste trabalho são os digramas de roseta, que permitem representar um grande número de medições de forma quantitativa, e a projeção estereográfica onde se representam planos e os respectivos polos. Na projeção estereográfica é igualmente possível fazer a representação através de diagramas de isodensidades, a partir dos quais é possível proceder à definição das famílias de descontinuidades de maior importância, bem como das suas coordenadas geológicas em termos médios e de maior representatividade.

3.3 – Fotogrametria

Fotogrametria é a ciência que visa obter informação fidedigna de objetos físicos através de processos de aquisição, medição e interpretação de imagens fotográficas. Com apenas uma fotografia não é possível obter medições relativas a um determinado objeto em estudo. Através de duas fotografias com sobreposição de áreas e através da estereoscopia, já se conseguem definir distâncias e posições através de técnicas de triangulação (Coggan *et al.*, 2007).

Para a realização do levantamento fotogramétrico foi seguido um fluxo de trabalho desde a aquisição das fotografias até aos resultados da modelação (Figura 16).

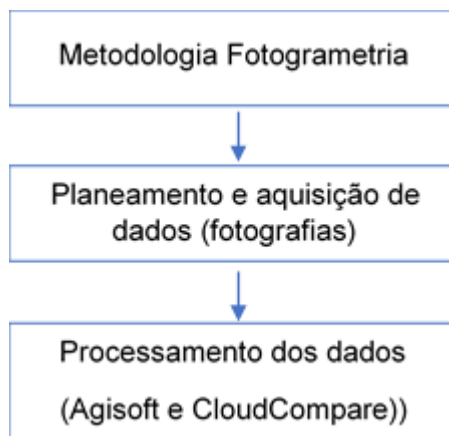


Figura 16 - Metodologia utilizada para a fotogrametria. Adaptado de Duarte (2018).

3.3.1 – Levantamento fotográfico da frente de estudo

O levantamento fotográfico das frentes de estudo foi realizado com o auxílio de uma máquina fotográfica digital, da marca Fujifilm, modelo Finepix JZ100, que conta com uma resolução de 14 megapixéis e distância focal (f) de 4,5 a 36mm (Quadro 10). Para obtenção das fotografias, é aconselhável evitar as sombras, assim como a incidência frontal e direta da luz solar, uma vez que o material rochoso é de cor clara e tem uma elevada refletância. Nesse caso para obtenção das fotografias escolheram-se momentos temporais de céu nublado.

Quadro 10 - Especificações da máquina fotográfica digital utilizada.

Marca	Modelo	Nr. de Pixéis	Distância focal (f)	Abertura (F)	Sensibilidade (ISO)
Fujifilm	JZ100	14 Milhões	$f=4.5 - 36.0\text{mm}$	F2.9 / F7.8	100 - 3200

Com a finalidade de obter as fotografias com a melhor orientação possível, foi marcada no chão uma linha guia paralela à direção do talude/frente, ao longo da qual se deslocou a máquina fotográfica. A distância da frente do talude à linha guia foi variável conforme a definição que se queria obter. No caso de se querer fotografar apenas uma porção da frente de estudo, a linha guia marcava-se mais próximo da frente, obtendo assim um maior número de pixéis por menos área fotografada, aumentando deste modo a resolução.

Para obter pares estereoscópicos de imagens fiáveis, as fotografias foram obtidas com 80% de sobreposição (Figura 17). Assim sendo, é necessário começar a aquisição fotográfica com uma fotografia que contenha no mínimo uma área de 80% fora do objeto de estudo, de modo a garantir que este é captado mais que uma vez.

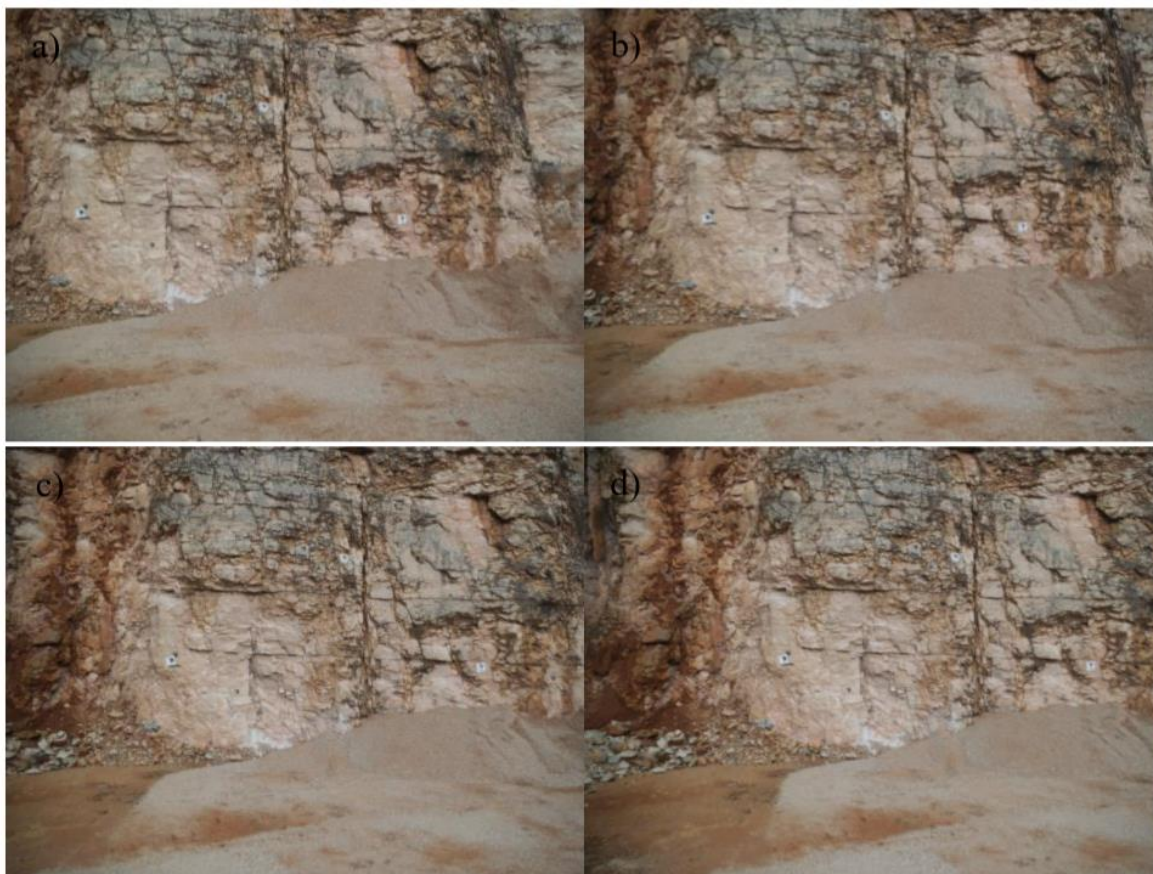


Figura 17 - Extrato de 4 imagens sucessivas adquiridas de uma porção da frente de estudo.

3.3.2 - Levantamento aerofotográfico da pedraira

O levantamento aerofotográfico da pedraira foi realizado com o recurso a um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), também conhecido por UAV (unmanned aerial vehicle) ou drone, da marca Dji, modelo Phantom 4 Pro (Figura 18). Este VANT está equipado com uma câmara digital de 20 megapixéis com uma distância focal entre 8.8 mm e 24mm e um intervalo de sensibilidade fotográfica (ISO) entre os 100 e 12800 em modo manual (Quadro 11). A câmara vem instalada num gimbal de 3 eixos para melhor estabilidade da câmara no decorrer dos voos.

Quadro 11 - Especificações do sensor acoplado ao VANT.

Nr. de Pixeis	Distância focal (f)	Abertura (F)	Sensibilidade (ISO)
20 Milhões	f=8.8 - 24.0mm	F2.8 / F11	100 - 12800



Figura 18 - VANT utilizado para o levantamento aerofotogramétrico.

De modo a que as imagens recolhidas tenham também uma sobreposição de 80% longitudinalmente e 60% lateralmente (Figura 19), é realizado um plano de voo prévio. Este plano de voo é executado previamente com o recurso a um tablet. No plano de voo é estabelecido o trajeto do VANT e são definidos os momentos exatos para captação das fotografias.

Para que o levantamento fotográfico seja realizado corretamente é necessário que o sol não incida diretamente sobre a objetiva da câmara, sendo que a situação ideal seria o levantamento ser realizado num dia nublado.

As definições da câmara são reguladas manualmente para que a velocidade do obturador seja a mais rápida possível, de modo que as fotografias não fiquem desfocadas. O ISO também é regulado para o valor mínimo para evitar que a foto fique demasiado brilhante.

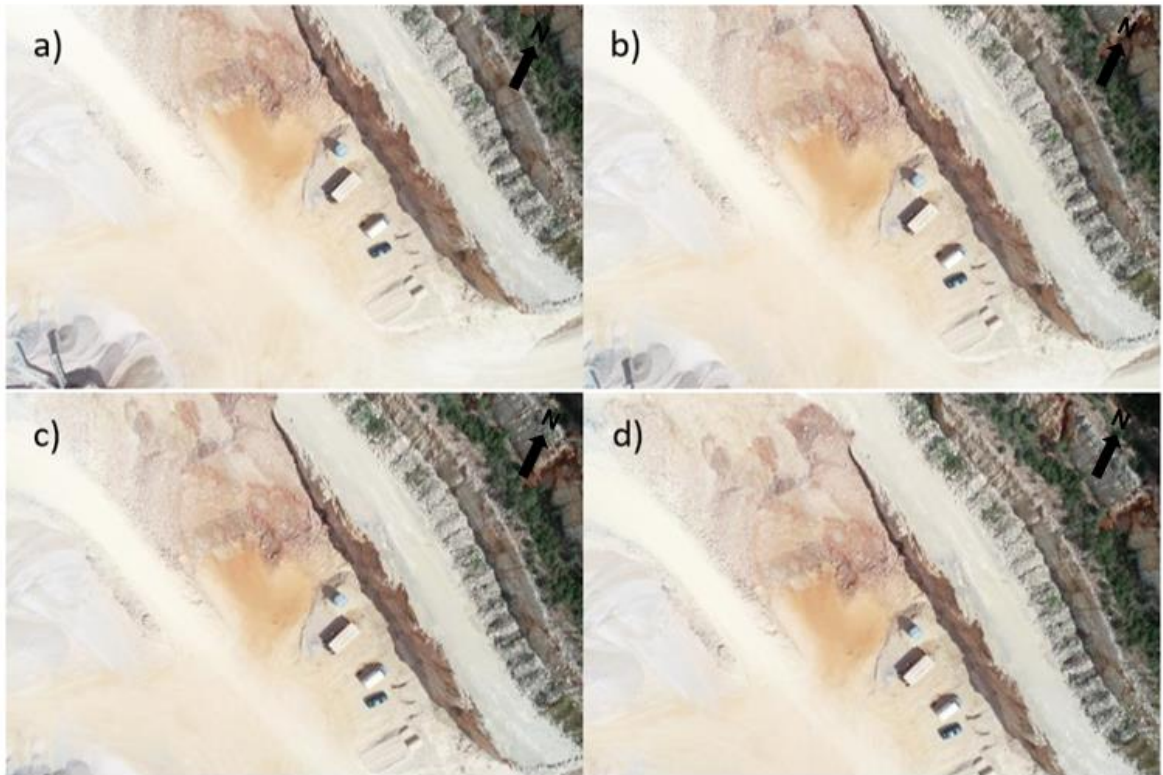


Figura 19 - Extrato de 4 fotografias consecutivas adquiridas pela câmara do VANT.

3.3.3 – Georreferenciação

A georreferenciação do levantamento aerofotográfico da pedreira é realizada por várias etapas que têm início mesmo antes do levantamento efetuado pelo VANT. Em primeiro lugar procede-se à colocação no chão da pedreira ou na base de uma bancada, e livre que qualquer obstrução visual vertical, o que se chama de pontos de controlo, ou *Ground Point Control (GPC)*, na língua Inglesa. Para a realização deste trabalho foram usados dois tipos de pontos de controlo, um circular e um retangular. Estas pontos de controlo foram deitadas no chão aos pares, um circular ao lado de um retangular (Figura 20).



Figura 20 - Fotografia captada pelo VANT onde é visível o par de pontos de controlo em que A é o circular e B o retangular.

Depois do voo ser realizado é efetuada a georreferenciação de todos os pontos de controlo colcados no chão da pedreira ou no topo das bancadas. Este processo é feito com o auxilio de um recetor GNSS (Global Navigation Satellite System) da marca Geomax, modelo Zenith 10. Este aparelho está equipado com um *Personal Digital Assistant* (PDA) ou assistente pessoal digital no qual ficam registadas as coordenadas correspondentes a cada ponto de controlo. As coordenadas fornecidas pelo recetor são as do sistema de referência PT-TM06/ETRS89.

3.3.4 – Processamento dos dados fotogramétricos

A modelação é a parte do trabalho em que se usa as imagens resultantes dos levantamentos fotográficos e os dados do levantamento topográfico, de modo a criar modelos a duas dimensões (2D) e três dimensões (3D) da área de estudo. Para isso foram utilizados três programas informáticos:

GIMP versão 2.10.4 - Este é um programa informático de livre acesso (*freeware*) com a finalidade de edição de fotografia digital. O *GIMP* foi o *software* menos utilizado dos três e foi apenas usado para equilibrar os brancos nas imagens fotográficas que ficaram demasiado escuras. Esta função é feita de forma automática pelo programa, contudo tem de ser aplicada a cada uma das fotografias de modo separado.

Agisoft PhotoScan Professional - Este *software* é utilizado para criação de nuvem de pontos. Nele são inseridas as fotos adquiridas com a finalidade de criar nuvens de pontos, modelos 3D, Modelos Digital de Elevação (MDE) e ortofotomapas.

CloudCompare – O *CloudCompare* é também um programa informático *freeware*, sendo que este tem a capacidade de trabalhar com nuvens de pontos. Neste programa procede-se à definição dos planos de fracturação, assim como de distâncias e orientações.

Tanto o *Agisoft PhotoScan* como o *CloudCompare* necessitam de um fluxo de trabalho lógico de forma a fornecerem resultados considerados fiáveis. Os fluxogramas para a metodologia de cada programa informático podem ser observados nas Figuras 21 e 24.

3.3.4.1 – Modelação (*Agisoft PhotoScan Professional*)

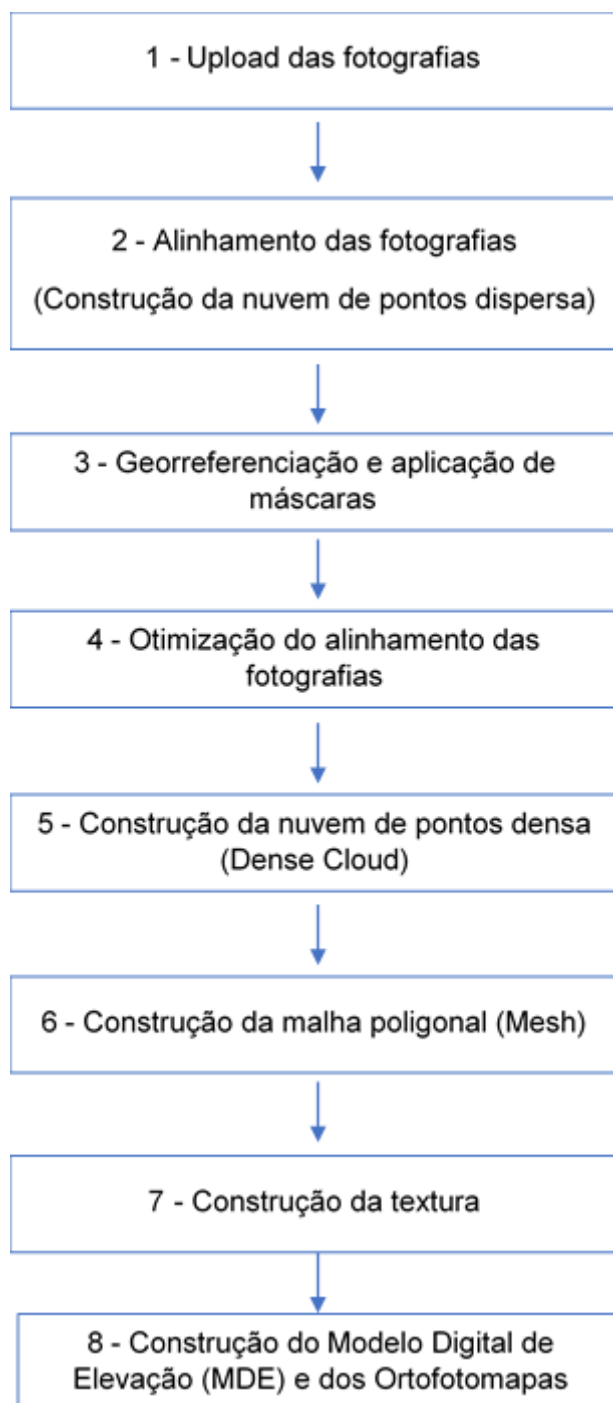


Figura 21 - Fluxograma representativo do desenvolvimento do trabalho no *Agisoft PhotoScan*, adaptado de Duarte (2018).

- 1- De modo a iniciar o trabalho de modelação é necessário realizar o carregamento das fotografias para o programa. Para isto, dentro do *workspace* são criados vários *chunks*. Cada *chunk* corresponde a um levantamento diferente e nele são carregadas as fotografias correspondentes.

- 2- A segunda etapa corresponde ao alinhamento das fotografias, sendo que esta etapa é efetuada automaticamente, sendo necessário inserir alguns parâmetros relativos à qualidade da etapa. A resultante desta etapa é uma nuvem de pontos (Figura 22), onde já é possível obter uma definição do modelo.
- 3- A terceira etapa é a georreferenciação e aplicação de máscaras nas fotografias. Esta etapa é feita manualmente e fotografia a fotografia. Primeiro identificam-se todos os pontos de controlo presentes na fotografia, às quais são atribuídos os números correspondentes a cada ponto de controlo. As fotografias obtidas pelo VANT são georreferenciadas pelo GPS existente no aparelho, no entanto este apresenta uma precisão de ± 10 m, o que gera erros de 30 m na criação da nuvem de pontos.

Todos os objetos que aparecem nas fotografias e que não estão estáticos têm de ser ignorados, para isto são aplicadas máscaras. Isto acontece porque se o objeto se movimentar durante o levantamento fotográfico, vai induzir em erro todos os processos do programa. Na pedraira em estudo existem várias máquinas em movimento, pelo que estas máquinas foram ignoradas nas fotografias.

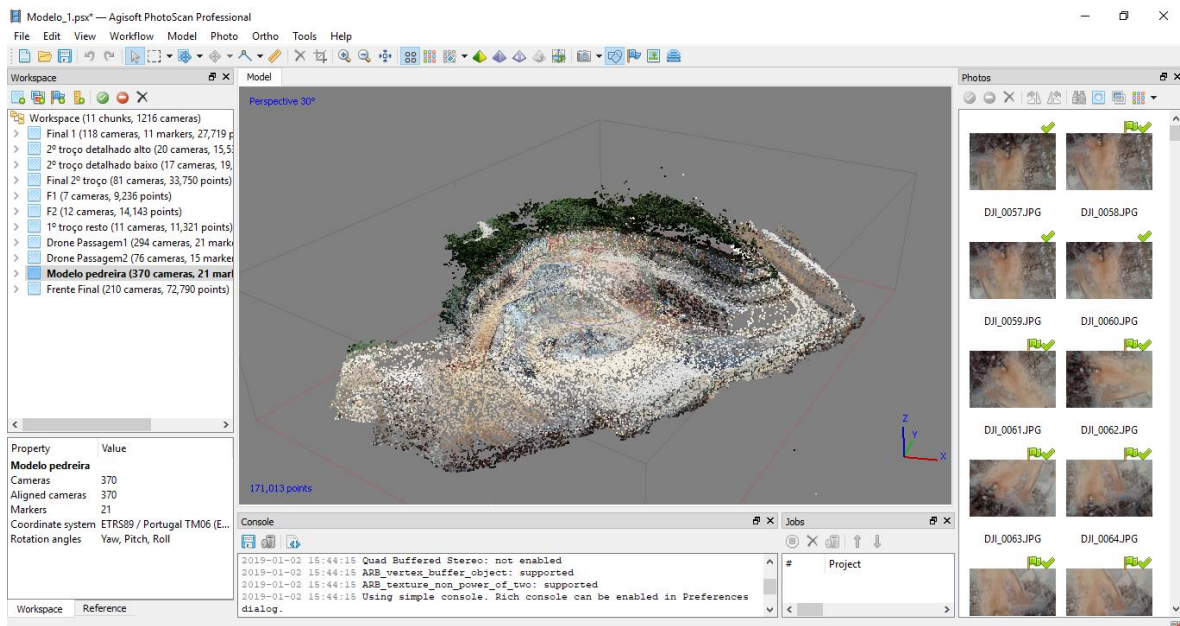


Figura 22 - Visualização da nuvem de pontos proveniente do alinhamento das fotografias no *Agisoft PhotoScan*.

- 4- A quarta etapa é a otimização do alinhamento das fotografias. Aqui o programa já vai ter em conta os pontos de controlo georreferenciados e pode realizar-se um alinhamento mais minucioso.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE UM MACIÇO DE ROCHAS CARBONATADAS COM APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FOTOGRAMETRIA

- 5- A quinta etapa é a construção da nuvem de pontos densa. Esta etapa é a mais demorada, no entanto o resultado é uma nuvem de pontos de maior densidade a qual já se assemelha com o resultado final do modelo (Figura 23).
- 6- A sexta etapa corresponde à criação da malha poligonal (Mesh). Esta malha, juntamente com a nuvem de pontos densa já vai fornecer a base para se trabalhar no programa informático *CloudCompare*.

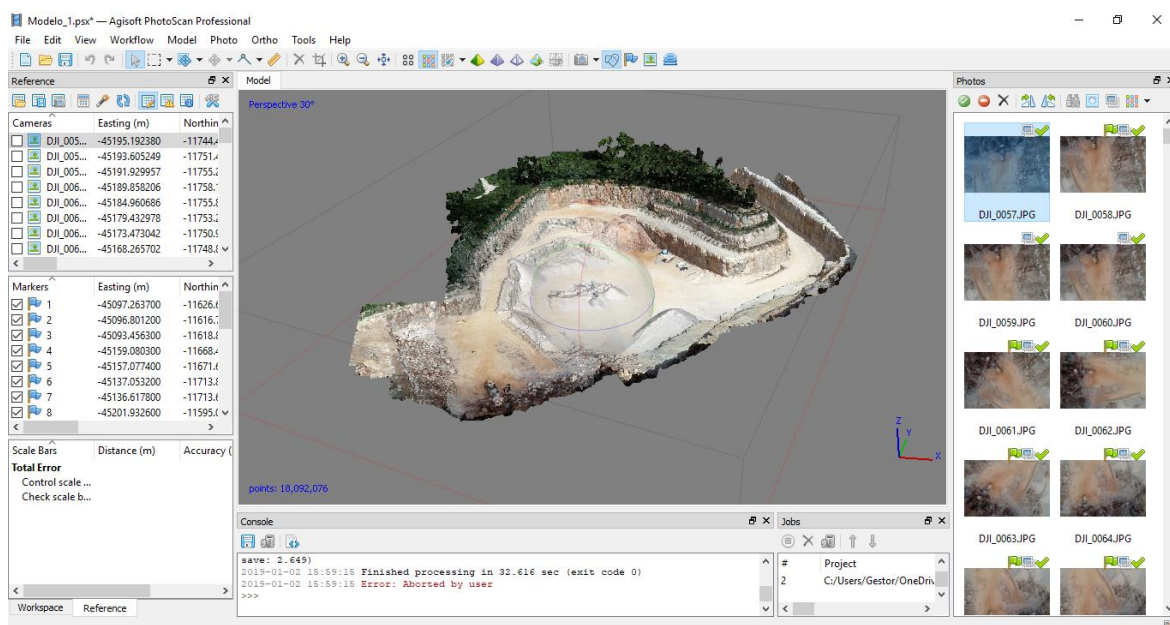


Figura 23 - Visualização da nuvem de pontos densa que foi obtida.

- 7- A sétima etapa relaciona-se com a construção da textura do modelo. Esta etapa melhora o grafismo do modelo, sendo que este deixa de ser uma nuvem de pontos densa para se assemelhar com a realidade. Posteriormente pode ainda ser contruído o *tiled model*, que vai ainda melhorar a sua textura. Este é o último processo para melhorar visualmente o modelo.
- 8- Por fim são construídos o ortofotomapa e o Modelo Digital de Elevação, mais propriamente o Modelo Digital de Superfície (MDS), uma vez que este inclui valores altimétricos de todos os objetos presentes no terreno.

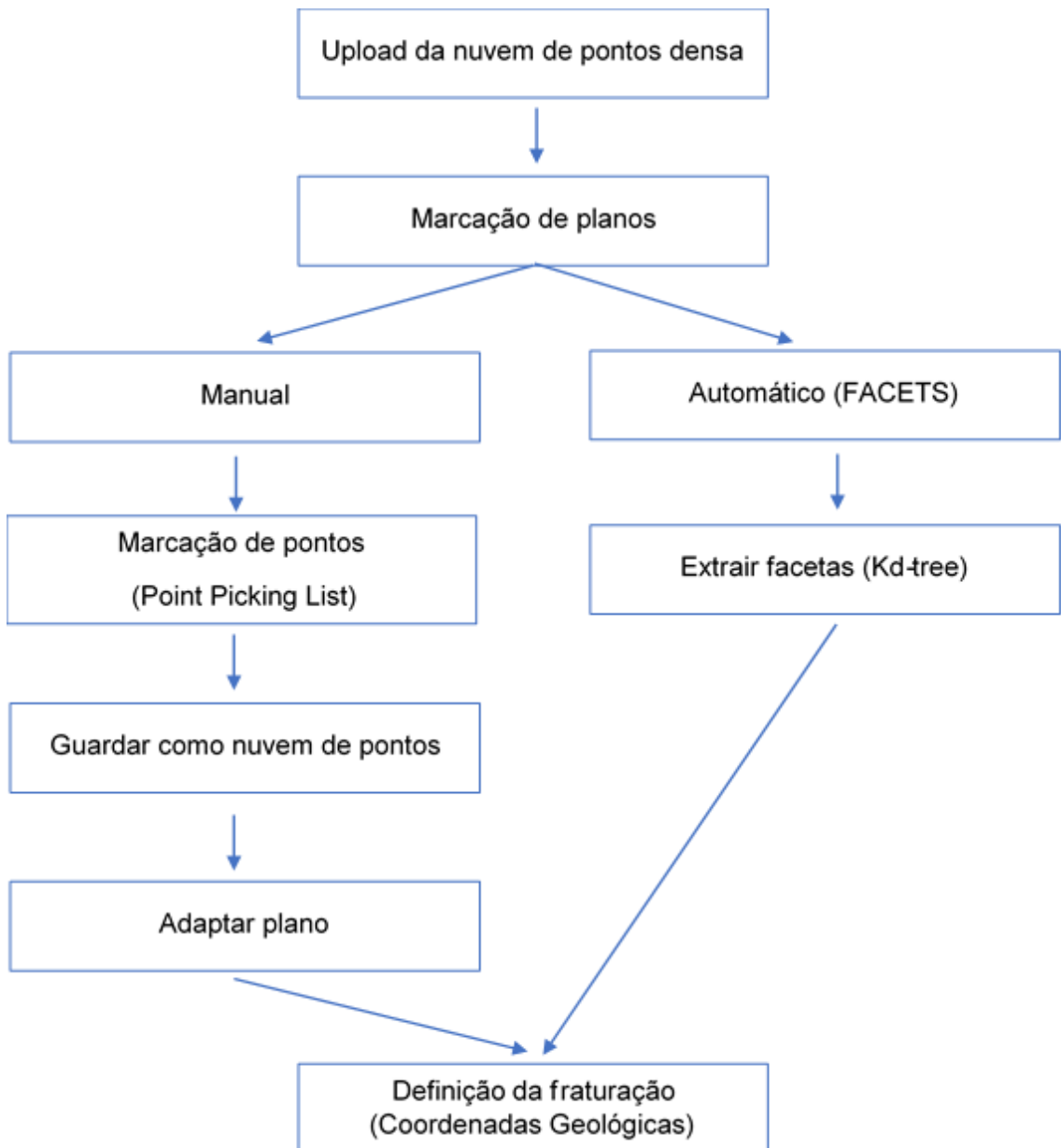
3.3.4.2 – Extração dos elementos (*CloudCompare*)

Figura 24 - Fluxograma da metodologia usada no programa *CloudCompare*, adaptado de Duarte (2018).

A fim de definir os valores de direção e pendora da fraturação existente no maciço, é necessário seguir também uma sequência lógica de processos (Figura 24). Com esta finalidade foram executadas duas metodologias diferentes, uma designada como manual e outra correspondendo a uma versão automatizada estabelecida pelo *CloudCompare*.

Na parte inicial é necessário introduzir, no programa *CloudCompare*, a nuvem de pontos construída no programa *Agisoft PhotoScan*. Seguidamente são então aplicadas as

duas metodologias diferentes, a manual e a automática com o recurso ao *plug-in* FACETS (Dewez *et al.*, 2016).

Para proceder à marcação dos planos de descontinuidade de modo manual, é necessário escolher três ou mais pontos pertencentes a um dado plano. Posteriormente, guardam-se os dados como uma nova nuvem de pontos. A esta adapta-se o plano que mais se apropria e que permite definir os valores de pendor (*Dip*) e direção de pendor (*Dip Direction*).

No método automático deve selecionar-se a nuvem de pontos a analisar, iniciar o *plug-in*, e escolher alguns parâmetros relacionados com a deteção dos planos (número mínimo de pontos, distância entre pontos) e com a fusão dos planos (ângulo máximo para fusão e a distância máxima ao centro do plano). Os dados fornecidos através desta metodologia são expressos na forma de pendor e direção de pendor, podendo ser definidas as várias famílias de descontinuidades existentes. É possível efetuar diferentes análises dos dados no *CloudCompare*, uma vez que existe a opção de visualizar as representações da projeção estereográfica dos planos de descontinuidade.

Capítulo 4 – Resultados e discussão

4.1 - Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados do trabalho efetuado e a sua discussão, seja da utilização da classificação RMR bem como dos trabalhos de fotogrametria e a sua envolvente.

4.2 – Determinação da massa volúmica e porosidade aberta

Para determinação da massa volúmica e da porosidade aberta foram seguidos os métodos descritos em 3.2.1, de acordo com as recomendações da ISRM (1981).

As amostras utilizadas nos ensaios foram recolhidas nos locais onde foram realizados os ensaios de determinação de dureza através do martelo de Schmidt. No total foram recolhidas 70 amostras, dos vários setores considerados.

No Quadro 12 apresentam-se os resultados de massa volúmica e da porosidade aberta e os respetivos valores do desvio padrão para os vários sectores de amostragem.

Quadro 12 - Resultados dos ensaios laboratoriais para a determinação da massa volúmica e porosidade aberta.

Conjunto	Setor	ρ_d (g/dm ³)			n %		
		Média	Desvio Padrão	CV	Média	Desvio Padrão	CV
1	1	2695,64	10,51	0,39	0,82	0,18	21,99
2	1	2690,87	5,01	0,19	0,63	0,16	25,93
3	2	2668,35	17,35	0,65	1,92	0,73	37,99
4/5	3	2691,55	62,82	2,33	1,69	0,36	21,57
6	4	2630,89	45,83	1,74	3,21	1,68	52,26
7	5	2638,44	7,54	0,29	2,81	0,27	9,44
8	6	2653,95	17,50	0,66	2,33	0,65	27,75
Maciço rochoso		2667,10	39,88	0,01	1,50	1,17	0,61

Segundo os resultados obtidos é possível verificar que as amostras recolhidas no setor 1 apresentam os maiores valores da massa volúmica e os menores da porosidade aberta, estes valores podem ser explicados pelos provetes do setor 1 serem provenientes de um filão de calcite de espessura considerável. O setor 3 também evidencia valores de massa volúmica elevados e de porosidade aberta reduzida, uma vez que o calcário neste setor se apresenta substancialmente mais são.

Em termos médios, os calcários da frente de estudo da pedreira possuem uma massa volúmica de 2667 kg/m^3 e uma porosidade aberta de 1,91%. Estes valores são compatíveis com os geralmente evidenciados pelos calcários de matriz micríticas. Rocha (2016) realizou um trabalho de caracterização física onde recolheu amostras de diversas pedreiras dentro do maciço calcário estremenho, designadamente de uma pedreira inserida nas Camadas de Cabaços e Montejunto, unidade J^3_{CM} , presente na Folha 27-A (Vila Nova de Ourém) da Carta Geológica de Portugal de escala 1:50 000 realizada pelo IGM (2000).

A unidade de Cabaços e Montejunto, pertencentes ao Jurássico superior, podem ser distinguidas em dois tipos de fácies: as Camadas de Cabaços e as Camadas de Montejunto, as primeiras correspondem a litologias mais ou menos carbonatadas, que na sua base são conglomeráticas e micríticas no topo. A fácies denominada Camadas de Montejunto, é constituída por calcários micríticos de cores cinzentas, mais ou menos oolíticos, pelóidicos e bioclásticos. Rocha (2016) determinou a massa volúmica aparente assim como a porosidade aberta de amostras das Camadas de Montejunto, obtendo, respetivamente, os resultados médios de 2685 kg/m^3 e 0,24 % estes resultados revelaram alguma semelhança aos encontrados no presente trabalho, no entanto os resultados da porosidade aberta de Rocha (2016) são mais reduzidos registando-se a situação contrária para os resultados da massa volúmica aparente.

É também possível comparar os resultados obtidos com as classes de classificação para massa volúmica e porosidade segundo a IAEG (1979) (Quadro 13).

Quadro 13 - Classificação dos valores de massa volúmica e porosidade com a correspondente descrição e classe, adaptada de IAEG (1979).

Descrição	Massa volúmica (kg/m^3)	Classe	n (%)	Descrição
Muito baixa	<1835	1	>30	Muito elevada
Baixa	1835 - 2243	2	15 - 30	Elevada
Média	2243 - 2599	3	5 - 15	Média
Elevada	2599 - 2803	4	1 - 5	Baixa
Muito elevada	>2803	5	<1	Muito baixa

Segundo o Quadro 13 é possível verificar que todos os valores obtidos correspondentes à massa volúmica se enquadram na classe 4, definida como elevada. Quanto à porosidade, os provetes do setor 1 enquadram-se na classe 5, de porosidade muito baixa. Os provetes dos restantes setores pertencem à classe 4 que corresponde a uma porosidade baixa.

4.3 – Classificação Rock Mass Rating (RMR)

O índice RMR permite classificar os maciços rochosos segundo alguns parâmetros geotécnicos. Os resultados do índice RMR são apresentados tendo em atenção os vários parâmetros de classificação.

No cálculo do índice RMR, a frente de estudo foi dividida em 12 setores (Figura 25). Estes setores foram escolhidos com base em mudanças físicas evidentes, como mudanças na fracturação, na cor da rocha, constituição (presença de filões de calcite) e alteração na direção da frente.

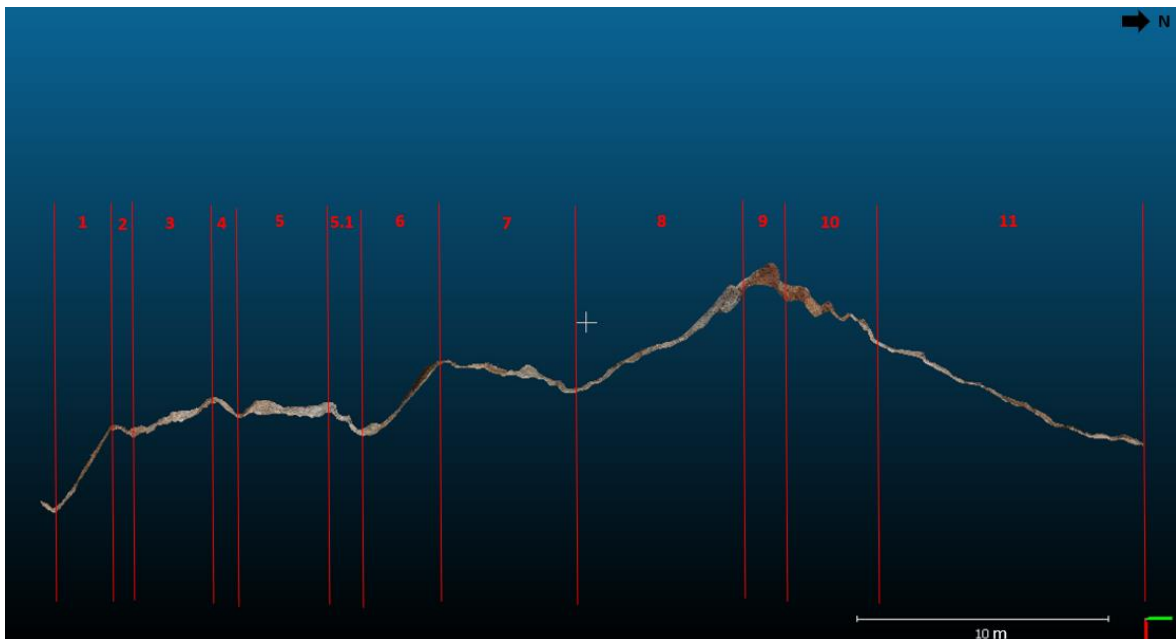


Figura 25 - Representação em planta da frente estudada e respetivos setores identificados através da numeração (1 – 11).

4.3.1 - Descrição dos diferentes setores

Uma vez que a frente de estudo foi dividida por setores que foram caracterizados tendo em atenção parâmetros geotécnicos, procede-se a uma descrição dos setores, designadamente dos aspetos de maior importância, como a orientação, a existência de fraturas, cor do material rochoso e o seu grau de alteração.

Comum a todos os setores, a fraturação é caracterizada por 3 famílias de fraturas. A família L corresponde à estratificação presente no maciço, tem uma atitude média de N40°W; 7°NE, permitindo a definição de camadas calcárias bem delimitadas. A família F é a que mais afeta a frente de estudo, apresentando um espaçamento reduzido e uma atitude média correspondente a N50°W; 83°NE. As fraturas da família de fraturação T têm uma

menor expressão relativamente às da família F e exibem uma atitude média de N39°E; 76°NE.

O **setor 1** (Figura 26) corresponde ao limite de uma falha com a direção de N60°W; 88°NE. Sendo visível a presença de água intersticial, a qual pode provocar a precipitação de calcite (CaCO_3), verifica-se a presença de um filão de calcite com cerca de 2 cm de espessura e de cor branca a amarelada.

No **setor 2** (Figura 26) o calcário encontra-se muito fraturado e muito alterado (W_4) devido à proximidade com o plano de falha, nas proximidades deste existe um filonete de calcite com cerca de 3 cm de espessura. Este setor apresenta uma cor acastanhada devido ao grau de alteração do material rochoso.

O **setor 3** (Figura 26) é caracterizado pela presença de calcário branco e pouco alterado, no entanto encontra-se bastante compartimentado pelas descontinuidades da família F. Aqui as descontinuidades desta família têm um espaçamento médio de cerca de 10 cm.

O **setor 4** (Figura 26) é também muito afetado pela fraturação da família F que neste setor têm um espaçamento médio de 6 cm. Neste setor ocorre percolação de água, evidenciando ao material rochoso uma cor mais acastanhada do que no setor 3, devido à presença de argila.

O **setor 5** (Figura 26) é composto por calcário de tonalidades brancas, por vezes mais acinzentadas devido à alteração causada pela exposição aos fatores atmosféricos. Neste setor, as descontinuidades da família F apresentam maiores espaçamentos, resultando no aumento da dimensão dos blocos rochosos. O **setor 5.1** (Figura 26) apresenta as mesmas características que o setor 5, no entanto a fraturação deste setor foi afetada pelo desmonte com recurso a explosivos o que resultou numa maior abertura da fraturação.

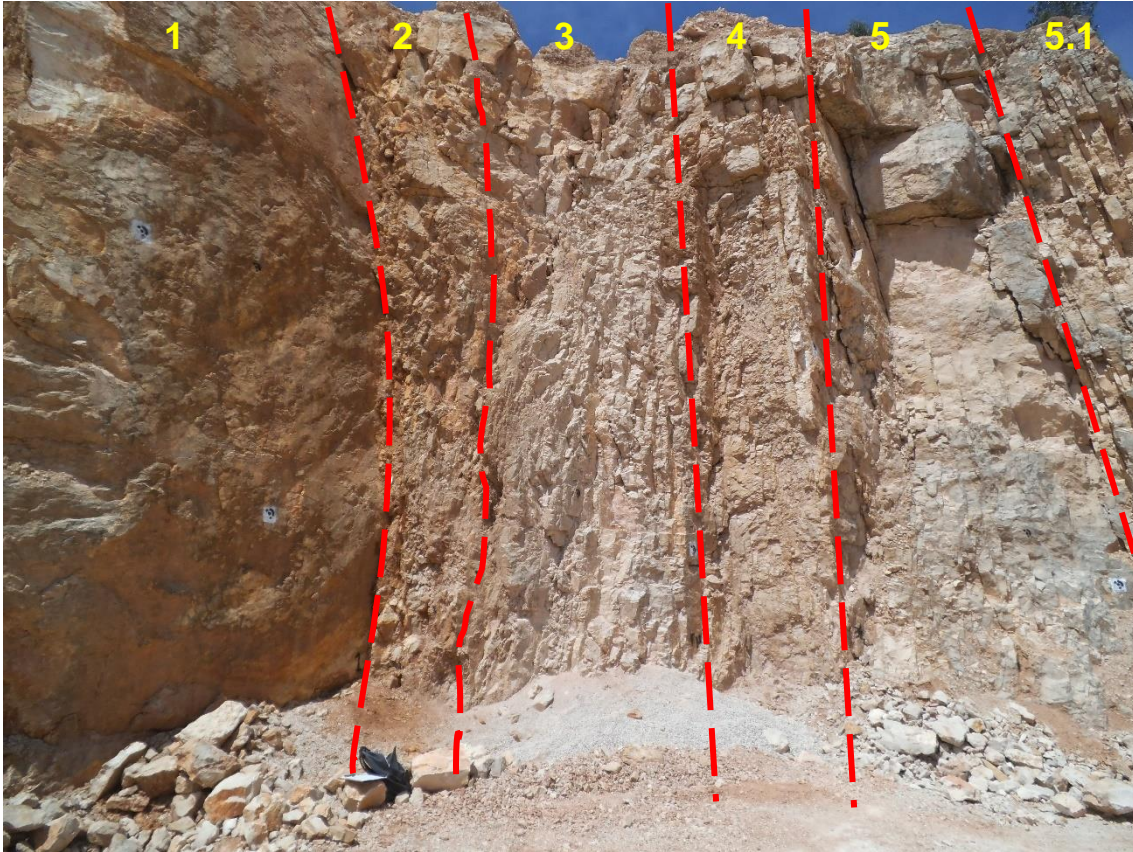


Figura 26 - Representação dos setores 1 a 5.1 identificados na frente de estudo. As linhas vermelhas a tracejado limitam os setores.

O **setor 6** (Figura 27) tem a direção típica da família F ($N51^{\circ}W$; $79^{\circ}NE$). Neste setor o calcário apresenta uma tonalidade branco-acinzentado e evidência uma película de alteração fina e de cor cinzenta. Na parte do setor de cotas mais elevadas, o calcário muda para tonalidades mais acastanhadas devido à existência de material argiloso.

O **setor 7** (Figura 27) é dividido em duas partes, uma a sul e outra a norte. A primeira encontra-se compartimentada pela família F de fraturação, apresentando uma profundidade média de 8 m e espaçamento médio de 7 cm. Na parte norte, o calcário apresenta-se mais são e menos fraturado, revelando, no entanto, uma ligeira coloração cinzenta, devido seu grau de alteração moderado ou intermédio (W_3).

O **setor 8** (Figura 27) apresenta também uma intensa fraturação relacionada com a presença das fraturas da família F e um grau de alteração mais significativo. As superfícies de descontinuidade revelaram-se mais rugosas relativamente a setores anteriores. As fraturas apresentam humidade perene o que leva à formação de musgo e de depósitos argilosos.

O **setor 9** (Figura 27) corresponde a uma caixa de falha com cerca de 1,5 m de espessura e aspeto cavernoso. Através das medições que foram possíveis realizar, verificou-se que este plano de falhamento tem uma direção e pendor semelhante à família F. Na caixa de falha, o material rochoso encontra-se muito alterado ou mesmo decomposto e existem depósitos de *terra rossa*.

O **setor 10** (Figura 27) é uma zona também afetada pela falha existente no setor 9. Aqui o maciço rochoso está fraturado pelas descontinuidades correspondentes à família F e tem uma tonalidade rosada devido aos processos de alteração e à presença de argila.

Do setor 10 para o setor 11 é visível uma modificação progressiva no maciço rochoso, revelando-se menos fraturado, mais são e com uma maior resistência.

No **setor 11** (Figura 27) a família das fraturas F perde substancialmente expressão, enquanto as descontinuidades da família T evidenciam-se pelas suas maiores aberturas, que por vezes se encontram relacionadas com a utilização de explosivos. No setor 11, a rocha apresenta-se com cor branca e é possível distinguir facilmente a estratificação existente no maciço rochoso.

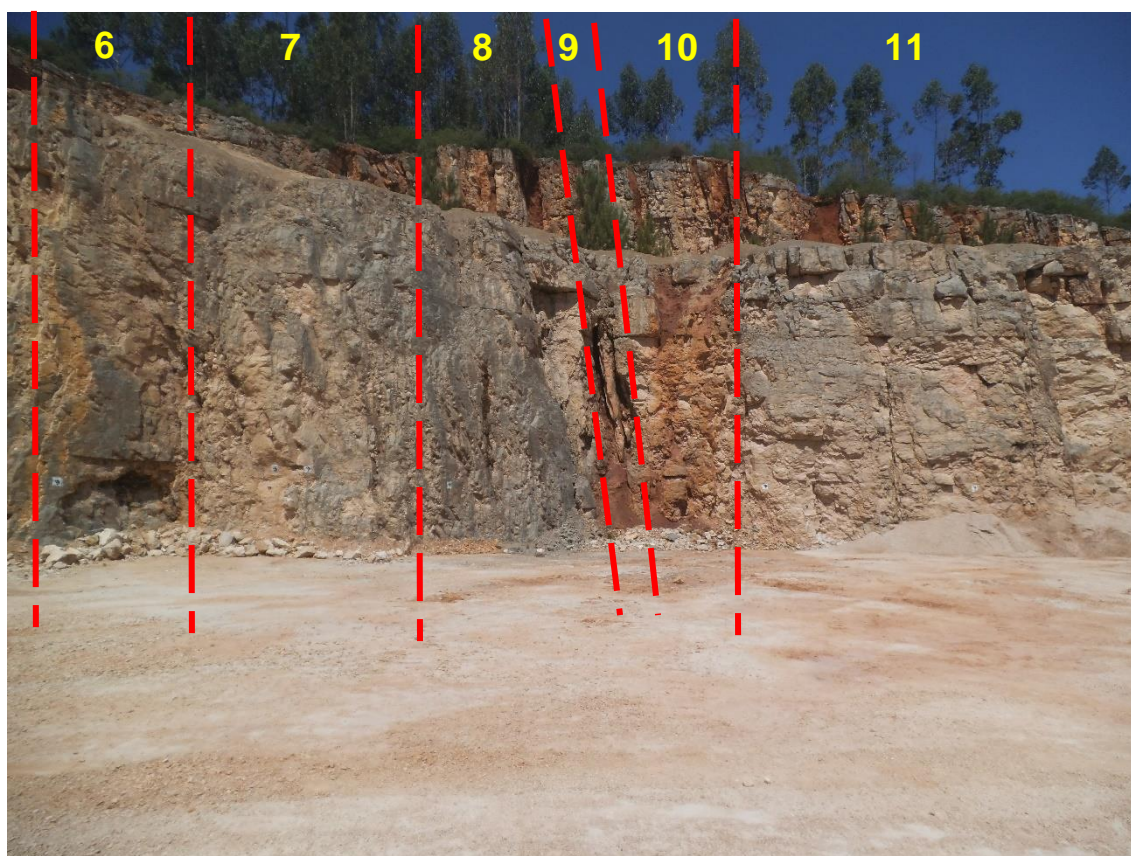


Figura 27 - Representação dos setores 6 a 11 identificados na frente de estudo. As linhas vermelhas a tracejado limitam os setores.

Aquando da recolha das amostras para os ensaios de caracterização, verificou-se que a frente de estudo selecionada já se encontrava parcialmente coberta por material rochoso proveniente da produção da pedreira, pelo que só foi possível recolher amostras de 6 dos 12 setores presentes na frente de estudo.

4.3.2 - Resistência do material rochoso

A resistência do material rochoso foi definida através da execução de ensaios de determinação de dureza através do Martelo de Schmidt. Os ensaios foram realizados *in situ*, nos diferentes setores da frente. As determinações foram executadas com a carga orientada perpendicularmente às superfícies de fracturação. No Quadro 14 podem observar-se os resultados da dureza de Schmidt obtidos nos locais ensaiados. Nestes locais ou nas suas proximidades também se recolheram as amostras para os ensaios laboratoriais.

No Quadro 14 estão igualmente representados os valores da resistência à compressão uniaxial, expressos em MPa, estes foram obtidos através do ábaco presente na Figura 11 e em que se consideraram os valores da dureza de Schmidt e também os valores da massa volúmica.

Quadro 14 - Resultados dos ensaios *in situ* realizados com o Martelo de Schmidt.

Ponto	Setor de medição	Carga perpendicular às superfícies das fraturas da família	Valores Médios da Dureza de Schmidt	Massa volúmica ρ_d (kg/m ³)	Valores da Resistência à Compressão uniaxial (MPa)
1	1	F	34	2696	72
2	1	F	39	2691	91
3	2	T	19	2668	38
4	3	F	25	2692	56
5	3	L	23	2692	37
6	4	T	18	2623	35
7	5	T	28	2638	52
8	5	F	35	2638	67
9	5	L	20	2638	30
10	6	L	30	2654	51
11	6	T	24	2654	51

Ao comparar os resultados da resistência à compressão uniaxial com os valores do parâmetro (1) do RMR do Quadro 1, é possível constatar que a totalidade dos resultados da resistência à compressão uniaxial (RCU) se enquadra em dois intervalos, um de 25 a

50 MPa e outro entre 50 e 100 MPa, e que têm, respetivamente, os valores ponderais intermédios de 4 e de 7.

Os resultados obtidos relativos à RCU podem ser comparados com os valores característicos apresentados pela ISRM (1981) e observáveis no Quadro 5. Desta forma, os resultados obtidos enquadram-se em dois intervalos: o das rochas modernamente duras (R3) com uma RCU entre 25 e 50 Mpa, e o intervalo correspondente às rochas duras (R4) com a RCU compreendida entre 50 e 100 Mpa.

Os valores mais elevados de RCU correspondem ao setor 1, no qual se verifica a presença de um filão espesso de calcite. O setor 5 apresenta também valores elevados para a determinação perpendicular à fraturação da família F, sendo que para o mesmo setor, as determinações perpendiculares às fraturas das outras famílias já apresentam valores menores.

4.3.3 - Rock Quality Designation (RQD)

Uma vez que não se executou qualquer tipo de sondagens com recuperação de testemunho, o cálculo do RQD foi realizado através das expressões (2), (3) e (4) apresentadas no capítulo 3. Na determinação do RQD consideraram-se os espaçamentos encontrados para as 3 famílias de fraturas existentes no maciço rochoso. No Quadro 15 encontram-se os resultados obtido para os diferentes setores assim como para o maciço rochoso estudado.

O setor 9 não foi considerado no cálculo do RMR, uma vez que corresponde a uma caixa de falha onde o grau de alteração do material rochoso é muito elevado, verificando-se a presença de *terra rossa*.

Quadro 15 - Espaçamento médio da fraturação por família e por setor, valores do Rock Quality Designation (RQD) de acordo com as expressões de Palmstrom (1982) e Priest & Hudson (1979).

Setor	Espaçamento médio (m)			Jv	RQD (%)			
	F	T	L		Palmstrom	Clas. do maciço	Priest & Hudson	Clas. do maciço
1	0,15	0,33	0,78	10,97	79	Bom	70	Razoável
2	0,10	0,33	0,78	14,24	68	Razoável	58	Razoável
3	0,11	0,33	0,78	13,52	70	Razoável	61	Razoável
4	0,06	0,33	0,78	20,62	47	Fraco	39	Fraco
5	0,17	0,33	0,78	10,13	82	Bom	73	Razoável
5.1	0,10	0,33	0,78	14,11	68	Razoável	59	Razoável
6	0,06	0,33	0,78	21,95	43	Fraco	36	Fraco
7	0,11	0,33	0,78	13,35	71	Razoável	61	Razoável
8	0,10	0,33	0,78	14,56	67	Razoável	57	Razoável
10	0,12	0,33	0,78	12,88	73	Razoável	63	Razoável
11	0,14	0,33	0,78	11,45	77	Bom	68	Razoável
Maciço	0,11	0,33	0,78	13,25	71	Razoável	62	Razoável

Os valores de RQD calculados através de uma sondagem são condicionados pela própria orientação da sondagem. No cálculo do RQD através dos valores de índice de fraturação volumétrico (Jv), a relação com a orientação da sondagem não é considerada. Deve mencionar-se que os valores RQD observados no Quadro 15 podem ser ligeiramente elevados para o maciço rochoso da frente estudada, uma vez que este apresenta fraturação com espaçamento reduzido.

Os valores de RQD obtidos através da expressão 4 estabelecida por Priest & Hudson (1979) são menores que os obtidos pela expressão 2. Uma vez que a totalidade do maciço se encontra bastante fraturado, os valores de calculados segundo Priest & Hudson (1979) são talvez os que mais se aproximam da realidade.

Segundo o parâmetro (2) da Quadro 1 os valores de RQD calculados segundo Palmstrom (1982) enquadram-se nas classes 25%-50%, 50%-75% e 75%-90%, que valores ponderais intermédios do sistema classificativo RMR, de 8, 13 e 17 respetivamente. O setor 5 relativamente aos outros setores apresenta as fraturas da família F com uma menor persistência e maiores espaçamentos, é o que revela maiores valores de RQD. Na sua maioria, os resultados obtidos enquadram-se entre os 50% e 75%.

Segundo Deere (1967) é possível classificar a qualidade do maciço rochoso com base no seu valor de RQD. Nesse caso, a maior parte dos setores e a frente total, são classificados como razoáveis. Existem também setores de boa qualidade, como é o caso dos setores 1, 5 e 11. De fraca qualidade, foram considerados os setores 4 e 6. É necessário ter em conta que a classificação da qualidade dos maciços rochosos através

do RQD apresenta limitações, isto porque o RQD é determinado somente pelo espaçamento medido entre fraturas da mesma família, sem ter em conta qualquer outra característica da fraturação e/ou dos maciços rochosos.

4.3.4 - Espaçamento das descontinuidades

O espaçamento entre descontinuidades foi medido com recurso a uma fita métrica com uma precisão de 1 mm e considerando as fraturas pertencentes a uma dada família. Os valores médios obtidos por família e setor podem ser observados no Quadro 15.

Para o cálculo do índice RMR não se consideram de modo direto os valores médios do espaçamento apresentados no Quadro 15, todos os valores registados são transformados nos valores ponderais para cada um dos setores.

Uma vez que a espessura das camadas atinge, por vezes, quase 1 m, a família L é a que tem um maior espaçamento médio, neste caso de cerca de 0,78 m. A família T tem espaçamentos desde os 6 cm aos 100 cm, no entanto apresenta um valor médio de 33 cm de espaçamento entre fraturas. A família F representa as fraturas mais frequentes no maciço rochoso e é a menos homogénea em termos de espaçamento, variando o seu espaçamento conforme o setor onde se realiza a medição. Esta família tem valores compreendidos entre 15 mm e 30 cm.

4.3.5 - Características das descontinuidades

Quando se procede a uma caracterização mais detalhada das descontinuidades é utilizado o descrito no Quadro 2 que está relacionada com o sistema classificativo do RMR de Bieniawski (1989).

A família L é a que tem valores ponderais mais baixos relativamente à **persistência** da fracturação, esta apresenta geralmente os valores dos pesos na ordem do 0, 1 e 2, que correspondem a valores medidos entre 2 m e 40 m. Estes valores explicam-se através da continuidade da estratificação que é sub-horizontal e interseta a frente de estudo numa grande extensão.

A família F tem valores ponderais em termos médios e relativos à persistência de 2, corresponde a uma família de fraturação sub-vertical e interseta a frente em quase toda a sua altura, evidenciando uma persistência entre 3 e 10 m.

A família T é a que apresenta valores de continuidade mais baixos, a que correspondem valores ponderais do sistema classificativo RMR mais elevados. Os valores

de persistência da família T encontram-se entre 50 cm e 3 m, o que faz variar os seus valores ponderais entre 4 e 6.

Quando ao parâmetro da **abertura**, as fraturas das famílias F e T apresentam uma grande variação e os seus pesos vão de 0 a 5. Deve salientar-se que o desmonte com recurso a explosivos tende a aumentar a abertura da fracturação, desse modo temos um valor de peso de 3 para as descontinuidades das famílias F e T e um valor médio de 4 para as da família L.

A **rugosidade** da totalidade das superfícies de descontinuidade que foram estudadas foi classificada como ligeiramente rugosa a rugosa, o que corresponde a um valor ponderal de 3 a 5, segundo Bieniawski (1989).

O material de **preenchimento** existente nas descontinuidades é um parâmetro muito variável de família para família, mas que dentro de cada setor apresenta uma menor variação. Nas famílias F e T existem fraturas com todo o tipo de preenchimento, desde o mole com espessura <5 mm ao inexistente, sendo que o mais frequente é o duro com espessura <5 mm. Para a família L já não existem os extremos da escala, verificando-se como o mais comum o material de preenchimento duro com espessura <5 mm.

As superfícies de descontinuidade presentes na frente de estudo quanto ao **grau de alteração** foram classificadas, de modo geral, entre moderadamente alteradas a ligeiramente alteradas, o que corresponde respetivamente a valores ponderais de 3 e 5.

4.3.6 - Presença de água

Nas fraturas da frente de estudo observa-se a presença de água intersticial, bem como a existência de vestígios de percolação de água, o que se traduz em valores de peso do parâmetro de presença de água do RMR entre 8 e 12. Esta variação de valores verifica-se para todas as famílias de fraturação. Nas zonas do maciço onde existem caixas de falha de pequenas dimensões e a existência de *terra rossa*, a água está igualmente mais presente. A caracterização da fracturação foi realizada em períodos temporais distintos, o que permitiu verificar a influência da pluviosidade nesta característica das descontinuidades.

4.3.7 - Orientação das descontinuidades

A orientação das descontinuidades corresponde a um parâmetro no cálculo do índice classificativo RMR modificado, e é caracterizada desde muito desfavorável a muito favorável em relação à orientação do talude/frente. Na realização da presente dissertação, a orientação e pendor das fraturas foi efetuada com uma bússola de geólogo. No total foram registadas 130 fraturas das diferentes famílias F, T e L.

A família L corresponde à estratificação original da rocha, e varia em direção desde N32°W aos N42°W e em pendores desde 4°NE aos 8°NE. As camadas rochosas são bem definidas, com possanças decimétricas a métricas e apresentam-se contínuas em toda a frente de estudo. Nos setores onde a família F se apresenta mais frequente, a família L é menos perceptível. Na Figura 28 é visível o diagrama de roseta e também a representação da projeção estereográfica dos polos das descontinuidades da família L.

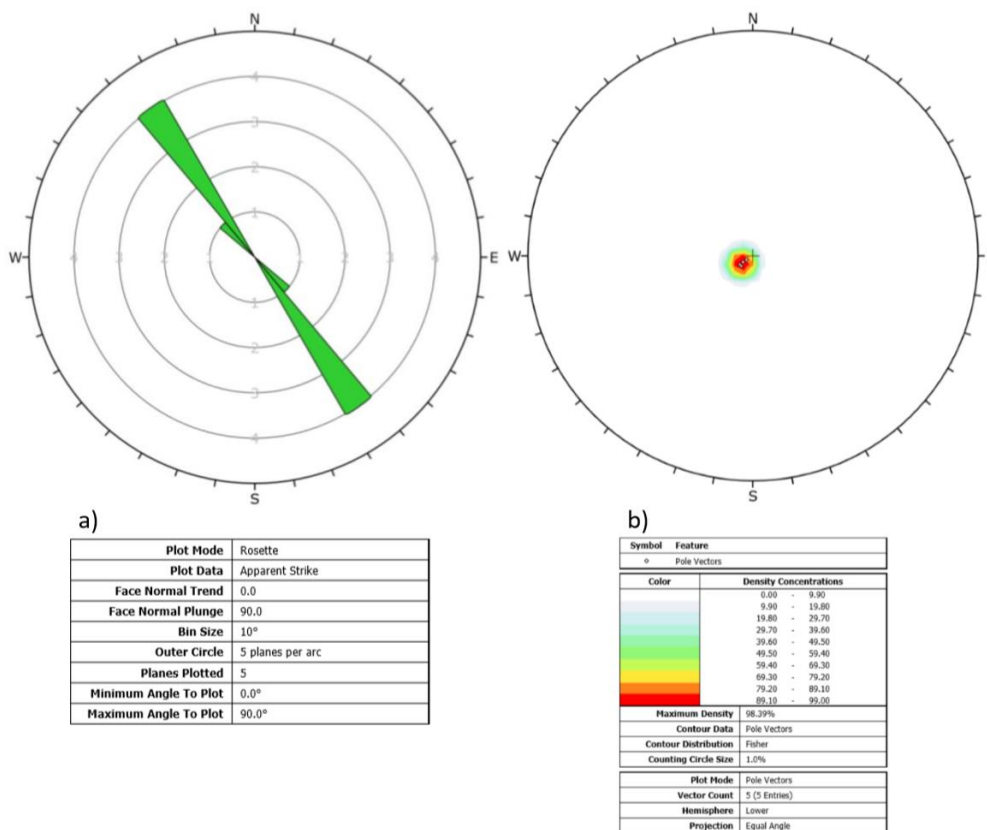


Figura 28 - Projeção da família de fraturas L. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.

A família de descontinuidades T é um conjunto de fraturas originadas por forças posteriores à formação das rochas carbonatadas. Esta família de fraturas é determinante nos processos de desmonte da pedra. Na frente de estudo existem alguns setores que

são paralelos à direção desta família de fraturação (setores 2, 4 e 5.1). As descontinuidades desta família apresentam valores de direção desde N35°E até N50°E. O pendor é muitas vezes sub-vertical, com valores maiores ou superiores a 70° que podem pender para SE ou NE. Na Figura 29 observam-se o diagrama de roseta bem como as projeções estereográficas dos polos dos planos das descontinuidades da família T.

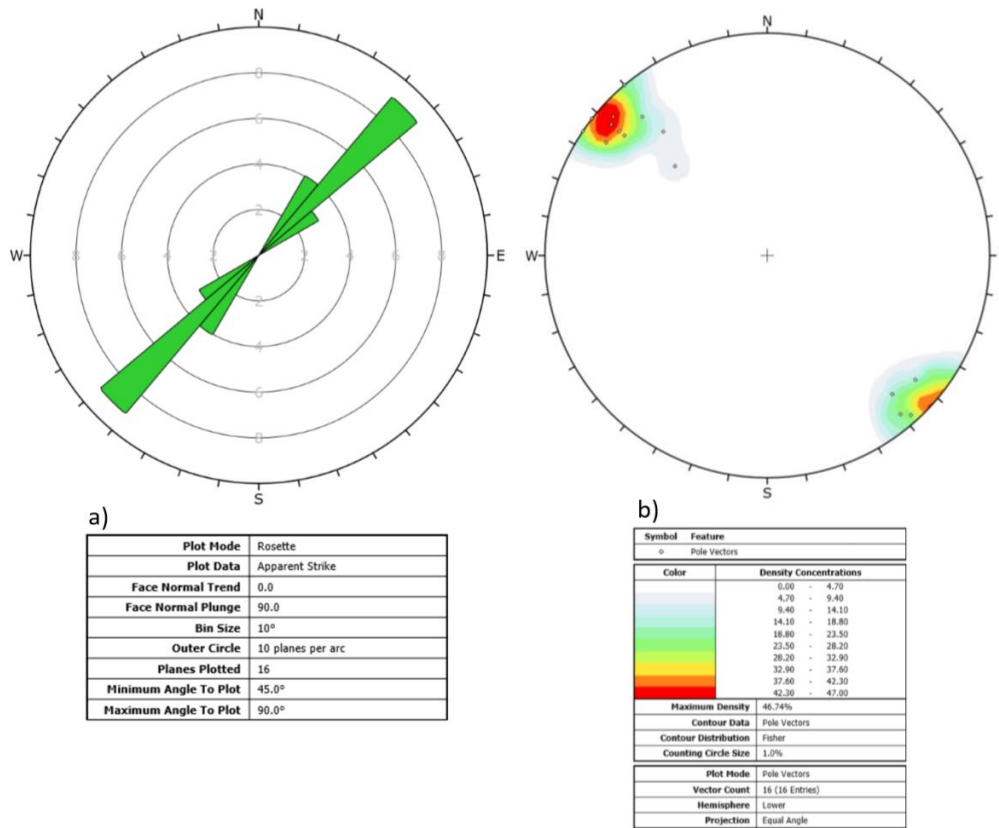


Figura 29 - Projeção da família de fraturas T. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.

A fraturação que constitui a família F à semelhança da família T é também posterior à formação dos calcários constituintes do maciço rochoso. Setores existentes na frente de estudo têm também a direção da família F (setores 1, 6 e caixa de falha presente no setor 9), sugerindo também que esta rege o desmonte do maciço rochoso. As descontinuidades da família F são mais frequentes na frente de estudo, foram caracterizadas 109 descontinuidades. As características das fraturas desta família foram analisadas em cada setor, uma vez que apresentam variação de setor para setor. A direção das descontinuidades varia desde N40°W até N88°W. O pendor da família F está compreendido entre 74°NE ou SE e subvertical. Na Figura 30 encontra-se o diagrama de roseta e também as projeções estereográficas dos polos dos planos das descontinuidades da família F.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE UM MACIÇO DE ROCHAS CARBONATADAS COM APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FOTOGRAMETRIA

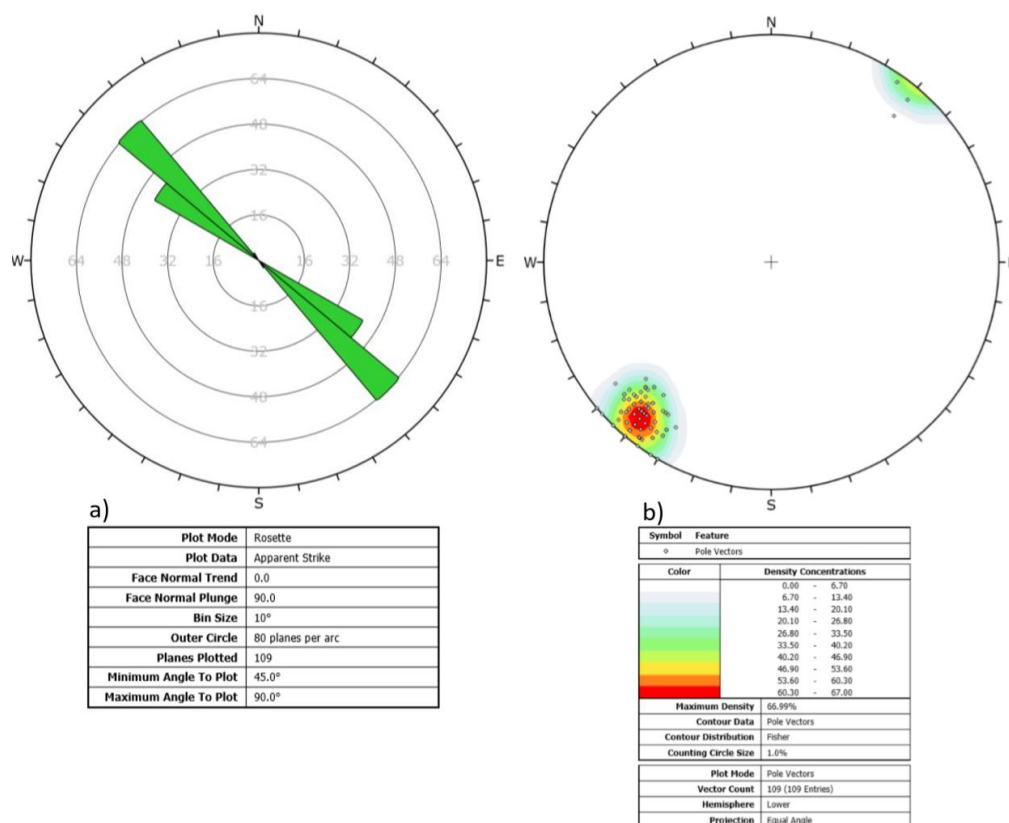


Figura 30 - Projeção da família de fraturas F. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.

O diagrama de roseta e a projeção estereográfica de todas as descontinuidades registadas na frente de estudo está representado na Figura 31. A família L é relativa à estratificação do maciço rochosos carbonatado e é a menos presente, no entanto as camadas têm uma persistência considerável e são visíveis na totalidade da frente. O piso base da área da pedreira corresponde ao topo de uma camada com a mesma direção e pendor das descontinuidades da família L. A família T é a mais difícil de visualizar e de caracterizar na frente de estudo, intersetando muitas vezes as superfícies das descontinuidades da Família F. Esta é a mais frequente em toda a extensão da frente de estudo e que possui a maior variação das características das fraturas nos vários setores.

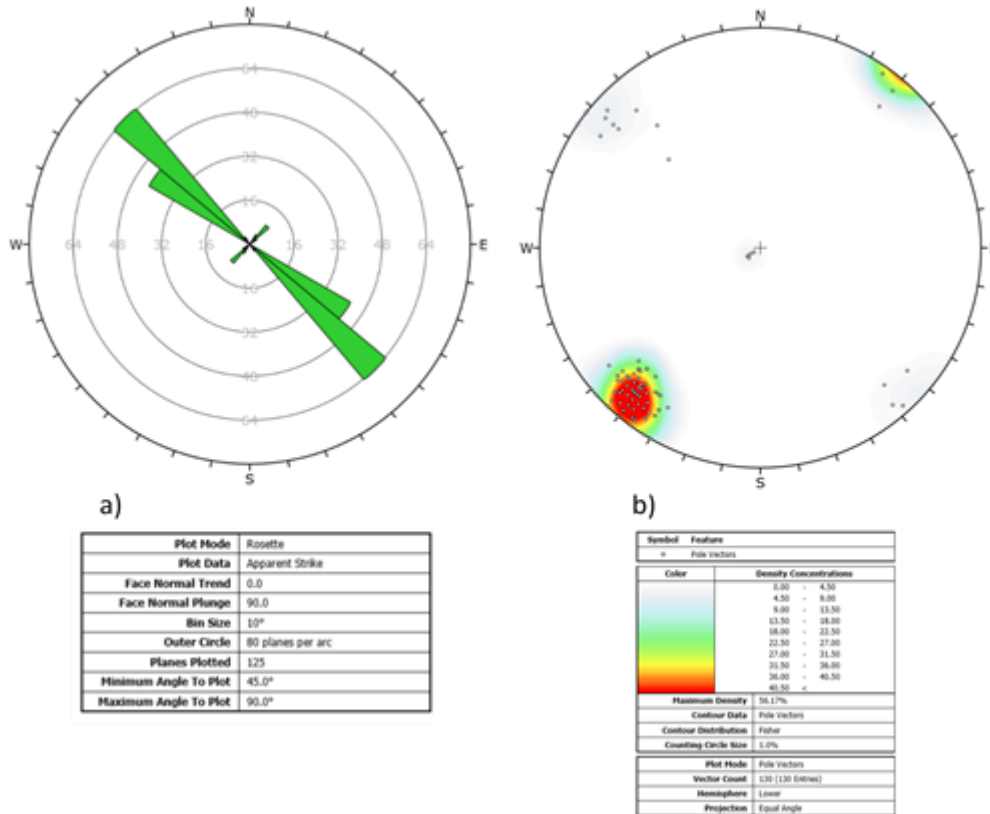


Figura 31 - Projeção de todas as fraturas ocorrentes na frente de estudo. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.

4.3.8 Índice RMR

O índice RMR é calculado com base em todos os resultados dos vários parâmetros considerados. Para isto é determinado o índice RMR para cada setor e para a totalidade da frente de estudo. No Quadro 16 estão os resultados do índice de RMR para cada setor. Neste quadro encontram-se também os dados para cada parâmetro medido, resultados esses em que os valores correspondem a valores ponderados ou pesos

Quadro 16 - Valores de índice RMR e respetiva classificação para os diferentes setores e frente de estudo.

Setor	Parâmetro / Peso									Classificação		
	RCU	RQD	Espaçamento	Comprimento	Separação	Rugosidade	Enchimento	Alteração	Percolação	Índice RMR	Classe	Descrição (Maciço Rochoso)
1	7	17	10	5	0	4	3	3	8	58	III	Razoável
2	4	13	10	6	2	4	3	4	10	56	III	Razoável
3	4	13	10	7	2	4	4	4	9	57	III	Razoável
4	4	8	10	6	3	3	4	3	10	51	III	Razoável
5	4	17	10	6	2	4	4	4	10	61	II	Bom
5.1	4	13	10	6	2	4	3	3	9	56	III	Razoável
6	7	8	8	5	3	4	4	3	10	51	III	Razoável
7	4	13	10	6	2	4	3	4	10	56	III	Razoável
8	4	13	10	6	2	4	3	4	10	56	III	Razoável
10	4	13	10	6	2	4	3	4	10	57	III	Razoável
11	4	17	10	6	2	3	3	4	9	59	III	Razoável
Maciço	7	13	10	2	3	4	3	4	8	54	III	Razoável

Os resultados do índice RMR para todos os setores é bastante homogêneo, sendo que a maioria dos setores, incluindo também o geral do maciço, são classificados como maciços rochosos razoáveis. Como maciço rochoso bom está apenas classificado o setor 5. No entanto, o seu índice de RMR é o valor mais baixo do intervalo que o permite classificar como maciço rochoso de boa qualidade, como visível no Quadro 4 onde estão representados estes intervalos. É de salientar que os resultados de RMR apresentados no Quadro 16 foram calculados com base nos valores de RQD obtidos segundo Palmstrom (1982). No caso de corrigir o índice RMR com base nos valores de RQD calculados segundo Priest & Hudson (1979), apenas os setores 1, 5 e 11 são afetados, perdendo 4 valores de RMR. Estas alterações ocorrem devido às determinações do RQD, segundo Palmstrom (1982), nos setores 1, 5 e 11 serem enquadradas no intervalo entre 75% e 90% (maciço de boa qualidade), enquanto segundo Priest & Hudson (1979) passarem a pertencer ao intervalo entre 50% e 75% (maciços de qualidade razoável).

Segundo Bieniawski (1989) através do índice RMR calculado é também possível obter valores de coesão da massa rochosa (kPa) e ângulos de atrito da massa rochosa. No entanto, através deste método não é possível chegar a um valor específico, mas um intervalo correspondente ao valor de RMR calculado. Estes intervalos de valores de coesão da massa rochosa (kPa) e ângulos de atrito em relação com o valor de RMR estão representados no Quadro 4. Desse modo, os setores classificados com classe RMR III tem um valor entre 200 e 300 (kPa) de coesão da massa rochosa e um ângulo de atrito entre 25° e 35°. O setor 5 classificado pela classe II, segundo Bieniawski (1989) tem uma coesão da massa rochosa entre 300 e 400 (kPa) e um ângulo de atrito entre 35° e 45°.

4.4 – Utilização da Fotogrametria

No presente trabalho, o processo correspondente à fotogrametria insere toda a metodologia desde a aquisição dos dados (fotografias e levantamento dos pontos de controle), até aos resultados finais estabelecidos com base nos modelos 2D e 3D criados.

Para criação destes modelos utilizaram-se 320 fotografias obtidas com a máquina fotográfica digital mencionada no subcapítulo 3.3.1. O levantamento aerofotográfico da pedreira foi realizado com o recurso a um VANT descrito no subcapítulo 3.3.2 e foram adquiridas 445 fotografias aéreas, sendo que apenas 294 foram utilizadas.

4.4.1 – Processamento dos dados

De modo a criar os modelos 2D e 3D foi utilizado o programa *informático Agisoft PhotoScan* Profissional através metodologia e fluxo de trabalho descritos no Capítulo 3. Após o alinhamento das fotografias o programa fornece os primeiros dados relacionados com a captação das fotografias. Na Figura 32 está representada a localização da câmara, para o levantamento realizado com o VANT, no momento de captação da fotografia assim como a quantidade de sobreposições.

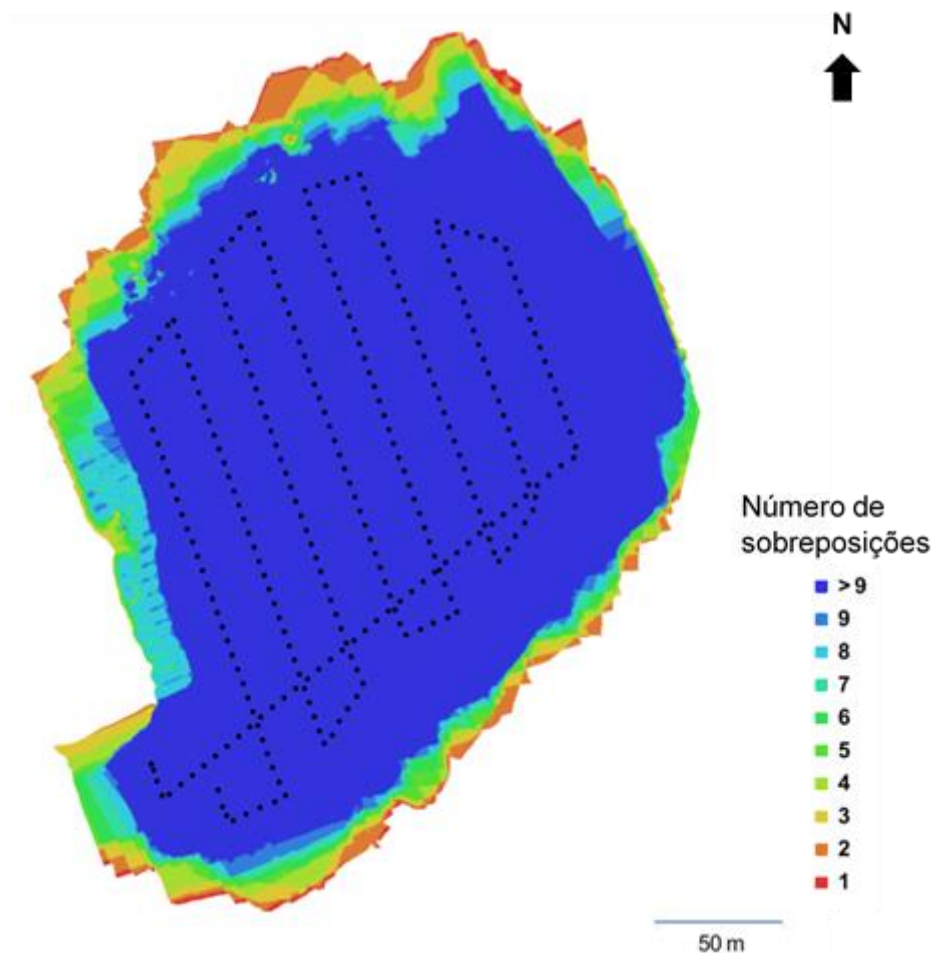


Figura 32 - Localização das câmaras e sobreposição de imagens.

Da Figura 32 é possível observar que na maior parte da área da pedreira onde foi realizado o levantamento aerofotogramétrico, existe uma sobreposição superior a 9 fotografias, o que revela uma sobreposição superior a 80% longitudinalmente e 60% lateralmente. As 294 fotografias utilizadas foram captadas a uma altitude de voo média de 72 m, o que resultou numa resolução espacial, ou *Ground Sample Distance* (GSD) de 1,81 cm/pixel. A área coberta pelo levantamento foi de 62400 m² e resultou num erro de reprojeção de 1,35 pixéis.

A GSD conseguida através do levantamento fotográfico é muito reduzida em comparação com a resolução oferecida pelas imagens de satélite do *Google Earth Pro*, que para a área de estudo é cerca de 31 cm/pix.

A construção da nuvem de pontos densa é o processo mais demorado de todo o fluxo de trabalho, totalizando um total de 16 horas e 30 minutos de computação para uma qualidade média. Este processo resultou numa nuvem densa com 18 209 076 pontos. A nuvem de pontos densa é a base para o trabalho de aquisição da fracturação através do programa informático *CloudCompare*.

Para a construção dos modelos 2D e 3D relacionados apenas com frente de estudo foram utilizadas 137 fotografias das cerca de 320 captadas. O número de fotografias adquiridas é muito superior ao das utilizadas, isto porque foram efetuados diversos levantamentos para, posteriormente, se escolherem as de melhor qualidade e as que foram obtidas em melhores condições atmosféricas. A nuvem de pontos densa construída para a frente de estudo requereu 8 horas e 34 minutos de computação para uma qualidade média, o que gerou uma nuvem densa constituída por 6 262 894 de pontos.

Uma vez que para a modelação da frente de estudo não se realizou o levantamento de pontos de controlo, esta não ficou georreferenciada, logo os valores apresentados no relatório gerado pelo programa informático *Agisoft PhotoScan* para resolução e área de cobertura não são válidos.

4.4.2 – Levantamento dos pontos de controlo

Como já referido, de modo a georreferenciar todos os dados e modelos é necessário criar pontos de controlo, os denominados *Ground Control Points* (GCPs). Seguindo a metodologia apresentada no capítulo 3.3.3, foram marcadas 21 no piso base e no todo das bancadas da pedreira. Estes pontos de controlo foram localizadas em sítios estratégicos de modo a corresponderem a uma distribuição aproximadamente uniforme dentro da área abrangida pelo levantamento fotográfico aéreo (Figura 33). Estes pontos de controlo foram posteriormente georreferenciadas com o recurso a um recetor GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que forneceu os dados no sistema de referência PT-TM06/ETRS89, com um erro médio horizontal e vertical, respetivamente, de 2,6 cm e 2,7 cm.



Figura 33 - Localização dos pontos de controlo na área da pedreira.

Os dados de referência dos pontos de controlo são depois inseridos no *Agisoft PhotoScan* de modo a efetuar-se a georreferenciação de todos os modelos. Este processo tem também erros associados, na maioria correspondentes à projeção. Para este processo existem erros horizontais e verticais, erro total e erro total em pixéis. Estes dados podem ser observados no Quadro 17.

Os erros obtidos, tanto para os eixos horizontais como para o eixo vertical são na ordem de 2 cm, o que corresponde a valores de erro bastante reduzidos. No trabalho realizado por Salvani *et al.* (2017), os autores realizaram o levantamento topográfico com o recurso a uma estação total Leica™ TCRP 1203 + R1000 e dois recetores de GPS também da marca Leica™. Neste trabalho, os autores consideraram 54 pontos de controlo e o erro obtido nos referidos pontos foi de 0,029 m.

Quadro 17 - Erros de georreferenciação associados ao processo de projeção.

	Horizontal (XY) (m)	Vertical (Z) (m)	XYZ (m)	Erro total (pix)
Total	0,016	0,015	0,022	0,281

De modo a obter uma representação da fracturação válida a partir da nuvem de pontos densa da frente de estudo foi necessário referenciar esta nuvem de pontos com a do levantamento georreferenciado da pedreira. Com esta finalidade foram carregadas ambas as nuvens de pontos densas no programa informático *freeware CloudCompare* e posteriormente sobrepostas (Figura 34). Deste modo, a nuvem de pontos da frente de estudo fica também georreferenciada, evidenciando, contudo, erros muito superiores à georreferenciação da nuvem de pontos da pedreira.



Figura 34 - Sobreposição de ambas as nuvens de pontos densas. No centro com a cor mais escura e melhor definição encontra-se a nuvem de pontos densa correspondente à frente de estudo. Na envolvente encontra-se parte da nuvem de pontos densa da pedreira.

4.4.3 – Ortofotomapa e Modelo Digital de Elevação

Um dos objetivos da modelação dos dados fotográficos passa pela criação de um ortofotomapa e de um modelo digital de elevação. Na Figura 35 está representado o ortofotomapa georreferenciado obtido através do levantamento fotográfico da pedreira com recurso ao VANT.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE UM MACIÇO DE ROCHAS CARBONATADAS COM APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FOTOGRAMETRIA

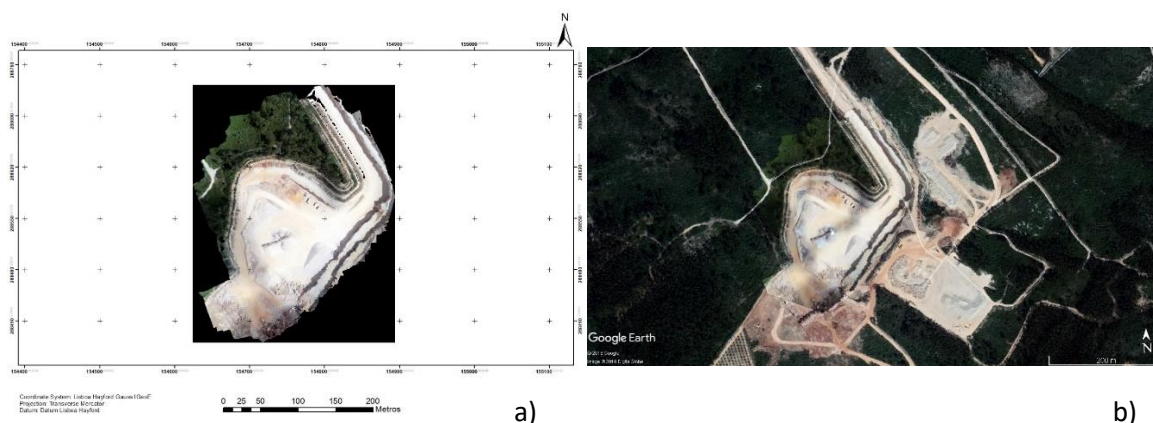


Figura 35 – a) Representação do ortofotomapa georreferenciado pertencente à pedreira. b) Sobreposição do ortofotomapa gerado nas imagens de satélite fornecido pelo *Google Earth* (2018).

O programa informático *Agisoft PhotoScan* permite exportar o ortofotomapa em vários formatos de ficheiro. É possível então exportar em ficheiro do tipo *Keyhole Markup language Zipped* (KMZ). Este tipo de ficheiro pode ser utilizado no programa informático *Google Earth Pro*, o que resulta numa sobreposição do ortofotomapa com as imagens de satélite fornecidas pelo programa informático *Google Earth Pro* (Figura 35).

As imagens de satélite mais recentes fornecidas no *Google Earth Pro*, para a zona de estudo, foram captadas em 18/08/2018 pelo satélite *WorldView – 3*. Este satélite pertence à empresa *DigitalGlobe* e o sensor nele instalado tem uma *Ground Sample Distance* (GSD) de 0,31 m (DigitalGlobe 2018). Quando ao ortofotomapa gerado, este tem uma GSD de 1,81 m, o que resulta numa imagem nítida onde é possível distinguir vários elementos naturais e humanos.

O Modelo Digital de Elevação contruído corresponde ao Modelo Digital de Superfície (MDS) uma vez que nele estão presentes elementos para além do terreno, neste caso a maquinaria, veículos, anexos de pedreira e elementos naturais como a vegetação. Na Figura 36 está representado o MDS gerado pelo levantamento aerofotográfico da pedreira.

De modo a visualizar de forma mais simples os dados de altimetria presentes no MDS, é possível utilizar os dados na elaboração numa planta topográfica onde são representadas as curvas de nível do terreno representado pelo MDS. A planta topográfica criada com base no MDS esta representada na Figura 37

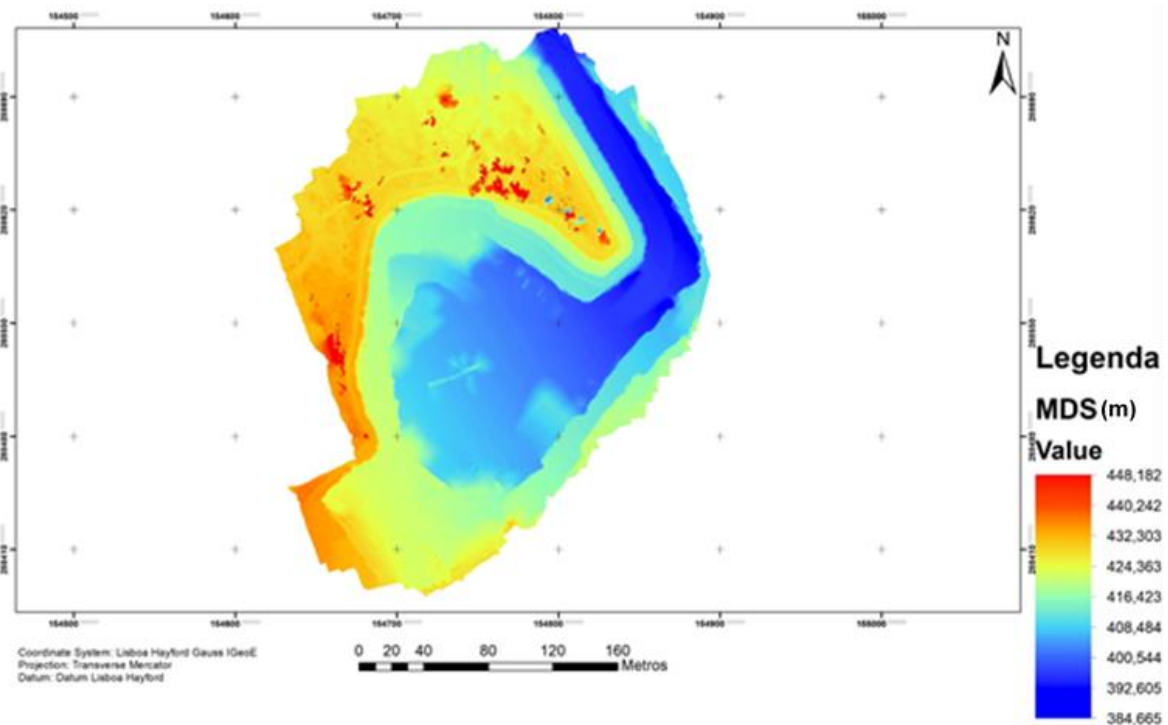


Figura 36 - Modelo digital de superfície construído da Pedreira “Cabeço da Moita Negra”.

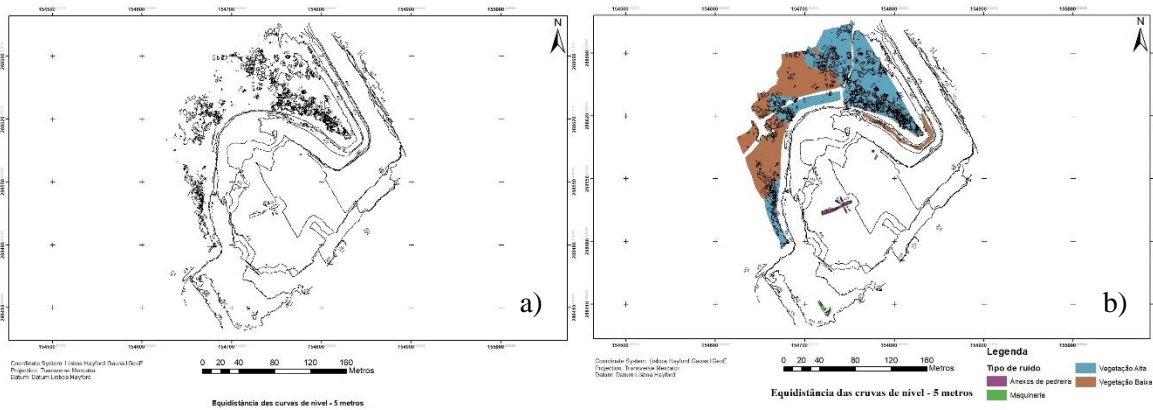


Figura 37 - a) Representação de planta topográfica gerada através do Modelo Digital de Superfície. b) Planta topográfica com os diversos elementos causadores de ruído identificados.

Uma vez que a planta topográfica foi gerada com recurso a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), e com base no MDS da Figura 36, deve ter-se em atenção que determinados elementos como a vegetação, a maquinaria e os anexos de pedreira podem gerar cotas falsas (Figura 37), sendo designados estes elementos como ruído. Numa primeira fase, o designado ruído pode ser retirado com recurso ao programa informático *Agisoft PhotoScan*, onde se classificam todos os pontos na nuvem de pontos densa que não correspondem à superfície do terreno, e posteriormente com recurso a um programa informático de SIG. Ao eliminar estes elementos é possível criar um Modelo

Digital de Terreno (MDT), modelo este onde só é representada a superfície do terreno. O processo de retirada destes elementos é efetuado manualmente, o que gera um erro intrínseco relacionado com a seleção dos pontos que pode ser realizada por excesso ou defeito em relação ao elemento a retirar. Na Figura 38 está representada a planta topográfica construída com base no MDT, neste modelo não figuram os elementos marcados na Figura 37, só deste modo é possível criar o MDT.

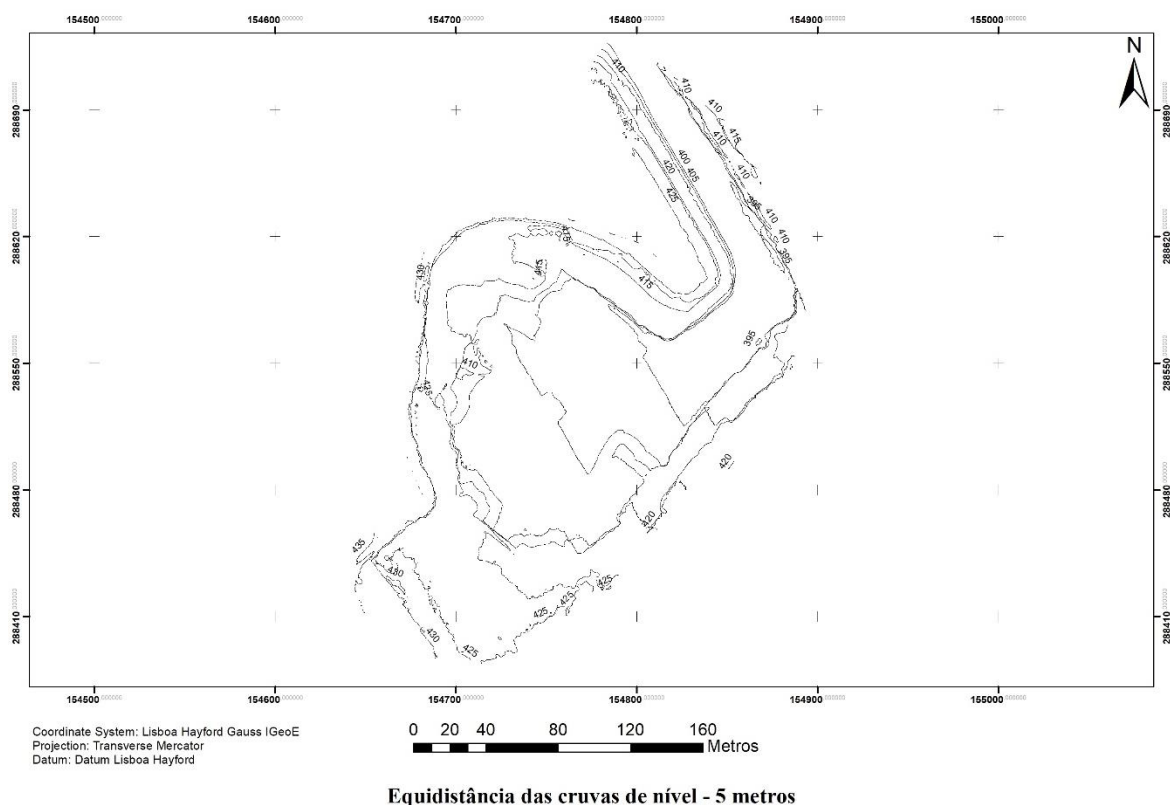


Figura 38 - Representação da planta topográfica contruída com base no Modelo Digital de Terreno.

Ao comparar a área da pedreira representada na Folha nº319 da Carta Militar de Portugal (SCE, 1968) (Figura 2) com planta topográfica construída para a mesma área, é possível constatar que as linhas com cotas superiores para os limites da pedreira na sua zona central e SW são respetivamente de 430 m e 435 m, o que se assemelha aos dados obtidos e representados.

4.4.4 – Dados de Fraturação

Como referido anteriormente na metodologia (Capítulo 3), existem duas formas distintas de obtenção das atitudes dos planos de fraturação com o recurso ao programa informático *freeware CloudCompare*, sendo estes o método manual e o automático. O método manual consiste na marcação, no mínimo, de três pontos pertencentes ao mesmo plano de descontinuidade. De seguida é criado um plano que melhor se ajusta aos pontos marcados. Este plano vai possuir as características de pendor e direção de pendor (*dip* e *dip Direction*) da descontinuidade que foi considerada a partir dos pontos. Este processo é realizado para todas as descontinuidades perceptíveis ao utilizador. O método automático baseia-se num algoritmo denominado de FACETS, criado por Dewez *et al.*, (2016), que deteta faces de descontinuidade automaticamente.

Para a comparação das diferentes metodologias foram apenas considerados os dados correspondentes às fraturas da família F localizada no setor 3 da frente de estudo. Este setor tem cerca de 3,5 m de comprimento por 11 m de altura e encontra-se bastante afetado pela fraturação da família F, que intersecta a frente em quase toda a sua altura, uma vez que a fraturas da Família F apresenta, de modo geral, um pendor sub-vertical.

No levantamento de campo realizado com auxílio da bussola de geólogo foram caracterizadas 9 descontinuidades, cuja representação em diagrama de roseta e concentração de polos utilizando a projeção estereográfica se pode observar na Figura 39.

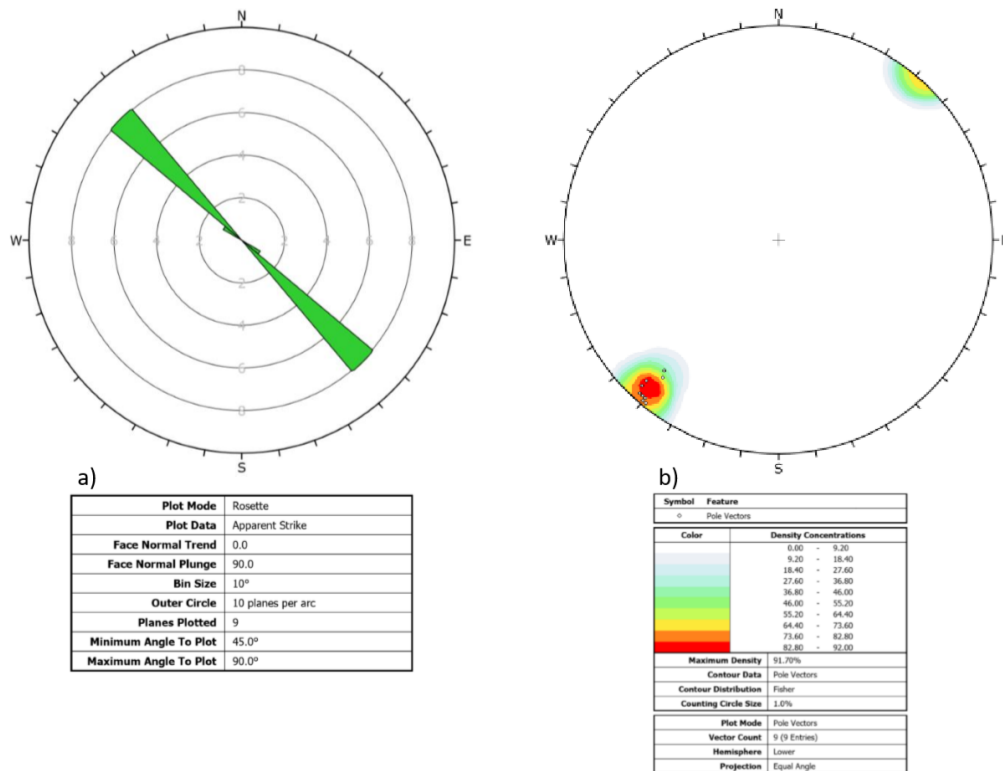


Figura 39 - Projeção da família de fraturas F caracterizadas *in situ* no setor 3. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.

O conjunto de planos de fratura medidos *in situ* tem as suas direções compreendidas entre N47°W e N51°W e os seus pendores entre 78° e 89° para NE, sendo que o plano médio para este conjunto de dados tem as coordenadas geológicas de N49°W; 86°NE.

O método *in situ* revela um menor número de dados relativos à fraturação, uma vez que as medições apresentam restrições nas zonas de cota mais elevadas do setor.

O método manual, com base na nuvem de pontos densa criada através das técnicas de modelação, revelou 20 planos de fraturação, os quais se podem visualizar na Figura 40. Os dados de fraturação recolhidos variam para a direção entre N50°W e N35°W e entre 79° e 87° para NE em relação ao seu pendor. O plano médio resultante deste conjunto de dados tem coordenadas geológicas de N42°W; 83°NE. Na Figura 41 estão representados os diagramas de roseta e de isodensidades da concentração dos polos para o conjunto de dados recolhidos manualmente da nuvem de pontos densa.

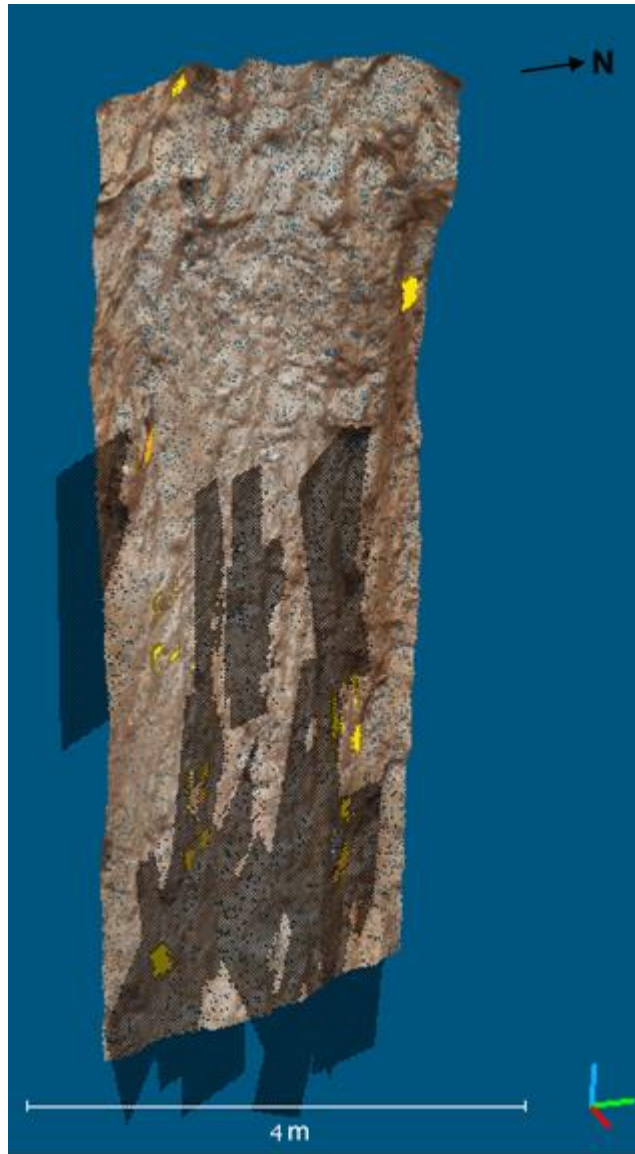


Figura 40 - Representação gráfica dos planos de fraturação retirados manualmente (sombreado) e através do FACETS (amarelo).

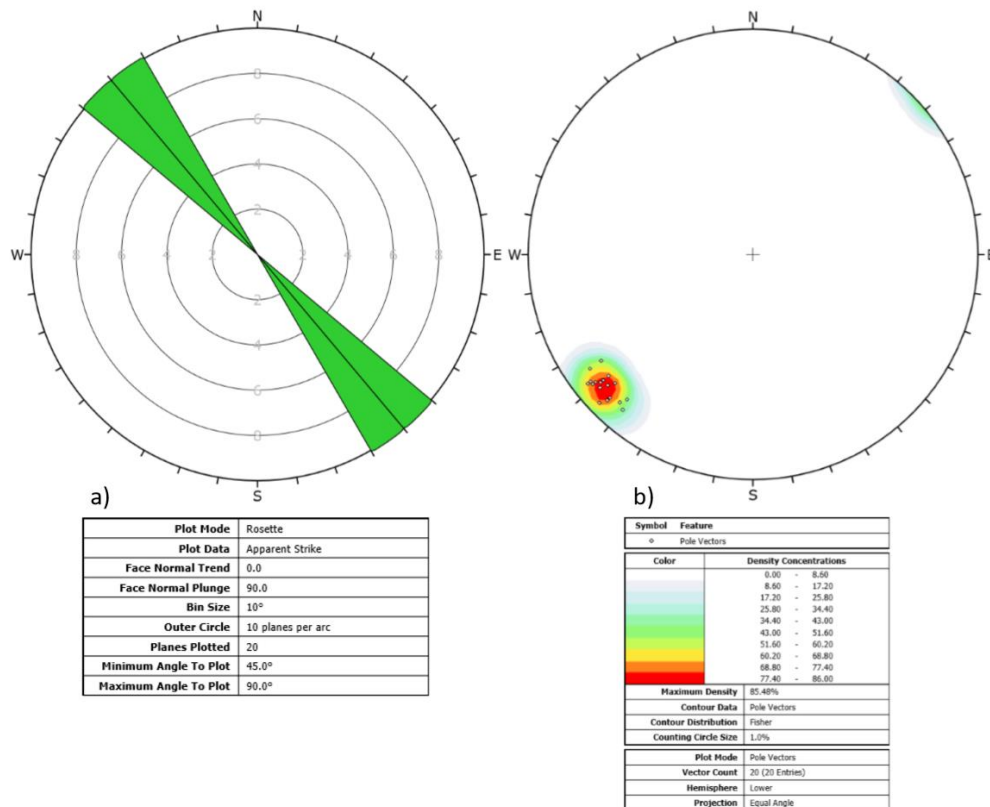


Figura 41 - Projeção estereográfica da família de fraturas F medidas manualmente na nuvem de pontos densa no setor 3. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.

O levantamento automático através do *plug-in* FACETS é realizado com base na nuvem de pontos densa. Este método revela todos os planos existentes no setor, que posteriormente têm de ser filtrados de modo a revelar apenas os dados correspondentes à família F. Neste caso filtraram-se os dados com uma direção de pendor (*Dip Direction*) entre 40° e 55°, e pendor (*Dip*) entre 79° e 89°. A filtragem destes dados resultou num conjunto de 12 planos de fraturação (Figura 42) com as direções de N50°W a N36°W e pendores entre 80° e 87° para NE. O seu plano médio tem uma direção e pendor correspondente de N49°W; 84°NE. Na Figura 42 observa-se a representação dos diagramas de rosetas e de isodensidades da concentração dos polos para este conjunto de dados.

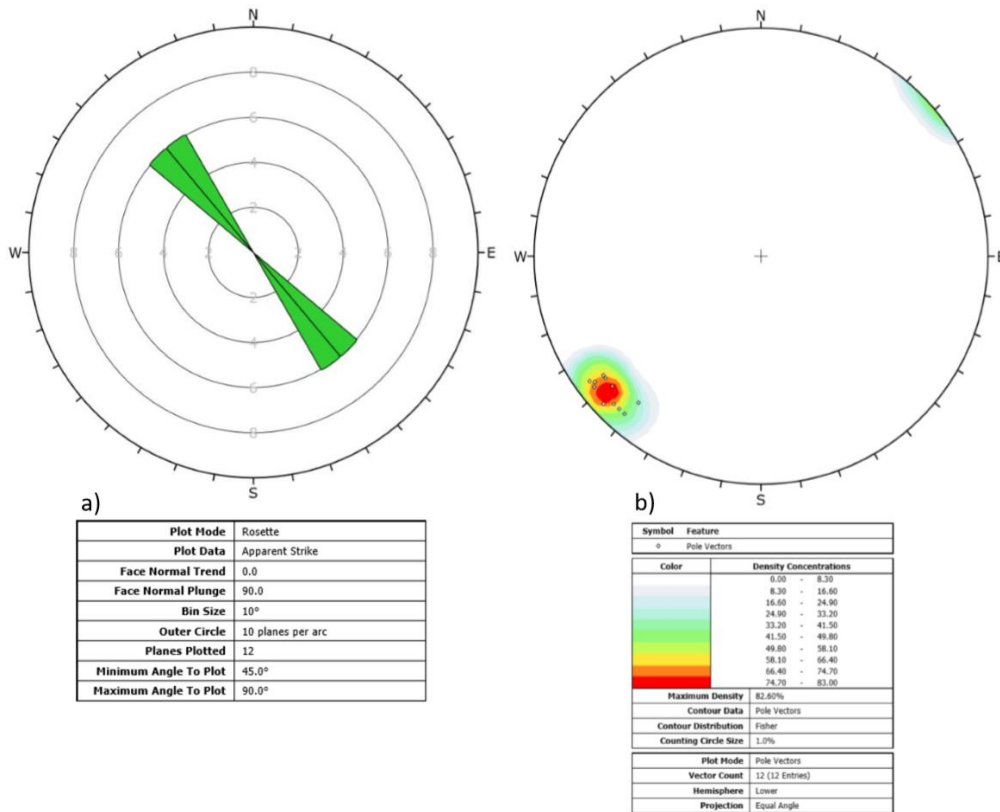


Figura 42 - Projeção estereográfica da família de fraturas F medidas automaticamente na nuvem de pontos densa no setor 3. a) Diagrama de roseta correspondente aos planos medidos. b) Diagrama de isodensidades da concentração dos polos dos planos de descontinuidade.

Destas 3 metodologias utilizadas para levantamento da caracterização da orientação da fraturação no setor 3, a que identificou um maior número de descontinuidades foi a manual com recurso ao programa informático *freeware CloudCompare*. A metodologia que apresentou menores valores de desvio padrão relativos a dados de direção foi o levantamento *in situ* com recurso a uma bussola de geólogo, contudo foi a que possibilitou um menor número de dados, o que poderá estar relacionado com a dificuldade em caracterizar a fraturação nas cotas mais elevadas do setor 3.

Nos Quadros 18 e 19 estão representados os dados obtidos através das diferentes metodologias assim como alguma estatística com estas relacionadas.

Quadro 18 - Dados obtidos através das diferentes metodologias.

Nº de Fraturas	<i>In situ</i>		CC Manual		CC FACETS	
	Dip	Dip Dir.	Dip	Dip Dir.	Dip	Dip Dir.
1	84	43	79	55	86	54
2	89	39	81	41	85	53
3	78	41	84	45	86	52
4	88	42	82	48	85	41
5	88	41	80	47	82	53
6	89	40	87	46	82	52
7	80	40	85	45	85	45
8	86	43	85	51	80	40
9	88	40	83	42	85	43
10	Sem Dados		83	55	87	47
11			86	52	82	53
12			84	51	82	49
13			84	40	Sem Dados	
14			84	49		
15			83	42		
16			80	50		
17			83	50		
18			82	50		
19			82	50		
20	85	52				

Quadro 19 - Resultados das coordenadas geológicas da fraturação obtidas através das várias metodologias.

Parâmetros	In Situ		CC Manual		CC FACETS	
	Dip	Dip Dir.	Dip	Dip Dir.	Dip	Dip Dir.
Máximo	89	43	87	55	87	54
Mínimo	78	39	79	40	80	40
Média	86	41	83	48	84	49
Desv.Pad.	3,8	1,3	2,0	4,3	2,1	4,9
CV	4,48	3,25	2,43	8,99	2,50	10,12
n	9		20		12	

Ao analisar as fraturas detetadas pelo FACETS (Figura 40) verifica-se que estas não são muito significativas no setor 3, uma vez que se apresentam num número relativamente reduzido. O *plug-in* FACETS deteta faces de descontinuidade, contudo tem dificuldades a detetar faces de pequenas dimensões ou apenas planos de fraturas sem faces expostas.

O levantamento manual da fraturação a partir da nuvem de pontos densa foi o método que detetou um número mais elevado de fraturas. Para realização deste método é necessário que a nuvem de pontos densa que foi gerada tenha uma boa resolução, de modo a visualizarem-se as fraturas. Este método revelou os valores mais elevados de desvio padrão em termos de direção de pendor, em relação ao método *in situ*, no entanto originou valores muito próximos dos obtidos através do método automático. No caso do desvio padrão. O método manual com base na nuvem de pontos apresentou os menores valores de desvio padrão para as determinações do pendor.

Através do Quadro 19 é possível verificar que os valores médios de direção de pendor mais próximos correspondem aos conjuntos de dados obtidos através da fotogrametria, variando estes entre 7º e 8º relativamente ao valor médio de direção de pendor obtido *in situ*. Esta diferença pode estar relacionada com a caracterização de fraturas em cotas mais elevadas no setor 3 e também com o maior número de dados obtidos através dos métodos da fotogrametria.

4.4.5 – Cálculo do RQD

O cálculo do RQD foi baseado a partir de medições do espaçamento das descontinuidades realizadas *in situ*, resultados esses que podem ser observados no Quadro 15. De modo a avaliar as capacidades da fotogrametria na possível determinação do RQD, realizou-se um levantamento do espaçamento da fraturação do setor 3, da frente de estudo, recorrendo ao programa informático *CloudCompare* e tendo em consideração a designada nuvem de pontos densa. Os resultados obtidos usando as diferentes metodologias podem ser observados no Quadro 20.

Quadro 20 - Espaçamento médio da fraturação por família e respetivo cálculo do RQD para o setor 3, através dos métodos *in situ* e da fotogrametria.

Método	Espaçamento médio (m)			Jv	RQD (%)	
	F	T	L		Palmstrom	Priest & Hudson
Manual	0,11	0,33	0,78	13,52	70,39	60,86
Fotogrametria	0,14	0,29	1,52	11,41	77,34	68,40

Através dos resultados obtidos é possível observar que o valor de RQD obtido através dos dados fotogramétricos tem um valor de 7% a 8%, mais elevado do que o calculado através dos métodos de levantamento *in situ*. O aumento do RQD é explicado com o incremento do espaçamento médio das famílias de fraturação F e L, em particular para esta última.

Uma vez que o setor 3 se apresenta bastante compartimentado e com as fraturas da família F com um espaçamento médio muito reduzido, deve destacar-se que as medições realizadas no programa informático *CloudCompare* perdem exatidão, isto porque é necessário promover o incremento da aproximação de partes do setor 3, o que torna a nuvem de pontos densa num aglomerados de pontos onde se torna difícil a medição do espaçamento da fraturação. Deve salientar-se que os resultados obtidos para o espaçamento e RQD não têm uma grande discrepância, e os métodos fotogramétricos permitem analisar os vários setores em toda a sua altura, o que possibilita um maior número de dados. Verifica-se igualmente no presente estudo uma maior precisão na determinação da espessura da estratificação e na definição do espaçamento das fraturas da família L.

Relativamente à aquisição e marcação de fraturas, o cálculo do RQD com base nos dados fotogramétricos é realizado de forma mais simples e expedita uma vez que só é necessário medir o espaçamento entre descontinuidades, sem se verificar a necessidade de realizar a marcação e extração das atitudes das descontinuidades.

Capítulo 5 – Considerações finais

5.1 – Conclusões

No presente trabalho recorreu-se aos métodos manuais e fotogramétricos para efetuar a caracterização do maciço da pedreira “Cabeço da Moita Negra” e da fraturação nele presente. O maciço rochoso estudado enquadra-se na Formação da Serra de Aire (Azerêdo, 2007), também conhecida como Calcários micríticos de Serra de Aire (Manuppella et al., 2000) que como o nome indica são caracterizados por serem calcários com uma matriz de calcite de grão fino, o que condiciona os resultados dos ensaios de caracterização física como a massa volúmica e porosidade.

A classificação geomecânica RMR de Bieniawski (1989) foi usada no maciço rochoso estudado, para a sua aplicação realizaram-se ensaios *in situ* e em laboratório, assim como um levantamento de campo. A frente de estudo foi dividida em 12 setores distintos, tendo em atenção as variações de orientação e as características litológicas e estruturais do maciço rochoso carbonatado.

Procedeu-se à definição da resistência à compressão uniaxial (RCU), através da realização de ensaios de determinação de dureza através do martelo de Schmidt. Os valores de RCU variaram entre 30 MPa e 91 MPa, sendo que os valores superiores correspondem a setores onde se verificou a presença de filões espessos de calcite. Os menores valores de RCU correspondem a medições efetuadas perpendicularmente às superfícies da fraturas da família F, designadamente em setores muito fraturados e com um espaçamento de fraturação reduzido.

Em laboratório foram determinados os valores de massa volúmica aparente e porosidade aberta. Os valores de massa volúmica aparente encontram-se entre 2631 kg/m³ e 2696 kg/m³, valores estes que segundo a IAEG (1979) são elevados. Os valores de porosidade estão compreendidos entre 0,63 % e 3,21 %, sendo que os valores mais baixos (<1 %) correspondem às amostras do setor 1.

O levantamento dos planos de descontinuidades revelou três principais famílias de fraturas, são estas a família L que corresponde à estratificação, a família F que corresponde à fraturação que se apresenta sub-vertical e que interseta a totalidade da frente de estudo e por fim a família T que corresponde a uma família de fraturação de orientação perpendicular à fraturação da família F. A família L têm uma atitude média de N40°W; 7°NE, sendo que estes dados correspondem à atitude média das camadas. A família de descontinuidades F é a mais ocorrente na frente de estudo e tem uma orientação média

de N50°W; 83°NE. A família T é a mais difícil de visualizar e de caracterizar e tem uma atitude média de N39°E; 76°NE.

Os valores de RQD foram calculados a partir das expressões de Palmstrom (1982) e Priest & Hudson (1979), que têm em conta com o espaçamento das fraturas presentes no maciço rochoso. O RQD foi calculado para cada um dos diferentes setores. Os valores de RQD obtidos variaram entre 36% (setor 6) e 82 % (setor 5). Através dos valores de RQD obtidos é possível classificar, segundo Deere (1967), a qualidade do maciço que neste caso se revelou entre o fraco e o bom.

Os valores de índice RMR obtidos para os vários setores analisados permitiram classificar o maciço rochoso como de qualidade razoável, com exceção do setor 5 que tem um valor de índice RMR de 61 correspondendo, nesse caso, a boa qualidade.

Os métodos fotogramétricos aplicados para a realização desta dissertação foram utilizados com o objetivo de perceber se era possível caracterizar a fraturação e utilizar os dados obtidos numa classificação geomecânica. Tentou extrair-se o máximo de dados possíveis através dos métodos fotogramétricos, pelo que através das fotografias e da sua georreferenciação foi possível criar ortofotomapas, modelos digitais de superfície e de terreno, assim como plantas topográficas. Os ortofotomapas e MDT obtidos têm um GDS, respetivamente, de 1,81 cm e 7,26 cm. Todos estes modelos foram contruídos com base no levantamento fotográfico realizado com um VANT e georreferenciados através de um recetor GNSS. Todo o processo de levantamento aerofotográfico com o VANT e dos pontos de controlo foi realizado em apenas uma manhã.

O levantamento das atitudes das discontinuidades mostrou-se passível de ser realizado através da nuvem densa de pontos através dos métodos manuais e automáticos com recurso ao plug-in FACETS. Foram comparados os resultados da família de fraturação F do setor 3 obtidos pelo levantamento *in situ*, manualmente a partir da nuvem de pontos densa e automaticamente. O método que revelou mais dados foi o manual a partir dos dados fotogramétricos, este aumento do número de dados pode ser explicado porque através da fotogrametria é possível medir planos de descontinuidade em toda a altura da frente de estudo, enquanto no levantamento manual *in situ* existe uma limitação em altura. Os dados que estatisticamente se mais se aproximaram do levantamento manual *in situ* foram os dados obtidos através do plug-in FACETS.

Com base na nuvem de pontos densa gerada é possível realizar vários tipos de medições, assim sendo foi possível determinar o espaçamento entre as fraturas da mesma família existente no setor 3, o que possibilita o cálculo do RQD. Os valores de RQD calculados através dos dados obtidos *in situ* e através da fotogrametria para o setor 3 foram, respetivamente, 70% e 77% de acordo com as determinações de Palmstrom (1982) e de 61% e 68% tendo em atenção a metodologia proposta por Priest & Hudson (1979).

Dos dados obtidos para o levantamento da orientação das descontinuidades para o setor 3, a metodologia que revelou um menor valor de coeficiente de variação (CV) foi o método manual *in situ* com recurso à bússola de geólogo. Em valores médios, a diferença entre os diferentes métodos é, no máximo, 8° para direção do pendor e 3° para o pendor.

A fotogrametria provou-se vantajosa de várias formas em relação aos levantamentos manuais *in situ*. No caso do tempo de execução, como referido o levantamento fotográfico e dos pontos de controlo demorou cerca de uma manhã, o restante do trabalho de fotogrametria pode ser feito no escritório de forma relativamente rápida. O levantamento das características das descontinuidades e do maciço rochoso demorou comparativamente mais tempo, cerca de 20 horas de trabalho para uma frente com cerca de 48 m.

A acessibilidade é também uma vantagem no levantamento fotográfico com o VANT, isto porque é possível obter dados remotamente em sítios onde é difícil aceder fisicamente.

Outra grande vantagem está relacionada com a segurança do geólogo. A área de estudo correspondia a uma frente bastante fraturada com cerca de 11 metros de altura dentro de uma pedreira ativa. A instabilidade potencial desta frente acarreta problemas de segurança durante os levantamentos *in situ*. O levantamento realizado com o VANT diminui esse risco uma vez que não é necessário a permanência junto da frente de estudo.

Por último existe a quantidade de dados obtidos que se revelou maior através dos métodos fotogramétricos, contudo existem várias características que dificilmente podem ser observadas e medidas através da fotogrametria, por isso é sempre necessário que o geólogo se desloque ao campo para verificar todas as outras características. Existiram, no entanto, algumas dificuldades na extração dos planos de descontinuidade com base na nuvem de pontos densa. Estas dificuldades estão maioritariamente relacionadas com a aquisição dos dados, o que engloba as especificações limitadas da máquina fotográfica, as condições atmosféricas e a falta de experiência do utilizador, seja na escolha de imagens ou na criação de modelos.

A utilização de outros programas informáticos de licença paga pode resultar também em dados mais fiáveis. É exemplo destes, o programa informático Sirovion que nasceu de uma colaboração entre a empresa *Datamine* e a *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO). Um computador com melhores especificações a nível gráfico e de processamento, poderia também devolver modelos com maior definição, necessitando de menos tempo de computação.

5.2 – Trabalhos futuros

Os trabalhos relacionados com o uso da fotogrametria com finalidades geológicas, nomeadamente a obtenção de dados de fraturação começaram no início do século XXI, são exemplos os trabalhos de Roncella *et al.*, (2004) e Coggan *et al.*, (2007), contudo estes autores não utilizavam ainda os levantamentos fotográficos com os VANT's. Os VANT's são aparelhos extremamente versáteis e capazes de transportar aparelhos com massas superiores às dos próprios VANT's. Por esta mesma razão, na última década estes aparelhos têm sido usados para as mais diversas áreas, como por exemplo, na análise de risco e vulnerabilidade relativamente às inundações em áreas urbanas (Buffon *et al.*, 2018), na geofísica aplicada (Coelho & Prieto, 2018), na caracterização de discontinuidades (Dewez *et al.*, 2016) (Francioni *et al.*, 2015) (Salvani *et al.*, 2017) (Tung *et al.*, 2018), na arqueologia (Fernández *et al.*, 2016) e na topografia (Rusli, 2017).

Na área da geologia existem aperfeiçoamentos e estudos a realizar baseados no uso da fotogrametria com recurso aos VANT's, apresentando-se seguidamente alguns temas para um futuro desenvolvimento:

- Desenvolver uma metodologia de aquisição de imagem;
- Proceder ao cálculo de erro entre valores de atitudes medidos *in situ* e valores retirados da nuvem de pontos densa;
- Utilização da tecnologia dos VANT's e da fotogrametria para definição de pegadas de fogo;
- Utilização dos métodos fotogramétricos para cálculo de volumes de exploração, e granulometrias obtidas a partir do desmonte de maciços rochosos.
- Relação custo/benefício entre VANT's e outros métodos utilizados para levantamentos topográficos, nomeadamente estação total e *laser scan*.

Referências bibliográficas

Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). Sistemas aquíferos de Portugal continental. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água.

Andrade, P.S. & Saraiva, A.A. (2008) - Estimating the joint roughness coefficient of discontinuities found in metamorphic rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67 (3), pp. 425-434.

Aydin, A. (2008). ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. In *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (pp. 25-33). Springer, Cham.

Azerêdo, A. C.; Duarte, L. V.; Henriques, M. H. & Manuppella, G. (2003). Da dinâmica continental no Triásico aos mares do Jurássico Inferior e Médio. *Cadernos de Geologia de Portugal*. Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.

Azerêdo, A.C., 2007. Formalizam da litostratigrafia do Jurássico Inferior e médio do Maciço calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). *Comunicações Geológicas* 94, 29-51.

Barton, N. Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Springer Verlag, vol. 6, pp 189-236.

Barton, N., & Bieniawski, Z. (2008). RMR and Q-Setting records straight. *Tun. Tunnell. Internat*, 26-29.

Bieniawski, Z. T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proc. 4 th Int. Conference on Rock Mechanics*. Montreaux. Balkema, vol. 2, pp. 41-48.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons.

Buffon, E., Sampaio, T., & Paz, O. (2018). Veículo aéreo não tripulado (VANT): aplicação na análise de inundações em áreas urbanas. *GOT, Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, (13), 85-108.

Carvalho, J. M. F., Midões, C., Machado, S., Sampaio, J., Costa, A., & Lisboa, V. (2011). *Maciço Calcário Estremenho Caracterização da Situação de Referência*. Relatório interno, 1-42.

Carvalho, J.M.F., 2013. *Tectónica e caraterização da fraturação do Maciço Calcário Estremenho, Bacia Lusitaniana*. Contributo para a prospeção de rochas ornamentais e ordenamento da atividade extrativa. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa (não publicada), 884 p.

Coggan, J. S., Wetherelt, A., Gwynn, X. P., & Flynn, Z. (2007). Comparison of hand-mapping with remote data capture systems for effective rock mass characterisation. In *Proceedings of 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics-The Second Half Century of Rock Mechanics* (Vol. 1, pp. 201-205).

Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de outubro. *Diário da República* n.º 197/2007, Série I de 2007-10-12. Lisboa: Ministério da Economia e da Inovação.

Deere, D. U. (1967) – Geological considerations. Rock Mechanics in Engineering Practice, 1st chapter, Stagg & Zienkiewicz, London.

Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois Univ At Urbana Dept Of Civil Engineering.

Dewez, T. J., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., & Rohmer, J. (2016). FACETS: A CLOUDCOMPARE PLUGIN TO EXTRACT GEOLOGICAL PLANES FROM UNSTRUCTURED 3D POINT CLOUDS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41.

DigitalGlobe, 2018. WORLDVIEW-3 DATA SHEET. Consultado a 20 de dezembro de 2018. Disponível em: https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/95/DG2017_WorldView-3_DS.pdf

Duarte, J., A., M., (2018). CONTRIBUTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE ÁREAS COM POTENCIAL PARA A EXTRAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS CARBONATADAS. Análise integrada de dados fotogramétricos, geológicos e geofísicos para caracterização de maciços rochosos carbonatados. (Tese de Doutoramento). Universidade de Coimbra, Portugal.

Fernández-Lozano, J., & Gutiérrez-Alonso, G. (2016). Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: An example from the Roman Gold District of the Eria River Valley (NW Spain). Journal of Archaeological Science: Reports, 5, 509-520.

Francioni M, Salvini R, Stead D, Geiovannini R, Riccucci S, Vanneschi C, Gullì D. 2015. Na integrated remote sensing-GIS approach for the analysis of na open pit in the Carrara marble district, Italy: slope stability assessment through kinematic and numerical methods, Comput Geotech. 67:46 - 63

Hoek, E. (1994) - Strength of rock and rock masses. ISRM New Journal 2 (2), pp. 4-16.

Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bowden, W. F. (1995) - Support of underground excavations in hard rock. Balkema.

Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S. (2013, January). Quantification of the geological strength index chart. In 47th US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association.

IAEG (1979) – “Classification of rocks and soils for engineering geological mapping”, Part 1 – rock and soils materials. Bulletin of the International Association Engineering Geology.

IGM (1998) - Folha 27-A (Vila Nova de Ourém) da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.

Instituto Nacional de Estatística. (2011). População residente, população presente, famílias, núcleos familiares, alojamentos e edifícios. Disponível em : http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_quadros

ISRM (1977). "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts. Vol. 16, n.º 2, p.141-156.

ISRM (1981). BASIC GEOTECHNICAL DESCRIPTION OF ROCK MASSES (BGD). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 18. 87-110.

Kullberg, J.C., Rocha, R.B., Soares, A F., Rey, J., Terrinha, P., Azerêdo, A.C., Callapez, P., Duarte, L.V., Kullberg, M.C., Martins, L., Miranda, J.R., Alves, C., Mata, J., Madeira, J., Mateus, O., Moreira, M., Nogueira, C.R., 2013. A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, J.C. Kullberg (Eds). Geologia de Portugal, Vol. II - Geologia Mesocenozóica de Portugal. Escolar Editora, Lisboa, 195-347.

Lima, C. & Menezes, J.E. (2008) - Textos de apoio de Geologia de Engenharia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Malta, L., Barros, J. É., & Candeias, A. L. B. PROJETO AEROFOTOGRAFÉTRICO PARA RPA'S (VANT) NO ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE ESCADA.

Manuppella, G., Telles Antunes, M., Costa Almeida, C. A., Azerêdo, A. C., Barbosa, B., Cardosa, J. L., ... & Martins, L. T. (2000). Carta geológica de Portugal na escala de 1: 50 000. Notícia explicativa da folha 27-A (Vila Nova de Ourém).

Miranda, T. F., Correia, A. G., & Sousa, L. R. (2006). Determinação de parâmetros geomecânicos em formações rochosas e maciços heterogéneos.

Palmström, A. (1982). The volumetric joint count-a useful and simple measure of the degree of rock jointing. Proc. 4th Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol, 5, 221-228.

Priest SD, Hudson J. Discontinuity spacing in rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1976.

Prieto, R., Coelho, D. (2018). POTENCIAL DO USO DE VANTS NA GEOFÍSICA APLICADA. Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral 2018.

RIBEIRO, A.; SILVA, J. B.; CABRAL, J.; DIAS, R.; FONSECA, P.; KULLBERG, M. C.; TERRINHA, P.; KULLBERG, J. C. & PHIPPS, S. P. (1996)- Tectonics of the Lusitanian Basin. Contribution to the MILUPOBAS Project - EC Contract no. JOU2-CT94-0348. (inédito).

Rocha, F. J. G. (2016). Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa. (Alqueidão da Serra, Porto de Mós/Santarém e Alenquer). (Dissertação de Mestrado). Universidade de Coimbra, Portugal.

Roncella, R., Forlani, G., & Remondino, F. (2005, January). Photogrammetry for geological applications: automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes. In Videometrics VIII (Vol. 5665, p. 566503). International Society for Optics and Photonics.

Rusli, N. (2018). The Accuracy Assessment of *Agisoft PhotoScan* and *Pix4D Mapper* Software in Orthophoto Production.

Salvini, R., Mastrococco, G., Seddaiu, M., Rossi, D., & Vanneschi, C. (2017). The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 34-52.

Serviços Cartográficos do Exército (1968) - Carta Militar de Portugal Série M888 à escala de 1/25000

Silva, R. L., Duarte, L. V., Comas-Rengifo, M. J., Mendonça Filho, J. G., & Azerêdo, A. C. (2011). Update of the carbon and oxygen isotopic records of the Early–Late Pliensbachian (Early Jurassic, ~ 187 Ma): Insights from the organic-rich hemipelagic series of the Lusitanian Basin (Portugal). *Chemical Geology*, 283(3-4), 177-184.

Tung, W. Y., Nagendran, S. K., & Ismail, M. A. M. (2018, June). 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in *CloudCompare*. In IOP conference series: earth and environmental science (Vol. 169, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.

Vallejo, L. G.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. (2002) – Ingeniería Geológica. Prentice Hall.

VISA Consultores (2010). Estudo de Impacte Ambiental: Projeto de Ampliação da Pedreira “Cabeço da Moita Negra” (não publicado). Lisboa.

Zhang, P., Du, K., Tannant, D. D., Zhu, H., & Zheng, W. (2018). Automated method for extracting and analysing the rock discontinuities from point clouds based on digital surface model of rock mass. *Engineering Geology*, 239, 109-118.