

# Detecção Remota em Riscos Geológicos na exploração de Recursos Minerais

Marta Regina Gonçalves Pacheco

Geologia

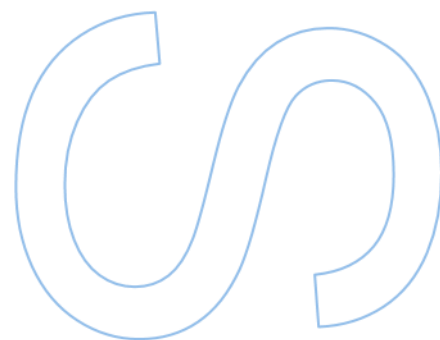
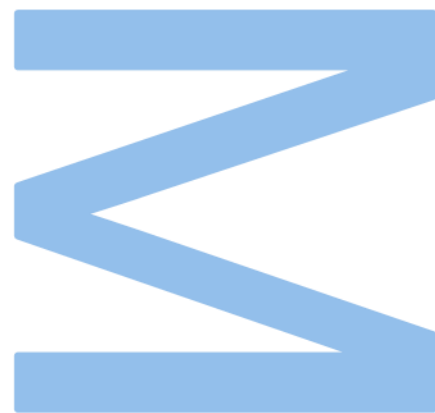
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território  
2021/2022

**Orientador**

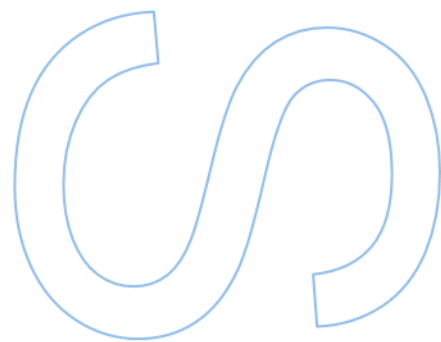
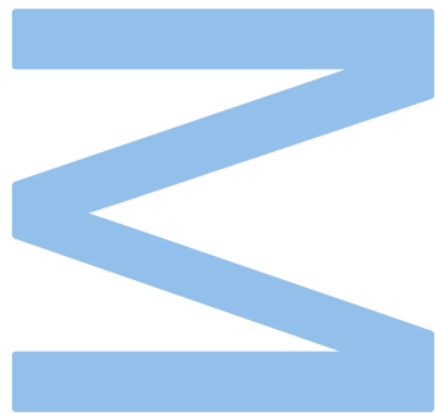
Alexandre Martins Campos de Lima, Professor Associado,  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

**Coorientador**

José Alberto Álvares Pereira Gonçalves, Professor Auxiliar,  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto



**U.** PORTO  
FC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
UNIVERSIDADE DO PORTO





# Declaração de Honra

Eu, Marta Regina Gonçalves Pacheco, inscrito(a) no Mestrado em Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto declaro, nos termos do disposto na alínea a) do artigo 14.º do Código Ético de Conduta Académica da U.Porto, que o conteúdo do presente relatório de estágio reflete as perspetivas, o trabalho de investigação e as minhas interpretações no momento da sua entrega.

Ao entregar este relatório de estágio, declaro, ainda, que a mesma é resultado do meu próprio trabalho de investigação e contém contributos que não foram utilizados previamente noutros trabalhos apresentados a esta ou outra instituição.

Mais declaro que todas as referências a outros autores respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, encontrando-se devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção de referências bibliográficas. Não são divulgados no presente relatório de estágio quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor.

Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

Marta Pacheco,

Porto, 30 de setembro de 2022.

# Agradecimentos

Apesar de ser a autora deste trabalho, não seria possível elaborá-lo sozinha sem um grupo de pessoas que me auxiliou a nível académico e pessoal. Por esta razão, aproveito para demonstrar os meus agradecimentos:

Aos meus professores orientadores Alexandre Lima e Doutor José Alberto Gonçalves pelo tempo que dedicaram a apoiar-me e a ensinar-me o necessário para a elaboração desta tese.

A toda a equipa que integra a GEOteK – Potencial Avulso, incluindo o meu supervisor Eng. Jorge Costa, os engenheiros Eduardo Silva e Diogo Alves e a secretária Eduarda Barros pelo acolhimento, disponibilidade e apoio que me ofereceram durante a oportunidade que me concederam de desenvolver o meu tema da tese de mestrado num ótimo ambiente de trabalho.

A todos os professores de Geologia e de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto que conheci por terem contribuído para a expansão do meu conhecimento que se revelou útil durante a produção deste trabalho.

À professora Joana Ribeiro que, apesar de não ter sido minha professora orientadora, me ajudou a desenvolver este trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso de Geologia por me acompanharem e apoiarem sempre que precisei ao longo destes anos.

Ao meu namorado, Diogo Cruz, que me sempre me incentivou ao longo de todo o meu percurso académico, incluindo o processo de elaboração deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, aos meus pais, irmãos e avós que sempre foram pacientes e encorajadores para comigo nos momentos mais difíceis do meu percurso enquanto estudante universitária.

## Resumo

A exploração de massas minerais, ou pedreiras como são vulgarmente conhecidas, apresentam grande impacto tanto na economia regional, pela geração de emprego e investimento local, como na economia nacional, a nível das exportações. Independentemente da finalidade de cada exploração, que pode ser produção de rocha industrial ou ornamental, é fundamental estudar as condições geológicas e estruturais do maciço rochoso de forma a assegurar a segurança dos trabalhadores e o aproveitamento económico da exploração. Neste contexto, foram estudados os riscos geológicos associados à produção de rocha ornamental na pedreira da “Lega Gorda”, situada em Penafiel, Portugal, recorrendo a duas técnicas de deteção remota: a fotogrametria aérea e LiDAR. A partir de nuvens de pontos geradas com estas técnicas, determinaram-se situações de risco de rotura de taludes que poderiam ocorrer com o avanço da frente de desmonte, nomeadamente rotura em cunha. Para além disso, foram determinadas as dimensões do bloco unitário e os volumes de rocha extraídos durante o período de 25 de maio a 1 de julho de 2022. A deteção remota provou ser uma ferramenta útil na determinação destes parâmetros, com a obtenção de informação geológica e estrutural dos 6,5ha que constituem a área de estudo deste relatório de forma precisa e mais rápida do que com os métodos tradicionais.

Palavras-chave: pedreira; descontinuidades; fotogrametria; LiDAR; VANT.

## Abstract

Open pit-mines such as quarries have a great impact not only on regional economy, by creating new jobs and incentivizing local investments, but also on national economy as well, with its weight on a country's exports. Even if the purpose may be different for each exploitation, which could be industrial or ornamental stone production, it's fundamental to study the geological and structural conditions of the rock mass so that the worker's safety and this type of mining economic benefits are assured. In this context, the geological hazards potential associated with the ornamental stone production of the Lega Gorda quarry, situated in Penafiel, Portugal, was analysed by using two remote detection techniques: aerial photogrammetry and LiDAR. These techniques allowed the generation of cloud points which were used to determine possible slope failures that could accompany the excavation progress, specifically wedge failures. Furthermore, unit block dimensions were determined as well as the volume of extracted rock between 25<sup>th</sup> of May and 1<sup>st</sup> of July 2022. Remote detection proved itself as a useful tool to determine these parameters with the geological and structural information of the 6,5ha that composes the study area of this report in a precise way and faster than what would be expected with traditional methods.

Keywords: quarry; discontinuities; photogrammetry; LiDAR; VANT.

# Índice

Lista de Tabelas .....	vii
Lista de Gráficos.....	viii
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Quadros .....	xiii
Lista de Abreviaturas .....	xiv
Introdução.....	1
1. Exploração de massas minerais .....	3
1.1. Classificação de pedreiras.....	3
1.2. Finalidades das explorações de massas minerais .....	4
1.3. Panorama económico da produção de rocha ornamental e matéria-prima industrial em Portugal.....	4
2. Área de estudo .....	7
2.1. Enquadramento geográfico.....	7
2.2. Enquadramento geológico .....	10
3. Riscos Geológicos – Estabilidade de taludes.....	12
3.1. Fatores que contribuem para a instabilidade dos taludes .....	12
3.2. Descontinuidades .....	13
3.3. Tipos de rotura de taludes .....	25
3.4. Métodos de análise de estabilidade de taludes.....	29
4. Detecção Remota.....	33
4.1. Aeronaves não-tripuladas (VANT) .....	33
4.2. Fotogrametria .....	37
4.3. LiDAR.....	39
5. Metodologia .....	42
5.1. Área de estudo .....	42
5.2. Fotogrametria aérea .....	43
5.3. LiDAR aéreo .....	48



5.4. Softwares utilizados.....	51
6. Resultados obtidos e discussão.....	52
6.1. Fotogrametria aérea .....	52
6.2. LiDAR aéreo .....	56
6.3. Comparação dos resultados obtidos por fotogrametria e LiDAR.....	57
6.4. Volumetria .....	59
6.5. Avaliação de risco geológico .....	63
Conclusão.....	74
Referências Bibliográficas .....	76
Anexos .....	1
Anexo 1 .....	2
Anexo 2 .....	10

## Lista de Tabelas

Tabela 1 Erro estimado para a georreferenciação dos onze pontos de controlo utilizados na captura de imagens por fotogrametria no dia 27 de maio de 2022. ....	53
Tabela 2 Erro estimado para a georreferenciação dos cinco pontos de controlo utilizados na captura de imagens por fotogrametria no dia 01 de julho de 2022. ....	55
Tabela 3 Quantidade de volume de blocos graníticos retirado na pedreira da Lega Gorda entre 27 de maio e 1 de julho de 2022. ....	62
Tabela 4 Dimensões dos blocos retirados da pedreira da Lega Gorda ente 27 de maio e 1 de julho de 2022. ....	66
Tabela 5 Valores determinados para Jv e respetiva classificação ISRM (1978) para os blocos retirados da pedreira da Lega Gorda entre 27 de maio e 1 de julho de 2022...	67

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 Produção anual de rocha ornamental na sua totalidade comparada com a produção anual de apenas de rocha ornamental granítica e de rochas similares em Portugal (em toneladas), desde 2007 até 2020, segundo os dados de DGEG (2021). . 6	
Gráfico 2 Variação da cota nas imagens obtidas por fotogrametria aérea no dia 27 de junho de 2022.....	54

# Lista de Figuras

Figura 1 Gráfico que representa a Taxa Média Anual de 4% para o valor das exportações de rocha ornamental de Portugal entre os anos 1997 a 2015. Retirado de DGEG (2022).  
 ..... 5

Figura 2 Localização da pedreira da Lega Gorda, delimitada a vermelho, no mapa de Portugal obtido com o Google Earth Pro v7.3.4.8642 (30 de junho de 2020). ..... 7

Figura 3 Carta de Ordenamento do PDM em vigor no Município de Penafiel para a área de exploração da pedreira da Lega Gorda. .... 8

Figura 4 Carta de Condicionantes do PDM em vigor no Município de Penafiel para a área de exploração da pedreira da Lega Gorda. .... 8

Figura 5 Granito cinza-azul de Penafiel extraído na pedreira da Lega Gorda. .... 9

Figura 6 Esquema tectono-estratigráfico à escala 1: 5 000 000 retirado da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010). ..... 10

Figura 7 Localização da pedreira da Lega Gorda na Carta Geológica 9-D (Penafiel), à escala 1: 50 000. .... 11

Figura 8 Maciço rochoso constituído pelo material rochoso e pelas discontinuidades. .... 12

Figura 9 Propriedades geométricas de discontinuidades no maciço rochoso. Retirado e traduzido de Hudson (1989). ..... 15

Figura 10 Classificação da rugosidade. Retirado de ISRM (1978). ..... 16

Figura 11 Abertura das discontinuidades. a) Descontinuidade fechada; b) Descontinuidade aberta; c) Descontinuidade preenchida. Adaptado de de ISRM (1978).  
 ..... 17

Figura 12 Bloco-diagrama a representar maciços rochosos com diferentes números famílias de discontinuidades. Retirado de González de Vallejo et al., 2002. .... 21

Figura 13 Esboço de maciços rochosos que apresentam blocos (a) maciços/compactos; (b) irregulares; (c) tabulares e (d) colunares. Retirado de ISRM 1978). ..... 25

Figura 14 Tipos de rotura planares de taludes. Retirado e traduzido de González de Vallejo et al., 2002. .... 26

Figura 15 Condições para rotura planar e em cunha. Retirado e traduzido de González de Vallejo et al. (2002). ..... 27

Figura 16 Esquema de taludes em condições favoráveis para o tombamento com e sem flexão dos estratos. Retirado de González de Vallejo et al. (2002). ..... 28

Figura 17 Rotura circular num afloramento rochoso com grande grau de fraturação. . 28

Figura 18 Exemplo de um plano N50°;45°E projetado relativamente ao centro da esfera de projeção (em cima) e projetado horizontalmente (em baixo) Retirado de Aber e Ber (2007). ..... 30

Figura 19 Projeção estereográfica de situação de instabilidade do talude com possibilidade de a) rotura planar; b) rotura em cunha; c) tombamento e c) rotura circular. Retirado e traduzido de Wyllie & Mah (2014). ..... 31

Figura 20 Projeção da interseção de dois planos de descontinuidade que resultam no deslizamento ao longo de um dos planos de descontinuidade - rotura planar (em cima) - e ao longo da linha de interseção - rotura em cunha (em baixo). Retirado e traduzido de Wyllie & Mah (2014). ..... 32

Figura 22 Estações ReNEP distribuídas ao longo de Portugal Continental e Insular. Retirado de <<https://renep.dgterritorio.gov.pt/estacoes>>, acedido em 10 de junho de 2022. .... 35

Figura 23 Operação de Aeronaves Não-tripuladas da categoria Aberta segundo as condições impostas pela ANAC (2022). Retirado de <[https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria\\_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx](https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx)>, acedido em 04 de maio de 2022. .... 37

Figura 23 Esquema da posição de duas capturas de imagens a partir de duas posições diferentes que permitem o posicionamento tridimensional de um objeto que se encontre na aérea de interseção. Retirado e traduzido de Bemis et al. (2014). ..... 38

Figura 24 Ondas contínuas e discretas medidas por um sistema aéreo LiDAR. Retirado e traduzido de Dong & Chen (2018). ..... 40

Figura 25 Panorama geral da pedreira da Lega Gorda no dia da primeira visita (27 de maio de 2022). ..... 42

Figura 26 Área delimitada correspondente à zona de estudo, abrangendo a zona de exploração e zona de defesa da pedreira da Lega Gorda. .... 43

Figura 27 *Workflow* utilizado para a fotogrametria aérea. .... 44

Figura 28 Drone DJI Phantom 4 com sensor CMOS. .... 45

Figura 29 Interface da aplicação *3D Survey Pilot* para a determinação das especificações do voo do drone *Dji Phantom 4*. .... 45

Figura 30 Colocação dos pontos de controlo no campo (à esquerda) e medição das coordenadas no ponto de controlo com a antena GPS (à direita). .... 46

Figura 31 Obtenção das coordenadas de pontos dos vértices e de descontinuidades das bancadas da pedreira da Lega Gorda. .... 46

Figura 32 Drone DJI Phantom 4 RTK. .... 47

Figura 33 Drone DJI Phantom 4 RTK. .... 48

Figura 34 Colocação de um dos cinco pontos de controlo. ....	48
Figura 35 Workflow utilizado para LiDAR.....	49
Figura 36 Drone <i>DJI Matrice 300 RTK</i> e comando remoto do drone, no canto esquerdo. .....	49
Figura 37 Interface da aplicação DJI Pilot no controlo remoto do drone DJI Matrice 300 RTK. ....	50
Figura 38 Página WebSIG relativa à pedreira da Lega Gorda criada pela GEOteK. ...	51
Figura 39 Nuvem de pontos obtida por fotogrametria no dia 27 de maio de 2022, visualizada no CloudCompare. ....	52
Figura 40 Visualização das coordenadas dos pontos determinadas com a estação total na nuvem de pontos gerada a partir de imagens captadas por fotogrametria no dia 27 de maio de 2022. ....	53
Figura 41 Comparação entre a qualidade da nuvem de pontos gerada no <i>AGISOFT Metashape</i> (à esquerda) e no <i>3Dsurvey</i> (à direita) à escala 1:240. ....	54
Figura 42 Nuvem de pontos gerada a partir de imagens obtidas por fotogrametria aérea no dia 1 de julho de 2022, visualizada no CloudCompare.....	55
Figura 43 Nuvem de pontos obtida com LiDAR no dia 27 de maio de 2022, visualizada no CloudCompare, onde é possível observar conjuntos de dados vazios.....	56
Figura 44 Nuvem de pontos gerada a partir com LiDAR obtidos no dia 27 de junho de 2022, visualizada no CloudCompare. ....	57
Figura 45 Comparação entre a nuvem de pontos obtida com fotogrametria (á esquerda) e com LiDAR (à direita) no dia 27 de maio de 2022, visualizadas no CloudCompare à escala 1:250. ....	58
Figura 46 Comparação entre a nuvem de pontos obtida com fotogrametria (à esquerda) e com LiDAR (à direita) no dia 27 de junho de 2022, visualizadas no CloudCompare à escala 1:300. ....	59
Figura 47 Nuvem de pontos colorida de acordo com a distância entre as nuvens de pontos obtidas no dia 27 de maio de 2022 e 01 de julho de 2022 por fotogrametria, obtida no CloudCompare,.....	60
Figura 48 Nuvem de pontos que mostra a amarelo as zonas onde houveram diferenças na altitude (à esquerda) entre a nuvens de pontos obtidas para o dia 27 de maio (a meio) e para o dia 1 de junho de 2022 (à direita), à escala 1:300.....	60
Figura 49 Zonas numeradas de 1 a 5 onde ocorreram maiores diferenças de altitude entre as nuvens de pontos obtidas. ....	61

Figura 50 Determinação de volumes adicionados e retirados na zona 5 na última nuvem de pontos obtida em relação à primeira (à esquerda) e malha tridimensional da zona 5 que permite visualizar a localização de volume adicionado e removido (à direita). .... 62

Figura 51 Utilização do *Compass Plug-in* incorporado no *CloudCompare* na medição da atitude de planos de descontinuidade..... 63

Figura 53 (a) Projeção estereográfica numa rede de Schmidt de 160 planos de descontinuidades presentes na pedreira da Lega Gorda. (b) Projeção estereográfica dos polos dos 160 planos de descontinuidades presentes na pedreira da Lega Gorda e respetivo contorno de densidade. .... 64

Figura 53 Diagrama de roseta relativo às atitudes dos 160 planos de descontinuidades medidas na pedreira da Lega Gorda, em que cada pétala apresenta (a) 20° e (b) 30° de largura, respetivamente. .... 64

Figura 54 Medição das dimensões dos blocos retirados da pedreira da Lega Gorda entre 27 de maio e 1 de julho de 2022 no *CloudCompare*. .... 66

Figura 55 Representação dos planos de descontinuidade, exagerando a sua continuidade, no *CloudCompare*..... 67

Figura 56 Planos de descontinuidades (azul) que formam uma cunha, cuja linha de interseção se encontra representada a laranja e a tracejado, no flanco NW na nuvem de pontos..... 69

Figura 57 Projeção estereográfica dos planos de descontinuidade (azul), talude (verde) e ângulo de atrito do granito (vermelho) no flanco NW. A direção do movimento é dada pela seta a preto. .... 69

Figura 58 Planos de descontinuidades (azul) que formam uma cunha, cuja linha de interseção se encontra representada a laranja e a tracejado, no flanco NE na nuvem de pontos..... 70

Figura 59 Projeção estereográfica dos planos de descontinuidade (azul), talude (verde) e ângulo de atrito do granito (vermelho) no flanco NE. A direção do movimento é dada pela seta a preto. .... 70

Figura 60 Zona de fraturação intensa do granito representada na nuvem de pontos (em cima) e no campo (em baixo)..... 71

## Lista de Quadros

Quadro 1 Classes de Pedreiras. Retirado da página web da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) < <a href="https://www.dgeg.gov.pt/media/wzrozybv/guião-das-pedreiras.pdf">https://www.dgeg.gov.pt/media/wzrozybv/guião-das-pedreiras.pdf</a> >, acedido em 15 de maio de 2022. ....	3
Quadro 2 Fatores que influenciam a finalidade da atividade de exploração das pedreiras. Adaptado de Sousa et al. (2012) e Carvalho (2008). ....	4
Quadro 3 Fatores que influenciam a estabilidade dos taludes. Adaptado de González de Vallejo et al. (2002). ....	13
Quadro 4 Tipos de descontinuidades. Retirado de González de Vallejo et al. (2002). ....	14
Quadro 5 Classificação de espaçamentos entre descontinuidades de acordo com a ISRM (1978). ....	16
Quadro 6 Classificação da rugosidade das paredes de descontinuidades segundo a ISRM (1978). † O termo “espelhada” deverá ser usado apenas quando há evidências de deslizamento prévio ao longo das descontinuidades. ....	17
Quadro 7 Classificação da abertura entre descontinuidades segundo a ISRM (1978). ....	18
Quadro 8 Classificação da continuidade de descontinuidades segundo a ISRM (1978). ....	19
Quadro 9 Classificação de descontinuidades baseada no material de enchimento e grau de percolação segundo a ISRM (1978). ....	20
Quadro 10 Classificação do maciço rochoso de acordo com o número de famílias que o interseam, segundo a ISRM (1978). ....	22
Quadro 11 Classificação do tamanho do bloco unitário de acordo com o valor de $J_v$ , segundo a ISRM (1978). ....	24
Quadro 12 Classificação do maciço rochoso de acordo com a forma e tamanho do bloco unitário segundo a ISRM (1978). ....	24



## Lista de Abreviaturas

FCUP	FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO
UP	UNIVERSIDADE DO PORTO
DGEG	DIREÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA
GEOTEK	GEOTEKNICS POTENCIAL AVULSO
PDM	PLANO DIRETOR MUNICIPAL
ZCI	ZONA CENTRO IBÉRICA
UAS	AERONAVES NÃO-TRIPULADAS
RTK	<i>REAL TIME KINEMATICS</i>
RENEP GNSS	REDE DE ESTAÇÕES PERMANENTES GNSS
GNSS	<i>GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM</i>
LIDAR	<i>LIGHT DETECTION AND RANGING</i>
GCP	<i>GROUND CONTROL POINTS</i>
GSD	<i>GROUND SAMPLE DISTANCE</i>
GPS	<i>GLOBAL POSITION SYSTEM</i>
ISRM	<i>INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS</i>

# Introdução

## **Enquadramento empresarial**

O presente relatório foi elaborado no âmbito de estágio curricular para conclusão do Mestrado em Geologia na empresa GEOteKnics - GEOteK – Potencial Avulso, criada em 2018 e constituída por profissionais da área da Engenharia Geotécnica. Os serviços prestados pela empresa envolvem apoio técnico a pedreiras; levantamentos topográficos e de fotogrametria com drones em áreas de exploração e de obras; realização de sondagens, ensaios e estudos geotécnicos; elaboração de relatórios sismográficos; venda e aplicação de cimento expansivo e, por fim, aluguer de equipamentos.

## **Objetivos**

A monitorização de exploração de massas mineiras (vulgo, pedreiras) é importante para garantir a segurança e o aproveitamento económico das suas operações. Para isso, é necessário o estudo contínuo de riscos geológicos durante todas as fases de exploração. Serve como evidência da importância destes estudos, o caso trágico que ocorreu em 2018 nas pedreiras de Borba, localizada no distrito de Évora, em que uma derrocada provocou a morte de cinco pessoas. Foi neste contexto da avaliação do potencial de risco de natureza geológica que se decidiu elaborar este relatório, com recurso aos mais recentes desenvolvimentos na área da deteção remota.

O objeto de estudo deste trabalho constitui uma pedreira cuja finalidade principal consiste na produção de rocha ornamental granítica que se encontra sob a supervisão geotécnica da GEOteK. Trata-se de uma exploração licenciada em nome da empresa Francisco Ferreira de Barros, Lda. e que se localiza na freguesia de Duas Igrejas, em Penafiel. Os objetivos deste trabalho compreendem o estudo de riscos geológicos associados à exploração de granito nesta pedreira, recorrendo a LiDAR e à fotogrametria aérea, usando aeronaves não-tripuladas equipadas com os respetivos sensores, neste caso uma câmara digital RGB e um LiDAR aerotransportado. Para além disto, também se pretende determinar as dimensões do bloco unitário e calcular o volume de granito extraído da zona de exploração num intervalo de aproximadamente de um mês.

## **Estrutura do relatório de estágio**

Para além da introdução, o relatório de estágio assenta-se em sete capítulos:

O Capítulo 1 integra uma introdução ao panorama nacional das explorações de massas minerais, mais concretamente, na exploração de maciços rochosos para produção de rocha ornamental, e à pedreira que constitui o objeto de estudo deste trabalho.

A área de estudo será apresentada no Capítulo 2, incluindo o respetivo enquadramento geográfico e geológico.

O Capítulo 3 concentra-se na instabilidade de taludes: quais os fatores que contribuem para a sua instabilidade e quais os diferentes tipos de rotura existentes. O estudo das características geométricas e físicas das descontinuidades que atravessam o material rochoso apresenta-se muito valioso na avaliação da estabilidade dos taludes, pelo que este tópico também será abordado neste capítulo.

O Capítulo 4 apresenta uma introdução às Aeronaves Não-Tripuladas e aos princípios fundamentais dos métodos de deteção remota utilizados neste trabalho: Fotogrametria aérea e LiDAR.

No Capítulo 5 é demonstrada a montagem e preparação dos voos dos drones para recolha de dados LiDAR e de fotogrametria da pedreira em estudo, assim como uma apresentação dos softwares de processamento dos dados obtidos.

Os resultados obtidos são analisados e discutidos no Capítulo 6, englobando a comparação entre as nuvens de pontos obtidas pelas diferentes metodologias, as quantidades de volume de rocha granítica extraída da pedreira, o tamanho do bloco único e a possibilidade de risco geológico, nomeadamente a rotura de taludes.

# 1. Exploração de massas minerais

As pedreiras constituem operações de extração de massas minerais implicando, para esse fim, atividades industriais de movimentação de terras e/ou rochas, perfuração e de desmonte. Segundo a DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia) (2022), as pedreiras estão dependentes de licenciamento, englobando, para além da área de lavra da massa mineral, as infraestruturas e instalações intrínsecas à sua extração, zonas de defesa, anexos e depósitos de massas minerais extraídas, de massas estéreis (ou escombrecas) e de terras removidas (ou pargas).

## 1.1. Classificação de pedreiras

Segundo o Decreto-Lei 340/2007, as pedreiras podem ser divididas em classes numeradas de 1 a 4, consoante a dimensão, risco e impacto ambiental associados (Quadro 1).

Quadro 1 Classes de Pedreiras. Retirado de DGEG (2022).

<b>Classes de Pedreiras</b>			
<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Pedreiras de calçada e laje se enquadradas nos limites das pedreiras de classe 3	Pedreiras a céu aberto que recorram à utilização de explosivos até 2000 kg/ano no método de desmonte e que não excedam nenhum dos seguintes limites: <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Área ≤ 5 ha;</li> <li>b) Profundidade de escavação ≤ 10 m;</li> <li>c) Produção ≤ 150 000 t/ano;</li> <li>d) Número de trabalhadores ≤ 15.</li> </ul>	Pedreiras subterrâneas ou mistas e as que, sendo a céu aberto, tenham uma área inferior a 25 há, excedam qualquer dos limites estabelecidos nas alíneas a), b), c) e d) da classe 3 ou recorram à utilização, por ano, de mais de 2 000 kg de explosivos no método de desmonte.	Pedreiras que tenham uma área igual ou superior a 25 ha.



## 1.2. Finalidades das explorações de massas minerais

A finalidade da atividade de exploração de cada pedreira varia entre transformar a massa mineral extraída em matéria-prima industrial (por exemplo: agregados, minerais para cimento e cal) e/ou produzir rocha ornamental (DGEG, 2022), dependendo de diversos fatores intrínsecos ao material rochoso/mineral de interesse e ao afloramento e de fatores de explorabilidade (Sousa et al., 2012; Sousa et al., 2020). Estes fatores, que se encontram sumarizados no Quadro 2, influenciam a capacidade do afloramento de produção de rocha ornamental, que implica o cumprimento de padrões de qualidade elevados, de forma que o material tenha o comportamento desejado, segundo critérios técnicos (Sousa et al., 2012; Carvalho et al., 2018). Os fatores de explorabilidade sobrepõem-se aos restantes no que toca à avaliação de instalar uma unidade extrativa (Sousa et al., 2012; Sousa et al., 2020): por exemplo, não basta o facto da rocha possuir características estéticas desejáveis caso não seja a sua extração não seja economicamente viável.

Quadro 2 Fatores que influenciam a finalidade da atividade de exploração das pedreiras. Adaptado de Sousa et al. (2012) e Carvalho (2008).

<b>Rocha</b>	<b>Afloramento</b>	<b>Explorabilidade</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralogia</li> <li>• Granulometria</li> <li>• Textura</li> <li>• Cor</li> <li>• Homogeneidade/</li> <li>• Heterogeneidade</li> <li>• Propriedades físicas</li> <li>• Propriedades mecânicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localização</li> <li>• Morfologia</li> <li>• Terrenos de cobertura</li> <li>• Estrutura (estratos, dobras)</li> <li>• Variação de fácies</li> <li>• Grau de fracturação (tipo, densidade)</li> <li>• Volume disponível</li> <li>• Grau de meteorização</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceitação pelo mercado</li> <li>• Distância aos centros de consumo</li> <li>• Infraestruturas industriais</li> <li>• Ordenamento do território</li> <li>• Impactos ambientais</li> <li>• Acessibilidade</li> <li>• Espessura do material de cobertura sem interesse económico</li> </ul>

## 1.3. Panorama económico da produção de rocha ornamental e matéria-prima industrial em Portugal

A produção de agregados tem vindo a sofrer uma queda devido ao declínio da atividade do setor da construção civil que se tem verificado nos últimos anos (DGEG, 2022; Sousa et al., 2020), contrastando com o aumento da produção de rocha ornamental. As rochas ornamentais mais comuns exploradas em Portugal incluem mármore, granito, calcários

sedimentares, ardósia e xisto, sendo estas vendidas em bloco ou transformadas (DGEG, 2022) e aplicadas na construção civil, decoração, pavimentos, revestimentos e arte fúnebre. Este tipo de exploração possui um grande impacto económico não só a nível regional - sendo o efeito mais perceptível a criação de emprego - como também a nível nacional, apresentando uma tendência crescente com uma taxa média anual de 4% para o valor das exportações, desde 1997 até ao ano de 2015 (Figura 1), cujos países de destino principais consistem na França, China, Espanha, Arábia Saudita, Reino Unido, Estados Unidos da América e Alemanha (DGEG, 2022; Carvalho et al., 2018).

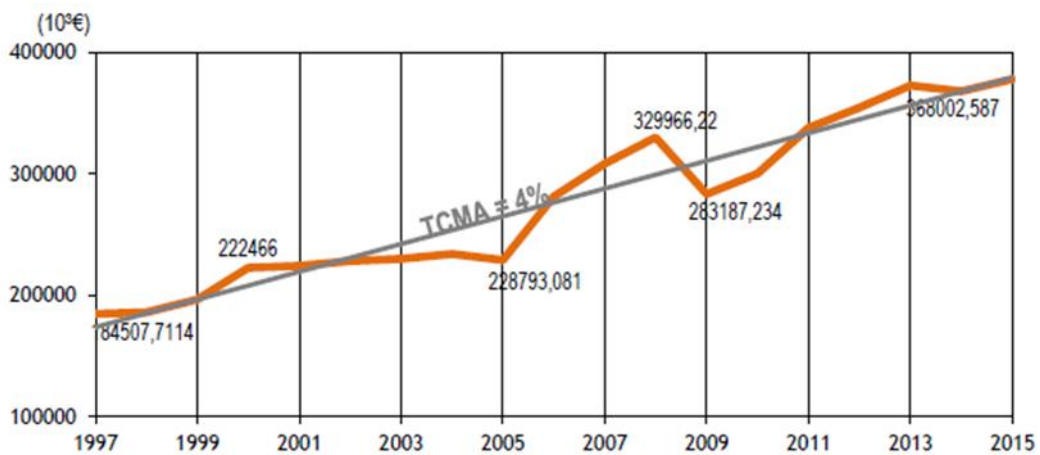


Figura 1 Gráfico que representa a Taxa Média Anual de 4% para o valor das exportações de rocha ornamental de Portugal entre os anos 1997 a 2015. Retirado de DGEG (2022).

De facto, Portugal apresenta-se como um dos principais países produtores de rocha ornamental a nível global (Carvalho et al., 2013; Sousa et al., 2020), com 3 769 122 de toneladas produzidas no ano de 2020, em que cerca de 37% desse valor corresponde a granito ornamental e rochas similares (DGEG,2021). O Gráfico 1 mostra a variação de produção de rocha ornamental e de granito ornamental e rochas similares a nível nacional, desde 2007 até 2020.

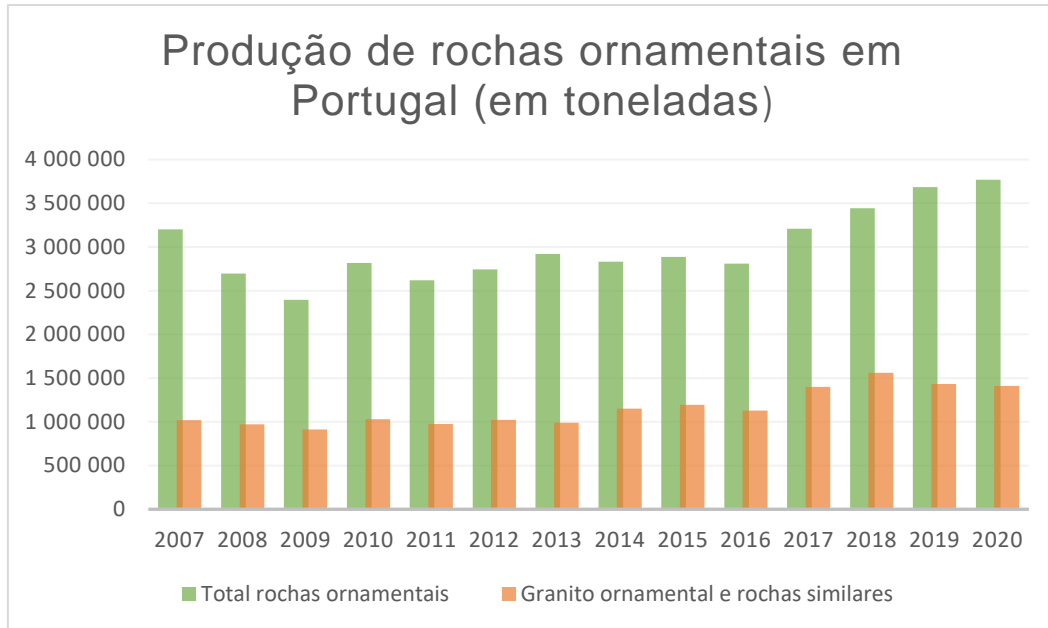


Gráfico 1 Produção anual de rocha ornamental na sua totalidade comparada com a produção anual de apenas de rocha ornamental granítica e de rochas similares em Portugal (em toneladas), desde 2007 até 2020, segundo os dados de DGEG (2021).

Segundo os dados da DGEG (2021), no ano de 2020, existiam 356 pedreiras de extração e transformação de rocha ornamental, estando a maior percentagem situada no norte de Portugal, especialmente as de granito (Sousa et al., 2020). Os granitos mais comuns apresentam cor acinzentada, sendo os mais valiosos os de tonalidade amarelada e rosada (Carvalho et al., 2013).

## 2. Área de estudo

### 2.1. Enquadramento geográfico

O alvo de estudo deste trabalho consiste na pedreira da Lega Gorda, pertencente à empresa *Fernando Ferreira de Barros, Lda*, situada na freguesia de Duas Igrejas, e constitui uma das várias explorações graníticas existentes ao longo do município de Penafiel, pertencendo este ao distrito do Porto (Figura 2).

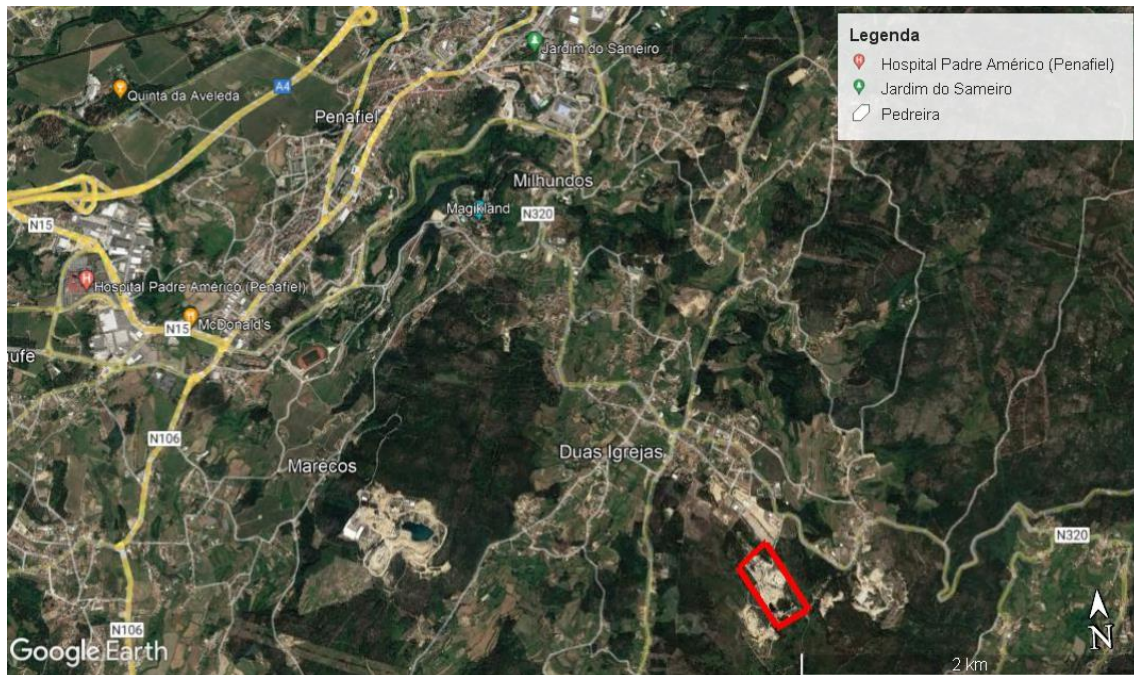


Figura 2 Localização da pedreira da Lega Gorda, delimitada a vermelho, no mapa de Portugal obtido com o Google Earth Pro v7.3.4.8642 (30 de junho de 2020).

À pedreira “Lega Gorda” foi atribuído o nº de licenciamento 2778 pela DGEG, dispendo de 6,45 ha de área total, sendo assim classificada como uma pedreira de classe 2, de acordo com o artigo 10ºA do Decreto-Lei n.º 340/2007 de 12 de outubro. A direção técnica encontra-se a cargo do Engenheiro Geotécnico Jorge Costa, da GEOtek.

Com os seus 7 trabalhadores e cerca de 3 ha de área de lavra, a empresa conta com uma produção anual expectável de cerca de 5 500,000 m<sup>3</sup> e estima-se que a sua exploração tenha 28 anos de vida útil.

De acordo com a Carta de Ordenamento e a Carta de Condicionantes do Plano Diretor Municipal (PDM) em vigor do Município de Penafiel, a pedreira encontra-se inserida, respetivamente, nas áreas classificadas como “Área de Exploração



Consolidada/Complementar” (Figura 3) e “Espaço para Indústria Extrativa – Área de Exploração Consolidada/Complementar (Granito)” (Figura 4).

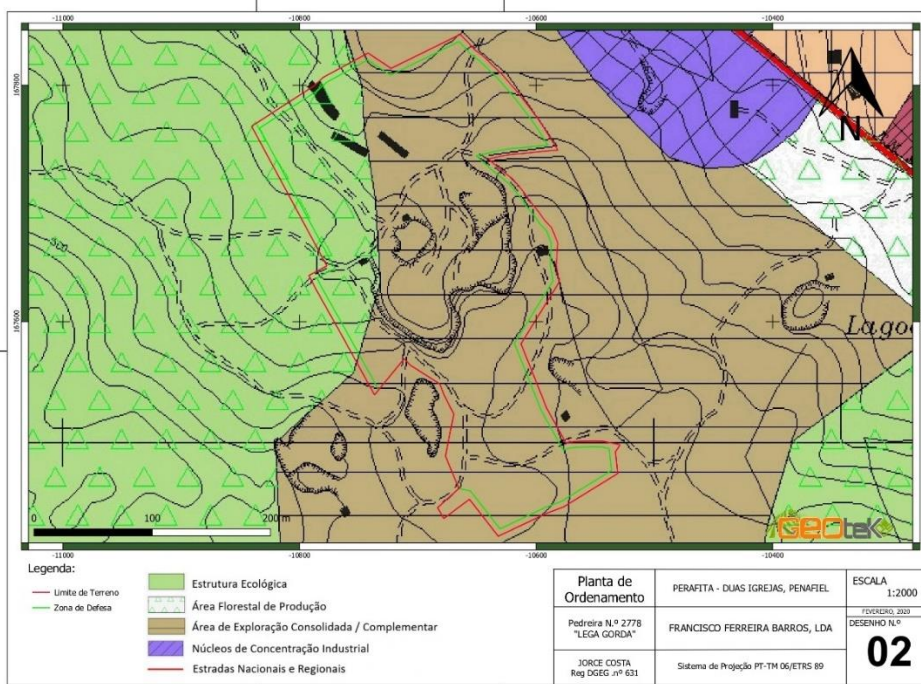


Figura 3 Carta de Ordenamento do PDM em vigor no Município de Penafiel para a área de exploração da pedreira da Legado Gorda.

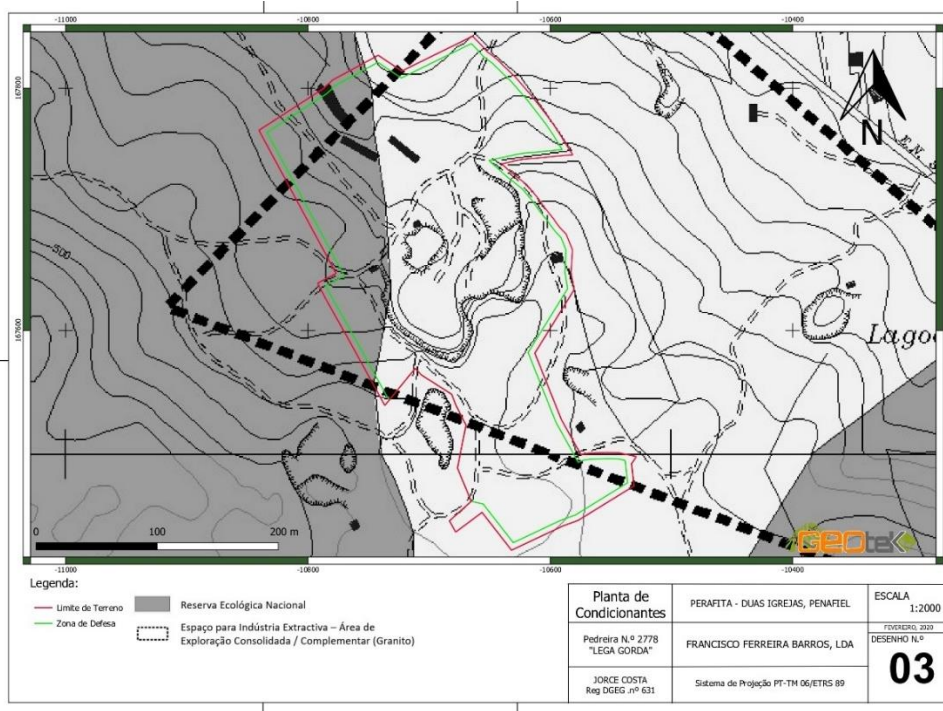


Figura 4 Carta de Condicionantes do PDM em vigor no Município de Penafiel para a área de exploração da pedreira da Legado Gorda.

A exploração da pedreira da Lega Gorda tem como finalidade a produção de rocha ornamental granítica com a tipologia comercial de Granito cinza-azul de Penafiel (Figura 5), aplicada na indústria transformadora para produção de pavimentos e revestimentos. O desmonte da massa rochosa é efetuado a céu aberto, em flanco de encosta, de cima para baixo e em degraus direitos, de acordo com o artigo 44º do Decreto-Lei 340/2007 de 12 de outubro. As bancadas assumem 10m de altura e 5m de largura, com uma inclinação de segurança de aproximadamente 5%, enquanto as escavações atingem os 35m de profundidade.



Figura 5 Granito cinza-azul de Penafiel extraído na pedreira da Lega Gorda.

## 2.2. Enquadramento geológico

A estrutura geomorfológica de Portugal Continental (Figura 6), assenta-se maioritariamente sob o Maciço Ibérico de idade ante-mesozóica e, à volta deste nas suas periferias, encontram-se instaladas as unidades estruturais mais recentes das bacias Meso-Cenozoicas, constituídas pelas orlas Ocidental e Meridional (ou Algarvia).

O Maciço Ibérico, que também pode ser denominado por Maciço Hespérico, é constituído pela Cadeira Varisca (ou Hercínica) que abrange a maioria do território da Península Ibérica Ocidental e também uma parte do território Central (Julivert et al. 1974). O Maciço Ibérico encontra-se dividido em zonas geotectónicas que apresentam características que permitem distinguirem-se umas das outras, relativamente às fácies presentes e a nível estrutural, metamórfico e magmático (Julivert et al., 1974). Em suma, consideram-se seis zonas geotectónicas (Julivert et al., 1974; Ribeiro & Sanderson 1996; Ribeiro et al., 2013):

- ZC- Zona Cantábrica;
- ZAOL – Zona Astúrico-Ocidental Leonesa;
- ZGTM – Zona Galiza Trás-os-Montes;
- ZCI- Zona Central Ibérica;
- ZOM – Zona de Ossa-Morena;
- ZSP – Zona Sul Portuguesa.

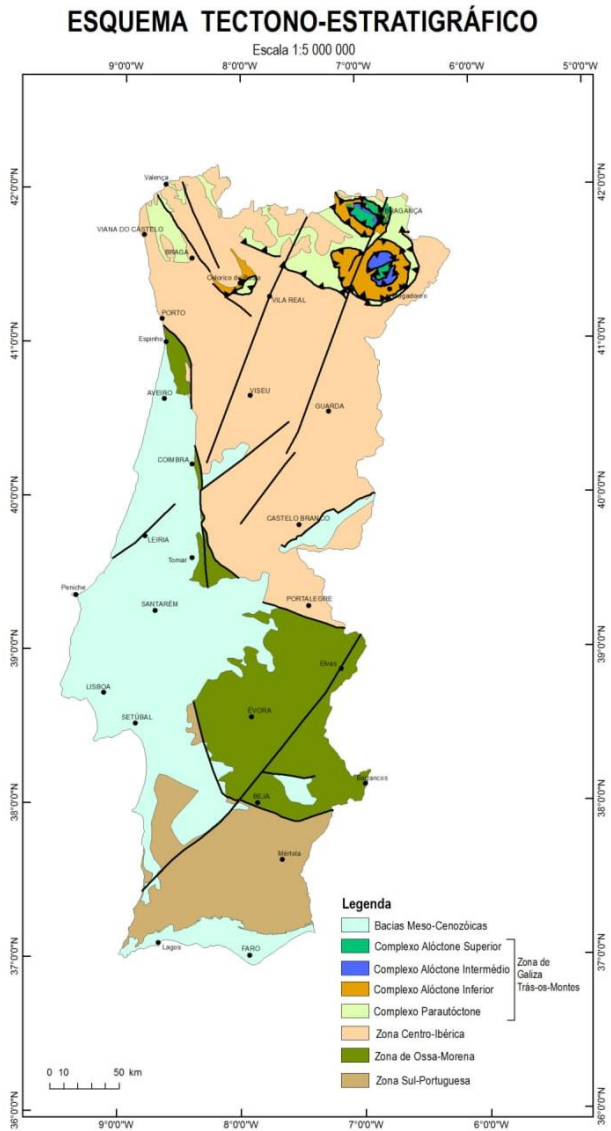
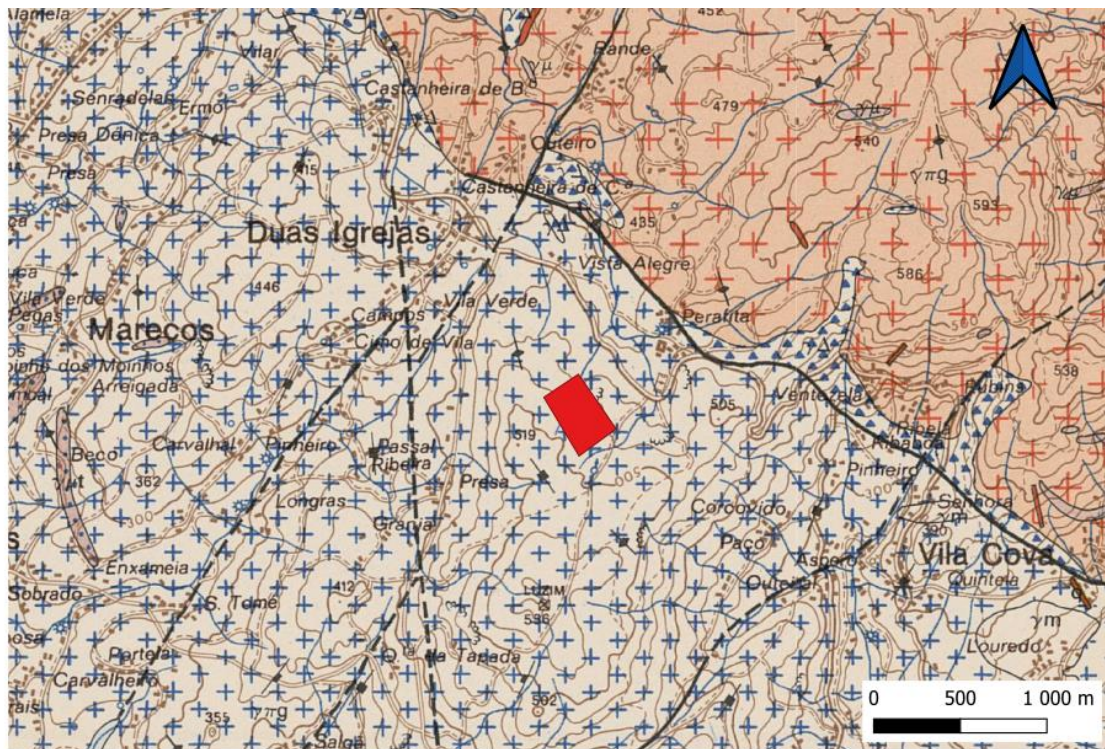


Figura 6 Esquema tectono-estratigráfico à escala 1: 5 000 000 retirado da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1 000 000 (LNEG, 2010).

Os afloramentos rochosos explorados na pedreira da Lega Gorda constituem massas graníticas que se instalaram na ZCI durante a orogenia Varisca. Segundo a Carta Geológica 9-D (Penafiel) à escala 1:50 000, o granito explorado na área de estudo classifica-se como monzonítico porfiroide de duas micas, essencialmente biotítico (Figura 7). Estes granitoides, de orientação preferencial NW-SE (noroeste-sudeste), são hercínicos, tardi a pós-tectónicos e apresentam fenocristais de microclina numa matriz de grão médio composta por plagioclases, quartzo, microclina, biotite e moscovite na sua composição mineralógica (Cândido de Medeiros et al., 1980). Os seus atributos macroscópicos são relevantes para a indústria de rochas ornamentais: cor acinzentada e azulada, grãos de tamanho uniforme e com diáclases bem espaçadas, na sua maioria de orientação N30°E (Cândido de Medeiros et al., 1980). Em zonas de grande densidade de diáclases ou junto à superfície onde a alteração é mais evidente, o granito poderá apresentar uma cor amarela-acastanhada mas ainda reter qualidades ornamentais.



Legenda:

Granitos Hercínicos

Tardi a Pós Tectónicos

Granitos monzoníticos porfiróides, de duas micas, essencialmente biotíticos

Tardi-tectónicos

Granitos porfiróides, de grão grosseiro, com duas micas, essencialmente biotíticos

Pedreira Lega Gorda



Figura 7 Localização da pedreira da Lega Gorda na Carta Geológica 9-D (Penafiel), à escala 1: 50 000.

### 3. Riscos Geológicos – Estabilidade de taludes

De forma a garantir a segurança dos trabalhadores, a preservação do equipamento e do material usados nas explorações de massas minerais e o máximo aproveitamento económico do material rochoso de interesse, é necessária uma monitorização das bancadas e da área circundante durante a exploração. Para isso, é necessário avaliar o potencial de risco geológico associado, nomeadamente a instabilidade de taludes no caso das pedreiras. O estudo da instabilidade dos taludes passa pela avaliação individual dos componentes que constituem o maciço rochoso: o material “rocha” e as descontinuidades que o interseam (Figura 8). As características mecânicas e físicas de cada componente influenciam o comportamento mecânico do maciço, que depende de fatores que irão ser explorados na secção seguinte.

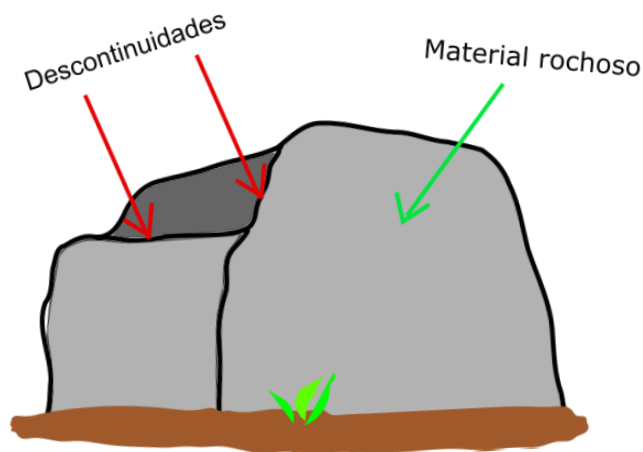


Figura 8 Maciço rochoso constituído pelo material rochoso e pelas descontinuidades.

#### 3.1. Fatores que contribuem para a instabilidade dos taludes

O estudo da instabilidade dos taludes engloba o estudo das condições geométricas, geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas dos mesmos (Dey et al., 2021; González de Vallejo et al., 2002) (Quadro 3), sendo os dois primeiros os de maior importância na probabilidade de rotura de um talude.

Quadro 3 Fatores que influenciam a estabilidade dos taludes. Adaptado de González de Vallejo et al. (2002).

<b>Fatores Geométricos</b>	<b>Fatores Geológicos</b>	<b>Fatores Hidrogeológicos</b>	<b>Fatores Geotécnicos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura</li> <li>• Inclinação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estratificação</li> <li>• Anisotropia</li> <li>• Litologia</li> <li>• Foliação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presença de água subterrânea e superficial</li> <li>• Pluviosidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência</li> <li>• Deformabilidade</li> <li>• Ângulo de atrito</li> <li>• Descontinuidades</li> </ul>

A instabilidade de taludes deve-se ao resultado do somatório de fatores que podem ser classificados como condicionantes (ou passivos) ou desencadeantes (ou ativos) (González de Vallejo et al., 2012). Os fatores geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos pertencem ao primeiro grupo e constituem fatores intrínsecos ao solo ou ao maciço rochoso, enquanto o último grupo engloba fatores externos que alteram as condições de equilíbrio do talude como, por exemplo, cargas estáticas ou dinâmicas, erosão e fatores climáticos (González de Vallejo et al., 2002; Quinta-Ferreira, 2010). O estudo destes fatores é crucial na análise do estado de estabilidade do talude e, caso seja necessário, auxilia a elaboração de um plano de estabilização (González de Vallejo et al., 2012).

### 3.2. Descontinuidades

No estudo da estabilidade de taludes no contexto de exploração de massas minerais, é de salientar a importância do estudo das descontinuidades que intersectam o maciço rochoso. As descontinuidades não só podem promover a rotura dos taludes, como também podem condicionar a exploração de um maciço para produção de rocha ornamental.

Entende-se por descontinuidade qualquer plano de compartimentação no maciço rochoso (González de Vallejo et al., 2002) ou qualquer entidade que interrompa a sua continuidade física (Hudson & Harrison, 1997), coincidindo com planos de alteração, meteorização e de fratura, que facilitam a circulação da água, independentemente da sua génese. No caso de maciços graníticos, as descontinuidades podem, por exemplo, ter origem tectónica, com a formação de falhas, ou também durante o arrefecimento e contração superficial do magma que lhe deu origem. Os planos de descontinuidades condicionam sempre as propriedades físicas e mecânicas do maciço rochoso (González

de Vallejo et al., 2002), como a resistência ao corte, a deformabilidade e a permeabilidade, pelo que é importante a sua identificação e classificação para estudos de riscos geológicos.

### 3.2.1. Tipos de descontinuidades

As descontinuidades podem ser agrupadas em dois tipos (Quadro 4):

- Sistemáticas – descontinuidades que surgem em famílias no maciço rochoso;
- Singulares – descontinuidades isoladas no maciço rochoso.

O estudo das famílias de descontinuidades é essencialmente estatístico, onde são determinadas a média das orientações e as características físicas e mecânicas gerais das descontinuidades, ao passo que, para as descontinuidades singulares, é necessária uma análise individual. Estas últimas podem subordinar as famílias de descontinuidades nos casos em que se mostram mais persistentes e contínuas, como no caso de falhas muito extensas (González de Vallejo et al., 2002).

Quadro 4 Tipos de descontinuidades. Retirado de González de Vallejo et al. (2002).

<b>Descontinuidades</b>	<b>Sistemáticas</b>	<b>Singulares</b>
Planares	-Planos de estratificação -Planos de laminação -Diáclases -Planos de Foliação	-Falhas -Diques -Discordâncias
Lineares	-Interseção de descontinuidades planares -Lineações	- Eixos de dobras

### 3.2.2. Características geométricas e físicas

Segundo a ISRM (*International Society for Rock Mechanics*) (1978), a descrição das famílias de descontinuidades integra um levantamento das seguintes características geométricas e físicas (Figura 9):

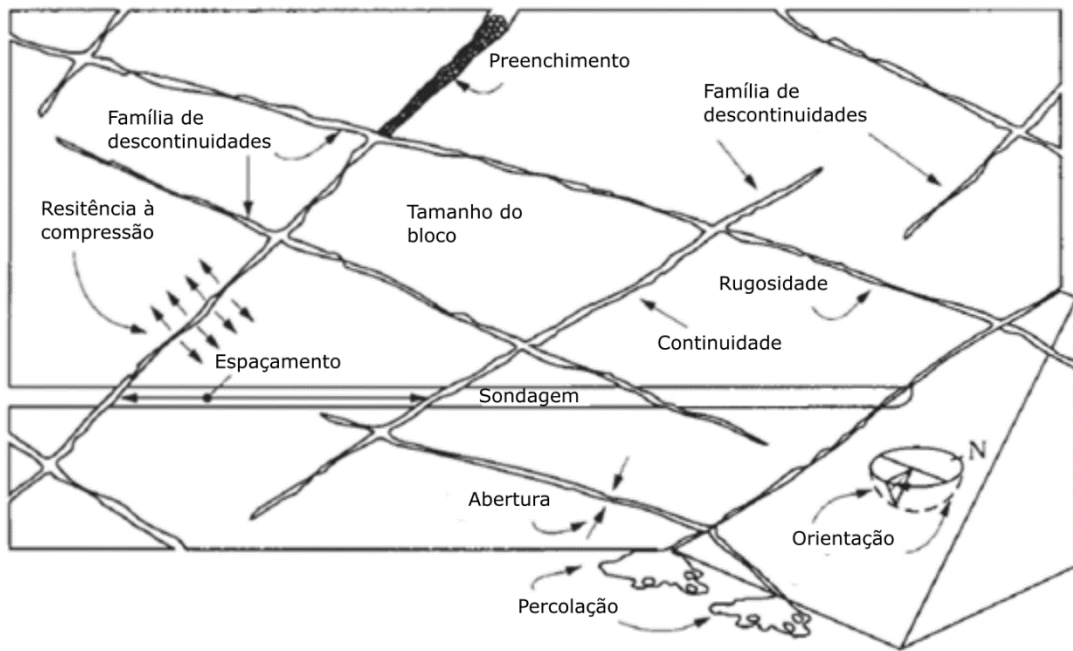


Figura 9 Propriedades geométricas de descontinuidades no maciço rochoso. Retirado e traduzido de Hudson (1989).

- Orientação

A orientação dos planos de descontinuidade é definida pela direção e inclinação ou, então, como sugerido pela ISRM, pelo azimute e mergulho. No caso das famílias de descontinuidades, a orientação média é dada por valores estatísticos representativos (González de Vallejo et al., 2002).

- Espaçamento

O espaçamento consiste na distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes da mesma família, refletindo a intensidade da fracturação num dado volume do maciço rochoso. Como o espaçamento entre descontinuidades da mesma família ou de famílias diferentes pode assumir vários valores, procede-se ao cálculo da média dos valores obtidos ou do valor mais provável, admitindo uma distribuição normal. O espaçamento influencia o tamanho e forma dos blocos e condiciona o comportamento do maciço rochoso: quanto menor o espaçamento, menor será a sua resistência e a sua condutividade hidráulica (González de Vallejo et al., 2002). O Quadro 5 resume a classificação ISRM (1978) das descontinuidades de acordo com o espaçamento.



Quadro 5 Classificação de espaçamentos entre descontinuidades de acordo com a ISRM (1978).

Descrição	Espaçamentos
Extremamente próximas	< 20 mm
Muito próximas	20 - 60 mm
Próximas	60 - 200 mm
Moderadamente afastadas	200 - 600mm
Afastadas	600 – 2000 mm
Muito afastadas	2000 - 6000 mm
Extremamente afastadas	> 6000 mm

• Rugosidade

A rugosidade consiste na presença de irregularidades nas paredes das descontinuidades e condiciona o ângulo de atrito e a resistência ao corte de um plano de descontinuidade: quanto maior a rugosidade, maior a resistência. A rugosidade apresenta diferentes tipos de acordo com a escala: asperezas (mm), irregularidades (cm), ondulações (dm) e curvatura (m). A Figura 10 e o Quadro 6 apresentam a descrição e classificação das descontinuidades segundo esta característica.

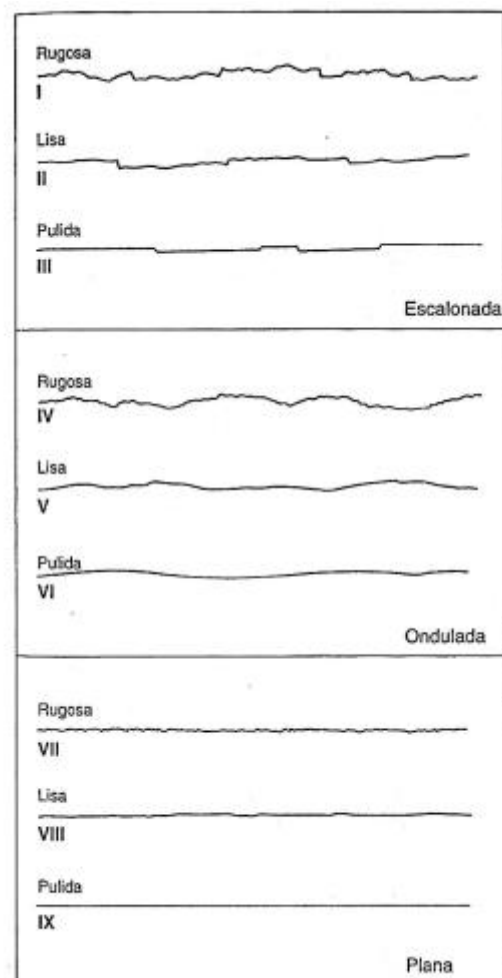


Figura 10 Classificação da rugosidade. Retirado de ISRM (1978).

Quadro 6 Classificação da rugosidade das paredes de descontinuidades segundo a ISRM (1978). † O termo “espelhada” deverá ser usado apenas quando há evidências de deslizamento ao longo das descontinuidades.

Classe	Descrição
I	Rugosa ou irregular, em patamares
II	Lisa, em patamares
III	Espelhada, em patamares
IV	Rugosa ou irregular, ondulada
V	Lisa, ondulada
VI	Espelhada <sup>†</sup> , ondulada
VII	Rugosa (ou irregular), planar
VIII	Lisa, planar
IX	Espelhada, planar

• Abertura

A abertura é a distância perpendicular entre as paredes da descontinuidade (González de Vallejo et al., 2002; Hudson & Harrison, 1997). As aberturas podem-se encontrar fechadas, abertas ou preenchidas (Figura 11). Em paredes planares e paralelas, a abertura é um valor constante (Hudson & Harrison, 1997). No entanto, o valor da abertura é variável na maioria dos casos que ocorrem na natureza, encontrando-se condicionado pela rugosidade e pela obliquidade/perpendicularidade das paredes das descontinuidades (Hudson & Harrison, 1997). Segundo a ISRM (1978), a abertura entre descontinuidades pode ser classificada segundo o Quadro 7.

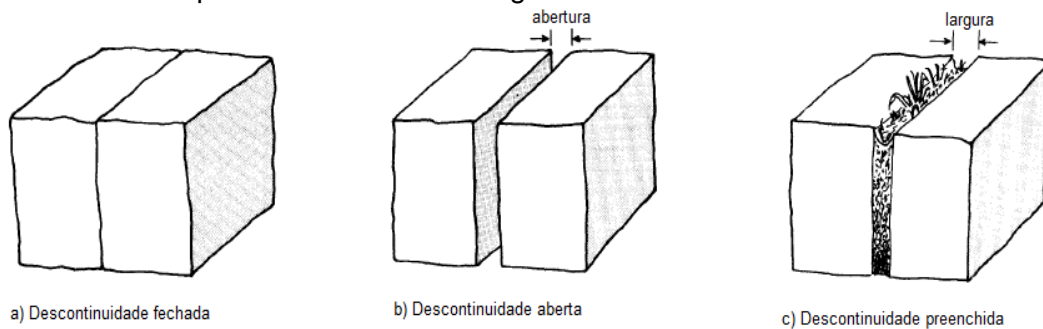


Figura 11 Abertura das descontinuidades. a) Descontinuidade fechada; b) Descontinuidade aberta; c) Descontinuidade preenchida. Adaptado de de ISRM (1978).

Quadro 7 Classificação da abertura entre descontinuidades segundo a ISRM (1978).

<b>Abertura (mm)</b>	<b>Descrição</b>
< 0,1	Muito fechadas
0,1 – 0,25	Fechadas
0,25 – 0,5	Parcialmente fechadas
0,5 – 2,5	Abertas
2,5 – 10	Medianamente largas
>10	Largas
10 – 100	Muito largas
100 – 1000	Extremamente largas
>1000	Cavernosas

• Preenchimento (ou enchimento)

As aberturas podem encontrar-se preenchidas por materiais resistentes, brandos, solúveis, expansivos e/ou soltos cujas propriedades físicas e mecânicas poderão ser diferentes das do material rochoso, influenciando assim a resistência ao corte, deformabilidade, permeabilidade e processo de rotura do maciço (González de Vallejo et al., 2002). Segundo a ISRM (1978), os fatores mais importantes que influenciam o comportamento físico do material de preenchimento são:

- ❖ Mineralogia
- ❖ Granulometria
- ❖ *Over-consolidation Ratio* (OCR)
- ❖ Teor em água e permeabilidade
- ❖ Deslocamentos prévios devido a movimentos de cisalhamento
- ❖ Rugosidade das paredes
- ❖ Largura
- ❖ Fraturação ou esmagamento das paredes

O material rochoso do preenchimento das descontinuidades poderá ser decomposto ou desintegrado, caso se verifique erosão preferencial ao longo dos planos de descontinuidade (ISRM, 1978). Quando as condições da rocha se reduzem às de um solo, diz-se que está decomposta, quando a matriz ainda se encontra intacta mas alguns ou todos os grãos de minerais se encontram decompostos; e desintegrada, quando a rocha é friável; a matriz ainda se mantém intacta e os minerais não estão alterados

(ISRM, 1978). Quanto mais elevada for a espessura do enchimento, menor será a importância da rugosidade das paredes das descontinuidades.

- Continuidade (ou extensão ou persistência)

A continuidade é a extensão do plano de descontinuidade ao longo do maciço rochoso (González de Vallejo et al., 2002; Hudson & Harrison, 1997) e condiciona a sua resistência ao corte e a permeabilidade. A continuidade pode ser classificada conforme o Quadro 8, segundo os valores estipulados pela ISRM (1978).

Quadro 8 Classificação da continuidade de descontinuidades segundo a ISRM (1978).

<b>Descrição</b>	<b>Continuidade (m)</b>
Muito pouco contínua	< 1m
Pouco contínua	1 – 3
Medianamente contínua	3 – 10
Contínua	10 – 20
Muito contínua	>20

- Percolação

A percolação de água nos maciços rochosos resulta principalmente da condução de água através de descontinuidades (permeabilidade secundária), ao contrário das rochas sedimentares, em que a permeabilidade primária poderá ter mais influência que a secundária, onde a água é conduzida pelos poros da rocha (ISRM, 1978). Nas descontinuidades com paredes paralelas, o escoamento de água é unidirecional e, portanto, laminar. Nas descontinuidades com abertura > 2mm, as rugosidades das paredes favorecem regimes turbulentos. A ISRM (1978) estabeleceu uma classificação para maciços rochosos baseada no material de enchimento e no grau de percolação, conforme o Quadro 9.

Quadro 9 Classificação de descontinuidades baseada no material de enchimento e grau de percolação segundo a ISRM (1978).

Grau de percolação	Descrição	
	Descontinuidades sem enchimento	Descontinuidades com enchimento
I	Descontinuidade muito aberta e seca; não parece ocorrer a percolação de água.	Material de preenchimento bastante consolidado e seco. Devido à baixa permeabilidade, não é de esperar ocorrência de escoamento.
II	Descontinuidade seca; sem qualquer evidência de percolação de água.	Material de preenchimento húmido, mas não há ocorrência de água livre.
III	Descontinuidade que, apesar de seca, mostra sinais de passagem de água (p.ex manchas ferruginosas).	Material de preenchimento está molhado com ocasionais gotas de água.
IV	Descontinuidade húmida, embora não haja ocorrência de água livre.	Material de preenchimento com indícios de “lavagem”, evidenciando escoamento de água; recomenda-se a determinação do caudal.
V	Descontinuidades que evidenciam percolação de água (algumas gotas), sem fluxo contínuo.	Material de preenchimento “lavado” pontualmente e observam-se canais de escoamento de água; recomenda-se a determinação do caudal e da pressão da água (em termos qualitativos: alta, média ou baixa).

VI	Descontinuidades com escoamento contínuo de água; recomenda-se a determinação do caudal e da pressão da água (em termos qualitativos: alta, média ou baixa).	Material de preenchimento completamente “lavado” e as pressões de saída de água são muito elevadas, especialmente na superfície exposta; recomenda-se a determinação do caudal e a descrição qualitativa da pressão da água.
----	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

• Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples das paredes das descontinuidades é um parâmetro importante na determinação da resistência ao corte e deformabilidade do maciço rochoso e pode ser estimada a partir da determinação da dureza com o martelo de Schmidt. É um parâmetro que depende do tipo de litologia, da existência ou não de enchimento e o grau de alteração do maciço rochoso (González de Vallejo et al., 2002).

3.2.3. Famílias de descontinuidades

A orientação e o número de famílias de descontinuidades que intersejam o maciço rochoso influencia o seu comportamento mecânico, a sua deformabilidade e os mecanismos de rotura. Para além disto, também determinam o tamanho e a forma dos blocos (Figura 12) (ISRM, 1978; González de Vallejo et al., 2002).

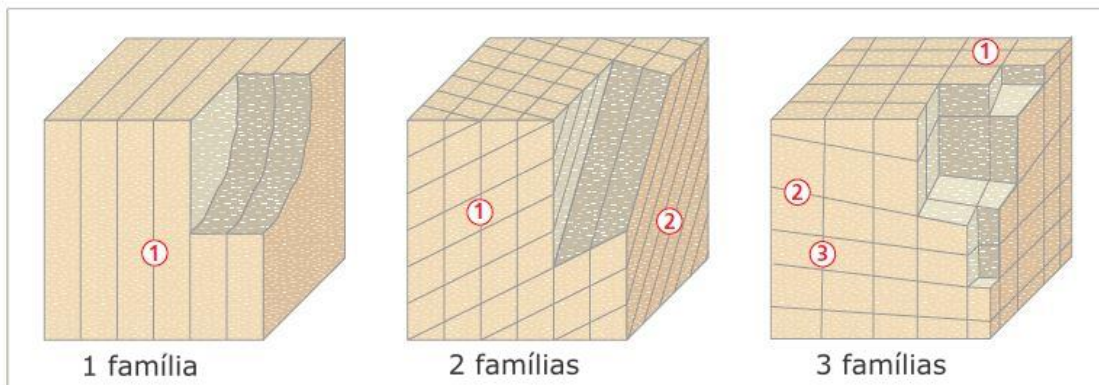


Figura 12 Bloco-diagrama a representar maciços rochosos com diferentes números famílias de descontinuidades. Retirado de González de Vallejo et al., 2002.

O maciço rochoso pode ser classificado consoante o número de famílias de descontinuidades que o interseta, segundo o Quadro 10.

Quadro 10 Classificação do maciço rochoso de acordo com o número de famílias que o intersetam, segundo a ISRM (1978).

Classe	Número de famílias de descontinuidades
I	Maciço/compacto, com algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
II	Uma família de descontinuidades
III	Uma família de descontinuidades e, ainda, algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
IV	Duas famílias de descontinuidades.
V	Duas famílias de descontinuidades e, ainda, algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VI	Três famílias de descontinuidades.
VII	Três famílias de descontinuidades e, ainda, algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VIII	Quatro ou mais famílias de descontinuidades.
IX	Maciço de rocha muito esmagada, com o aspeto idêntico a um solo.

### 3.2.3. Bloco Unitário

O tamanho dos blocos é um indicador importante do comportamento do maciço rochoso, nomeadamente das suas propriedades resistentes e de deformação (González de Vallejo et al., 2002), mas de difícil determinação. As dimensões dos blocos são produto da conjugação dos parâmetros do espaçamento, persistência e orientação dos sistemas de descontinuidades (ISRM, 1978).

O tamanho do bloco unitário pode ser determinado a partir de duas maneiras:

- **Índice do tamanho do bloco,  $I_b$** : representa as dimensões médias dos blocos medidos em afloramento. Para um maciço rochoso intersetado por três famílias de descontinuidades, tem-se:

$$I_b = \frac{(e_1 + e_2 + e_3)}{3} \text{ (González de Vallejo et al., 2002)}$$

em que  $e_1$ ,  $e_2$  e  $e_3$  são os valores médios dos espaçamentos das três principais famílias de descontinuidades do maciço rochoso. Segundo a ISRM (1978), este índice também pode ser estimado ao selecionarem-se visualmente vários tamanhos de blocos e determinar o tamanho médio. Nos casos em que as dimensões do bloco variem muito, por exemplo, desde os milímetros às dezenas de metros, recomenda-se uma precisão mínima de 10%.

- **Índice volumétrico de descontinuidades,  $J_v$ :** representa o número total de descontinuidades que intercetam a unidade de volume ( $m^3$ ) do maciço rochoso. De forma a desconstruir a determinação do índice volumétrico no espaço tridimensional, o valor de  $J_v$  é normalmente determinado para cada família ao contar o número de descontinuidades que intersetam um determinado comprimento, perpendicularmente à direção de cada família.

$$J_v = \sum \frac{\text{número de descontinuidades}}{\text{comprimento médio}} \text{ (González de Vallejo et al., 2002).}$$

O comprimento medido depende do espaçamento entre descontinuidades, variando normalmente entre os 5 e 10m (ISRM, 1978; González de Vallejo et al., 2002). Portanto, para um bloco intersetado por três famílias de descontinuidades ( $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ), seria necessário contabilizar ao longo de três comprimentos ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ) e  $J_v$  seria determinado por

$$J_v = \frac{n^o J_1}{L_1} + \frac{n^o J_2}{L_2} + \frac{n^o J_3}{L_3}$$

O valor deste índice constitui um indicador do tamanho do bloco, segundo o quadro 11.



Quadro 11 Classificação do tamanho do bloco unitário de acordo com o valor de  $J_v$ , segundo a ISRM (1978).

<b>Descrição</b>	<b><math>J_v</math> (descontinuidades/<math>m^3</math>)</b>
Muito grandes	<1
Grandes	1 – 3
Médios	3 – 10
Pequenos	10 – 30
Muito pequenos	>30

O tamanho do bloco unitário também permite, juntamente com a intensidade de fraturação, classificar o tipo de blocos, segundo a ISRM (1978) (Quadro 12 e Figura 13).

Quadro 12 Classificação do maciço rochoso de acordo com a forma e tamanho do bloco unitário segundo a ISRM (1978).

<b>Classe</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
I	Maciço/Compacto	Fraturas muito espaçadas
II	Cúbico	Fraturas equidimensionais
III	Tabular	1 dimensão muito menor
IV	Colunar	1 dimensão muito maior
V	Irregular	Grandes variações
VI	Esmagado	Fraturas muito próximas

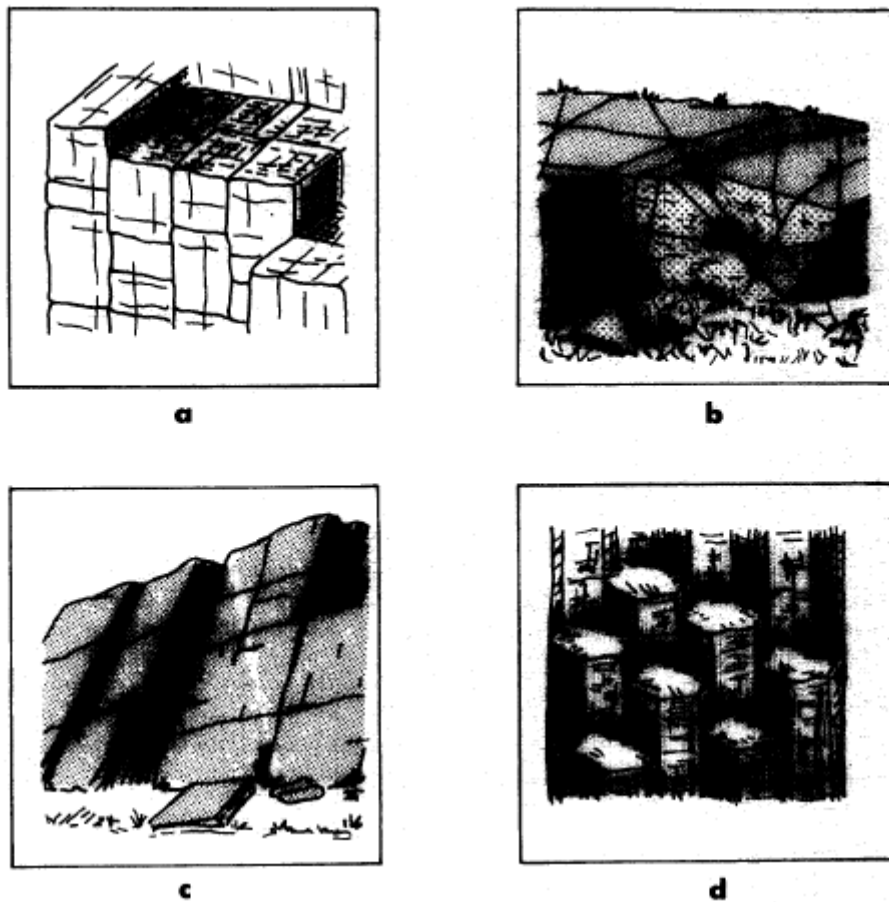


Figura 13 Esboço de maciços rochosos que apresentam blocos (a) maciços/compactos; (b) irregulares; (c) tabulares e (d) colunares. Retirado de ISRM 1978).

### 3.3. Tipos de rotura de taludes

A rotura dos taludes pode assumir diversas formas, atendendo à sua escala, geometria, volume envolvido, distância percorrida e velocidade de movimento do material (Quinta-Ferreira, 2010). Os mecanismos que levam à instabilização de um talude dependem do grau de fracturação, da orientação e número de famílias de descontinuidades presentes no maciço. Apesar deste grande número de fatores e de forma a simplificar a realidade, consideram-se quatro modelos de rotura principais: rotura planar, rotura em cunha, tombamento e rotura circular.

### 3.3.1. Rótura planar

As róturas planares ocorrem ao longo de planos de descontinuidades pré-existentes cuja inclinação ( $\alpha$ ) é inferior à do talude ( $\psi$ ). Para ocorrer movimento, a inclinação do plano de descontinuidade terá de ser superior ao ângulo de atrito interno ( $\varphi$ ).

As róturas planares também podem ser de vários tipos, dependendo da distribuição e das características das famílias de descontinuidades (Figura 14), nomeadamente rótura ao longo de um plano que aflora na face ou na base do talude, com ou sem rachaduras de tensão e róturas ao longo de um plano paralelo à face do talude, por erosão ou perda de resistência na base (González de Vallejo et al., 2002).

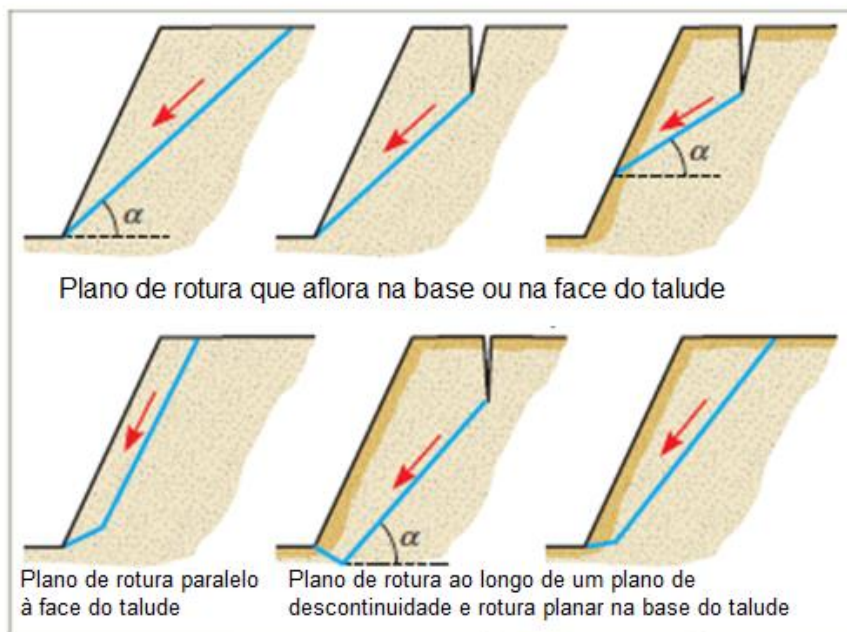


Figura 14 Tipos de rótura planares de taludes. Retirado e traduzido de González de Vallejo et al., 2002.

### 3.3.2. Rótura em cunha

A rótura em cunha corresponde ao deslizamento de blocos tetraédricos definidos pela interseção de dois planos de descontinuidades (Goodman, 1989). Para ocorrer movimento, é necessário que os planos de descontinuidades aflorem na superfície do talude e, tal como na rótura planar, é necessário que  $\psi > \alpha > \varphi$  (Figura 15).

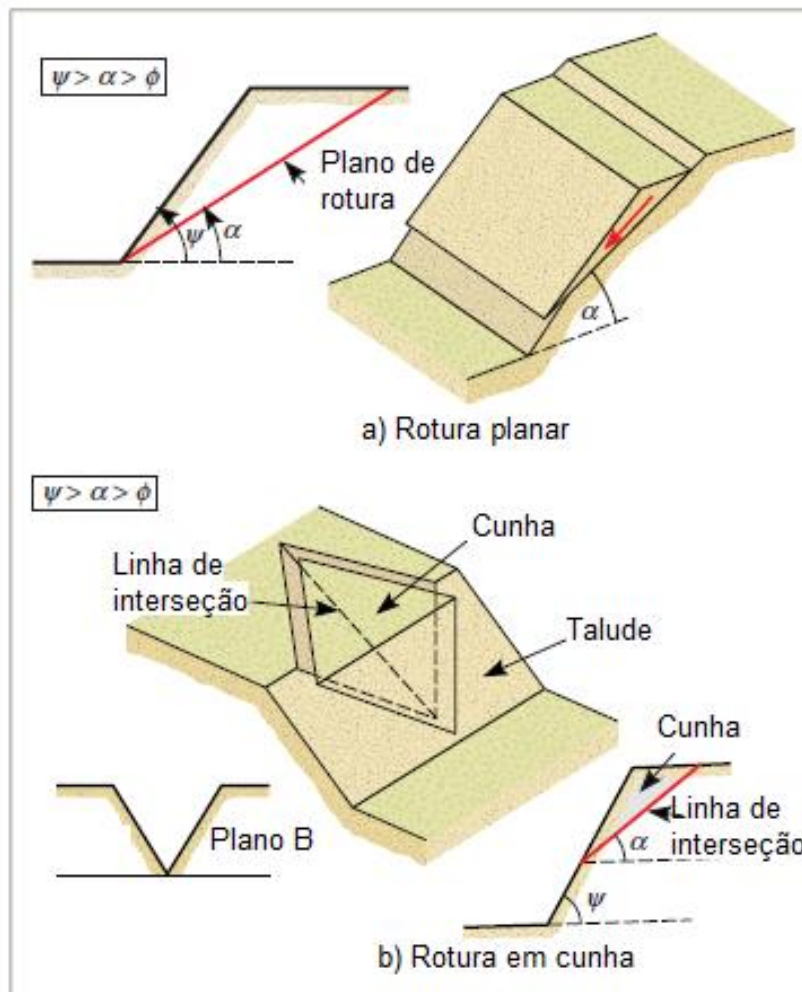


Figura 15 Condições para rotura planar e em cunha. Retirado e traduzido de González de Vallejo et al. (2002).

### 3.3.3. Tombamento (ou queda de blocos ou basculamento)

Em taludes de maciços rochosos onde os estratos apresentam direção (sub)paralela e inclinação oposta à do talude, é possível a ocorrência de queda de blocos. Os blocos surgem da fracturação dos estratos e condicionados por sistemas de descontinuidades perpendiculares entre si (González de Vallejo et al., 2002). A rotura, que pode ocorrer com ou sem flexão dos estratos (Figura 16), implica um movimento de rotação dos blocos e pode ser originada pela altura excessiva do talude, pela existência de forças externas aplicadas nos estratos, incluindo tensões hidrológicas, e/ou pela geometria desfavorável dos estratos (González de Vallejo et al., 2002).



Figura 16 Esquema de taludes em condições favoráveis para o tombamento com e sem flexão dos estratos. Retirado de González de Vallejo et al. (2002).

### 3.3.4. Rotura circular

A rotura circular é mais provável de ocorrer em maciços rochosos pouco competentes, muito alterados ou intensamente fraturados (Figura 17), apresentando um comportamento isotrópico, semelhante a um solo (González de Vallejo et al., 2002).



Figura 17 Rotura circular num afloramento rochoso com grande grau de fraturação. Retirado de González de Vallejo et al. (2002).

### 3.4. Métodos de análise de estabilidade de taludes

Segundo a ISRM (1978), as descontinuidades podem ser representadas em:

- Mapas geológicos: consiste na colocação da simbologia correspondente à orientação dos planos de descontinuidades no local onde se situam no mapa. Contudo, há uma limitação espacial para a representação de um grande número de descontinuidades.
- Blocos diagrama: permitem representar as principais orientações das famílias de descontinuidades com a vantagem de visualiza-las numa perspetiva tridimensional.
- Diagrama de rosetas: representam um grande número de medições de orientação de planos de descontinuidades agrupados em intervalos, normalmente de 10°, em que o resultado final se assemelha a “pétalas” simétricas em relação ao centro da roseta.
- Projeção estereográfica.

A projeção estereográfica permite a visualização e manipulação da geometria tridimensional de linhas e planos em redes de duas dimensões (Figura 18) (Davis and Reynolds, 1996). No entanto, a projeção estereográfica apresenta distorções relativamente às distâncias e relações espaciais, pelo que é necessário entender as diferenças entre as redes mais comuns: a rede de Wulff, que preserva a geometria angular em detrimento do tamanho e da forma, e a rede de Schmidt, que representa com precisão as áreas, mas distorce a informação angular (Aber & Ber, 2007). Esta última é a mais conveniente para representar os planos de descontinuidade, segundo a ISRM (1978). Os planos de descontinuidade podem ser representados por um círculo máximo ou pelo seu polo, sendo este último um ponto perpendicular ao plano. Na eventualidade de uma análise de uma grande quantidade de planos de descontinuidade, seria mais adequado representá-los como polos e aglomerá-los em conjuntos usando o método de contorno de Schmidt (ISRM, 1978). O valor central da maior concentração de polos é o valor representativo da orientação média de uma dada família de descontinuidades.

Com a projeção estereográfica pode-se prever a possibilidade e o tipo de rotura de taludes com o método de Markland (Figura 19), atendendo à relação entre o ângulo de atrito interno do material rochoso e as atitudes dos planos de descontinuidade e do plano de talude. O teste permite identificar concentrações significativas de polos de planos de descontinuidades e estabelecer a possibilidade de rotura (Wyllie & Mah, 2014). Os tipos de rotura que poderão ser mais frequentes na exploração de massas minerais que consiste no objeto de estudo deste trabalho, serão a rotura planar e em cunha.

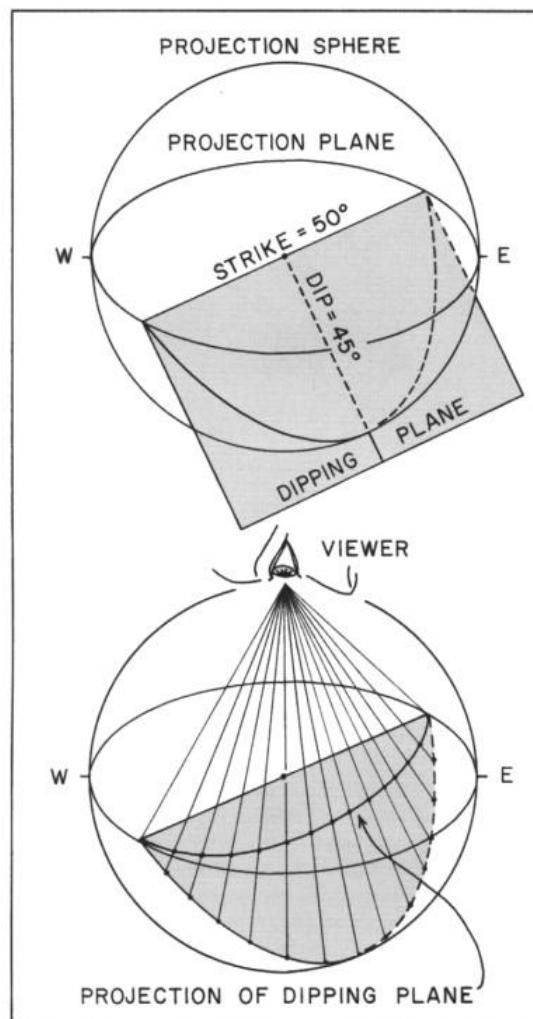


Figura 18 Exemplo de um plano N50°;45°E projetado relativamente ao centro da esfera de projeção (em cima) e projetado horizontalmente (em baixo) Retirado de Aber e Ber (2007).

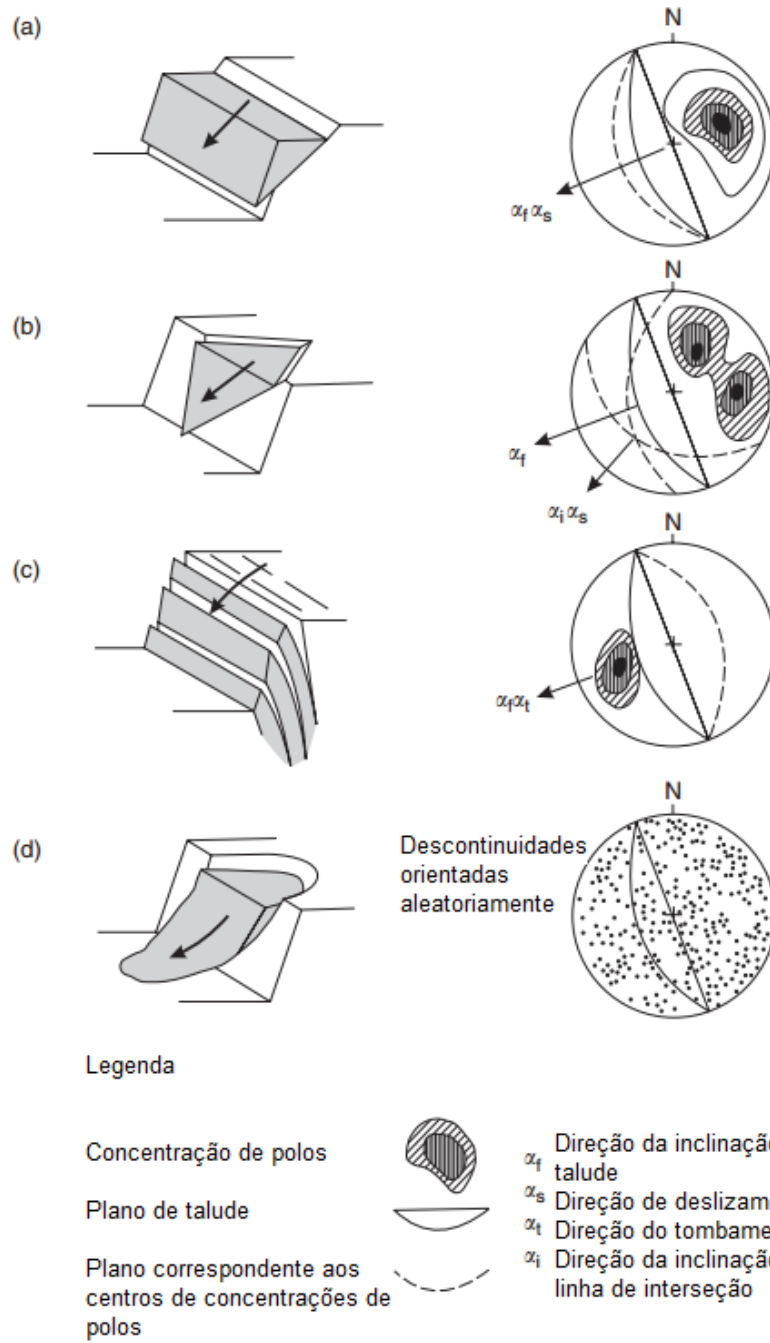
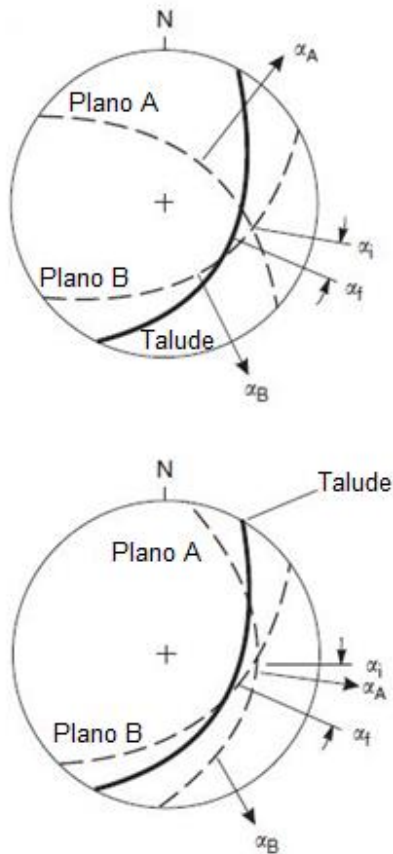


Figura 19 Projeção estereográfica de situação de instabilidade do talude com possibilidade de a) rotura planar; b) rotura em cunha; c) tombamento e c) rotura circular. Retirado e traduzido de Wyllie & Mah (2014).





O método de Markland possibilita a distinção entre o tipo de rotura possível numa interseção entre dois planos de descontinuidades: rotura em cunha, em que o deslizamento ocorre ao longo da direção da linha de interseção dos dois planos de descontinuidade; e um caso particular da rotura em cunha, em que o deslizamento ocorre ao longo de um dos planos de descontinuidade, sendo este último também uma rotura planar (Wyllie & Mah, 2014). A Figura 20 ilustra como se efetua essa distinção: o primeiro caso ocorre quando as inclinações dos dois planos de descontinuidade se encontram fora da área delimitada pelo mergulho da linha de interseção dos dois planos e a inclinação do talude; o segundo caso ocorre quando uma das inclinações de um dos planos se encontra no interior.

Figura 20 Projeção da interseção de dois planos de descontinuidade que resultam no deslizamento ao longo de um dos planos de descontinuidade - rotura planar (em cima) - e ao longo da linha de interseção - rotura em cunha (em baixo). Retirado e traduzido de Wyllie & Mah (2014).

## 4. Detecção Remota

### 4.1. Aeronaves não-tripuladas (VANT)

A aplicação de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT) das quais fazem parte as aeronaves vulgarmente conhecidas como drones, tem vindo a crescer na última década nas áreas científicas, comerciais e civis (Whitehead & Hugenholtz, 2014). De facto, são consideradas atualmente como um instrumento indispensável na investigação científica para a aquisição de informação e criação de modelos tridimensionais de uma área de interesse (Giordan et al., 2020).

Os desenvolvimentos iniciais dos VANT estão fortemente ligados a aplicações militares que, segundo a literatura anglo-saxónica, se enquadram na “regra dos 3 D’s”: “*dull*” (aborrecidas), “*dirty*” (imundas) e “*dangerous*” (perigosas). A utilização de VANT reduziu a probabilidade de erro humano comparado com operação de veículos aéreos tripulados em operações repetitivas e de baixa interação. Também são uma mais-valia em operações que envolvam o contacto com substâncias tóxicas e perigosas para o homem ou outras situações que ponham em risco a sua segurança. Para além das características já mencionadas, os VANT permitem durações de voo longas; repetibilidade dos voos, devido à programação dos mesmos e aos autopilotos, e custos reduzidos comparativamente com as aeronaves tripuladas (Watts et al., 2012). Estas características vantajosas fundamentam a transição da aplicação de drones para diversas áreas científicas e de engenharia (entre as quais a geologia e a geotecnia) pois permitem avaliar e prever remotamente as condições e tendências associadas aos processos naturais e induzidos pelos Homem (Whitehead & Hugenholtz, 2014), incluindo o estudo de riscos geológicos. A modelação tridimensional resultante do processamento da informação recolhida com VANT sobre uma área de interesse geológico permite analisar as características dos afloramentos rochosos e das estruturas geológicas, com as vantagens de diminuir o tempo de aquisição de dados comparado com uma saída de campo tradicional e de contornar a inacessibilidade que algumas áreas possam apresentar.

#### 4.1.1. Componentes dos VANT

Os componentes principais dos VANT podem ser classificados de acordo com três categorias (Giordan et al., 2020):

- Plataforma aérea, que engloba a estrutura do drone, sistemas de navegação e de energia, carga útil.
- GCS (*Ground Control Station*) que permite a operação remota da aeronave.
- Sistema de comunicação, que efetua a troca informação entre os outros dois componentes.

Na maior parte das aplicações em deteção remota, o sistema de navegação permite voos autónomos controlados por um autopiloto a bordo (Whitehead & Hugenholtz, 2014; Giordan et al., 2020), que adapta o trajeto consoante a informação recebida acerca da altitude e da posição da aeronave, para o seguimento de uma missão pré-definida. No entanto, o operador pode tomar o controlo da navegação quando achar necessário. Aliás, o operador é essencial para asseverar a segurança do voo das aeronaves não tripuladas, sendo parte da sua função monitorizar o voo e potenciais perigos e obstruções.

A maioria das VANT também possui um sistema de navegação inercial que controla a atitude do voo, conferindo-lhe assim mais estabilidade (Giordan et al., 2020), e possui também um sistema de geolocalização, com conexão a um sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Este sistema consiste em constelações de satélites que transmitem sinais de rádio com informação da sua posição, que permitem determinar a posição do recetor GNSS. Exemplos de GNSS incluem os sistemas de navegação europeu Galileo, o sistema dos EUA NAVSTAR GPS (*Global Positioning System*), o sistema russo GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) e o Sistema de Navegação por Satélite Beidou da China. A precisão padrão do posicionamento absoluto é da ordem dos metros. Essa precisão pode ser muito melhorada fazendo um posicionamento relativo a estações já existentes. Em Portugal, existe uma Rede Nacional de Estações Permanente GNSS (ReNEP GNSS) que constitui um serviço público de geoposicionamento fornecido pela Direção-Geral do Território (DGT) e é composta por 47 estações GPS/GNSS distribuídas por Portugal Continental e Insular (Figura 21), disponibilizando aos utilizadores com equipamentos recetores as suas coordenadas geográficas em tempo-real com precisão sub-decimétrica, utilizando a técnica corretora RTK (*Real Time Kinematic*) (ReNEP, 2022).

Esta correção é usada para melhorar a precisão do sinal de um recetor GNSS, à escala centimétrica.

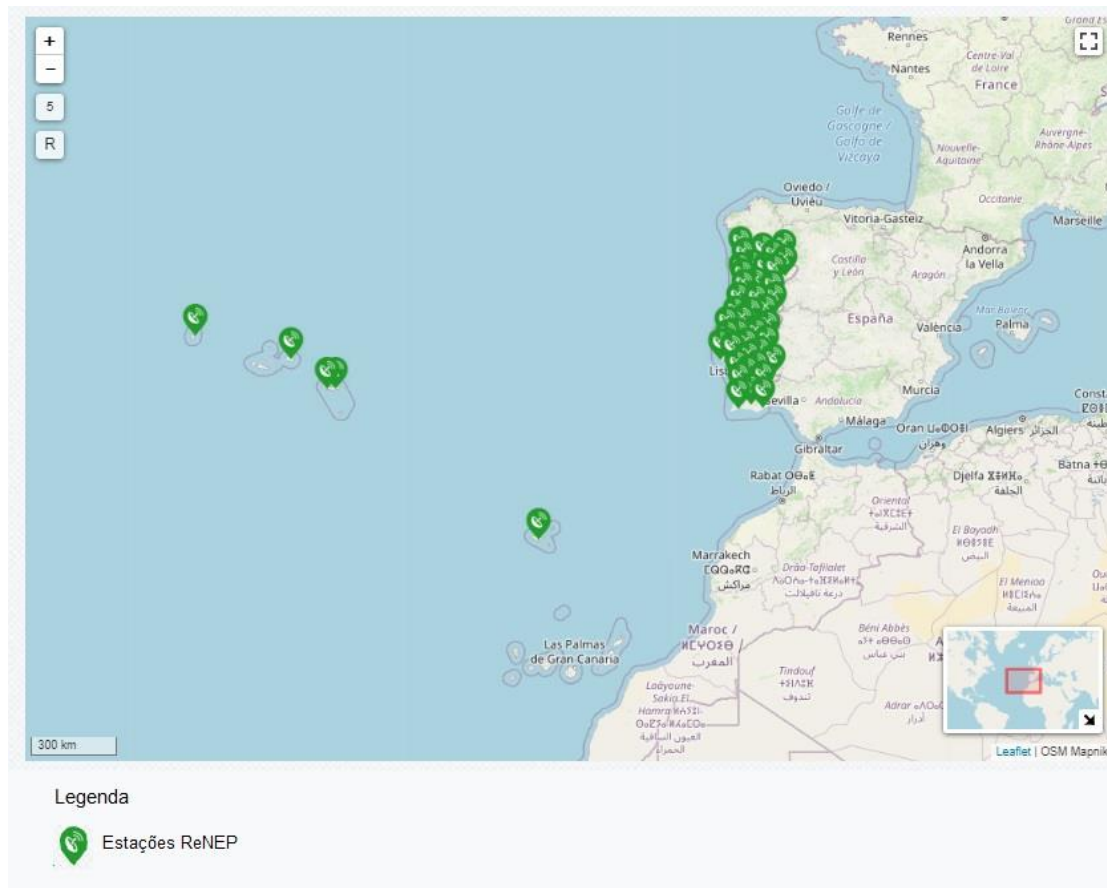


Figura 21 Estações ReNEP GNSS distribuídas ao longo de Portugal Continental e Insular. Retirado de <<https://renep.dgterritorio.gov.pt/estacoes>>, acessido em 10 de junho de 2022.

Em relação à tipologia dos VANT frequentemente comercializados, pode-se dividir em duas categorias conforme o tipo das asas, que podem ser do tipo fixo ou rotatório. O primeiro tipo atinge maiores velocidades e maior alcance, sendo lançados à mão ou com uma catapulta e aterram tanto com ou sem um mecanismo de aterragem, como um paraquedas ou uma rede de retardação (Whitehead & Hugenholtz, 2014). Para além disso, são adequados para uma recolha de informação a partir de sensores numa posição fixa e em áreas de grande extensão (Fernández-Lozano & Gutierrez-Alonso, 2016). Os drones com asas rotatórias, em geral, possuem durações de voo e autonomia menores. No entanto, proporcionam grande manobrabilidade durante o voo, facultando resultados detalhados sobre áreas relativamente pequenas, e possibilitam a orientação dos sensores em qualquer direção (Fernández-Lozano & Gutierrez-Alonso, 2016). Para além disso, possuem também a vantagem de aterrar num pequeno espaço. No

caso de levantamentos em pedreiras, como é o caso deste trabalho, a aterragem de VANT de asa fixa pode não ser possível.

Os componentes dos VANT que permitem efetivamente recolher informação sobre a área de estudo consistem em sistemas de aquisição ou sensores que podem ser acoplados à estrutura do drone. Geralmente, os sensores mais frequentemente utilizados consistem em (Giordan et al., 2020):

- Câmaras digitais
- Câmaras térmicas
- Câmaras multi ou hiperespetrais
- LiDAR

#### 4.1.2. Classes de VANT

Segundo a ANAC (Autoridade Nacional da Aviação Civil) (2022), os VANT apresentam duas categorias: aberta (OPEN) e específica (SPEC). A primeira é subdividida em três subcategorias de operações de aeronaves não-tripuladas (A1, A2 e A3) consideradas de baixo risco, segundo a regulamentação. Pertencem a estas subcategorias as aeronaves não tripuladas que satisfazem o seguinte conjunto de condições (ANAC, 2022) (Figura 22):

- Os VANT têm de ter uma massa máxima à descolagem inferior a 25kg.
- O piloto remoto terá de assegurar que o drone não sobrevoa ajuntamentos de pessoas e é mantido a uma distância de segurança das mesmas.
- O piloto remoto terá de manter o drone em VLOS (*Visual Line of Sight*), na maior parte dos casos.
- Durante o voo, a aeronave não poderá exceder os 120 m de altitude a partir do ponto mais próximo da superfície da terra, salvo quando for necessário sobrevoar acima de um obstáculo com mais de 105 m de comprimento; nesse caso, a altitude do voo poderá atingir os 15 m acima do objeto de obstrução.

- A aeronave não pode transportar mercadorias perigosas nem deixar cair qualquer material



Figura 22 Operação de Aeronaves Não-tripuladas da categoria Aberta segundo as condições impostas pela ANAC (2022). Retirado de <[https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria\\_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx](https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx)>, acedido em 04 de maio de 2022.

A categoria específica engloba aeronaves não tripuladas ou operações em que não seja cumprida uma ou mais condições de operação da categoria aberta mencionadas anteriormente.

## 4.2. Fotogrametria

Entende-se por fotogrametria a obtenção de informação geométrica de objetos em imagens digitais ou analógicas (Konecny, 2014), recorrendo à estereoscopia (Hodgets et al., 2004).

O princípio fundamental da fotogrametria consiste na triangulação aérea (Sajinkumar & Oomen, 2018), que determina as coordenadas tridimensionais (x,y,z) de um objeto a partir de duas imagens, sendo estas captadas em posições diferentes (Linder, 2016) (Figura 23). Para isso, é necessária a georreferenciação das imagens obtidas, que pode ser efetuada a partir da conexão ao GNSS ou, então, com pontos de controlo terrestres ou GCP (“Ground Control Points”). Estes últimos consistem em pontos sinalizados no campo e facilmente detetados nas imagens, em que as suas coordenadas são determinadas com recurso a um equipamento recetor de sinal GPS.

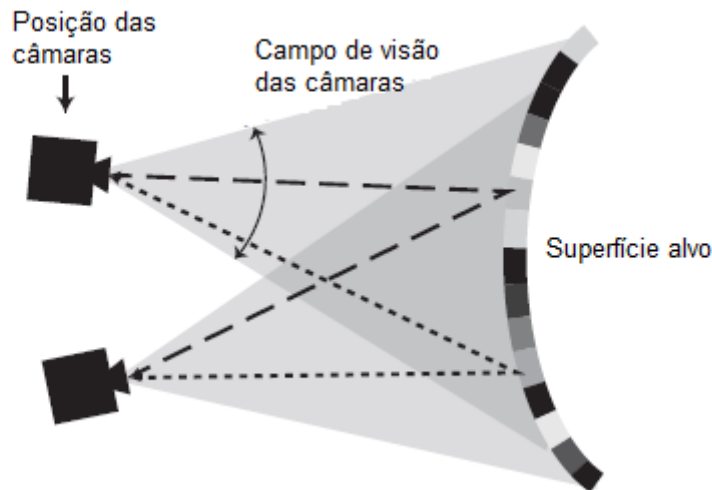


Figura 23 Esquema da posição de duas capturas de imagens a partir de duas posições diferentes que permitem o posicionamento tridimensional de um objeto que se encontra na área de interseção. Retirado e traduzido de Bemis et al. (2014).

Para a determinação das propriedades geométricas dos objetos, é necessário efetuar a correspondência de imagens, segundo pontos que representam o mesmo objeto em imagens adjacentes (*tie points*), em conformidade com as condições mínimas de 75% de sobreposição frontal das imagens e de 60% de sobreposição lateral, para a generalidade dos casos.

A partir do processamento das imagens obtidas, é possível obter uma nuvem de pontos que, por sua vez, dá origem a modelos topográficos digitais 3-D, que podem ser transformados em MDT (Modelos Digitais do Terreno) e MDS (Modelos Digitais de Superfície), sendo estes facilmente manipulados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Walsh et al., 2018).

#### 4.2.1. Classes de fotogrametria

Consoante o modo da recolha dos dados, é possível dividir a fotogrametria nas seguintes classes (Sajinkumar & Oomen, 2018):

- **Fotogrametria aérea:** Múltiplas fotografias sobrepostas da superfície são captadas através de uma câmara montada vertical (direção nadiral) ou obliquamente em relação à direção horizontal, numa aeronave não-tripulada (VANT/drone) ou, também, em aeronaves tripuladas. Estas últimas requerem mais tempo de aquisição de dados e um custo maior de operação, para além de

que a resolução espacial das imagens fornecidas é inferior comparada com a resolução espacial das imagens obtidas com VANT (Agüera-Veja et al., 2017).

- **Fotogrametria terrestre:** As imagens são captadas por uma câmara que pode estar montada num tripé, num poste ou apoiada manualmente.

Este trabalho recorreu à fotogrametria aérea para a recolha de imagens da pedreira Lega Gorda, com uma câmara digital acoplada num drone. Isto permitiu obter informação em sítios inacessíveis e de toda a extensão da área da exploração mais rapidamente, comparativamente com a fotogrametria terrestre.

Também é possível dividir a fotogrametria em classes segundo a utilização dos dados (Sajinkumar & Oomen, 2018):

- **Fotogrametria métrica:** São efetuadas medições e processamentos precisos de imagens do tamanho, forma e posição dos objetos captadas nas fotografias. Para além disso, também permite determinar localizações relativas, a área e o volume de objetos.
- **Fotogrametria Interpretativa:** Permite atribuir valores a características distinguíveis numa fotografia, como a forma, tamanho, sombra e padrões do objeto.

### 4.3. LiDAR

*Laser Scanning* ou LiDAR (*Light Detection and Ranging*) consiste num sistema de deteção remota ativo, i.e., possui a sua própria fonte transmissora de energia, medindo o retorno da mesma, resultante da interação com o objeto de estudo.

O fundamento da tecnologia LiDAR baseia-se na determinação da distância de um objeto, ao medir o intervalo de tempo desde a transmissão de um feixe laser até este ser refletido pelo objeto e registado pelo sensor. Os lasers podem ser transmitidos tanto como ondas contínuas como ondas discretas (em pulsos) (Figura 24). Os sistemas LiDAR pulsados medem o tempo desde a emissão de um pulso de luz curto até ser refletido pelo objeto e registado no recetor (Dong & Chen 2018).



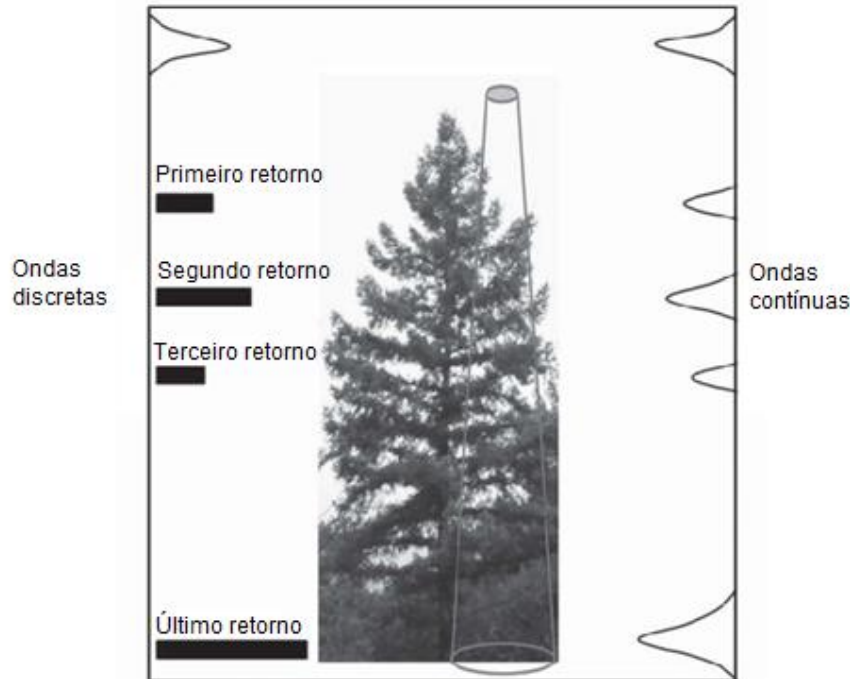


Figura 24 Ondas contínuas e discretas medidas por um sistema aéreo LiDAR. Retirado e traduzido de Dong & Chen (2018).

#### 4.3.1. Classes de LiDAR

Os métodos mais comuns de recolha de dados LiDAR dividem-se em (Telling et al., 2017):

- **Terrestrial Laser Scanning (TLS):** Recolha de dados em aparelhos estáticos e assentes numa plataforma fixa na superfície ou em aparelhos portáteis de mão;
- **Mobile Laser Scanning (MLS):** Recolha de dados numa plataforma móvel na superfície;
- **Airborne Laser Scanning (ALS):** Recolha de dados a partir de uma aeronave tripulada ou não-tripulada.

Neste trabalho, foi usado um sistema de LiDAR do tipo ALS com uma aeronave não-tripulada devido às dimensões da área de estudo, e assim possibilitou também uma comparação mais rigorosa e justa com os resultados obtidos por fotogrametria. As naves não-tripuladas atuais também permitem o levantamento de dados em campos de visão não-nadiraes, i.e., o ângulo entre o raio laser incidente e a superfície são inferiores a 90°. Isto impede uma distribuição fraca dos dados e que ocorram dados vazios, principalmente nas faces verticais das bancadas, e, conseqüentemente, evita a perda

na qualidade visual do modelo da superfície e que iria dificultar a interpretação dos dados (Buckley et al., 2008).

O levantamento com LiDAR envolve o registo dos valores de retorno numa matriz ou nuvem de pontos. Os pontos da nuvem de pontos podem ser georreferenciados da mesma forma que os pontos obtidos por fotogrametria: através da colocação de GCPs no terreno ou da conexão com o sistema GNSS de precisão a bordo do VANT. Tal como na fotogrametria, a nuvem de pontos obtida por LiDAR pode gerar modelos topográficos tridimensionais.

Antes do levantamento é importante notar a presença de obstruções entre o objeto de estudo e o sensor, pois poderá implicar o *scanning* de pontos a partir de várias posições e orientações de forma a eliminar ou reduzir ao máximo os dados vazios na nuvem de pontos final (Telling et al., 2017). Todavia, o número de localizações e posições possíveis está condicionado pela acessibilidade e segurança do terreno (Telling et al., 2017).

## 5. Metodologia

### 5.1. Área de estudo

A zona de estudo deste trabalho coincide com a área de exploração da pedreira da Lega Gorda (Figura 25), que se localiza aproximadamente nas coordenadas 41.177672°; - 8.260726°. A área estudada foi delimitada por um polígono de cerca de 13ha no Google Earth, de onde também foram retiradas as cotas dos vértices e de um ponto mais central (Figura 26). Neste trabalho foram usadas as técnicas de deteção remota da fotogrametria aérea e LiDAR com recursos a drones no estudo de riscos geológicos associados a esta exploração.



Figura 25 Panorama geral da pedreira da Lega Gorda no dia da primeira visita (27 de maio de 2022).

O primeiro levantamento de fotogrametria e de LiDAR foi realizado no dia 27 de maio de 2022 e, após um mês, no dia 27 e junho de 2022, foi realizado o segundo voo com recurso às mesmas metodologias para efeitos de estudo da volumetria. Porém, os resultados obtidos por fotogrametria no segundo voo não foram os mais satisfatórios: a interpretação das características estruturais do maciço granítico revelou-se mais difícil neste voo comparado com o primeiro, devido à diferença das condições de exposição solar. Por este motivo, foi realizado outro levantamento no dia 1 de julho.



Figura 26 Área delimitada correspondente à zona de estudo, abrangendo a zona de exploração e zona de defesa da pedreira da Lega Gorda.

## 5.2. Fotogrametria aérea

O método da fotogrametria aérea apoiou-se na utilização de drones para sobrevoar a zona de estudo. A preparação e o planeamento do voo são essenciais para garantir a qualidade dos dados obtidos: envolve ter em consideração a sua altitude e, conforme a área de estudo, determinar o número de fotografias e a área que vai ser coberta em cada imagem. Para além disto, também é importante antecipar condicionantes para o voo, tais como, por exemplo, a existência de vegetação alta e de torres e cabos de alta tensão e as condições climatéricas.

O GSD (*Ground Sample Distance*) consiste na distância medida no solo entre centros de dois píxeis consecutivos. Este é um fator que também foi levado em conta antes do voo para se ajustarem a altitude e as especificações da camara para o projeto. Quanto maior o valor de GSD na imagem, menor a sua resolução espacial e, portanto, informação a menor escala pode ser perdida. A determinação do valor do GSD implica conjugar a altitude, autonomia, resolução e área das imagens e o tempo de processamento (Seifert et al., 2019). Para projetos em que é necessário visualizar a área com grande detalhe, é recomendado um valor GSD baixo e, portanto, voar a altitudes mais baixas. Porém, em voos mais baixos é necessário captar mais imagens

por unidade de área. Para projetos que cobrem áreas muito extensas e que não necessitem de resultados detalhados, o valor GSD poderá ser mais alto, resultando numa altitude do voo mais elevada que reduz o tempo de aquisição e, conseqüentemente, a utilização da bateria e o tempo de processamento das imagens (PIX4D, 2022).

Após o processo de planeamento do voo e da captura das imagens, foram geradas nuvens de pontos que, por sua vez, deram origem a malhas, que podem incluir Modelos Digitais do Terreno (DTM), a partir dos quais é possível gerar imagens ortorretificadas: imagens que sofreram correções relativamente à distorção das lentes, à inclinação da câmara, perspectiva, relevo topográfico e curvatura da Terra. As fotografias ortorretificadas apresentam escala constante, ou seja, os pontos nas imagens estão representados nas suas posições reais em relação ao solo, permitindo assim a medição exata de distâncias, ângulos e áreas. O fluxo de trabalho do método da fotogrametria aérea utilizado neste trabalho pode ser resumido tal como mostra o esquema da Figura 27.

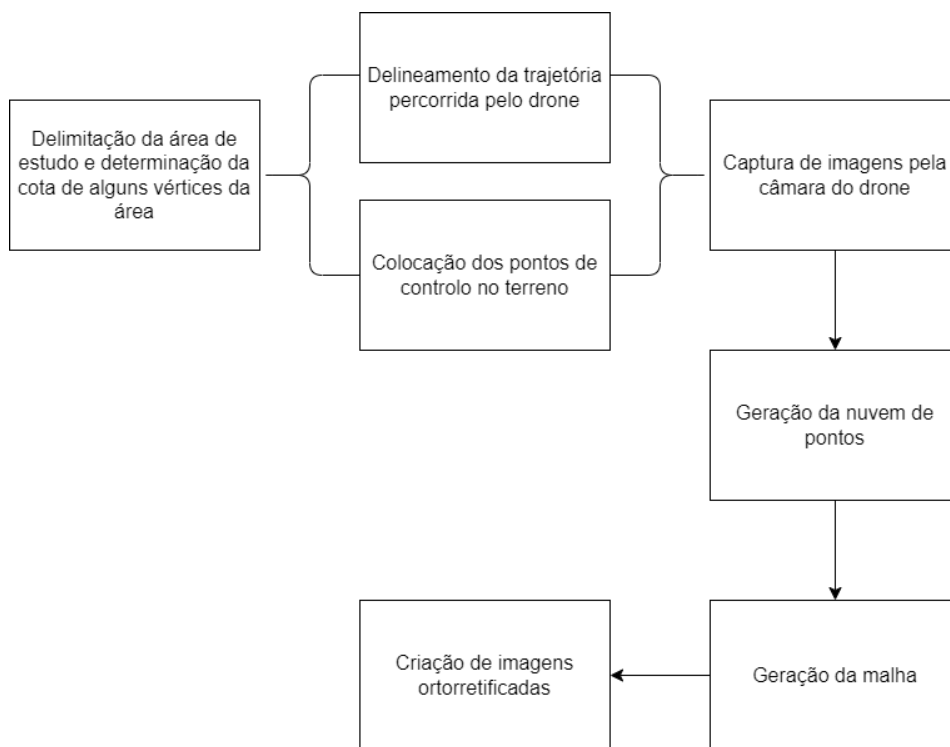


Figura 27 Fluxo de trabalho utilizado para a fotogrametria aérea.

5.2.1. 1º voo - 27 de maio de 2022

Para a modelação tridimensional da área de estudo correspondente à pedreira da Lega Gorda, foram recolhidas fotografias aéreas com o sensor CMOS incorporado na câmara digital do VANT *Phantom 4*, da marca *DJI* (Figura 28).



Figura 28 Drone DJI Phantom 4 com sensor CMOS.

O primeiro voo foi planeado com recurso à aplicação Android *3D Survey Pilot* (Figura 29), em que se delimitou a área de estudo, com cerca de 13,5ha, e o trajeto dos dois voos programados, perpendiculares entre si, segundo as mesmas especificações: sobreposição frontal e lateral de 70%, velocidade máxima do drone de 8m/s, ângulo da câmara de 75°, altitude do voo a 60 m e valor do GSD igual a 1,63 cm/px.

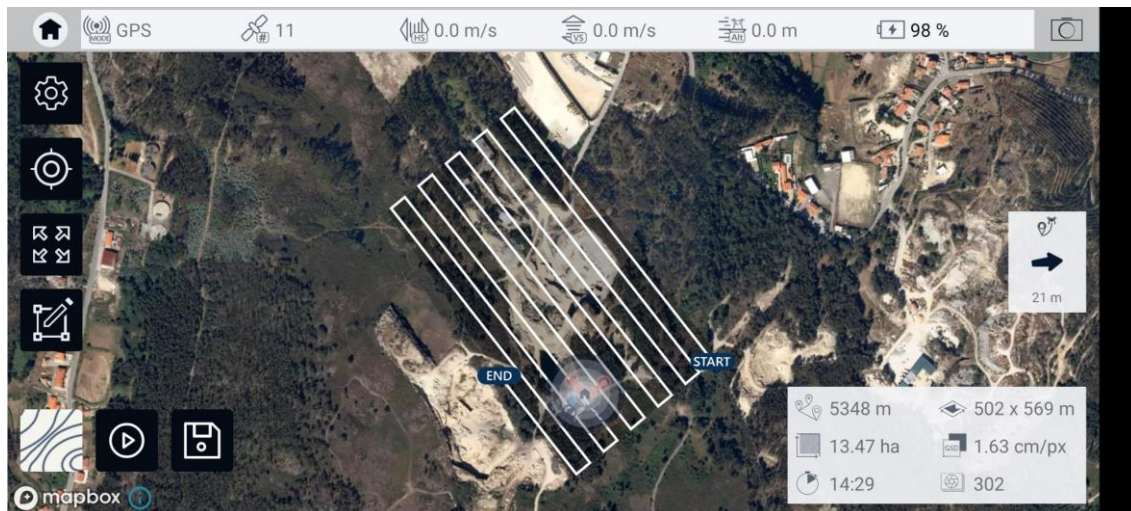


Figura 29 Interface da aplicação *3D Survey Pilot* para a determinação das especificações do voo do drone *Dji Phantom 4*.

O equipamento utilizado para o levantamento fotogramétrico, para além do drone *Phantom 4*, englobou uma antena GPS *Stonex S10A* com ligação à rede GNSS e uma estação total *Geomax Zoom 50* (Figura 30).

No campo, foram colocados 11 pontos de controlo (Figura 30) para a georreferenciação das imagens, nos quais foi centrada a antena GPS com 2 metros de altura para a obtenção das coordenadas relativas à sua latitude, longitude e altitude.



Figura 30 Colocação dos pontos de controlo no campo (à esquerda) e medição das coordenadas no ponto de controlo com a antena GPS (à direita).

Com a estação total, foram determinadas cotas de alguns vértices e de famílias de descontinuidades presentes nas bancadas (Figura 31), de modo a confirmar posteriormente a precisão dos resultados obtidos durante a sua análise.



Figura 31 Obtenção das coordenadas de pontos dos vértices e de descontinuidades das bancadas da pedreira da Lega Gorda.

### 5.2.2. 2º voo - 27 de junho de 2022

O segundo voo foi realizado com o drone *Phantom 4 RTK*, da marca *DJI* (Figura 32) e sem colocação de pontos de controlo. Desta vez, a georreferenciação foi baseada na ligação ao sistema GNSS da RENEPA com a técnica corretora RTK, sendo a estação localizada em Baião a mais próxima da localização da pedreira.



Figura 32 Drone DJI Phantom 4 RTK.

O controlo remoto do drone possui um monitor com a aplicação DJI GS RTK integrada, que permitiu traçar a trajetória do voo em voo cruzado e em direção não-nadiral (60º) e estabelecer uma altitude de voo de 60m.

### 5.2.3. 3º voo – 1 de julho de 2022

Com o objetivo de acompanhar as quantidades de remoção da rocha granítica explorada e de comparar os resultados obtidos a partir da georreferenciação com o sistema GNSS com correção RTK e com pontos de controlo, foi realizado outro voo no dia 1 de julho de 2022, por volta das 15h, também em condições meteorológicas favoráveis.



Para tal, foi usado o mesmo drone que no levantamento anterior, o *DJI Phantom 4 RTK* (Figura 33) e fez-se uso da mesma aplicação do comando remoto do VANT, *DJI GS RTK*, no traçado da trajetória cruzada e na definição de parâmetros como: altitude do voo de 60m, valor do GSD de 1,64cm/pixel, inclinação do sensor de 60° e uma sobreposição vertical e horizontal das imagens de 80%. Para além da conexão com o sistema GNSS com correção RTK, foram distribuídos 5 pontos de controlo ao longo da área de exploração (Figura 34).



Figura 33 Drone DJI Phantom 4 RTK.



Figura 34 Colocação de um dos cinco pontos de controlo.

### 5.3. LiDAR aéreo

A modelação tridimensional da pedreira em estudo, para além de se basear na fotogrametria aérea, também se apoiou em dados recolhidos com um sensor LiDAR a bordo de um VANT. O fluxo de trabalho deste método é semelhante ao da fotogrametria utilizado neste trabalho e pode ser resumido tal como mostra o esquema da Figura 35.

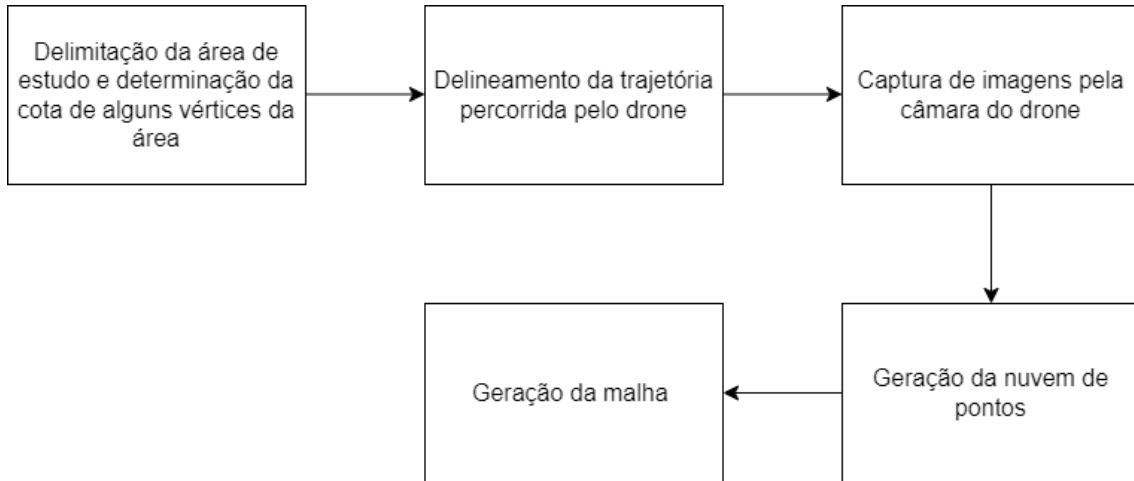


Figura 35 Fluxo de trabalho utilizado para LiDAR.

Antes de se ter dado início ao voo e à recolha de dados, foi efetuado o planeamento do voo, que tem em consideração a sobreposição das linhas de voo individuais de modo a assegurar que não ocorram conjuntos vazios de dados. Também teve de se levar em conta as áreas de vegetação densa ou de terrenos íngremes, que normalmente requerem maior densidade de pulsos por unidade de área (Lillesand et al., 2015). A densidade, entendida como a distância entre pulsos, é dependente da altitude e da velocidade da aeronave e do ângulo e da taxa de *scanning* (Lillesand et al., 2015).

Ambos os voos realizados nos dias 27 de maio e 27 de junho de 2022 foram efetuados usando o drone *Matrice 300 RTK*, da marca *DJI*, com um sensor LiDAR *Zenmuse L1*, também da mesma marca, acoplado (Figura 36).



Figura 36 Drone *DJI Matrice 300 RTK* e comando remoto do drone, no canto esquerdo.

No caso do levantamento LiDAR, não se fez uso de pontos de controlo para a georreferenciação, mas sim do sistema GNSS da RENE, utilizando a técnica corretora RTK. Por inoperacionalidade da estação BAIÃO, usou-se a segunda estação mais próxima da localização da pedreira, GAIA.

### 5.3.1. 1º voo – 27 de maio de 2022

A área de estudo foi definida no comando remoto do drone com a aplicação *DJI Pilot* (Figura 37). Para o primeiro voo, na mesma aplicação, foram definidos os seguintes critérios para a recolha de dados, que se realizou na direção nadiral: sobreposição lateral de 20%, ângulo da rota a 323°, velocidade máxima do drone de 4 m/s, altitude do voo a 100 m e valor de GSD igual a 2,73 cm/px.



Figura 37 Interface da aplicação DJI Pilot no controlo remoto do drone DJI Matrice 300 RTK.

### 5.3.2. 2º voo – 27 de junho de 2022

Devido ao voo do primeiro dia ter sido efetuado, essencialmente, numa única direção horizontal e a captura de dados ter sido realizada na direção nadiral, foram delineadas para o segundo voo quatro trajetórias diferentes, oblíquas entre si e em direção não-nadiral (45°), com o intuito de comparar a qualidade dos resultados obtidos em ambos os levantamentos. Este voo foi efetuado segundo as seguintes especificações: a 100m de altitude, velocidade do drone de 6,4 m/s e com um GSD de valor 2,73 cm/px.

## 5.4. Aplicações informáticas utilizadas

Relativamente aos dados do dia 27 de maio de 2022, foram geradas nuvens de pontos recorrendo às aplicações *DJI Terra*, que processa os dados recolhidos pelo sensor *Zenmuse L1*, e ao *3DSurvey* para os dados obtidos por LiDAR e por fotogrametria, respetivamente.

Os dados obtidos em 27 de junho de 2022 por fotogrametria foram processados não só no *3Dsurvey* como também no *AGISOFT Metashape*, de modo a comparar a qualidade visual e a precisão da informação contida nas nuvens de pontos. As nuvens de pontos LiDAR também foram geradas no *DJI Terra* tal como no primeiro caso.

Os dados obtidos por fotogrametria no dia 1 de julho de 2022, foram processados no *3Dsurvey*.

A análise da nuvem de pontos, para além das aplicações mencionadas, serviu-se da aplicação *CloudCompare*, que permite medir as atitudes dos planos de descontinuidade que intersejam o maciço rochoso. Para além disso, retorna a distância entre duas nuvens de pontos e a sua diferença nas três dimensões espaciais, possibilitando assim o cálculo da diferença volumétrica entre elas e inferir as unidades de volume de rocha extraída.

A página WebSIG criada pela GEOteK e fornecida à empresa Francisco Ferreira de Barros (Figura 38) contém fotografias e a nuvem de pontos relativas à pedreira de Lega Gorda que permite também efetuar cálculos de distâncias, volumes e medições de ângulos.



Figura 38 Página WebSIG relativa à pedreira da Lega Gorda criada pela GEOteK.

## 6. Resultados obtidos e discussão

### 6.1. Fotogrametria aérea

#### 6.1.1. 1º voo – 27 de maio de 2022

A nuvem obtida para o primeiro voo com o software *3Dsurvey* (Figura 39) revelou-se de grande qualidade visual, com pouco ruído e, sobretudo, com grande precisão, com erros de georreferenciação na ordem dos cm (Tabela 1). As coordenadas dos pontos determinadas com a estação total também permitiram averiguar a precisão dos resultados, em que as coordenadas determinadas para os vértices das bancadas coincidem com as dos pontos correspondentes na nuvem de pontos (Figura).



Figura 39 Nuvem de pontos obtida por fotogrametria no dia 27 de maio de 2022, visualizada no CloudCompare.

Tabela 1 Erro estimado para a georreferenciação dos onze pontos de controlo utilizados na captura de imagens por fotogrametria no dia 27 de maio de 2022.

GCP	Erro estimado total (m)
1	0.001
2	0.005
3	0.003
4	0.002
5	0.012
6	0.002
7	0.016
8	0.003
9	0.009
10	0.008
11	0.010

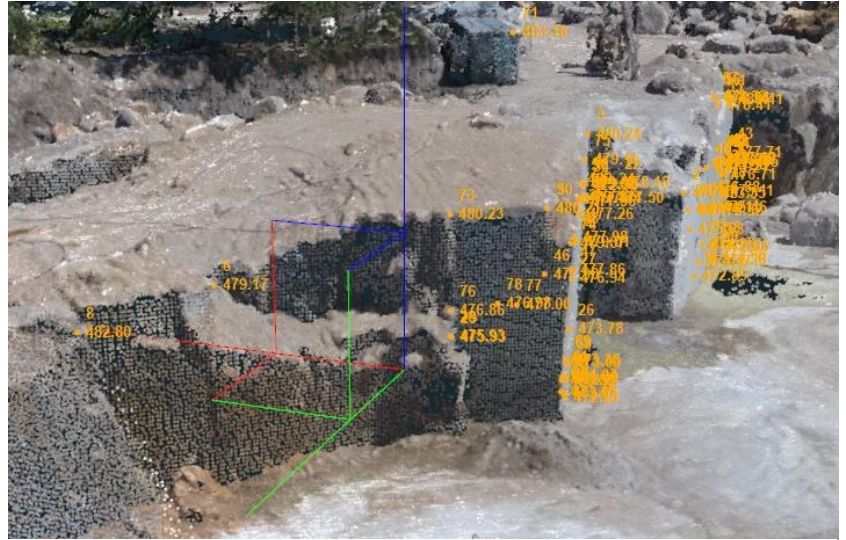


Figura 40 Visualização das coordenadas dos pontos determinadas com a estação total na nuvem de pontos gerada a partir de imagens captadas por fotogrametria no dia 27 de maio de 2022.

### 6.1.2. 2º voo – 27 de junho de 2022

Durante o segundo voo efetuado, surgiram alguns problemas relativamente à conexão com o sistema RTK que se traduziram em 147 das 866 imagens capturadas sem essa correção. Estas imagens em particular apresentaram grandes variações na cota, cuja ocorrência não é normal (Gráfico 2), levando a ponderar a possibilidade de interferência durante o voo com, por exemplo, alguma ave para explicar estas variações. No entanto, por apenas representarem 17% do total das imagens, o alinhamento com as imagens em que não ocorreu esta variação levou a que a que ficassem com coordenadas mais rigorosas.

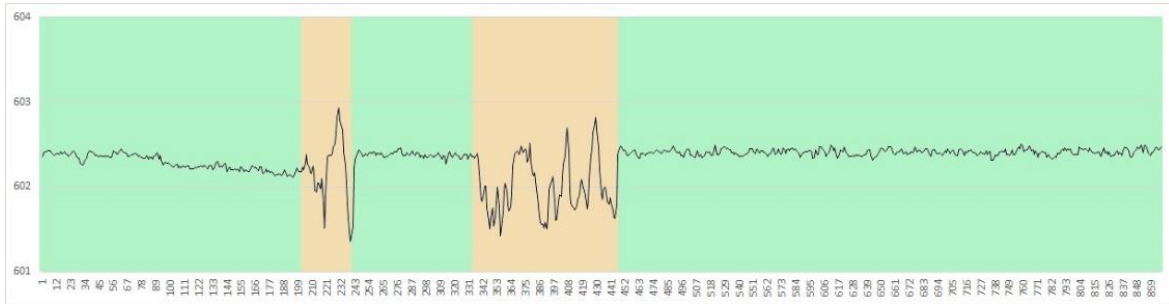


Gráfico 2 Variação da cota nas imagens obtidas por fotogrametria aérea no dia 27 de junho de 2022.

Duas nuvens de pontos foram geradas para as imagens obtidas em dois softwares diferentes: *AGISOFT Metashape* e *3Dsurvey*. A nuvem de pontos obtida com o primeiro revelou-se menos ruidosa (Figura 41) e, apesar de ter tamanho inferior, apresenta mais pontos (89 938 665) relativamente à nuvem gerada no *3Dsurvey* (78 648 357).



Figura 41 Comparação entre a qualidade da nuvem de pontos gerada no *AGISOFT Metashape* (à esquerda) e no *3Dsurvey* (à direita) à escala 1:240.

Comparando os dados obtidos para o primeiro voo e para o segundo, os primeiros apresentam-se com mais qualidade para identificar e interpretar as zonas de discontinuidades devido à maior exposição solar, visto que o primeiro voo foi realizado à tarde, enquanto o segundo de manhã. Este fator da exposição solar é importante para a deteção de planos de discontinuidades que apresentam uma exposição linear no afloramento.

### 6.1.3. 3º voo – 1 de julho de 2022

Visto que o voo referido anteriormente foi efetuado durante a manhã levando à captura de imagens com menos exposição solar que as do primeiro voo, foi efetuado outro voo em boas condições meteorológicas durante a tarde para colmatar esta diferença, de modo a obter nuvens de pontos com qualidade semelhante relativamente às do primeiro voo.

A nuvem de pontos foi gerada no *3DSurvey* e apresenta boa qualidade visual, com pouco ruído (Figura 42) e boa precisão relativamente à georreferenciação (Tabela 2). Visto que as condições de luminosidade foram melhores que as do voo anterior, as características geológicas da frente de desmonte da pedreira tornaram-se mais perceptíveis. Devido a estes fatores, foi usada para comparar a diferença entre os pontos relativamente à primeira nuvem de pontos obtida de modo a obter a quantidade de volume de rocha granítica extraída.



Figura 42 Nuvem de pontos gerada a partir de imagens obtidas por fotogrametria aérea no dia 1 de julho de 2022, visualizada no CloudCompare.

Tabela 2 Erro estimado para a georreferenciação dos cinco pontos de controlo utilizados na captura de imagens por fotogrametria no dia 01 de julho de 2022.

GCP	Erro estimado total (m)
1	0.006
2	0.010
3	0.008



4	0.011
5	0.007

## 6.2. LiDAR aéreo

### 6.2.1. 1º voo - 27 de maio de 2022

A nuvem de pontos gerada no *DJI Terra* para o voo do drone com sensor LiDAR realizado no mês de maio de 2022 apresenta várias zonas com dados vazios (Figura 43) principalmente as que se encontram na direção perpendicular à trajetória realizada pelo drone, que poderá ser o reflexo da obtenção de dados apenas numa direção horizontal e na direção nadiral.

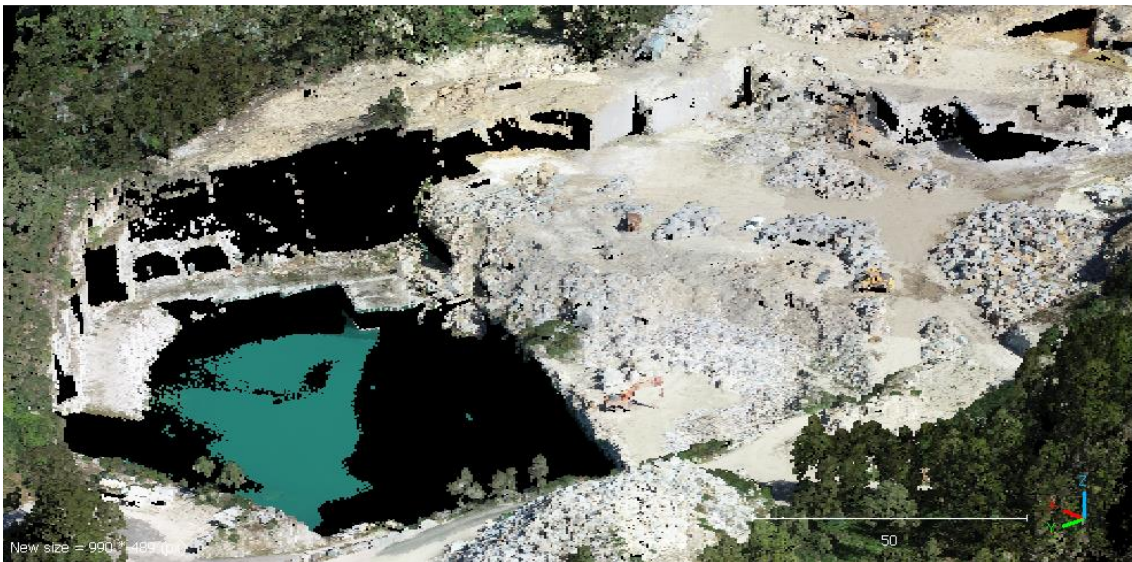


Figura 43 Nuvem de pontos obtida com LiDAR no dia 27 de maio de 2022, visualizada no CloudCompare, onde é possível observar conjuntos de dados vazios.

No geral, a qualidade dos dados da nuvem de pontos gerada no DJI Terra não foi satisfatória. Para além dos conjuntos de dados vazios, a resolução espacial não é suficiente para se distinguir as estruturas geológicas e estruturais e efetuar medições com precisão. Obteve-se também um erro na georreferenciação da nuvem de pontos a partir dos dados RTK da nuvem de pontos que podia ser eliminado ao se efetuar a georreferenciação a partir de outros métodos indiretos, tais como, alinhar a nuvem de acordo com a nuvem georreferenciada obtida por fotogrametria no mesmo dia. Mas, para isso, seria necessário reconhecer com precisão pontos de referência para uma georreferenciação correta, o que não acontece dado à qualidade da mesma.

### 6.2.2. 2º voo – 27 de junho de 2022

A nuvem de pontos relativamente ao segundo voo efetuado para a deteção remota com LiDAR foi também processada com o DJI Terra. Os problemas relativamente à falta de georreferenciação da mesma continuaram a persistir. A qualidade dos resultados melhorou comparado com a primeira nuvem obtida por LiDAR, em que houve a diminuição do número de conjuntos de dados vazios devido ao voo cruzado (Figura 44). Porém, continua a ser inferior comparado com a nuvem de pontos obtida por fotogrametria: os espaços vazios continuam a existir e a resolução espacial é inferior, em que as arestas dos objetos são menos definidas, dificultando a perceção das características geológicas do maciço rochoso, incluindo a presença de descontinuidades.



Figura 44 Nuvem de pontos gerada a partir com LiDAR obtidos no dia 27 de junho de 2022, visualizada no *CloudCompare*.

### 6.3. Comparação dos resultados obtidos por fotogrametria e LiDAR

Relativamente às nuvens de pontos obtidas para o primeiro levantamento por fotogrametria e com LiDAR, é evidente a maior qualidade visual dos dados do primeiro (Figura 45).

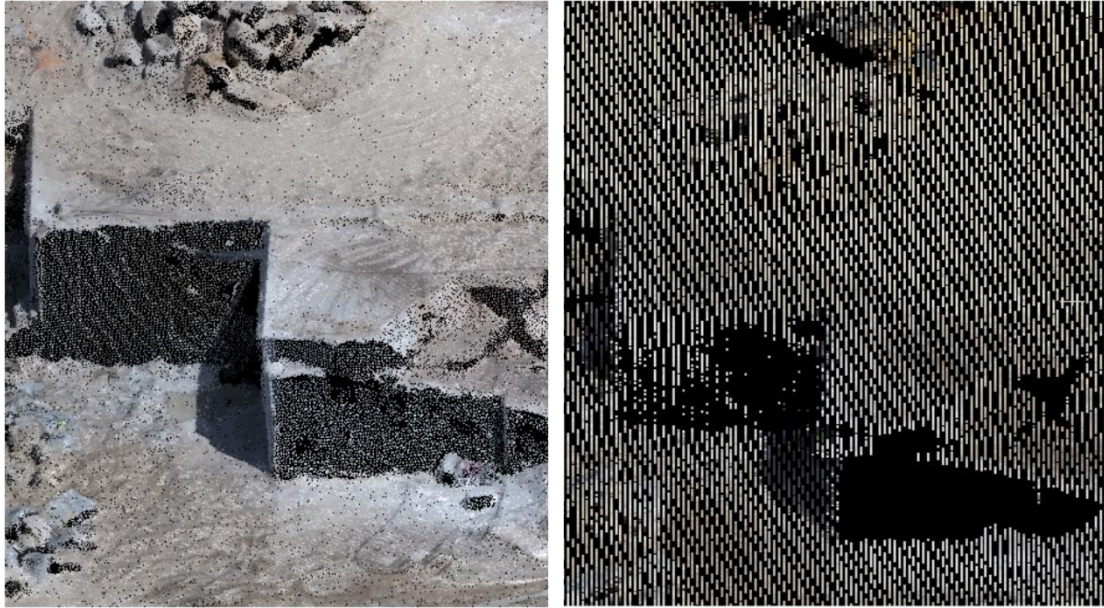


Figura 45 Comparação entre a nuvem de pontos obtida com fotogrametria (à esquerda) e com LiDAR (à direita) no dia 27 de maio de 2022, visualizadas no CloudCompare à escala 1:250.

De facto, apesar de apresentar um número maior de pontos (48 239 241 pontos contrastando com os 36 981 476 obtidos por fotogrametria), a nuvem de pontos obtida com LiDAR apresenta conjuntos de dados vazios e resolução espacial inferior. Tal como já foi mencionado anteriormente no subcapítulo 6.2., isto poderá ter sido devido às configurações do voo, que foi efetuado apenas numa direção horizontal e na direção nadir, ao contrário do voo planeado para o levantamento fotogramétrico. Para colmatar estas falhas nos dados, seria indicado ter-se efetuado um voo cruzado, i.e., dois voos perpendiculares um ao outro e também inclinar ( $<90^\circ$ ) o sensor LiDAR, tal como foi demonstrado na segunda vez que foi realizado o voo LiDAR. No entanto, estas alterações não foram suficientes para que a qualidade desta segunda nuvem de pontos ultrapassasse a da que foi obtida por fotogrametria: os limites dos objetos continuam a ser menos definidos e a perceção das características estruturais e geológicas é mais difícil (Figura 46).

Na eventualidade de serem realizados levantamentos deste tipo no futuro, sugerem-se que sejam aplicadas as seguintes configurações, de forma a evitar a fraca qualidade dos resultados LiDAR obtidos neste trabalho: inclinação do sensor LiDAR de cerca de  $70^\circ$ ; atitude do voo inferior à que foi realizada neste estudo (entre 60 a 70m); delineação de uma trajetória de padrão aleatório ou em roseta, em vez da trajetória linear usada, para melhorar a captura das bancadas verticais.

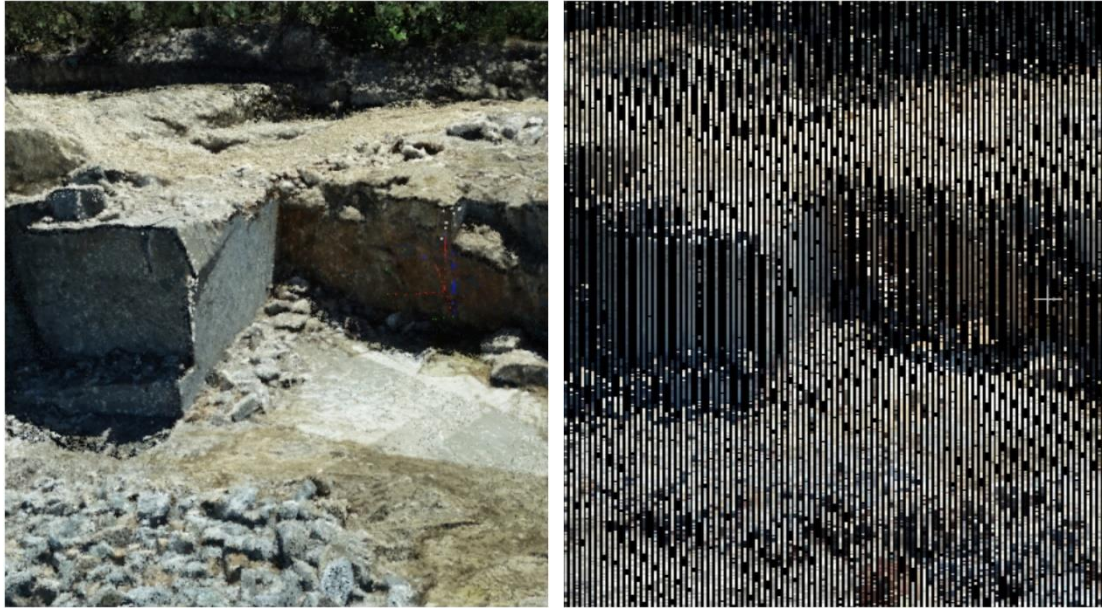


Figura 46 Comparação entre a nuvem de pontos obtida com fotogrametria (à esquerda) e com LiDAR (à direita) no dia 27 de junho de 2022, visualizadas no CloudCompare à escala 1:300.

Em relação à preservação da escala dos objetos na nuvem, ambas as obtidas por LiDAR e por fotogrametria apresentam boa precisão: foram medidas as alturas dos mesmos blocos em cada nuvem e coincidiram com a diferença entre as altitudes de pontos medidas com a estação total na base e topo dos mesmos.

Pelas razões mencionadas anteriormente, decidiu-se usar apenas as nuvens de pontos obtidas por fotogrametria devido à sua boa resolução espacial e precisão no estudo de riscos geológicos associados à exploração da Lega Gorda, na medição de atitudes das discontinuidades nas bancadas da pedreira e na volumetria.

#### 6.4. Volumetria

Um dado de interesse para o acompanhamento da exploração da pedreira consiste nas quantidades volumétricas que são movimentadas durante um determinado período de tempo. No enquadramento deste trabalho, foi possível determinar essa diferença de volumes entre os dados obtidos por fotogrametria nos dias 27 de maio e 1 de julho de 2022.

O *CloudCompare* surge como uma ferramenta útil para este efeito, pois permite comparar duas nuvens de pontos relativamente à distância entre eles, com a função

“Compute cloud/cloud distance”. O resultado é uma nuvem de pontos colorida que representa as áreas onde ocorreram diferenças relativamente à posição dos pontos. No caso da área de estudo deste trabalho, foi possível detetar diferenças a partir de 0,03m entre as duas nuvens de pontos obtidas. A figura 47 representa a nuvem de pontos correspondente à distância entre as nuvens de pontos geradas por fotogrametria, em que as zonas coloridas a amarelo correspondem a áreas onde se verificou uma diferença absoluta maior. Pode-se verificar essa diferença alternando entre as nuvens de pontos originais na mesma área (Figura 48).

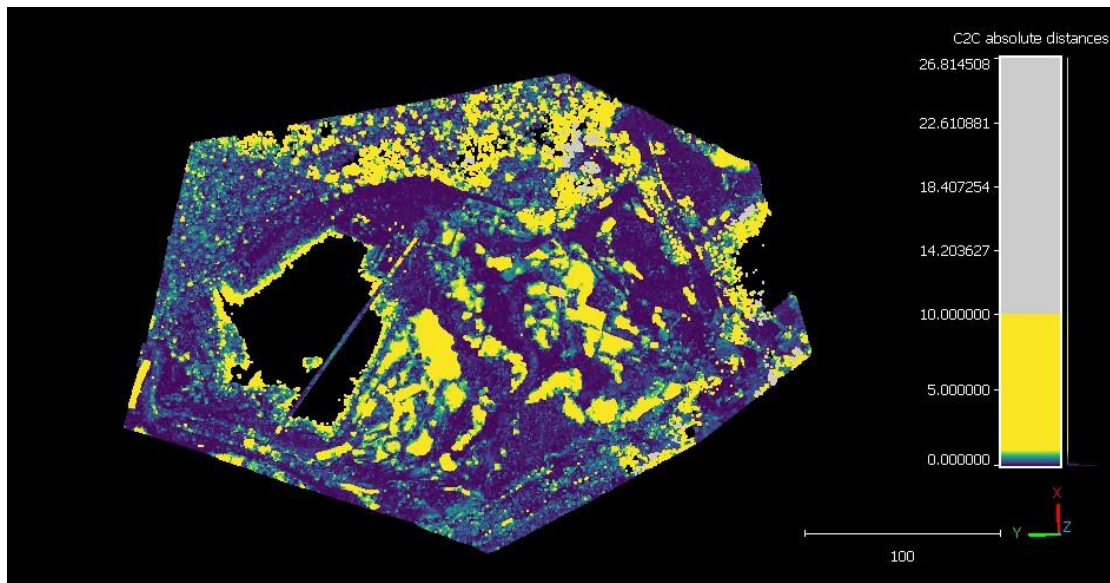


Figura 47 Nuvem de pontos colorida de acordo com a distância entre as nuvens de pontos obtidas no dia 27 de maio de 2022 e 01 de julho de 2022 por fotogrametria, obtida no CloudCompare,

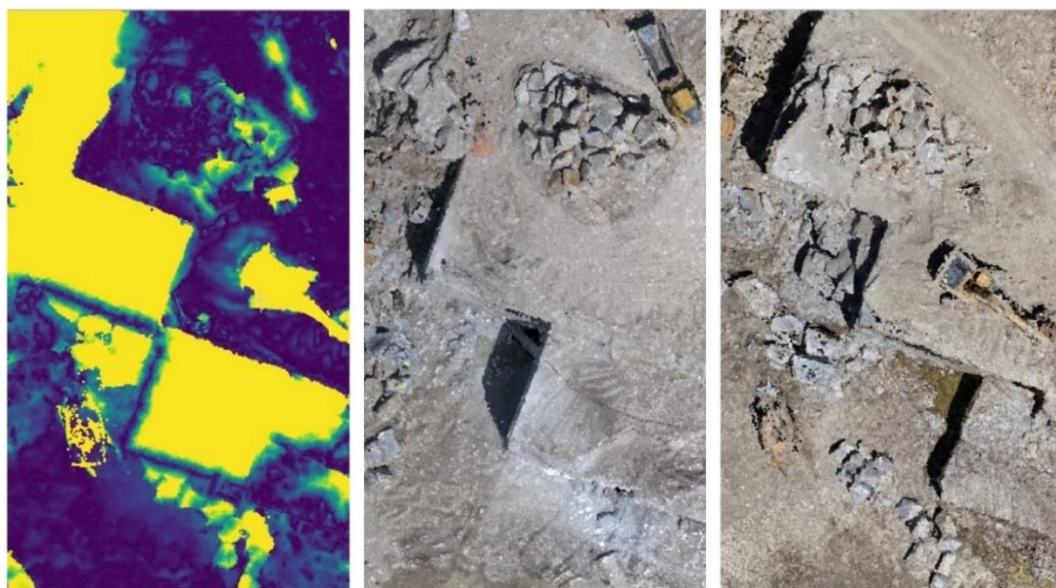


Figura 48 Nuvem de pontos que mostra a amarelo as zonas onde houve diferenças na altitude (à esquerda) entre a nuvens de pontos obtidas para o dia 27 de maio (a meio) e para o dia 1 de julho de 2022 (à direita), à escala 1:300.

A Figura 49 representa diferentes zonas nas bancadas da pedreira onde ocorreram diferenças significativas nas coordenadas dos pontos, correspondentes aos blocos de rocha granítica que foram extraídos, encontrando-se numeradas de 1 a 5.

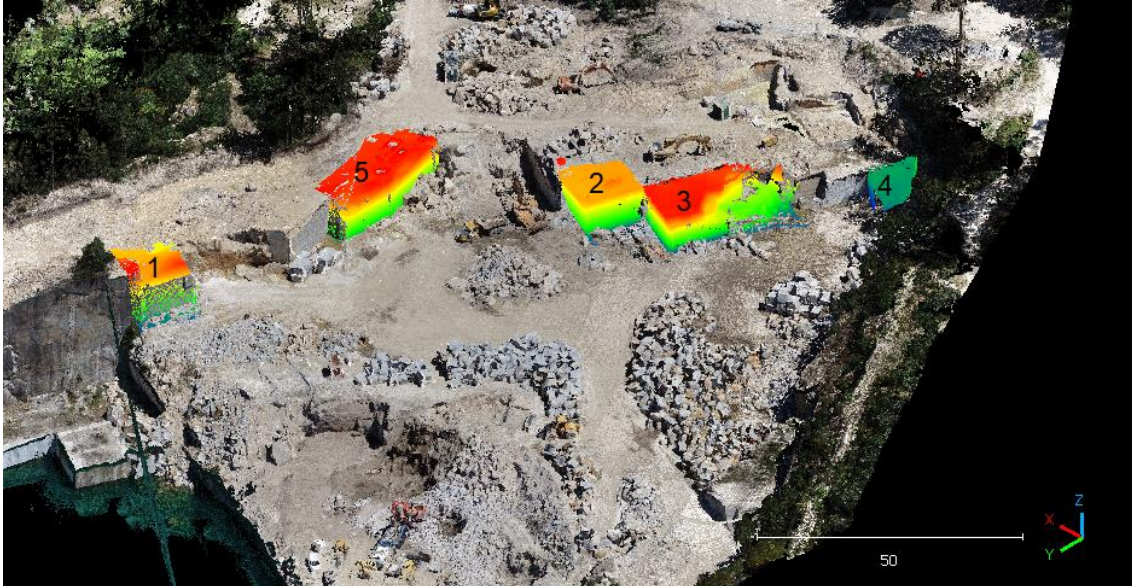


Figura 49 Zonas numeradas de 1 a 5 onde ocorreram maiores diferenças de altitude entre as nuvens de pontos obtidas.

Após a seleção dos blocos, foram determinadas as diferenças volumétricas, também com o *CloudCompare*, com a função “*Compute 2.5D volume*”. Isto resulta em valores de volumes que foram retirados e adicionados relativamente aos dados obtidos no primeiro voo (Figura 50), sendo possível criar uma malha tridimensional que permite visualizar onde surgem as maiores e menores diferenças (Figura 50).

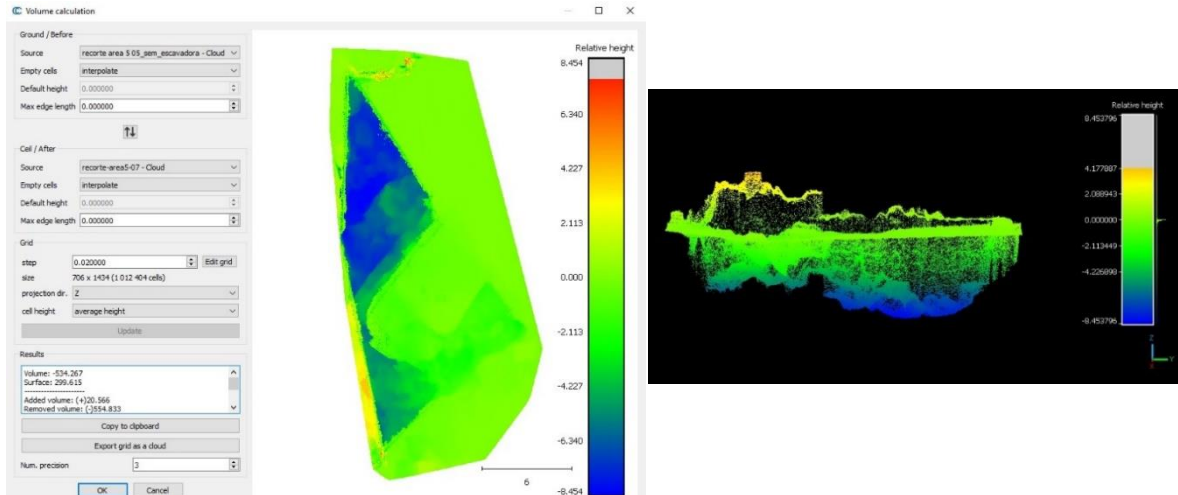


Figura 50 Determinação de volumes adicionados e retirados na zona 5 na última nuvem de pontos obtida em relação à primeira (à esquerda) e malha tridimensional da mesma zona que permite visualizar a localização de volume adicionado e removido (à direita).

Depois de se medir a diferença volumétrica individualmente nas zonas onde se detetou maior diferença entre as coordenadas dos pontos das nuvens, ou seja, as zonas correspondentes a blocos de granito extraídos da pedreira, foi determinado um total de aproximadamente  $2900m^3$  de volume removido da pedreira da Lega Gorda (Tabela 3).

Tabela 3 Quantidade de volume de blocos graníticos retirado na pedreira da Lega Gorda entre 27 de maio e 1 de julho de 2022.

Bloco	Volume ( $m^3$ )
1	124,4
2	719,3
3	1161,9
4	350,7
5	534,3
<b>TOTAL</b>	<b>2890,6</b>

## 6.5. Avaliação de risco geológico

### 6.5.1. Caracterização geométrica das descontinuidades

Após as visitas à zona de exploração da pedra da Lega Gorda, juntamente com a análise das nuvens de pontos obtidas, determinou-se que a maioria das descontinuidades presentes são prevalentemente planares sistemáticas do tipo diáclases, também podendo ser, por vezes, lineares nas interseções de descontinuidades. Quanto à sua rugosidade, são maioritariamente planas rugosas, o que equivale à classe VII na classificação ISRM (1978). A abertura das descontinuidades classifica-se desde muito fechadas a parcialmente fechadas e, devido a este fator, não se encontram significativamente preenchidas. Para além disto, não foram determinadas descontinuidades com persistência considerável.

A nuvem de pontos obtida por fotogrametria no dia 27 de maio de 2022 permitiu obter 160 medições de atitudes de planos de descontinuidades com o *CloudCompare*, determinadas com o *Compass Plug-in*, que seleciona uma área constituída por pontos pertencentes ao plano de descontinuidade e retorna uma média das orientações dos mesmos, que só é possível devido à georreferenciação da nuvem de pontos (Figura 51).

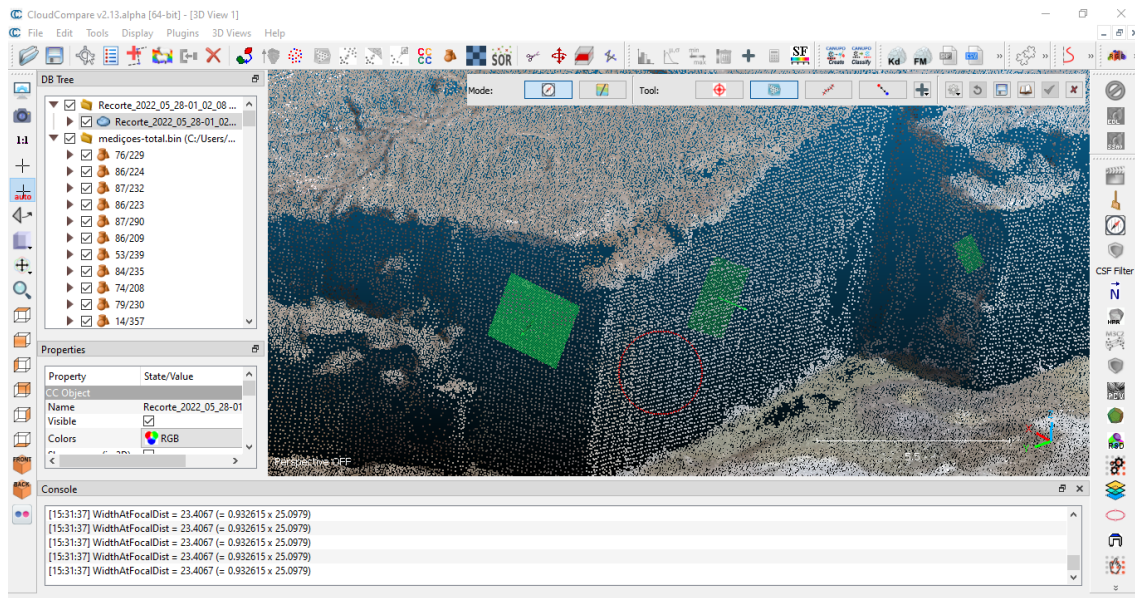


Figura 51 Utilização do *Compass Plug-in* incorporado no *CloudCompare* na medição da atitude de planos de descontinuidade.

A partir destas orientações, foi efetuada a projeção estereográfica dos planos de descontinuidade e da distribuição dos seus polos respetivos numa rede estereográfica



de Schmidt (Figura 52). O *software* utilizado para a projeção estereográfica foi o *Stereonet*, que também permite obter o diagrama de rosetas (Figura 53), que indica as direções principais que definem as principais famílias de discontinuidades. Para a obtenção do diagrama de rosetas, não se consideraram os planos (sub)horizontais (com inclinação <math>< 15^\circ</math>), visto que, segundo a ISRM (1978), não produzem resultados satisfatórios.

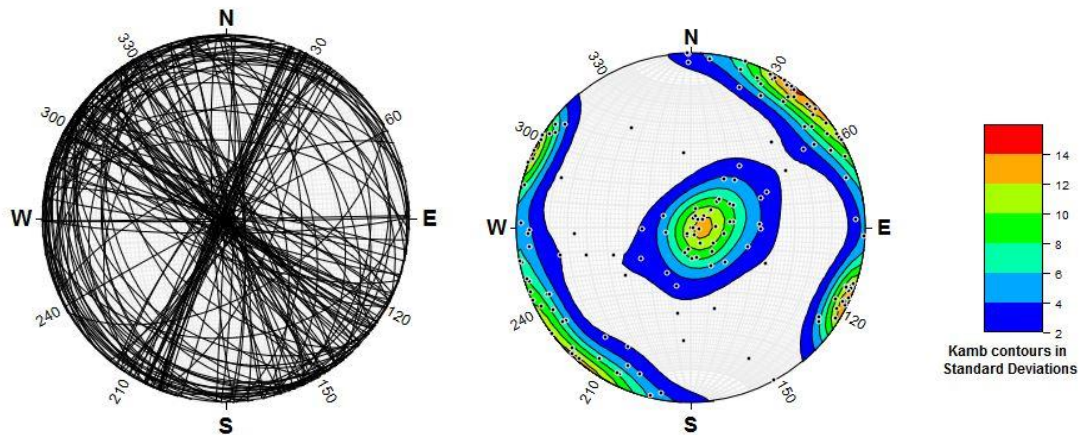


Figura 52 Projeção estereográfica numa rede de Schmidt da atitude de 160 planos de discontinuidades determinadas na pedreira da Lega Gorda (à esquerda) e respetiva projeção estereográfica dos polos agrupados em conjuntos.

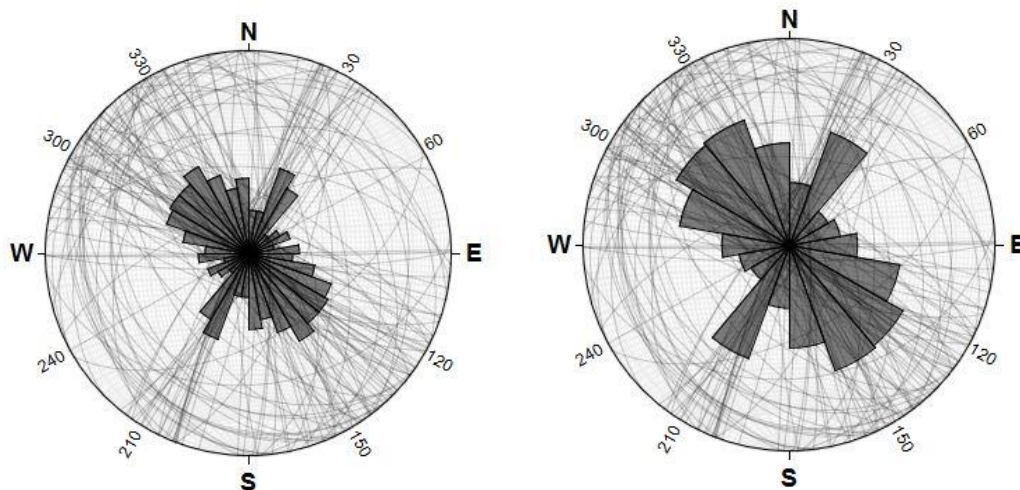


Figura 53 Diagrama de roseta relativo às atitudes dos 160 planos de discontinuidades medidas na pedreira da Lega Gorda, em que cada pétala apresenta  $10^\circ$  (à esquerda) e  $20^\circ$  (à direita) de largura, respetivamente.

A análise dos diagramas de roseta obtidos, juntamente com as projeções estereográficas dos planos de discontinuidades e dos respetivos polos, permite concluir que as direções das discontinuidades se encontram distribuídas maioritariamente na

direção NW-SE (noroeste-sudeste), que, segundo a notícia explicativa da Folha 9-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000, coincide com a fracturação longitudinal, NW-SE, paralela, portanto, ao alongamento do batólito. Da mesma forma, a referida fraturação transversa na mesma bibliografia é visível no diagrama de roseta. Porém, também existe um conjunto de descontinuidades significativo com orientação preferencial na direção perpendicular NE-SW (nordeste-sudoeste). Segundo o diagrama de roseta com pétalas de 20° de largura, e assumindo o valor médio com o valor representativo de cada classe, as direções principais dos planos de descontinuidades são: N30°, N130° e N150°.

#### 6.5.2. Tamanho e forma do bloco unitário

As famílias de descontinuidades presentes no granito explorado na pedreira da Lega Gorda são, geralmente, bem espaçadas umas das outras, podendo ser também, em algumas zonas, relativamente equidimensionais, originando blocos do tipo maciço/compacto e do tipo cúbico.

O tamanho do bloco unitário foi determinado a partir do índice do tamanho do bloco  $I_b$ , segundo a média das dimensões dos vários blocos retirados da pedreira da Lega Gorda durante o período entre 27 de maio e 1 de julho de 2022. O *CloudCompare* apresenta uma ferramenta de medição de distâncias na nuvem de pontos georreferenciada que permite medir as dimensões de cada bloco (Figura 54). Na tabela 4, encontram-se as dimensões dos blocos em metros.

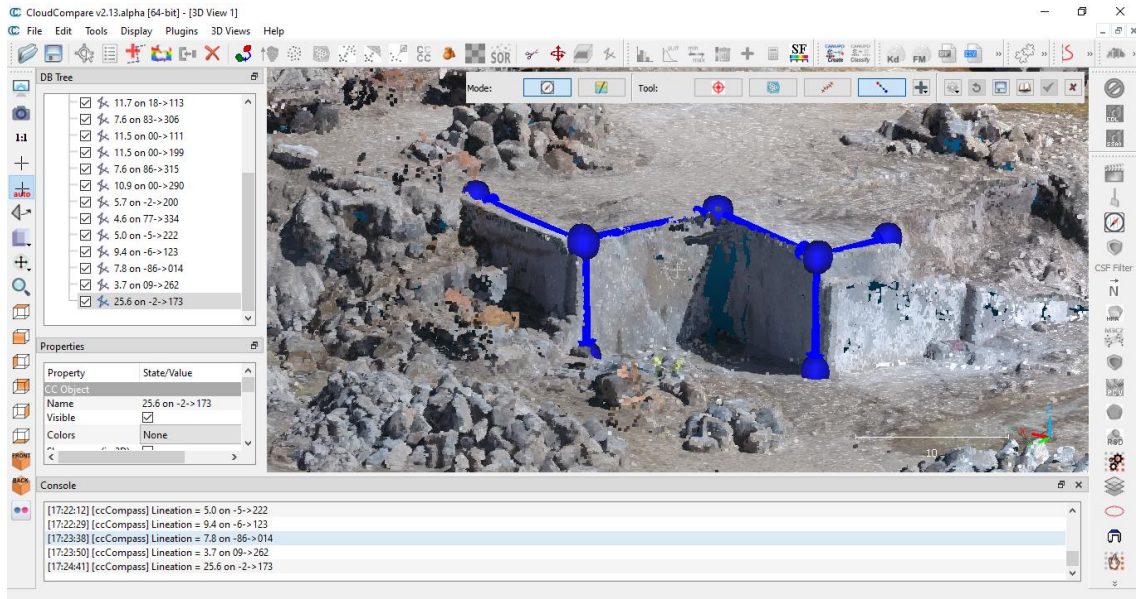


Figura 54 Medição das dimensões dos blocos retirados da pedreira da Lega Gorda entre 27 de maio e 1 de julho de 2022 no CloudCompare.

Tabela 4 Dimensões dos blocos retirados da pedreira da Lega Gorda ente 27 de maio e 1 de julho de 2022.

Bloco	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
1	11,7	8,7	11,0
2	11,5	11,5	7,6
3	10,9	5,7	7,6
4	9,4	5,0	4,6
5	25,6	3,7	7,8

O Índice do tamanho do bloco é então dado por:

$$I_b = \frac{\frac{\Sigma \text{comprimento}}{5} + \frac{\Sigma \text{largura}}{5} + \frac{\Sigma \text{altura}}{5}}{3} = \frac{13,82m + 6,92m + 7,72m}{3} = 9,49m$$

Recorrendo à fórmula para o índice volumétrico de descontinuidades ( $J_V$ ), foram determinados o tamanho do bloco unitário em cinco regiões da pedreira coincidentes com os volumes retirados entre o período de 25 de maio e 1 de julho de 2022. Devido ao grande espaçamento entre as descontinuidades da mesma família, foi determinado o número de descontinuidades ao longo de um comprimento que varia entre os 10 e os

15m. Os valores obtidos para  $J_V$  estão contidos na tabela 5 e, segundo a classificação ISRM (1978), o tamanho do bloco classifica-se como Muito Grande.

Tabela 5 Valores determinados para  $J_V$  e respetiva classificação ISRM (1978) para os blocos retirados da pedreira da Lega Gorda entre 27 de maio e 1 de julho de 2022.

Bloco	$J_V$	Classificação ISRM (1978)
1	0,60	Muito grandes
2	0,50	Muito grandes
3	0,46	Muito grandes
4	0,46	Muito grandes
5	0,70	Muito grandes

### 6.5.3. Risco de Rotura

As nuvens de pontos obtidas por fotogrametria permitiram estudar as características geométricas das descontinuidades e a sua distribuição ao longo do material rochoso explorado. Com o *CloudCompare*, foi possível representar os planos de descontinuidades com a ferramenta de criar planos a partir dos valores da orientação dos mesmos, obtidos com o *Compass Plug-in* (Figura 55).



Figura 55 Representação dos planos de descontinuidade, exagerando a sua continuidade, no CloudCompare.

Para esta análise, foi usada a primeira nuvem de pontos obtida por fotogrametria. Em algumas zonas da pedreira da Lega Gorda foram determinadas roturas de talude possíveis de acontecer no futuro com o avanço da frente de desmonte, nomeadamente roturas em cunha. Estas previsões baseiam-se no pressuposto que as descontinuidades visíveis nos afloramentos se prolongam significativamente ao longo da sua direção. Os casos de estudo mais relevantes encontram-se nos flancos E (este) e SE (sudeste). Ainda que a interseção das descontinuidades neste último se efetue na Zona de Defesa da pedreira, não deixa de ser interessante estudar a possibilidade de rotura e, para além disso, serve de exemplo da aplicação da deteção remota no estudo de riscos geológicos.

Como referido anteriormente, nestes flancos da pedreira, tem-se a interseção de duas descontinuidades que formam uma cunha. Se a escavação prosseguir na direção representada nas Figura 56 e 58 a tracejado, ou seja, na direção da linha de interseção entre os dois planos, poderá ocorrer risco de instabilidade do talude, tal como mostra o resultado do teste de Markland para estes casos (Figuras 57 e 59). Para se considerar instabilidade de talude, é necessário que (Lisle & Leyshon, 2004; Wyllie & Mah, 2014):

- o mergulho da linha de interseção entre os dois planos de descontinuidade seja superior ao ângulo de atrito;
- o mergulho da linha de interseção seja inferior à inclinação do plano de talude;
- o plano de deslizamento tenha uma inclinação na orientação oposta ao interior do talude.

Isto implica que estão em risco de instabilidade todas as linhas de interseção que se encontrem no interior do círculo menor correspondente ao ângulo de atrito e que, ao mesmo tempo, possuam mergulho inferior à inclinação do plano do talude. Na projeção estereográfica, admitiu-se que o plano de talude se encontrava perpendicular à linha de interseção dos dois planos e com inclinação vertical, de modo a respeitar a configuração das bancadas, e assumiu-se o valor médio dos valores para o ângulo de fricção interno ( $\phi$ ) para granitos sãos, segundo González de Vallejo et al. 2012, que se situa entre 45° a 58°.

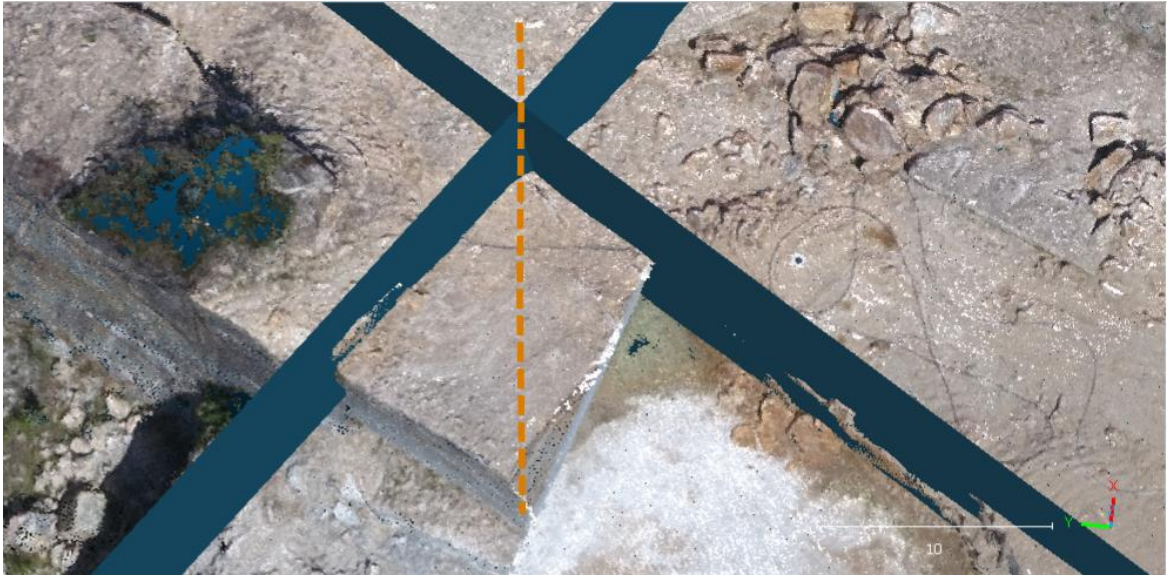


Figura 56 Planos de descontinuidades (azul) que formam uma cunha, cuja linha de interseção se encontra representada a laranja e a tracejado, no flanco E na nuvem de pontos.

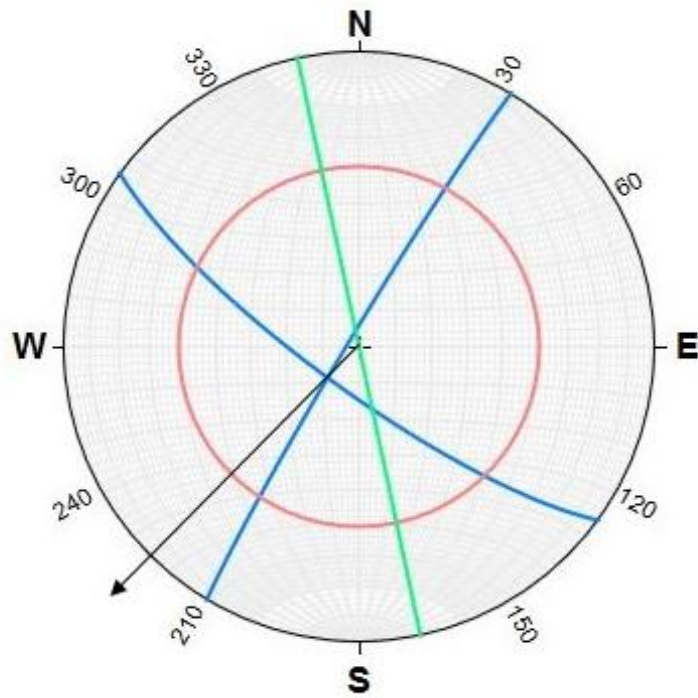


Figura 57 Projeção estereográfica dos planos de descontinuidade (azul), talude (verde) e ângulo de atrito do granito (vermelho) no flanco E. A direção do movimento é dada pela seta a preto.

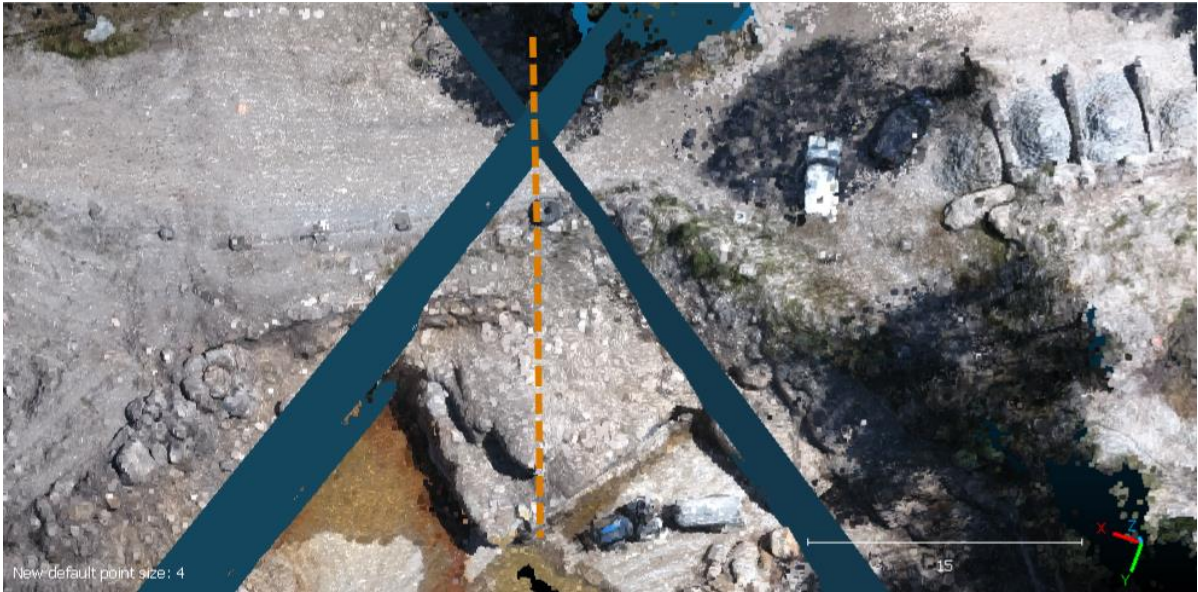


Figura 58 Planos de descontinuidades (azul) que formam uma cunha, cuja linha de interseção se encontra representada a laranja e a tracejado, no flanco SE na nuvem de pontos.

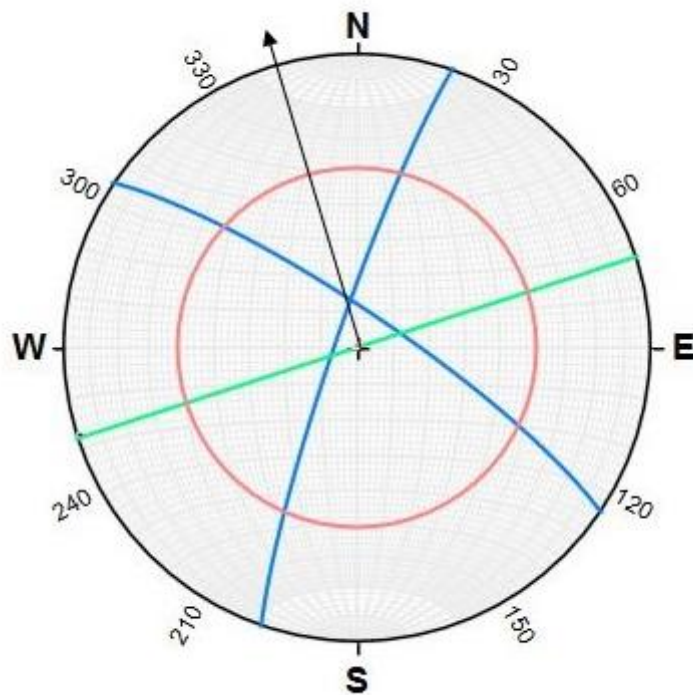


Figura 59 Projeção estereográfica dos planos de descontinuidade (azul), talude (verde) e ângulo de atrito do granito (vermelho) no flanco SE. A direção do movimento é dada pela seta a preto.

A análise cinemática a partir da projeção estereográfica permite identificar a direção de deslizamento do bloco, que é dada pelo mergulho da linha de interseção entre os dois planos de descontinuidade que constituem a cunha (Wyllie & Mah, 2014).

Nestas duas situações estudadas, há risco de instabilidade em ambas visto que foram satisfeitas as condições mencionadas. A direção do movimento do deslizamento encontra-se representada nas redes estereográficas das Figuras 57 e 59, sendo no sentido NE-SW (nordeste-sudoeste) e NW-SE (noroeste-sudeste) nos flancos E e SE, respetivamente.

Não foram determinadas situações de risco de rotura por tombamento (uma parte devido à configuração vertical das bancadas) nem por deslizamento.

A análise da nuvem de pontos e a visita à pedreira permitiram confirmar a existência de uma zona de fracturação intensa (Figura 60), também localizada no flanco oriental, em que o granito possui grau de alteração W4 - apresenta alteração evidente e encontra-se parcialmente friável -, para a qual é necessário ter em atenção durante o desmorte para não ocorrer instabilidade.



Figura 60 Zona de fraturação intensa do granito representada na nuvem de pontos (em cima) e no campo (em baixo).



#### 6.5.4. Métodos de estabilização de taludes

De forma a evitar o risco de instabilidade dos taludes, medidas de estabilização terão de ser tomadas para evitar potenciais perdas de material rochoso de interesse, danos ambientais, estragos nos equipamentos de exploração e, principalmente, para garantir a segurança dos trabalhadores. A elaboração de um plano de estabilização terá de ter em conta os recursos materiais e financeiros disponíveis, a urgência das medidas e a escala e dimensão da instabilidade (González de Vallejo et al., 2012).

A estabilidade de um talude pode ser aumentada ao reduzir as cargas desestabilizadoras ou ao aumentar as forças estabilizadoras. Qualquer atividade realizada no talude irá afetar fatores básicos que controlam o seu equilíbrio: o peso, os parâmetros de resistência dos materiais e a presença de água. Consoante os parâmetros geológicos e estruturais do maciço rochoso, as medidas de estabilização de taludes incluem (González de Vallejo et al., 2012):

- Alteração da geometria do talude;
- Drenagens;
- Aumento da resistência do terreno ao inserir elementos estruturais resistentes no talude;
- Construção de muros ou outros elementos de contenção.

A estabilidade dos taludes nas explorações de massas minerais depende do cumprimento do Plano de Lavra da pedreira, respeitando a configuração das bancadas. Nas situações de instabilidade de talude determinadas neste relatório para a pedreira da Lega Gorda, a segurança durante as operações de extração depende da prevenção da interseção de descontinuidades em cunha e, caso se verifique instabilidade, seja com recurso às técnicas de deteção remota ou com técnicas tradicionais, deve ser promovido o saneamento controlado das frentes de desmonte, implicando um avanço de escavação o mais ortogonal possível a uma das descontinuidades. No caso em que se verifique a presença de granitos com um grande grau de alteração que possa comprometer a estabilidade do talude, como por exemplo, a zona de granito W4 mencionada no capítulo anterior, é aconselhado proceder ao desmonte em taludes com inclinações dirigidas para o interior do maciço rochoso

Relativamente a medidas relacionadas com a drenagem, a pedreira da Lega Gorda deveria possuir valas nas periferias da Zona de Exploração de modo a desviar a circulação de água de escorrência dos taludes de modo a evitar a sua erosão. Em vez disso, possui valas internas que conduzem as águas superficiais para a bacia ou lagoa

de retenção interna. Neste sentido, os modelos tridimensionais da pedreira obtidos por técnicas de deteção remota também poderiam ser úteis na análise da topografia e avaliar a circulação das águas superficiais, recorrendo a técnicas de SIG.

## Conclusão

As técnicas de deteção remota utilizadas neste relatório – fotogrametria aérea e LiDAR – produziram resultados diferentes relativamente à qualidade das nuvens geradas, o que fez com que se tivesse optado por usar na análise as primeiras devido à precisão fornecida pela georreferenciação realizada a partir de pontos de controlo e ao menor número de conjuntos de dados vazios. Para além disso, o facto das nuvens de pontos obtidas por LiDAR terem maior número de pontos não compensou a sua fraca resolução espacial.

A partir das nuvens de pontos geradas por fotogrametria, foi possível determinar: cerca de 2900  $m^3$  de volume de rocha granítica retirado da pedreira da Lega Gorda durante o período entre 27 de maio e 1 de julho de 2022, um índice de tamanho de bloco ( $I_b$ ) igual a cerca de 9,5m e um bloco considerado muito grande segundo o índice volumétrico de descontinuidades ( $I_V$ ), segundo a classificação ISRM (1978). Também possibilitou a representação de planos de descontinuidade, assim como a medição das suas atitudes, o que permitiu conferir a formação de blocos em cunha em interseções entre planos de descontinuidades nalguns pontos da pedreira. Segundo a projeção estereográfica destes casos, seria possível ocorrer situação de instabilidade, com o deslizamento do bloco a dar-se no sentido da linha de interseção entre descontinuidades, caso o desmonte fosse efetuado na direção perpendicular a esta última. Apesar destes resultados terem sido apoiados quer visualmente nos modelos da pedreira, quer na sua projeção estereográfica, a análise efetuada não tomou em consideração outros fatores externos que também podem influenciar a estabilidade do talude, tal como por exemplo, a pressão hidráulica.

Em suma, as técnicas de deteção remota, nomeadamente a fotogrametria aérea, permitiram produzir modelos tridimensionais da pedreira e, posteriormente, com recurso a softwares, efetuar medições de distâncias, áreas, volumes e estudar as características geométricas das descontinuidades e a sua distribuição ao longo do material rochoso explorado com precisão. Para além disso, possibilitaram uma recolha de dados mais rápida de uma área de estudo relativamente extensa do que seria possível com métodos tradicionais (por exemplo, recorrendo ao uso da bússola no campo) e proporcionaram, inclusive, a recolha de informação em zonas de difícil acesso. Por estes motivos, a deteção remota apresentou-se como uma ferramenta vantajosa para o estudo de riscos associados à exploração de recursos geológicos. Mesmo considerando as limitações dos métodos de análise de rotura de taludes utilizados e da resolução espacial das

nuvens de pontos obtidas, poderá ser utilizada em conjunto com métodos de recolha de dados tradicionais de forma a obter o máximo de informação possível.

## Referências Bibliográficas

- Aber, J. S., & Ber, A. (2007). Geometric Analysis. Em *Developments in Quaternary Sciences* (Vol. 6, pp. 17–32). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(07\)80070-4](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(07)80070-4)
- Aber, J. S., Marzloff, I., & Ries, J. B. (2010). *Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications*. Elsevier Science.
- ANAC. (2022). *Categoria Aberta (OPEN)*. [https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria\\_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx](https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx), acedido em 4 de maio de 2022.
- Bemis, S. P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M. R., Akciz, S., Thiele, S. T., & Bangash, H. A. (2014). Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69, 163–178. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>
- Buckley, S., Vallet, J., Braathen, A., & Wheeler, W. (2008). Oblique helicopter-based laser scanning for digital terrain modelling and visualisation of geological outcrops. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37.
- Cândido de Medeiros, A., Pereira, E., & Moreira, A. (1980). *CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL NA ESCALA DE 1/50000. NOTÍCIA EXPLICATIVA DA FOLHA 9-D PENAFIEL*. Dierção-Geral de Geologia e Minas. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Carvalho, J. F., Henriques, P., Falé, P., & Luís, G. (2008). Decision criteria for the exploration of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8), 1306–1319. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.005>
- Carvalho, J., Lopes, C., Mateus, A., Martins, L., & Goulão, M. (2018). Planning the future exploitation of ornamental stones in Portugal using a weighed multi-dimensional approach. *Resources Policy*, 59, 298–317. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.08.001>
- Carvalho, J. M. F., Lisboa, J. V., Casal Moura, A., Carvalho, C., Sousa, L. M. O., & Leite, M. M. (2013). Evaluation of the Portuguese Ornamental Stone Resources. *Key Engineering Materials*, 548, 3–9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.548.3>
- Davis, G. H., & Reynolds, S. J. (1996). *Structural Geology of Rocks and Regions, 2nd Edition*.
- Dey, J., Roy, S., & Matin, A. (2021). *Drone photogrammetry: A structural data gathering tool for open pit mining geotechnics* (P. Dight & P. Dight, Eds.; pp. 135–148). Australian Centre for Geomechanics. [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2135\\_06\\_Dey/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2135_06_Dey/)
- DGEG. (2021). *Dados Globais da Indústria Extractiva*. Dados Globais da Indústria Extractiva. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/dados-globais-da-industria-extractiva/producao/>, acedido em 15 de maio de 2022.
- DGEG. (2022). *Guião de Pedreiras*. <https://www.dgeg.gov.pt/media/wzrozybv/guião-das-pedreiras.pdf>, acedido em 15 de maio de 2022.

- Dong, P., & Chen, Q. (2018). *LiDAR remote sensing and applications*. CRC Press, Taylor & Francis.
- Fernández-Lozano, J., & Gutierrez-Alonso, G. (2016). *The Use of UAVs (Unmanned Air Vehicles) in geology*.
- Giordan, D., Adams, M. S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., De Berardinis, P., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B., & Troilo, F. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(7), 3437–3481.  
<https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- González de Vallejo, L. I. (2012). *Geological Engineering*. Pearson Educación.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (2nd ed). Wiley.
- Hodgetts, D., Drinkwater, N. J., Hodgson, J., Kavanagh, J., Flint, S. S., Keogh, K. J., & Howell, J. A. (2004). Three-dimensional geological models from outcrop data using digital data collection techniques: An example from the Tanqua Karoo depocentre, South Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, 239(1), 57–75.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.239.01.05>
- Hudson, J. A. (1989). *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*. CIRIA/Butterworths, 72.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles* (1st ed). Pergamon.
- ISRM. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, 319–368.
- Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A., & Conde, L. (1974). Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. *IGME*, 94.
- Konecny, G. (2014). *Geoinformation: Remote sensing, photogrammetry and geographical information systems* (2nd ed.).  
<http://marc.crcnetbase.com/isbn/9781482232134>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (Seventh edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Linder, W. (2016). *Digital photogrammetry* (4th ed.). Springer Berlin Heidelberg.
- Lisle, R. J., & Leyshon, P. R. (2004). *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers* (2nd ed). Cambridge University Press.
- LNEG, U. de G., Hidrogeologia e Geologia Costeira, I. P. (2010). *Carta Geológica de Portugal (2ª) à escala 1:1 000 000*.
- Medeiros, A., Pereira, E., & Moreira, A. (1981). *Carta Geológica 09-D Penafiel de Portugal (1ª)*. LNEG-LGM.

- PIX4D. (2021). *Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry*. PIX4D Support. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry>, acessido em 26 de abril de 2022.
- Quinta-Ferreira, M. (2010). *O estudo dos taludes e da sua estabilidade*. (pp. 305–315).
- ReNEP. (2022). *Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS*. Bem-vindo à página da ReNEP. <https://renep.dgterritorio.gov.pt/>
- Ribeiro, A., Pereira, E., Ribeiro, M. L., & Castro, P. (2013). *Unidades alóctones da região de Morais (Trás-os-Montes Oriental): Vol. Vol. I: Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. Livraria Escolar Editora.
- Ribeiro, A., & Sanderson, D. (1996). SW-Iberia—Transpressional Orogeny in the Variscides. *Europrobe secretariate, Uppsala University*, 138.
- Sajinkumar, K. S. & Oommen, T. (2018). Photogrammetry. Em *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 713–714). Springer, Cham.
- Seifert, E., Seifert, S., Vogt, H., Drew, D., van Aardt, J., Kunneke, A., & Seifert, T. (2019). Influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images. *Remote Sensing*, 11(10), 1252. <https://doi.org/10.3390/rs11101252>
- Sousa, L., Carvalho, J., Pita, P., & Lourenço, J. (2020). Granitos Ornamentais do Norte de Portugal—Caraterísticas, Potencialidades e Constrangimentos. *Boletim de Minas*.
- Sousa, L. M. O., Oliveira, A. S., Lourenço, J. M. M., & Capela, I. M. C. (2012). Fatores condicionantes da exploração de granito ornamental: O exemplo dos granitos meteorizados da região de Vila Real. Em M. Quinta-Ferreira, M. T. Barata, F. C. Lopes, M. H. Henriques, & R. P. dos Reis, *Para desenvolver a Terra: Memórias e notícias de Geociências no espaço lusófono* (pp. 509–518). Imprensa da Universidade de Coimbra. [https://doi.org/10.14195/978-989-26-0531-9\\_51](https://doi.org/10.14195/978-989-26-0531-9_51)
- Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P., & Glennie, C. (2017). Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*, 169, 35–68. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>
- Walsh, S. J., Page, P. H., Brewington, L., Bradley, J. R., & Mena, C. F. (2018). A Beach Vulnerability Framework for the Galapagos Islands: Fusion of WorldView 2 Imagery, 3-D Laser Scanner Data, and Unmanned Aerial Vehicles. Em *Comprehensive Remote Sensing* (pp. 159–176). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10438-5>
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- Whitehead, K., & Hugenholtz, C. H. (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (VANTs), part 1: A review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 02(03), 69–85. <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>
- Wyllie, D. C., & Mah, C. (2014). *Rock Slope Engineering: Fourth Edition* (4th ed). CRC Press.

# Anexos



# Anexo 1



Programa de processamento de imagens aéreas  
Versão 2.15.1

## Relatório

**Projeto:** lega\_gorda\_27-05

**Data de aquisição da** 2022-05-27

**imagem:**

Modelo da câmera	Resolução	Distância focal	Tamanho do sensor	Tamanho do pixel
DJI FC330	4000 × 3000	3.61mm	6.2 × 4.6 mm	1.542µm
<b>Tamanho da Ortofoto:</b>	581.48m 689.18m	<b>× Resolução em pixels:</b>	0.020m	



# Dados do levantamento

Número de 589  
imagens:

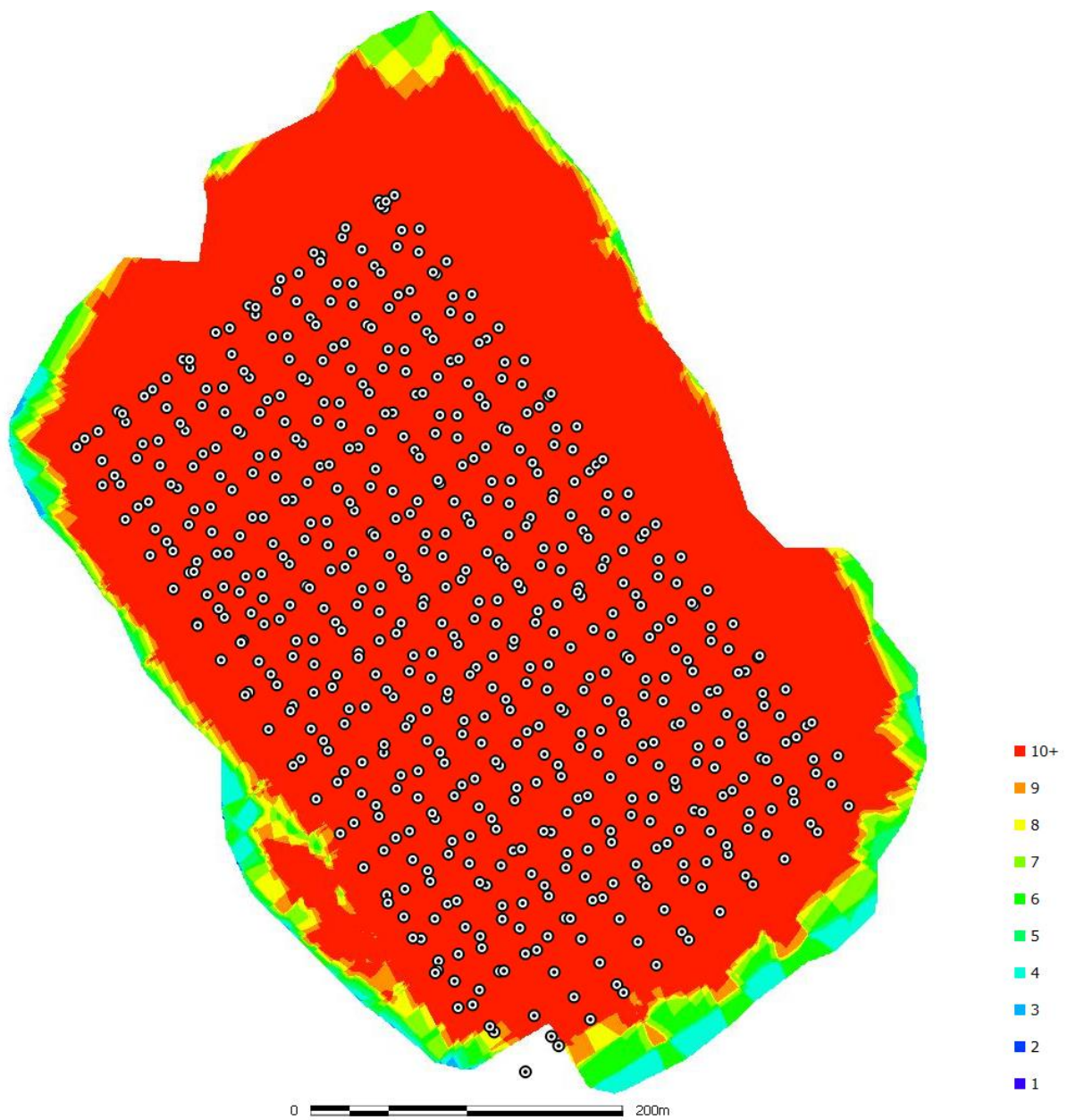
Número de imagens 588  
registradas:

Altitude de voo: 76.0m

Número de pontos 790  
chave (keypoints) por  
imagem / média:

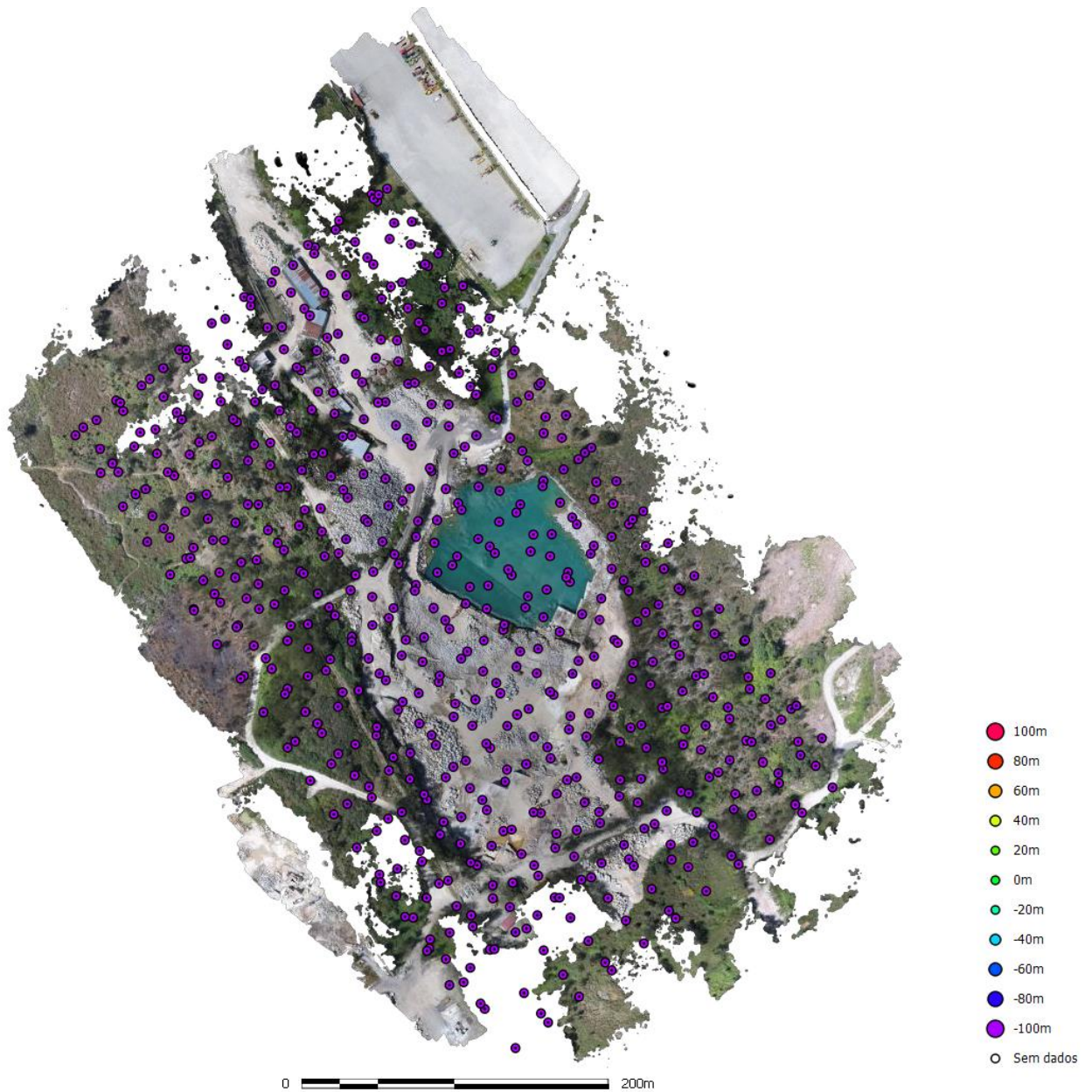
Resolução no 0.0369m  
solo:

Georreferenciamento: Sim

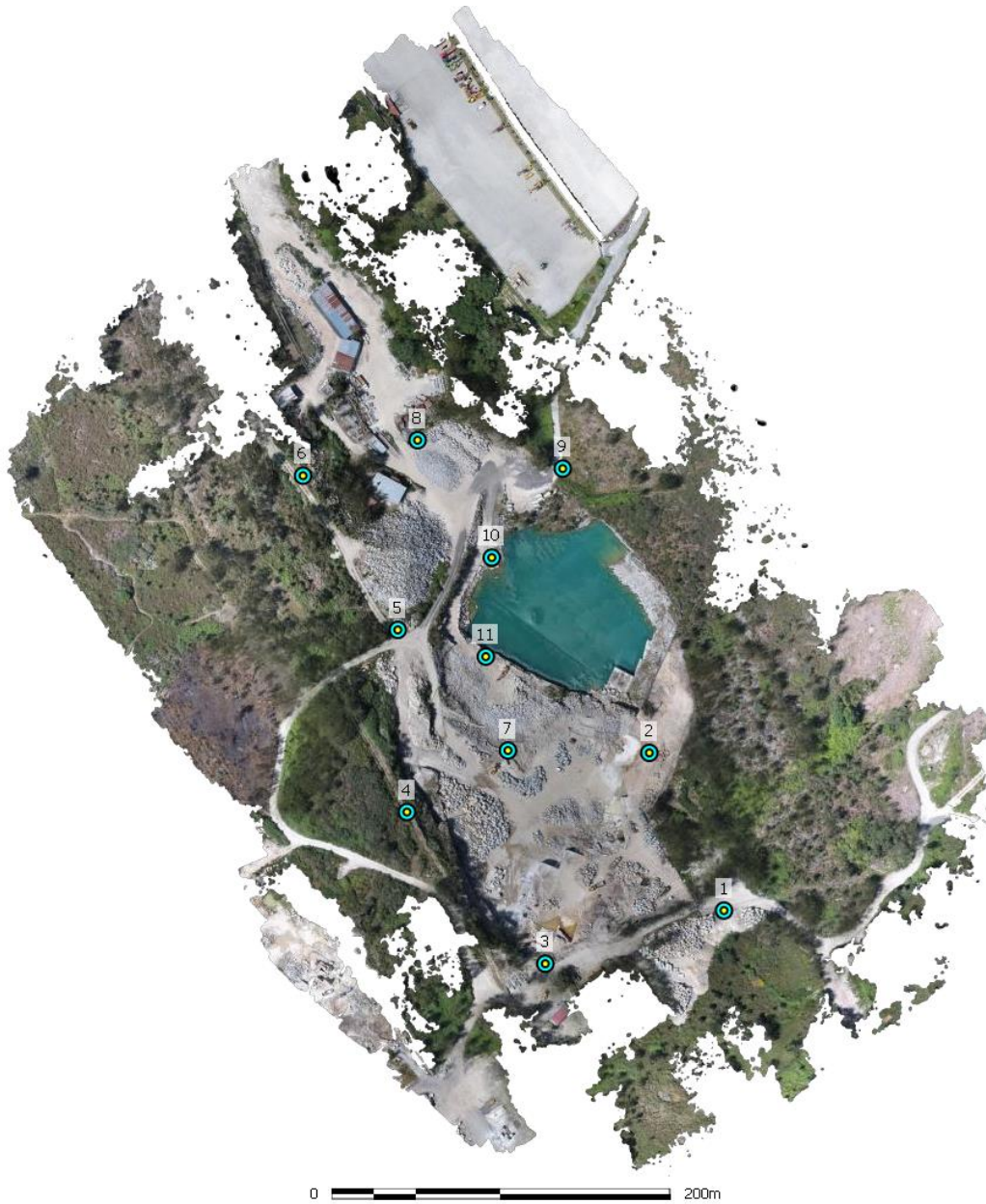


# Posições das câmeras

X erro	Y erro	Erro horizontal	Erro vertical	Erro total
1.803m	3.086m	3.574m	101.471m	101.534m



## Pontos de controle em solo (GCP)



ID do ponto	Coordenadas			Erros				Número de projeções
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	3D [m]	
1	-10559.767	167496.711	479.868	-0.000	0.001	0.001	0.001	23
2	-10603.735	167589.511	479.959	-0.001	0.001	0.005	0.005	38
3	-10665.001	167465.400	487.346	0.001	0.001	0.002	0.003	24
4	-10746.488	167554.670	488.554	0.001	-0.001	0.001	0.002	26
5	-10751.870	167661.889	472.397	-0.003	0.006	0.009	0.012	46
6	-10807.660	167752.650	475.444	0.000	0.002	-0.002	0.002	33
7	-10686.998	167590.907	470.966	-0.006	0.004	-0.014	0.016	54

8	-10740.198	167773.555	459.530	-0.001	-0.002	0.002	0.003	58
9	-10654.734	167756.840	463.117	-0.005	0.003	-0.006	0.009	43
10	-10696.515	167704.451	456.188	0.007	-0.003	-0.003	0.008	60
11	-10700.048	167646.176	460.629	0.006	-0.005	0.006	0.010	71

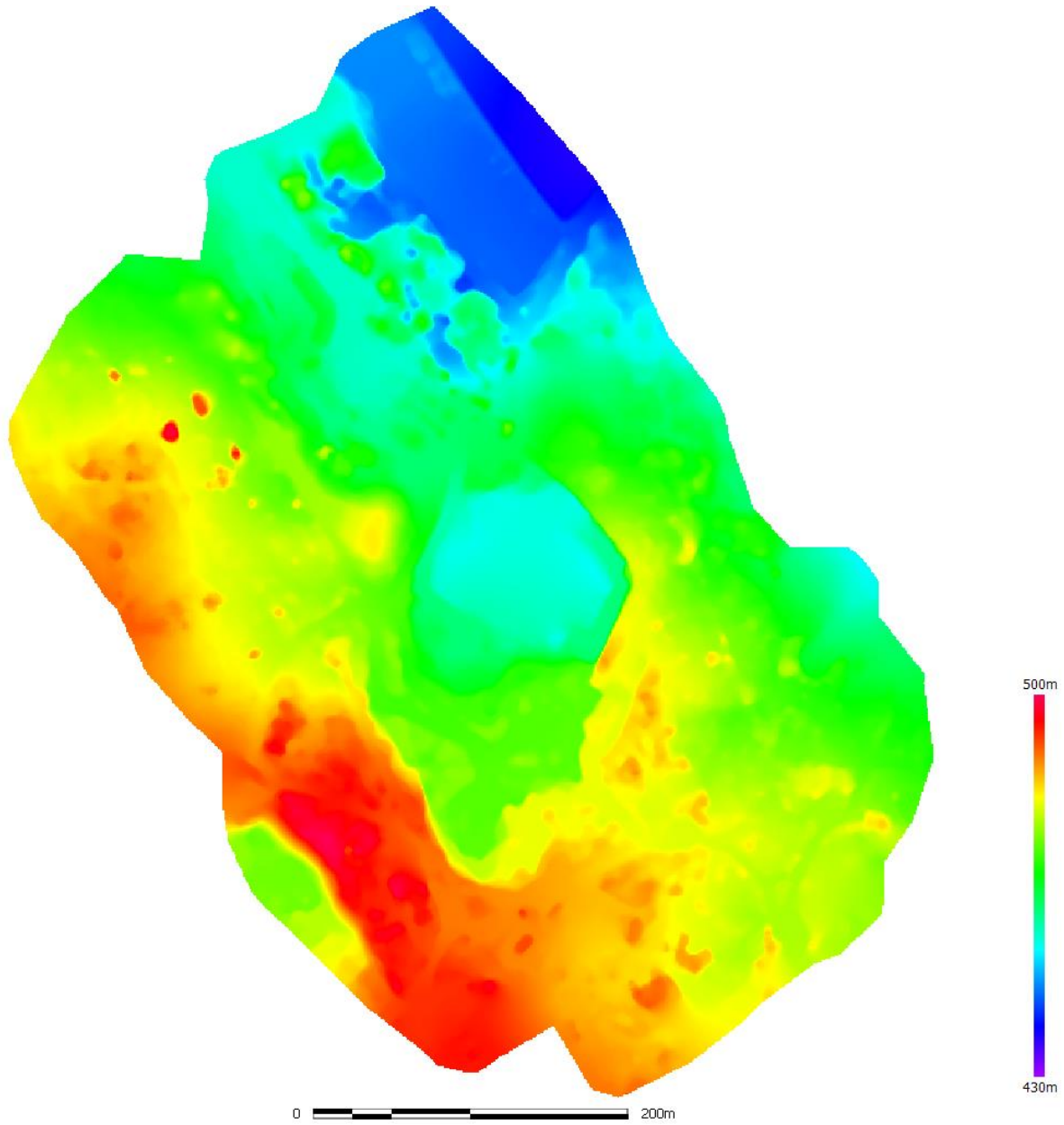
# Modelo digital de elevação

Resolução do 1m

Densidade média 216.18 pontos/m<sup>2</sup>

Grid:

do ponto:



## Processando parâmetros

<b>Estatística do ajustamento do grupo</b>	
Imagens	589
Imagens registradas	588
Número de pontos de controle em solo	11
Pontos equivalentes 3D	464893
Erro de reprojeção de RMS	0.956348
Erro máximo de reprojeção	35.9764
<b>Parâmetros de otimização</b>	
Parâmetros	f, ppx, ppy, k1, k2, k3, t1, t2
<b>Nuvem densa de pontos</b>	
Número de pontos	36721824
<b>Gride de malha regular</b>	
Tamanho da célula do Grid	1m
Número de Triângulos	472559
<b>Ortomosaico</b>	
Tamanho	29074 x 34459
Resolução em Pixels	0.020m

## Camera Parameters

<b>Camera:</b>	DJI FC330		
<b>Focal length (f):</b>	2350.04px	<b>Radial distortion (k1):</b>	-0.001443
<b>Principal point X (ppx):</b>	2042.00px	<b>Radial distortion (k2):</b>	-0.005223
<b>Principal point Y (ppy):</b>	1449.27px	<b>Radial distortion (k3):</b>	0.002708
<b>Tangential distortion (t1):</b>	-0.000090	<b>Tangential distortion (t2):</b>	-0.000041



## Anexo 2



3Dsurvey

Programa de processamento de imagens aéreas

Versão 2.15.1

## Relatório

**Projeto:** lega-gorda-01-07

---

**Data de aquisição da** 2022-07-01

**imagem:**

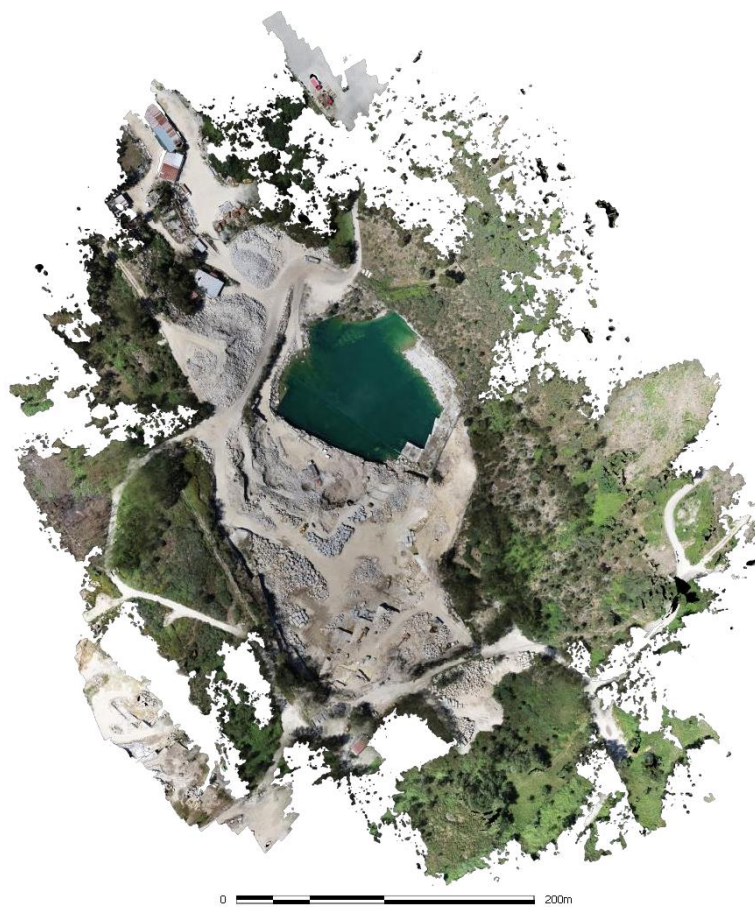
---

<b>Modelo da câmera</b>	<b>Resolução</b>	<b>Distância focal</b>	<b>Tamanho do sensor</b>	<b>Tamanho do pixel</b>
DJI FC6310R	4864 × 3648	8.8mm	13.2 × 9.9 mm	2.714µm

---

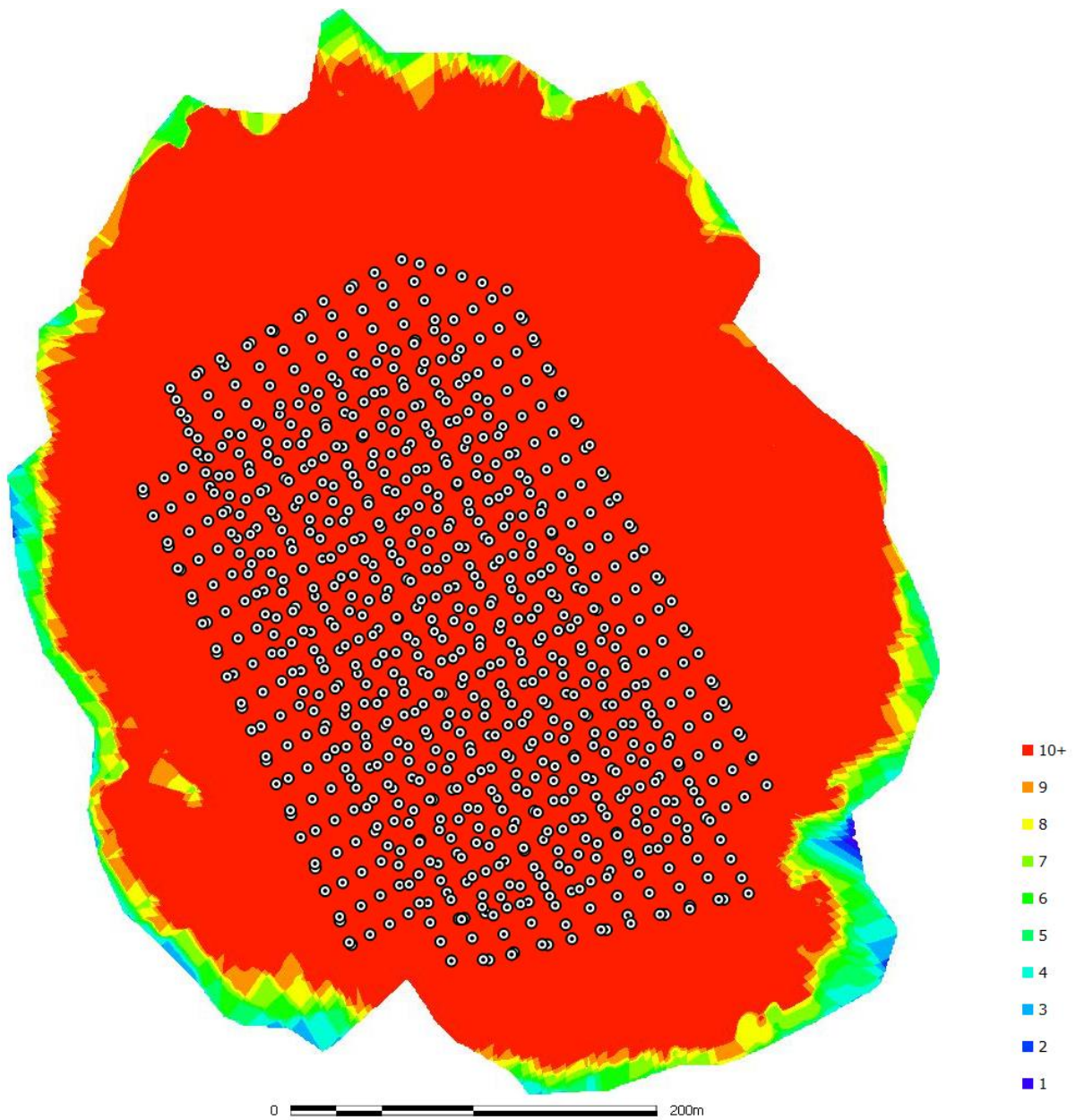
**Tamanho da** 504.01m **× Resolução em** 0.010m  
**Ortofoto:** 586.18m **pixels:**

---



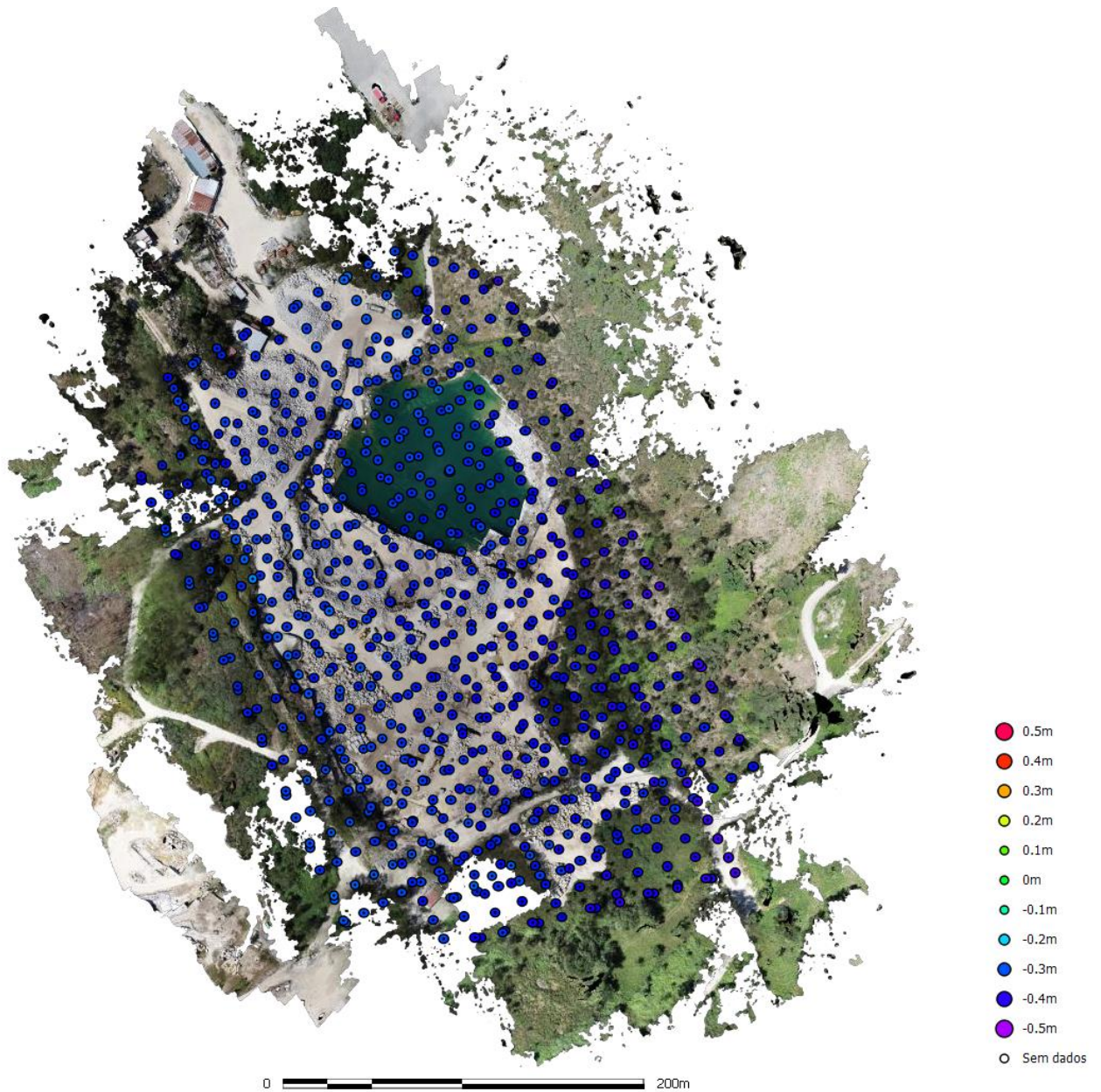
# Dados do levantamento

<b>Número de imagens:</b>	de 799	<b>Número de imagens registradas:</b>	799
<b>Altitude de voo:</b>	87.2m	<b>Número de pontos chave (keypoints) por imagem / média:</b>	1677
<b>Resolução solo:</b>	no 0.0303m	<b>Georreferenciamento:</b>	Sim

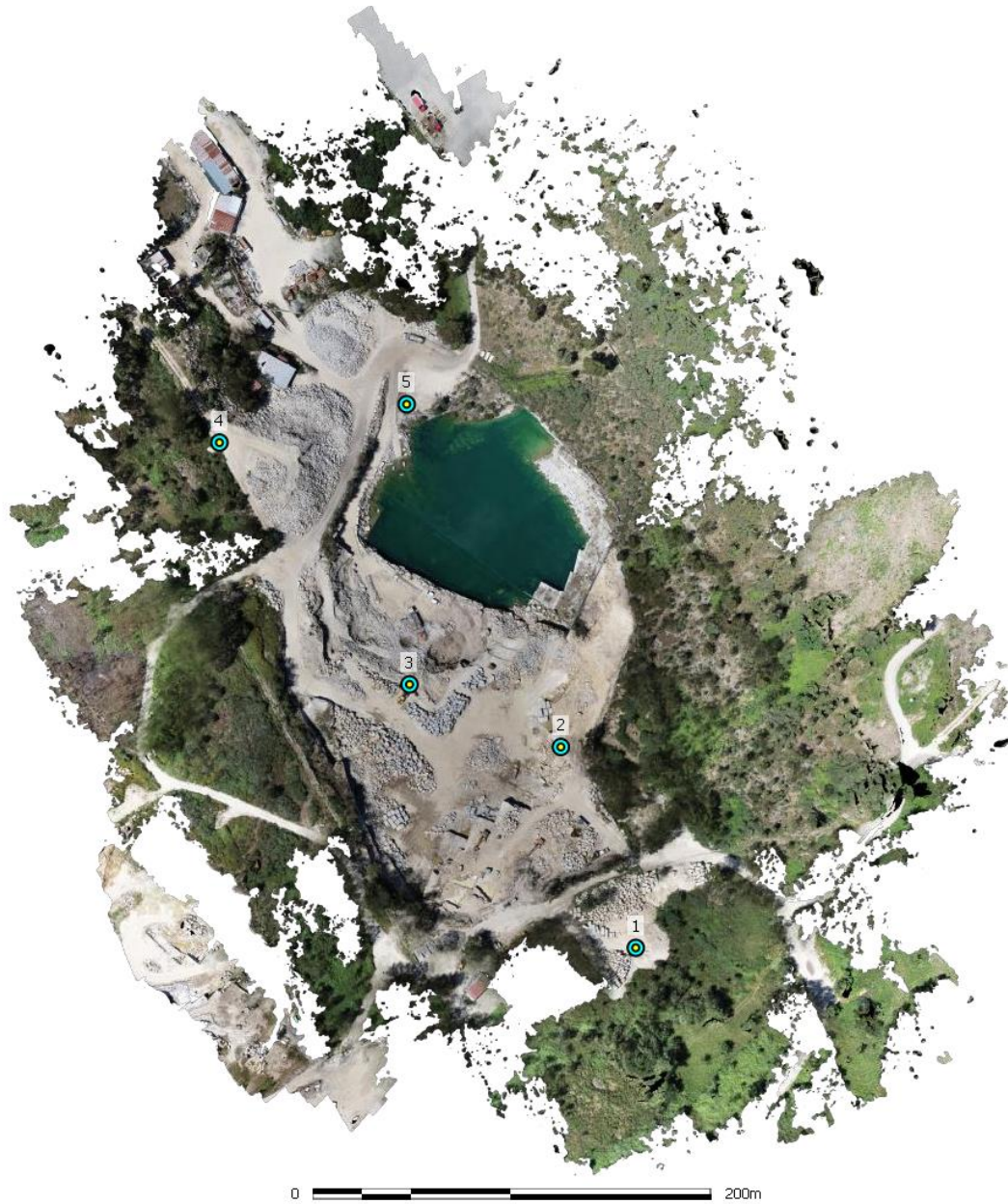


# Posições das câmeras

X erro	Y erro	Erro horizontal	Erro vertical	Erro total
0.056m	0.029m	0.064m	0.343m	0.349m



## Pontos de controle em solo (GCP)



ID do ponto	Coordenadas			Erros				Número de projeções
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	3D [m]	
1	-10577.088	167456.184	485.110	-0.004	-0.002	-0.004	0.006	42
2	-10614.605	167556.733	480.356	0.002	0.006	0.007	0.010	68
3	-10690.421	167588.053	470.668	-0.003	-0.007	-0.004	0.008	98
4	-10785.649	167709.131	476.308	0.002	0.010	0.005	0.011	31
5	-10691.855	167728.309	463.992	-0.005	-0.006	0.000	0.007	71

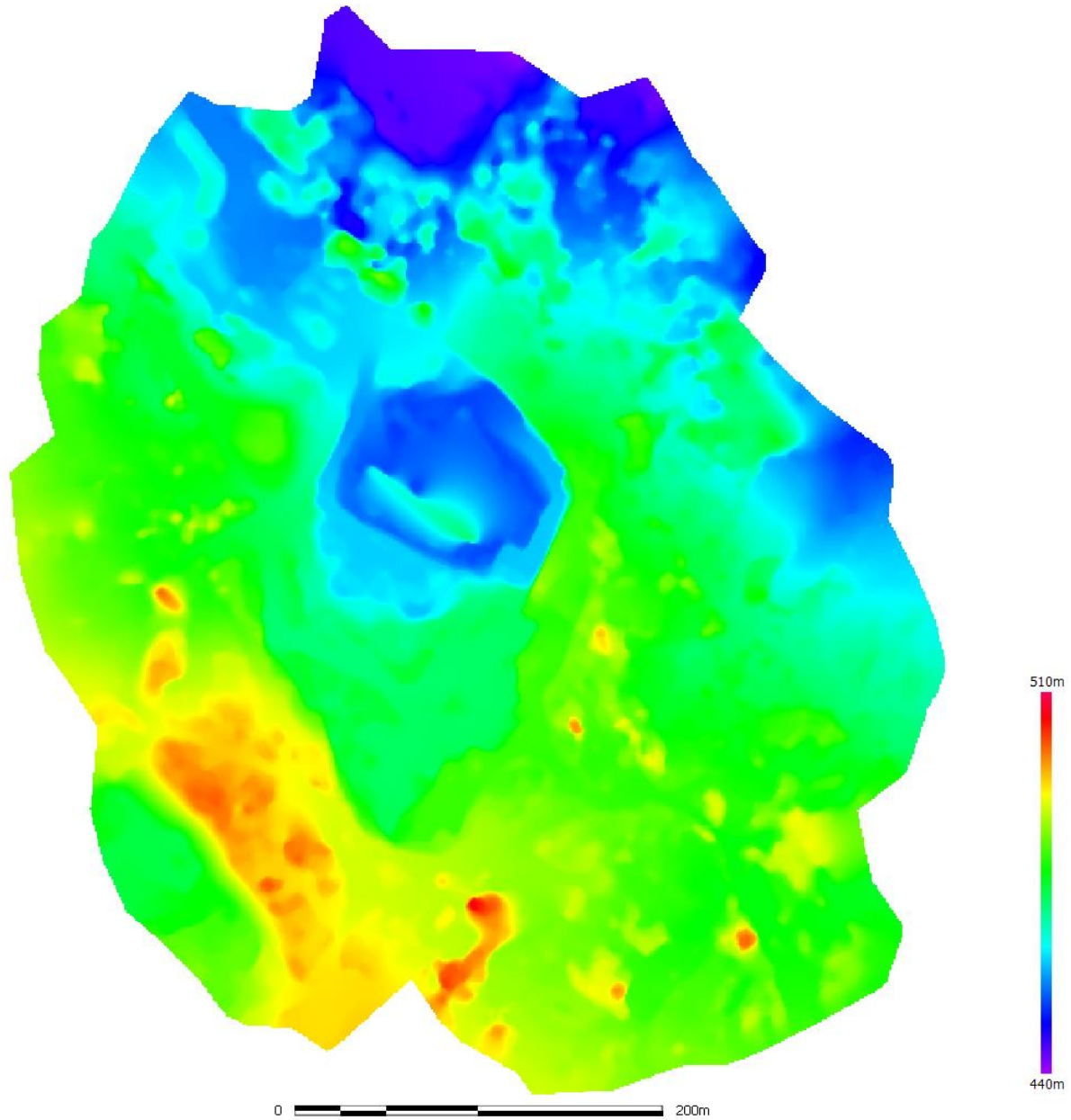
# Modelo digital de elevação

Resolução do 1m

Densidade média 462.56 pontos/m<sup>2</sup>

Grid:

do ponto:



## Processando parâmetros

<b>Estatística do ajustamento do grupo</b>	
Imagens	799
Imagens registradas	799
Número de pontos de controle em solo	5
Pontos equivalentes 3D	1340497
Erro de reprojeção de RMS	0.853949
Erro máximo de reprojeção	20.2279
<b>Parâmetros de otimização</b>	
Parâmetros	f, ppx, ppy, k1, k2, k3, t1, t2
<b>Nuvem densa de pontos</b>	
Número de pontos	71059971
<b>Gride de malha regular</b>	
Tamanho da célula do Grid	1m
Número de Triângulos	424670
<b>Ortomosaico</b>	
Tamanho	50401 x 58618
Resolução em Pixels	0.010m

## Camera Parameters

<b>Camera:</b>	DJI FC6310R		
<b>Focal length (f):</b>	3709.45px	<b>Radial distortion (k1):</b>	-0.007089
<b>Principal point X (ppx):</b>	2406.27px	<b>Radial distortion (k2):</b>	-0.012528
<b>Principal point Y (ppy):</b>	1836.42px	<b>Radial distortion (k3):</b>	0.021136
<b>Tangential distortion (t1):</b>	-0.000178	<b>Tangential distortion (t2):</b>	-0.001207