



Veronica Dutra de Figueiredo
Licenciada em Geologia

**Uso de VANT para monitorização de
infraestruturas portuárias: caso da
Ericeira (Portugal)**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica

Orientadora: Prof.^a Doutora Paula F. da Silva, Prof^a
Auxiliar, FCT-NOVA
Co-orientador: Mestre Eng.^o Alexandre Santos-Ferreira,
Técnico superior, DGRM

Júri:

Presidente: Doutora Eng.^a Maria da Graça Brito
Arguente: Doutor Vitor Santos
Vogal: Doutora Eng.^a Paula F. Da Silva

Uso de VANT para monitorização de infraestruturas portuárias: caso da Ericeira (Portugal)

Copyright © Veronica Dutra de Figueiredo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha orientadora, Prof.^a Doutora Paula Silva, e ao meu co-orientador, Mestre Eng.^o Alexandre Santos-Ferreira, pelos ensinamentos, apoio e disponibilidade, principalmente durante as saídas de campo, e toda ajuda que me foi oferecida para a realização desta dissertação. Também quero agradecer a DGRM pelo apoio técnico oferecido.

Por fim, agradeço à minha família e aos meus amigos pelo suporte e carinho que me foram dados, que me ajudaram a tornar esta jornada mais leve. A minha conquista também é de vocês.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente a minha formação, muito obrigada.

RESUMO

O avanço tecnológico na área de detecção remota para a monitorização espacial tem disponibilizado, ao longo dos anos, melhores equipamentos capazes de maior rapidez para levantamento de dados, produzindo resultados de boa qualidade e a menores custos. É neste contexto que a fotogrametria aérea realizada por veículo aéreo não tripulado (VANT) tem sido utilizada, em alternativa aos métodos geodésicos mais tradicionais, para a monitorização, inspeção e visualização espacial.

No âmbito desta dissertação, realizaram-se levantamentos aéreos por VANT entre os meses de abril e julho de 2020, com o objetivo de fiscalizar a reabilitação de emergência do molhe do Porto da Ericeira, bem como monitorizar as arribas litorais que se desenvolvem para sul dele, identificando potenciais situações de queda de blocos, que representam perigo para as pessoas que circulam nesta área. Os dados obtidos durante os voos foram processados através de plataformas *online* - *DroneDeploy* (versão teste) e *Maps Made Easy* (versão paga, mas de baixo custo). Geraram-se ortomosaicos, modelos digitais de elevação (MDE) em 2,5D e modelos digitais de superfície (MDS) em 3D. A partir destes resultados, monitorizou-se o faseamento da reconstrução da cabeça do molhe, que consistiu na reorganização dos blocos Antifer e preenchimento por blocos rochosos. Nas arribas e com base no modelo 3D, identificaram-se seis áreas onde há instabilidade potencial de blocos.

A comparação dos modelos obtidos nos dois programas, permite afirmar que: (i) os ortomosaicos obtidos no *DroneDeploy* apresentam uma resolução espacial superior e melhor aspecto visual, nomeadamente de textura e coloração; (ii) os resultados do *Maps Made Easy* exibem uma menor quantidade de oclusões; (iii) os MDE em 2,5D e MDS tridimensionais, gerados por ambos os programas, apresentam deformações altimétricas da restituição da superfície da água; e (iv) a resolução do modelo digital tridimensional *online* é maior no *DroneDeploy*. Além disso, a *DroneDeploy* disponibiliza ainda um relatório estatístico que exhibe informações importantes para avaliar a qualidade dos resultados gerados, que demonstra ser útil uma vez que o utilizador não tem poder de decisão por causa do processamento automático *online*. O *Maps Made Easy* não fornece este tipo de relatório, sendo também um pouco inferior na comparação quantitativa dos resultados entre os dois programas de modelação.

Palavras-chave: VANT; molhe; estabilidade de arribas litorais; monitorização portuária.

ABSTRACT

Technological advances in the area of remote sensing for spatial monitoring, have made available, over the years, better equipments capable of faster data collection, producing good quality results and at lower costs. It is in this context that the use of aerial photogrammetry performed by unmanned aerial vehicle (UAV) has been used, as an alternative to more traditional geodesic methods, for monitoring, inspection and spatial visualization.

Within the scope of this dissertation, aerial surveys were carried out by UAV between April and July 2020, with the objective of inspecting the emergency rehabilitation of the Ericeira's harbor breakwater as well as monitoring the stability of the coastal slopes located to the south of this breakwater, identifying eventual unstable rock blocks, which represent a hazard to people who pass by this area. The data obtained during the flights were processed through the online platforms of DroneDeploy (trial version) and Maps Made Easy (a low cost paid version). Orthomosaic, 2.5D digital elevation models (DEM) and 3D digital surface models (DSM) were generated. From these results, the reconstruction stages of the breakwater head, through the reorganization of Antifer blocks and by rock armor infilling, were observed. On the coastal slopes, using the 3D model, 6 areas were identified with rock block instability.

Finally, from the comparison between the results of the two software, it is possible to affirm that: (i) the orthomosaics produced by DroneDeploy present a higher spatial resolution and better visual aspects, such as texture and coloring; (ii) the Maps Made Easy outputs exhibit less occlusions; (iii) the 2.5D DEM and 3D DSM generated by both software, present altimetric deformations related to the restitution of the water surface; and (iv) the resolution of the online DroneDeploy 3D digital model is higher. Additionally, DroneDeploy provides a statistical report that displays relevant information for assessing the outputs quality, since the user has no decision power due to the automatic online processing. Maps Made Easy does not provide this type of report, and the quantitative comparison between the results of the two software is somewhat impaired.

Keywords: UAV; breakwater; coastal cliffs stability; harbor monitoring.

ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Estrutura da tese.....	2
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 Uso de detecção remota para monitorização de movimentos superficiais.....	5
2.1.1 GPS.....	5
2.1.2 LiDAR.....	9
2.1.3 InSAR.....	12
2.2 VANT e aspetos da fotogrametria digital.....	15
2.3 Uso de VANTs.....	19
2.3.1 Sistemas de geoposicionamento do VANT: GPS, RTK e PPK.....	19
2.3.2 Monitorização de infraestruturas portuárias.....	21
2.3.2.1 Exemplos nacionais.....	22
2.3.2.2 Exemplos internacionais.....	26
2.3.3 Monitorização de taludes litorais.....	30
3. CASO DE ESTUDO – TRECHO SUL DO PORTO DA ERICEIRA.....	35
3.1 Área estudada.....	35
3.2 Metodologia utilizada.....	37
3.2.1 Planejamento e levantamento de campo.....	38
3.2.2 Processamento de dados.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 Comparação entre os <i>software DroneDeploy</i> e <i>Maps Made Easy</i>	47
4.2 Monitorização do molhe da Ericeira.....	51
4.3 Monitorização dos taludes costeiros a sul.....	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Localização da área de estudo; (b) localização do deslizamento de Shuping; (c) hill shade da região de deslizamento; (d) visão geral da área (Huang <i>et al.</i> , 2016)....	7
Figura 2. Velocidade média do deslocamento em planimetria e altimetria, e azimute do deslocamento planar para o deslizamento em Shuping (Huang <i>et al.</i> , 2016).....	8
Figura 3. (a) Localização da área de estudo ao longo dos Rios Thompson e Fraser; (b) Goldpan (túnel falso com 60 m para a escala); (c) White Canyon (túnel falso com 23 m para a escala); (d) Mile 109 (túnel falso com 80 m para a escala) (Rowe <i>et al.</i> , 2017)...	11
Figura 4. Mapa de deslocamentos superficiais em escala métrica em White Canyon (Rowe <i>et al.</i> , 2017).....	12
Figura 5. Área de estudo em Alexandria (Sharma <i>et al.</i> , 2016).....	14
Figura 6. Mapa de deslocamento cumulativo a partir de inSAR em Alexandria (Sharma <i>et al.</i> , 2016).....	14
Figura 7. Sistema RTK requer quatro linhas de comunicação constante: (1) entre os satélites e o drone; (2) entre os satélites e a estação GNSS de base; (3) entre a estação GNSS de base e a estação de base do drone; (4) entre a estação de base do drone e o drone (Wingtra, 2020).....	19
Figura 8. Sistema PPK exige apenas duas linhas de comunicação: (1) entre os satélites e a estação GNSS terrestre; e (2) entre os satélites e o drone (Wingtra, 2020).....	20
Figura 9. Ortomosaico do molhe da Ericeira e <i>ground control points</i> marcados em verde e vermelho (Henriques <i>et al.</i> , 2014).....	23
Figura 10. Nuvem de pontos do modelo digital de superfície, no qual o esquema de cores representa a altitude dos pontos (Henriques <i>et al.</i> , 2014).....	24
Figura 11. Foz do rio Arade com o quebra-mar nascente e o quebra-mar poente (Google Earth Pro, 2020).....	25
Figura 12. (a) Ortomosaico do quebra-mar Poente; (b) ortomosaico do quebra-mar Nascente (modificado de Henriques <i>et al.</i> , 2016).....	26
Figura 13. Porto de Baiona e seu molhe de proteção de enrocamento (Google Earth Pro, 2020).....	27
Figura 14. (a) Nuvem de pontos do modelo 3D gerado; (b) superfícies do modelo 3D (González-Jorge <i>et al.</i> , 2014).....	28
Figura 15. Quebra-mar em porto privado em Sanremo, na Itália (Google Earth Pro, 2020).....	39
Figura 16. Comparação entre modelos tridimensionais de 2016 e 2020 (Kersten <i>et al.</i> , 2020).....	33

Figura 17. Localização da área de estudo formada pelo molhe de proteção (em vermelho) e arribas (em amarelo) situadas para sul sob responsabilidade da DGRM....	36
Figura 18. Localização dos pontos de controlo terrestres ao longo do molhe.....	42
Figura 19. Localização dos pontos de controlo terrestres ao longo da arriba.....	44
Figura 20. Ortomosaico referente ao levantamento aéreo do dia 19 de abril de 2020 produzido pelo Maps Made Easy (sem escala).....	48
Figura 21. Modelo digital de elevação do levantamento de 19 de abril e processado através do Maps Made Easy (sem escala).....	49
Figura 22. Modelo 3D, de baixa resolução, do <i>Maps Made Easy</i> para o molhe da Ericeira, onde se identificam deformações na superfície da água, além do farolim e do bloco de betão – em vermelho.....	50
Figura 23. Ortomosaico da cabeça do molhe, sem oclusões, onde se detectam o colapso do setor da cabeça voltado para o mar, tetrápodes partidos, blocos de betão tombados, rotação da base da zona do farolim e fendilhamento na zona estreita do coroamento.....	52
Figura 24. Vista frontal do modelo 3D da cabeça do molhe, onde se destaca a projeção de bloco de rocha para cima dos blocos de betão (círculo vermelho pequeno); um tetrápode partido e remobilizado (círculo vermelho médio); e exposição de substrato de camada de blocos rochosos (círculo vermelho grande).....	53
Figura 25. Ortomosaico do molhe inteiro, com algumas oclusões na parte da água, onde se identificam alguns blocos lançados perto da zona do cais.....	54
Figura 26. Modelo digital de elevação em 2,5D de todo o molhe antes da reabilitação.....	55
Figura 27. (a) Modelo 3D do molhe inteiro; (b) destaque da região da cabeça, com melhor detalhe dos blocos individuais.....	56
Figura 28. Ortomosaico do molhe inteiro durante a reabilitação com apenas uma pequena oclusão na parte da água.....	57
Figura 29. Detalhe da cabeça do molhe durante a reabilitação em ortomosaico.....	58
Figura 30. Modelo digital de elevação com distorções na superfície de água.....	59
Figura 31. Modelo 3D com distorções na superfície de água.....	60
Figura 32. Ortomosaico sem oclusões do molhe inteiro em 04 de junho.....	61
Figura 33. Ortomosaico com detalhe da cabeça do molhe no início de junho e que mostra o seu progressivo preenchimento por blocos rochosos.....	62
Figura 34. Modelo digital de elevação em 2,5D do molhe inteiro no início de junho.....	63
Figura 35. Modelo 3D da cabeça do molhe, com destaque para o alargamento na porção menos exposta (em vermelho) e o preenchimento com blocos rochosos.....	64
Figura 36. Ortomosaico do molhe após a conclusão da sua reabilitação, em julho.....	65

Figura 37. Detalhe da cabeça do molhe após a sua reabilitação.....	66
Figura 38. Modelo digital de elevação 2,5D do molhe após a sua reabilitação.....	67
Figura 39. Detalhe da cabeça do molhe no modelo 3D no final da reabilitação.....	68
Figura 40. Visualização do modelo 3D completo da arriba da Ericeira a sul do molhe e dividido em três zonas: A, B e C, onde se salienta as regiões de instabilidade indicadas pelos círculos a vermelho.....	70
Figura 41. Ampliação do modelo 3D dos taludes, onde se destaca a formação de locas e a potencial precariedade da estabilidade do muro de alvenaria.....	71
Figura 42. Base do talude com algumas obras de estabilização, nomeadamente a construção de uma base de alvenaria e pequeno pilar e cavidades de dissolução à direita.....	72
Figura 43. Fenda na parte de trás do bloco - destacada em vermelho.....	72
Figura 44. Perspectiva do recuo da arriba com a quedas de blocos de diversas dimensões.....	73
Figura 45. Detalhe da zona B da arriba da Figura 40.....	74
Figura 46. Existência de locas profundas, por fenómenos de erosão interna, e blocos potencialmente instáveis na zona B da arriba.....	74
Figura 47. Bloco em risco de queda – visto em 3D.....	75
Figura 48. Imagem aérea de bloco assinalado em vermelho, em perigo elevado de queda, com destaque para a estrutura de suporte, junto à escadaria.....	76
Figura 49. Aspeto de mais cavidades de dissolução na zona B da arriba.....	76
Figura 50. Aspeto de bloco, destacado em vermelho, em perigo de tombamento na zona C.....	77
Figura 51. Aspeto da erosão diferencial e descalce significativo que colocam blocos em balanço na parte superior da arriba na zona C.....	78
Figura 52. Aspeto de cavidades de dissolução profundas no trecho da arriba junto às Furnas.....	78
Figura 53. Extrato do modelo 3D da arriba onde aparece um bloco proeminente, em perigo de queda, no extremo sul da zona C.....	79

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Resumo dos levantamentos aéreos efetuados e dos respectivos parâmetros associados.....	41
Tabela 2. Coordenadas dos pontos de controle terrestres no molhe.....	42
Tabela 3. Coordenadas dos pontos de controle terrestres para arriba.....	43

1. INTRODUÇÃO

A erosão em ambientes costeiros é um fator relevante na gestão de riscos, pois pode gerar eventos associados a danos em pessoas, estruturas e infraestruturas próximas da linha de costa, como por exemplo as portuárias, especialmente quando o processo erosivo pode desencadear episódios repentinos e catastróficos (Jaud *et al.*, 2019).

Por isso, as zonas de praia, portos e marinas necessitam ser protegidas da ação das ondas e tempestades; as estruturas típicas que cumprem essa função são os quebra-mares, esporões, diques longilitorais e molhes, que em regra incluem blocos de enrocamento. A energia das ondas é capaz de induzir movimentações nos blocos individuais dessas estruturas, comprometendo a respectiva integridade (Bueno *et al.*, 2015).

É primordial estudar o estado de degradação destas estruturas, para que seja possível fazer intervenções de manutenção atempadas nas suas partes críticas. Em particular, quebra-mares e molhes degradados sofrem com a perda e/ou a desorganização de blocos, especialmente na cabeça, e podem apresentar blocos partidos, comprometendo assim a sua função de proteção (Santos-Ferreira, 2015).

Para além do efeito direto sobre a estrutura, a ação das ondas age sobre as fundações de quebra-mares e molhes, podendo induzir fluidificação parcial, em especial nas fundações compostas por solos finos de baixa permeabilidade e/ou por solos arenosos com uma densidade relativamente baixa (*op. cit.*).

As infraestruturas, nomeadamente as portuárias, possuem um tempo de vida útil, no qual devem desempenhar as funções para as quais foram projetadas, seguindo os padrões de exigência relativos ao desempenho, segurança, estabilidade, aptidão em serviço e aparência aceitável. A redução gradual do desempenho da infraestrutura é um acontecimento natural, mesmo com a devida manutenção. Sempre que os níveis de serviço e segurança se situam abaixo do aceitável, são necessárias obras de requalificação para manter a funcionalidade da infraestrutura (Rodrigues, 2013).

Neste contexto, existe um interesse crescente em utilizar técnicas rápidas e menos onerosas para a monitorização da movimentação/degradação das infraestruturas portuárias com o objetivo de aumentar a segurança nessas zonas, nomeadamente recorrendo à utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT).

O VANT, vulgarmente designado por drone, tem sido utilizado como ferramenta de fotogrametria por conta da sua agilidade em coletar imagens estereoscópicas de forma

rápida - por exemplo, consegue cobrir uma região de 600 m de extensão em 8 min, e permitir o estudo de áreas de difícil acesso (Jaud *et al.*, 2019).

O uso de VANTs também apresenta os seus desafios, tais como (Duffy *et al.*, 2018):

- (i) Planeamento do voo, incluindo a verificação da área a sobrevoar, os lugares seguros para descolagem e aterragem do VANT, bem como a obtenção das permissões legais para o voo;
- (ii) As operações de voo devem ser efetuadas apenas após a calibração prévia do equipamento;
- (iii) Verificação das condições atmosféricas, em particular a velocidade do vento e a humidade devem ser avaliadas previamente e atempadamente; e por fim
- (iv) Qualidade dos dados obtidos, que é afetada pela própria exatidão do sistema de posicionamento global embutido no VANT, assim como a formação de sombras pela angulação com o sol, e estabilidade das imagens em condições de forte vento, que provocam a perda de nitidez.

1.1 Objetivos

A presente dissertação visa cumprir os requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (NOVA) e tem como objetivo discutir a utilização de VANT na monitorização da degradação do molhe do porto da Ericeira e acompanhar a sua reabilitação, já que foi danificado durante as tempestades de inverno no final de 2019. Adicionalmente o mesmo equipamento é utilizado para inspecionar as zonas instáveis nas arribas litorais que se estendem para sul daquele molhe.

Naquele trecho daqueles taludes costeiros, ativos geotécnicos do porto da Ericeira, ocorrem quedas de blocos de rocha e de partes de um antigo muro de contenção em alvenaria ali existente, colocando em risco os frequentadores da Praia dos Pescadores que por ali circulam.

O uso de VANT para a monitorização desta área, constitui um teste para a sua aplicação futura noutras infraestruturas portuárias da Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos - DGRM. As principais vantagens deste método para auxiliar e simplificar as operações de inspeção visual a desenvolver por esta entidade são o seu custo relativo baixo e a rapidez na aquisição de dados com

elevada precisão, além de ser capaz de fornecer regularmente atualizações sobre a área, em particular em trechos de acesso difícil ou que, muitas vezes, se apresentam inacessíveis de outra forma. Espera-se que, através dos levantamentos de VANT realizados nesta investigação, se otimize a eficiência desta parte do serviço portuário durante a vida útil dos seus ativos (Santos-Ferreira *et al.*, 2019).

1.2 Estrutura da tese

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos.

Inicia-se por um capítulo introdutório – Capítulo 1, que apresenta a relevância do estudo desenvolvido, o contexto em que se insere e os seus objetivos.

O Capítulo 2, trata do estado da arte, e está dividido em três secções: a primeira aborda técnicas de detecção remota utilizadas atualmente para monitorização de movimentos superficiais; a segunda, tece algumas explicações teóricas sobre a fotogrametria, restituição fotogramétrica e aspetos da qualidade dos modelos digitais associados; a terceira discute os VANTs, subdividindo-se de acordo com sistema de georreferenciação, GPS ou RTK/PPK, que utilizam e o seu uso na monitorização de infraestruturas portuárias, através de exemplos nacionais e internacionais, e por fim, a monitorização de taludes costeiros por VANTs.

No Capítulo 3, dividido em três secções, apresenta o caso de estudo, o porto da Ericeira, nomeadamente o enquadramento geográfico e geológico da área estudada, a metodologia utilizada, inclui o planeamento e levantamento de campo, e por fim, o processamento de dados.

O Capítulo 4 expõe e discute os resultados obtidos com os levantamentos efetuados, iniciando-se pela comparação entre os resultados da modelação desenvolvida em dois programas - *DroneDeploy* e *Maps Made Easy*. Discorre ainda sobre os resultados da monitorização periódica, desenvolvida entre abril e julho de 2020, quer do molhe da Ericeira durante a sua reabilitação, quer das arribas litorais a sul do molhe.

No Capítulo 5 são feitas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, colocam-se as referências bibliográficas utilizadas na dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Uso de detecção remota para monitorização de movimentos superficiais

O uso da detecção remota para investigar movimentos de terreno tem crescido bastante neste século. Isto deve-se ao facto de se poder adquirir grande volume de informações e cobrir extensão do terreno com exatidão e resolução espacial elevadas, de uma forma mais rápida e eficiente.

As técnicas de detecção remota mais utilizadas para avaliação de movimentos de terreno são o *Global Positioning System* - GPS, *Light Detection and Ranging* - LiDAR, e *Interferometric Synthetic Aperture Radar* - InSAR (Jaboyedoff *et al.*, 2012).

O GPS possibilita monitorizar, com precisão centimétrica a milimétrica, o deslocamento de terrenos; com esses dados em mãos, é possível traçar soluções que visam prevenir a instabilização de trechos de taludes ou minimizar os seus efeitos, bem como assegurar a proteção de infraestruturas que se encontrem nas suas imediações. O InSAR é mais utilizado para a detecção de pequenos deslocamentos de terreno, com precisão milimétrica, ocorridos em grandes áreas; o LiDAR oferece uma topografia com exatidão centimétrica, além de ser capaz de penetrar a vegetação e também possui outras aplicações complementares, desde cartografia a monitorização de deformações superficiais, nomeadamente devidas a deslizamentos ou quedas de bloco (*op. cit.*).

Em seguida abordam-se os principais fundamentos teóricos destas três técnicas, suas vantagens e desvantagens, assim como a breve descrição de casos práticos da sua aplicação.

2.1.1 GPS

O GPS é um sistema de satélites de navegação global (GNSS) que orbitam a Terra e que permitem obter o posicionamento, em tempo real, de qualquer ponto do planeta.

O funcionamento do GPS é dado através dos seguintes segmentos: os satélites - segmento espacial, transmitem os sinais continuamente para a Terra, sendo recebidos pelas estações terrestres de controlo - segmento de controlo, que permite a monitorização dos satélites, e pelos utilizadores - segmento do utilizador (Hofmann-Wellenhof *et. al.*, 2001).

O posicionamento efetuado com o GPS baseia-se na medição entre a antena receptora do utilizador e de, pelo menos, quatro satélites, por trilateração, que se baseia no registo de distâncias entre os vértices de uma rede imaginária de triângulos. Deste

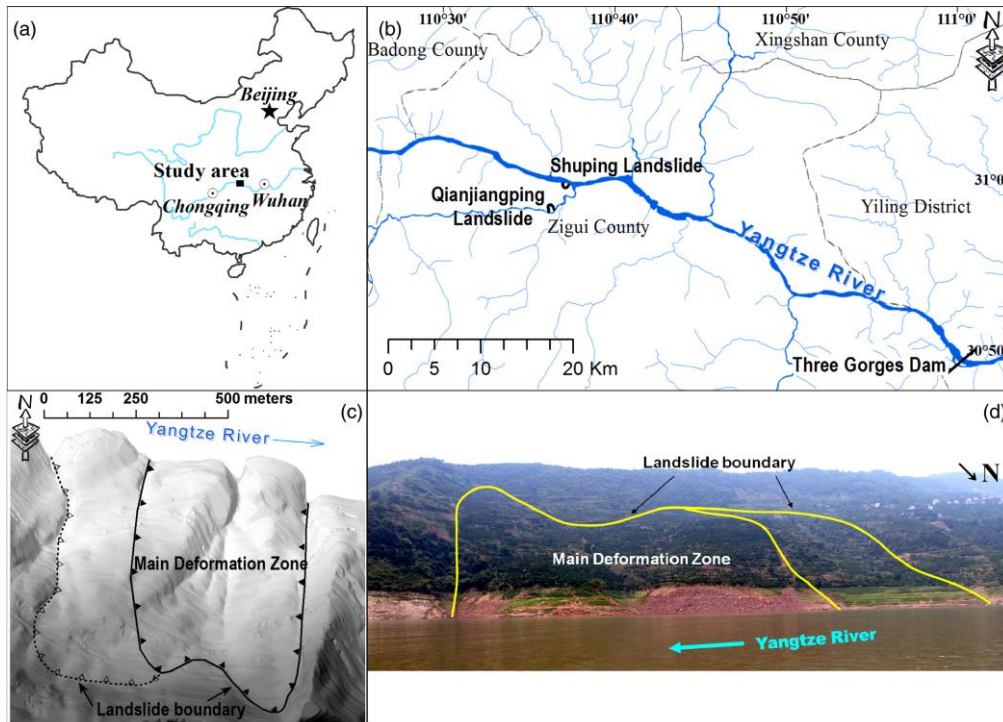
modo, as distâncias e as posições dos satélites permitem georreferenciar a antena relativamente ao referencial (Bajaj *et al.*, 2002).

O GPS apresenta as seguintes vantagens: funciona em qualquer ponto do planeta, a qualquer hora, sob quaisquer condições climáticas, não tem custos adicionais e é de fácil utilização, por possuir uma calibração automática (Pinto, 2000). As suas limitações estão associadas aos erros de exatidão, que dependem da quantidade de sinal recebida. O sinal pode ser afetado por efeitos atmosféricos, erros temporais e de receptores ou por fatores físicos, tais como: presença de montanhas, vegetação densa/alta e prédios altos na envolvente, entre outros (Silveira, 2008).

O GPS também pode ser aplicado na monitorização de movimentos superficiais, ou seja, deslocamentos de referências visualmente acessíveis. Para tal é necessário definir uma situação de referência a partir da qual se determinam os deslocamentos relativos nos vários períodos de observação (Abidin *et al.*, 2004).

No caso prático que é apresentado a seguir, realizou-se a recolha manual de dados de GPS, bem como o uso contínuo de GPS automático, com uma resolução temporal boa, para monitorizar um deslizamento de terreno de Shuping, no reservatório da Barragem das Três Gargantas, na China (Huang *et al.*, 2016). Os movimentos de terreno na região são despoletados pelas flutuações no nível de água da albufeira e pelas condições climáticas, especialmente em episódios de chuva intensa e prolongada (*op. cit.*). O deslizamento localiza-se na região de Zigui, a oeste da província de Hubei, na margem direita do Rio Yangtze, a cerca de 47 km da barragem - Figura 1a e 1b.

O escorregamento tem 800 m de comprimento, na direção norte-sul, e 700 m de largura, na direção leste-oeste, com uma espessura variável entre 30 e 70 m, formando um volume de material de $27,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ – Figura 1c e 1d. Este evento coloca em risco a população nas imediações, que teve que ser realojada, como também causa obstrução da infraestrutura rodoviária da zona, danos na própria barragem e afeta as rotas de navegação pelo Rio Yangtze (*op. cit.*).



(a) Localização geral da área; (b) localização na região de Zigui; (c) hipsometria da envolvente ao movimento; (d) vista geral da área instabilizada

Figura 1. Escorregamento de Shaping na região de Zigui, China (Huang *et al.*, 2016)

A monitoração do deslizamento iniciou-se em 2003, quando a superfície de deslizamento foi reativada pela subida do nível de água na albufeira para a cota (135,00). Foram colocadas 8 estações para levantamento manual com um GPS – G1 a G7, situadas dentro da zona principal de deformação, enquanto a estação G8 encontra-se fora dela, bem como uma estação de referência, GB0 (*op. cit.*). De 2003 a 2012, o registo de dados GPS era efetuado manualmente, com periodicidade mensal ou duas a três vezes por mês sempre que a taxa de deslocamento era mais elevada. Tal metodologia contudo utilizava demasiados recursos humanos e era lenta, tendo uma resolução temporal pior (*op. cit.*).

Deste modo e com o objetivo de obter informações de forma mais exata dos deslocamentos superficiais, igualmente confiável mas com maior resolução temporal, optou-se por utilizar um GPS, automático e contínuo, capaz de obter, quase em tempo real, os dados de posicionamento. Estes novos dados de posicionamento apresentaram uma precisão de $2 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ em planimetria, e $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ em altimetria (*op. cit.*).

Esta monitorização foi implementada em junho de 2012, quando se identificou uma alteração da evolução na taxa de deformação. A rede de monitorização desta metodologia foi a mesma que a utilizada previamente. A diferença é que no caso do uso de GPS automático e contínuo, são colocados sistemas de fornecimento de energia,

para garantir o funcionamento autónomo do instrumento por períodos longos e sem que exista necessidade de manutenção no local (*op. cit.*).

Para poder correlacionar os dados sobre a movimentação superficial a partir das duas metodologias, preferiu-se utilizar dados de velocidade média do movimento (mm/dia) em vez de apenas deslocamentos, em mm. Os resultados exibidos na Figura 2 sugerem que existe uma zona de movimentação mais rápida, dentro da massa instabilizada, que se estende da porção oeste – G5, passa pela porção central – G2 e G4, e prolonga-se até a área de sopé – G1 e G6. Esta zona de deformação mais rápida tem uma morfologia mais côncava, que facilita a infiltração de água, enquanto as partes mais ocidentais e orientais da zona de deformação principal têm uma morfologia mais convexa, sendo mais estáveis (*op. cit.*).

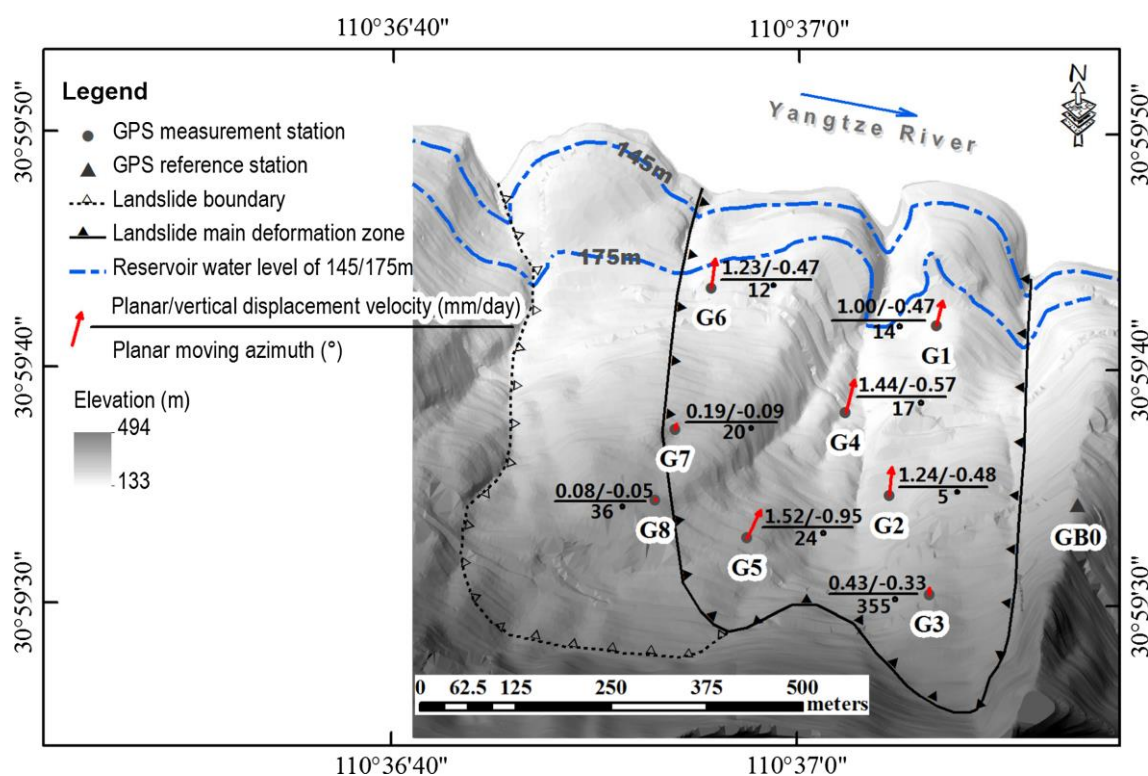


Figura 2. Velocidade média de deslocamento, em planimetria e altimetria, e azimute do deslocamento planar para o deslizamento em Shuping (Huang *et al.*, 2016)

A partir dos resultados dos deslocamentos acumulados na zona de movimentação mais rápida, nota-se que a evolução temporal da movimentação é gradual e consiste em dois tipos de movimentação: períodos curtos de taxa de deslocamento elevada – mais que 4 mm/dia em planimetria e 2 mm/dia em altimetria; e períodos mais longos de movimentação mais lenta – taxas de deslocamento semi-constantes de 1 mm/dia, aproximadamente (*op. cit.*).

2.1.2 LiDAR

LiDAR é um sensor remoto que faz uso de emissão de feixes de luz pulsada (*laser*) para medir distâncias na superfície terrestre. O *laser* emitido entra em contato com a superfície a ser estudada, depois é refletido de volta para o equipamento e registra-se o tempo que o *laser* levou para ir à superfície e voltar. As distâncias são calculadas através da velocidade da luz (NOAA, 2018).

Os sistemas de LiDAR podem ser divididos em três grupos de acordo com a sua função: (a) LiDAR de absorção diferencial, usado para medição de elementos químicos na atmosfera; (b) LiDAR do tipo *Doppler*, usado para medição da velocidade de um objeto em movimento; (c) LiDAR do tipo *scanner* retrorefletor, usado como instrumento de posicionamento, e é o tipo referido nesta dissertação. Neste tipo, distinguem-se os topográficos e os batimétricos: os primeiros usam um *laser* com comprimento de onda de infravermelho próximo, enquanto os outros usam um comprimento de onda verde, capaz de penetrar na água (Heritage & Large, 2009).

As aplicações do LiDAR podem ser divididas basicamente em cartografia - de vegetação ou áreas alagadas, estudo de aspectos geomorfológicos e monitorização - erosão costeira, dinâmica de cursos de água e movimentos de terreno (Jaboyedoff *et al.*, 2012).

O LiDAR é composto por um *laser scanner*, um sistema de posicionamento global (GPS) e um sistema de navegação inercial (INS), e geralmente pode ser colocado em pequenos aviões, helicópteros, VANTs, carros ou pode ser do tipo terrestre (NOAA, 2018).

O LiDAR aerotransportado (ALS – *airbone laser scanner*), registam 2 pontos/m² de terreno e a exatidão do posicionamento varia entre 5 e 30 cm. A utilização do sensor LiDAR montado em helicóptero, que voa a menor velocidade e altitude, registam-se em média 20 pontos por metro quadrado e a exatidão passa para 5 cm. O LiDAR terrestre (TLS – *terrestrial laser scanner*) é capaz de obter nuvens de dados mais densas, com cerca de 10.000 pontos/m² de terreno, e com uma maior exatidão de posicionamento - 1 cm (Jaboyedoff *et al.*, 2018).

A informação obtida com o LiDAR é uma nuvem de pontos contendo geralmente milhões de medições *laser* de distâncias, que representam a superfície onde o *laser* incidiu. Cada ponto da nuvem regista as coordenadas, *x*, *y* e *z*, além da intensidade na qual o sinal é refletido (Kemeny & Turner, 2008).

A densidade da nuvem de pontos está ligada à resolução espacial do modelo, ou seja, é um parâmetro que influencia na exatidão do modelo final e na definição do tamanho dos objetos identificados. Tal resolução é definida no campo pelo operador, antes da aquisição de dados (Bitenc *et al.*, 2008).

A intensidade do sinal refletido é afetada por diversas características, umas intrínsecas da superfície estudada, tais como a rugosidade, composição e teor de humidade ou teor em água; além de parâmetros técnicos, como a distância da superfície ao *laser scanner* e o ângulo de incidência do impulso *laser* (Lim *et al.*, 2005).

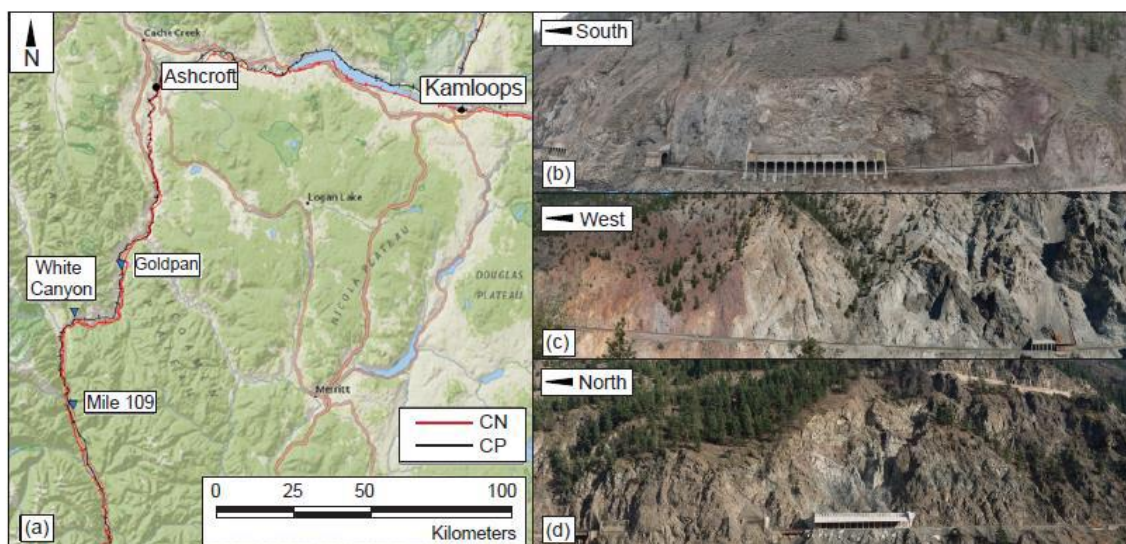
A partir do processamento desses dados recolhidos, elaboram-se modelos digitais de terreno e modelos tridimensionais com precisão elevada, que podem ser integrados com outros tipos de dados (NOAA, 2018).

Algumas limitações desta técnica são os custos do sensor, que são elevados e que não compensam para utilização em pequenas áreas; os pulsos de *laser* podem ser afetados pelas condições atmosféricas - de chuva forte e tempo nublado; e são produzidos grandes *datasets*, que levam tempo para serem interpretados (NOAA, 2018).

O exemplo prático selecionado corresponde ao levantamento com LiDAR terrestre de três áreas ao longo de uma ferrovia em Ashcroft, no Canadá. O objetivo do levantamento foi avaliar a ocorrência de movimentos de terreno que pudessem aumentar do risco de descarrilhamento na ferrovia, quer pela colisão de massas rochosas, quer pela obstrução do caminho de ferro; além de categorizar esses movimentos de acordo com o mecanismo de rotura, volume, litologia e rugosidade do plano de rotura (Rowe *et al.*, 2017).

Um desafio encontrado no estudo de estabilidade de taludes em caminhos ferroviários é a limitação física ou mesmo a proibição do acesso a esses taludes. Nesse contexto, o uso do LiDAR torna-se uma ferramenta indispensável para a monitorização dessas áreas. A nuvem de pontos gerada pelo rastreamento a *laser* pode ser comparada com a nuvem de pontos levantada posteriormente, para detetar deslocamentos nos taludes ao longo do tempo. Os modelos tridimensionais dos taludes gerados têm aplicações futuras para análise geotécnica e geomecânica (*op. cit.*).

A região de estudo é composta por três áreas ao longo da ferrovia nacional canadense: Goldpan, White Canyon e Mile 109 – Figura 3.



(a) Localização da área de estudo ao longo dos Rios Thompson e Fraser; (b) Goldpan (túnel falso com 60 m para a escala); (c) White Canyon (túnel falso com 23 m para a escala); (d) Mile 109 (túnel falso com 80 m para a escala)

Figura 3. Trecho de ferrovia em Ashcroft, no Canadá, monitorizada com LiDAR terrestre (Rowe *et al.*, 2017)

A área de Goldpan é formada, maioritariamente, por rochas basálticas-andesíticas e rochas sedimentares vulcanoclásticas e estende-se por cerca de 800 m ao longo do Rio Thompson, com uma altura média de 65 m (*op. cit.*). A geologia de White Canyon é mais complexa, apresentando granodiorito na porção mais a oeste, e ainda diques de tonalito e gnaiss, ao longo de cerca de 2,4 km, em taludes com inclinação média de 40° a 45° (*op. cit.*).

A área de Mile 109 é formada por taludes compostos por camadas de argilito, siltito, folhelho, arenito e conglomerado, numa extensão de 210 m e altura média de 220 m (*op. cit.*).

A recolha de dados foi realizada pelo *laser scanner Optech ILRIS 3D-ER*, cuja exatidão especificada pelo fabricante é de 7 mm para um alcance de 100 m. Os levantamentos nas áreas de estudo iniciaram em 2013, com uma frequência de leituras a cada 2 a 3 meses, até o último levantamento do projeto, em 2016. Os dados foram processados através do *software PolyWorks* (*op. cit.*).

A Figura 4 exibe uma carta com os deslocamentos que ocorreram entre outubro de 2015 e fevereiro de 2016 em uma seção oriental de White Canyon. Deslocamentos positivos, de vermelho a verde, representam acumulação de material, como depósito de tálus. Os deslocamentos negativos, de verde a roxo, indicam perda de material por

queda ou por escavação de material efetuada pela equipa de manutenção da ferrovia (*op. cit.*).

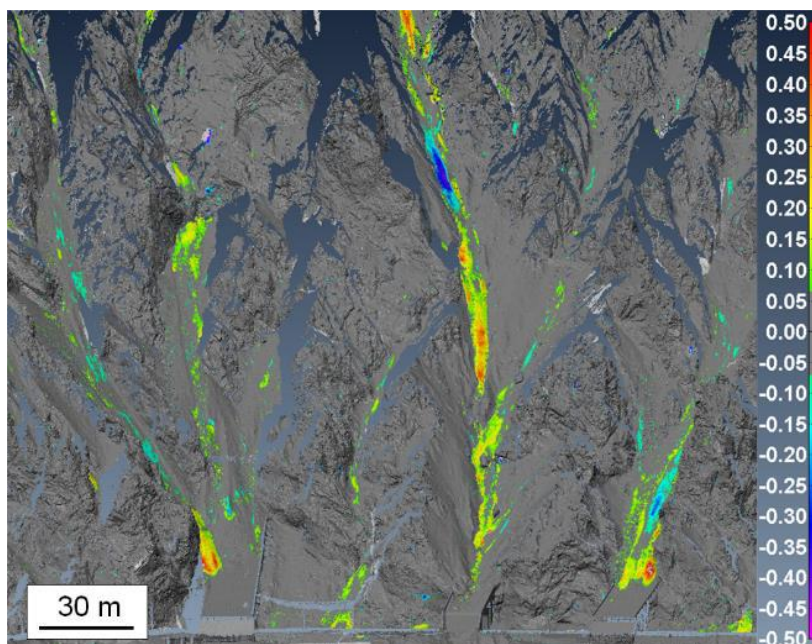


Figura 4. Carta de deslocamentos superficiais em escala métrica em White Canyon, Canadá (Rowe *et al.*, 2017)

A densidade de pontos de um rastreamento a *laser* depende da distância entre o *laser scanner* e o talude estudado, e do ângulo de incidência do *laser*. A média do alcance do *scanner* até o talude em Goldpan oscilou entre 170 e 230 m, o que resultou numa distância entre pontos no modelo de 6 cm. Essa resolução permite que detectar movimentos de volume de rocha a partir de 0,1 m³ (*op. cit.*).

Em Mile 109, a distância média até ao talude era de 450 m e o espaçamento entre pontos de 7 cm, permitindo detectar deslocamentos de material com um volume superior a 0,5 m³. Por fim, a distância entre o *scanner* e o talude em White Canyon variou entre 400 e 600 m, configurando um espaçamento médio entre pontos de 10 cm e a detecção de volume de rochas superior a 1 m³ (*op. cit.*).

2.1.3 InSAR

InSAR, em português interferometria radar de abertura sintética, é uma técnica de detecção remota do tipo ativa, que faz uso de micro-ondas para cartografar a superfície terrestre. Por atuar nesse espectro eletromagnético, pode ser aplicado em condições de tempo nublado e tem capacidade operacional diurna ou noturna. O sensor SAR pode ser colocado numa pequena aeronave ou em satélite (Pepe & Calò, 2017).

Tal tecnologia permite a construção de um modelo geomorfológico do terreno, com base na topografia e permite observar modificações na superfície terrestre, induzidas por deslizamentos, terremotos, erupções vulcânicas entre outras (*op. cit.*).

O sistema SAR cartografa a superfície do terreno através da utilização de duas ou mais imagens de uma área alvo obtidas em intervalos de tempo distintos, fazendo a medição de mudanças de fases consecutivas do sinal de radar obtidas nessas imagens (*op. cit.*). É possível determinar a deformação da superfície com uma precisão milimétrica. Estas imagens provêm da transmissão de impulsos de micro-ondas para a superfície terrestre, que reflete de volta para o sensor, no qual o tempo de retorno da micro-onda, a sua fase e a sua intensidade são registradas (Geoscience Australia, 2020).

O sensor mede tanto a amplitude como a fase do sinal do radar refletido pela superfície da Terra. A amplitude é a força do sinal que é gravado, ou seja, a refletividade dos alvos, e a fase é a fração de um ciclo de ondas completo que chega ao sensor. A medição da fase é importante para avaliar as deformações. Uma diferença de fase entre duas medições sequenciais significa que houve alguma deformação superficial, que tanto pode ser horizontal como vertical (assentamento ou empolamento). Por exemplo, se a superfície terrestre sofre um assentamento, o sinal radar emitido terá de viajar uma distância maior para atingir a superfície, o que resulta numa fração extra da onda radar para ser refletida e gravada, denominada como mudança de fase (Geoscience Australia, 2020).

O uso do InSAR permite, portanto, o varrimento de áreas extensas, de forma rápida e menos dispendiosa, e com precisão elevada. No entanto, esta técnica também apresenta suas limitações, por exemplo: em regiões húmidas, com formação de neve ou com vegetação densa, as superfícies sofrem alterações nas suas propriedades refletoras, chamada de decorrelação temporal, impossibilitando estimar a deformação (Zebker & Villasenor, 1992).

No caso prático de aplicação referido seguidamente, realizou-se um levantamento com base em InSAR de satélite para avaliar o deslocamento superficial ao longo de um corredor de condutas em Alexandria, Canadá. Em geral, os sistemas de condutas são afectados por problemas devidos a escorregamentos, rastejos ou subsidência. A monitorização *in situ* desses sistemas através de extensómetros e inspeções visuais acaba por ser pontual, constituindo um problema para avaliar grandes áreas, tornado-se dispendiosa. Nesse contexto, o uso do InSAR permite cobrir uma ampla área e com precisão elevada, na ordem de alguns milímetros (Sharma *et al.*, 2016).

A área de estudo - Figura 5, foi afetada por um escorregamento translacional com superfícies múltiplas de deslizamento, interessando 3 km do corredor de uma conduta (*op. cit.*).



Figura 5. Área de estudo em Alexandria (Sharma *et al.*, 2016)

A aquisição de dados foi realizada entre outubro de 2014 e de 2015 a partir de um sensor RADARSAT-2 montado em um satélite. A Figura 6 mostra a carta dos deslocamentos após o processamento dos dados (*op. cit.*).

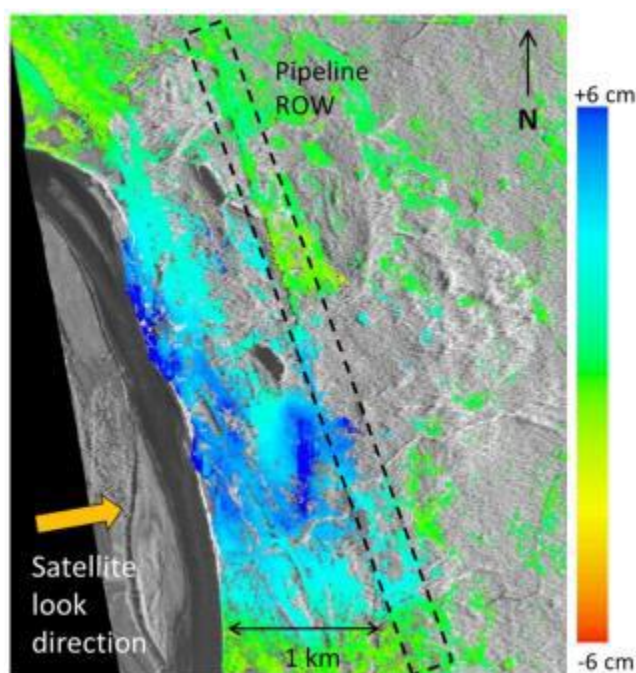


Figura 6. Carta de deslocamento cumulativo do terreno em Alexandria obtida a partir de inSAR (Sharma *et al.*, 2016)

Os movimentos de descida em direção ao talude estão marcados a azul, os movimentos de levantamento – provenientes da acumulação de rochas e solos no sopé, estão em amarelo e vermelho, enquanto os deslocamentos próximos de zero estão a

verde (*op. cit.*). É possível observar nessa figura que a porção norte do sistema de condutas é relativamente estável, mas o trecho sul intersecta a zona de escorregamento, passando de um deslocamento próximo de zero para 4 cm. Áreas com grandes diferenças de deformação são particularmente importantes, pois são pontos de deformação concentrada nas condutas (*op. cit.*).

2.2 VANT e aspetos da fotogrametria digital

A fotogrametria é a ciência e tecnologia para obter informações acerca de objetos físicos e sobre o ambiente, através do processo de recolha, medição e interpretação de imagens fotográficas (American Society of Photogrammetry, 1980). A aplicação mais tradicional da fotogrametria é a extração de informações topográficas, isto é, modelos de terreno, a partir de imagens aéreas.

A fotogrametria pode ser dividida em dois grandes grupos: fotogrametria terrestre e fotogrametria aérea; esta subdivide-se em três categorias: analógica, analítica e digital.

Na aplicação de fotogrametria com o uso de VANT - fotogrametria digital, é fundamental que durante a aquisição de imagens ocorra a sobreposição longitudinal, de pelo menos 80%, e lateral, de pelo menos 60%, entre as imagens. A sobreposição está relacionada com a percentagem em que uma fotografia se sobrepõe à seguinte, reconhecendo-se pontos em comum entre duas ou mais imagens. Quanto maior o número de pontos reconhecidos pelo *software* de processamento de imagens, menor será o erro de georreferenciação do modelo desenvolvido (Borges *et al.*, 2015).

Este requisito decorre do conceito de estereoscopia – para extrair a elevação de um objeto em cena, ou seja, para construir um modelo tridimensional, é necessário que ele seja fotografado em diferentes perspectivas (Zekkos *et al.*, 2018).

A restituição fotogramétrica pretende obter de imagens aéreas as feições planimétricas e/ou altimétricas de um alvo, ou seja, visa a geração de ortofotos, modelos digitais e nuvens de dados em 3D.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos *software* de fotogrametria de acesso livre tem aumentado, o que acaba por reduzir os custos e viabilizar ainda mais os trabalhos de levantamento fotogramétrico. Alguns exemplos de *software* gratuitos mais usados são: *VisualSFM* (Bartos *et al.*, 2014; Mlambo *et al.*, 2017; Vacca *et al.*, 2018), *CloudCompare* (Mlambo *et al.*, 2017; Tung *et al.*, 2018; Lucarelli *et al.*, 2019) e *MicMac* (Duarte *et al.*, 2017; Rupnik *et al.*, 2017; Jaud *et al.*, 2018).

Esses programas são opções eficientes para a construção de modelos de boa qualidade, de forma simples e rápida. No entanto, deve-se atender aos problemas derivados da formação de espaços vazios na nuvem de pontos e da qualidade da textura. Certamente, a utilização desses programas depende da finalidade do projeto e do nível de detalhe pretendido.

Os *software* de uso comercial e profissional são ferramentas confiáveis que conseguem gerar modelos mais exatos e precisos, de maior qualidade, com melhor textura e podem ser aplicados em quaisquer projetos (Bartos *et al.*, 2014). Para o presente estudo, a restituição fotogramétrica foi realizada pelos *software* comerciais da *DroneDeploy*, versão de teste, gratuita, e o *Maps Made Easy*, versão paga.

DroneDeploy e *Maps Made Easy* são ambas aplicações *web* que permitem que o utilizador faça o carregamento das imagens obtidas por ele mesmo, enquanto o programa se encarrega de fazer o processamento, *online*, das imagens. A maior vantagem deste tipo de processamento *online* é a sua rapidez, pois não exige que o utilizador tenha um computador com elevada capacidade de processamento interno. No final, são gerados produtos como cartas, ortomosaicos georreferenciados, nuvens de pontos, modelos tridimensionais, modelos digitais de altitude (MDE) e modelos digitais de superfície (MDS) que são facilmente exportados em diferentes formatos – *GEOTIFF*, *SHP*, *JPG*, *PDF*. Estes programas também possuem outros recursos, como medição de distâncias, áreas, volumes e contagem de vegetação. Ambos os programas têm aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento, por exemplo estudos forenses, arqueológicos, ambientais, geológicos, estruturais entre outros (DroneDeploy, 2020; Maps Made Easy, 2020).

O *Maps Made Easy* é uma aplicação paga consoante o número de pontos e resolução espacial dos mapas. No início e após o registo *online*, o utilizador recebe 500 pontos para usar, o que equivale a um mapa de 50 acres (202.342,8 m²) com uma resolução de 2,54 cm por pixel. A resolução padrão é de 5,08 cm por pixel, que permite uma área de 600 acres (2.428.114 m²) ser mapeada por \$30 USD com uma sobreposição longitudinal e lateral de 60%, ou seja, um custo de \$0.05 USD por acre (Burnham, 2019).

Descreve-se a metodologia que estes *software* seguem para a reconstrução tridimensional - 3D. Primeiramente, ocorre a identificação de pontos comuns entre as imagens sobrepostas – um processo conhecido como “extração de atributo”. A resolução da imagem, a sobreposição e a textura afetam o resultado dessa extração (Zekkos *et al.*, 2018).

A etapa seguinte consiste na geração de um modelo 3D “bruto”, isto é, uma nuvem de pontos de baixa densidade, e na estimação da posição e orientação da câmera para cada foto. Esta etapa é executada por um processo de ajustamento que inclui algoritmos para correspondência de pontos, triangulação de pontos 3D, e para a eliminação automática – filtragem, de objetos em movimento (*op. cit.*).

Para aumentar a exatidão do modelo 3D, pontos de controlo terrestre são identificados ao longo do processo, e são incluídos para otimizar o processamento de parâmetros intrínsecos da câmera - distância focal, tamanho do sensor, distorção das lentes, e extrínsecos – posicionamento e orientação da câmera (*op. cit.*).

Por consequência, essa nuvem de pontos de baixa qualidade é significativamente densificada por algoritmos de estereoscopia para obter, por fim, a nuvem de pontos densa. A nuvem de pontos densa produzida apresenta similaridades com aquelas obtidas por outros métodos de detecção remota, como o LiDAR (*op. cit.*).

A última etapa consiste no pós-processamento e na criação de um modelo digital de superfície. Tal modelo é gerado pela identificação dos pontos de controlo através das suas coordenadas. Na teoria, é necessário um mínimo de pelo menos quatro pontos de controlo para o posicionamento do modelo no sistema de coordenadas. No entanto, certamente 4 pontos não são suficientes para áreas extensas e para alvos de geometria complexa (*op. cit.*).

Na etapa de pós-processamento gera-se uma nuvem de pontos tridimensional, ortofoto e modelos digitais de elevação (MDE) e de superfície (MDS). Ortofoto é uma imagem, ou um conjunto de imagens – ortomosaico, que foi geometricamente corrigida através do processo de ortorectificação. Isso significa que a escala da ortofoto é uniforme e que é possível fazer medições diretas nela. Geralmente, o ortofoto é apresentado em vista de planta, mas outras perspectivas são possíveis (*op. cit.*).

O modelo digital de superfície (MDS) consiste num modelo topográfico altimétrico que representa a superfície considerando valores altimétricos inerentes às edificações, à vegetação e a todos os acidentes artificiais. Já o modelo digital de terreno (MDT) é um modelo topográfico altimétrico que representa a superfície a nível do terreno, ou seja, não considera o que está acima do terreno, como edificações, vegetações e acidentes artificiais. O modelo digital de elevação é um termo genérico e engloba os modelos digitais de superfície e de terreno (DG Território, 2020).

A qualidade dos modelos digitais gerados através da restituição aerofotogramétrica por VANT, é geralmente avaliada pelo indicador da raiz do erro quadrático médio (RMSE

– *root mean square error*). Esta avaliação constitui na utilização de pontos de controlo terrestres, previamente georreferenciados, isto é, que já tiveram suas coordenadas levantadas por algum outro método geodésico, como LiDAR ou GNSS. Como a nuvem de pontos em 3D é gerada usando esses pontos de controlo terrestres, autores têm usado parte desses pontos como pontos de referência – *check points*. O indicador RMSE é interpretado como uma medida do desvio médio entre o valor observado e o gerado pelo modelo, sendo a diferença entre estes valores elevada ao quadrado. No entanto, a interpretação desse indicador estatístico não é fácil (Gomez e Purdie, 2016).

A avaliação da exatidão de um modelo digital não é completamente objetiva se fizer uso somente dos pontos de controlo terrestre, pois a geometria do modelo se adapta a esses pontos, e conseqüentemente, estes irão apresentar um erro menor. O uso complementar de pontos de referência contribui para uma avaliação da exatidão do modelo mais adequada e objetiva. É fundamental que a distribuição espacial desses pontos de referência e de controlo terrestre cubra toda a área modelada, idealmente segundo uma malha triangular, para minimizar a distância máxima entre esses pontos. A distribuição espacial deve também ser homogênia, não se limitar à periferia e/ou centro do modelo (Sanz-Ablanedo *et al.*, 2018).

Segundo Sanz-Ablanedo *et al.* (2018), o erro vertical é cerca de 2,5 vezes o erro em planimetria. Outra questão é que se forem utilizados poucos pontos de controlo terrestre, a raiz do erro quadrático médio dos pontos de referência será de ± 5 vezes a média do *ground sampling distance* – GSD. GSD é a distância, medida no terreno, entre dois *pixels* adjacentes. Se introduzir um número maior de pontos de controlo – mais de 2 pontos por 100 imagens – o erro médio quadrático dos pontos de controlo diminui para ± 2 vezes a média do GSD. Em projetos que requeiram uma elevada exatidão, é necessário um número considerável de pontos de controlo terrestre, isto é, mais de 3 pontos por 100 imagens.

A exatidão de um levantamento aéreo por VANT depende de muitos procedimentos, como o planeamento do voo, a qualidade da imagem da câmara, algoritmos computacionais e o georreferenciamento. Este planeamento deve estar de acordo com as sobreposições longitudinal e lateral adequadas, e o equipamento deve manter uma altitude constante e fazer o recobrimento homogêneo de toda a área a estudar. Com estes cuidados tomados, o subsequente processamento das imagens fotogramétricas é eficiente (*op. cit.*).

2.3 Uso de VANT

2.3.1 Sistemas de geoposicionamento do VANT: GPS, RTK e PPK

O VANT podem utilizar um sistema GPS a bordo, tal como os modelos *DJI Mavic Mini* e *DJI Mavic Pro 2* utilizados neste estudo, para calcular o geoposicionamento da câmara através da trilateração de satélites. Neste caso, é de se esperar uma menor exatidão, de apenas alguns metros, especialmente em altimetria, e por isso, o levantamento de pontos de controlo terrestre é fundamental para diminuir esses erros.

Podem ainda recorrer à utilização do sistema RTK (*Real-time kinematic*) ou PPK (*Post-processed kinematic*) no levantamento aéreo que aumenta, consideravelmente, a exatidão do posicionamento da câmara, tanto em planimetria quanto em altimetria, a escassos poucos centímetros. O uso desses sistemas dispensa a necessidade de utilizar pontos de controlo terrestre (Wingtra, 2020).

O funcionamento do sistema RTK é mostrado na Figura 7: um VANT com um receptor destes a bordo recolhe dados oriundos dos satélites e da base terrestre estacionária, em tempo real, durante o seu voo; os dados provenientes da base terrestre servem para corrigir os erros de sinal do satélite e, assim, a exatidão chega a ser de 2 a 3 cm, tanto na horizontal quanto na vertical. Para o pleno funcionamento deste sistema, é necessário que não haja interrupções de sinal entre a estação GNSS de base e a base de controlo (operador), e entre a base de controlo (operador) e o VANT. Como a correção do posicionamento ocorre durante o voo, quando o drone aterra, a correção está finalizada (*op. cit.*).

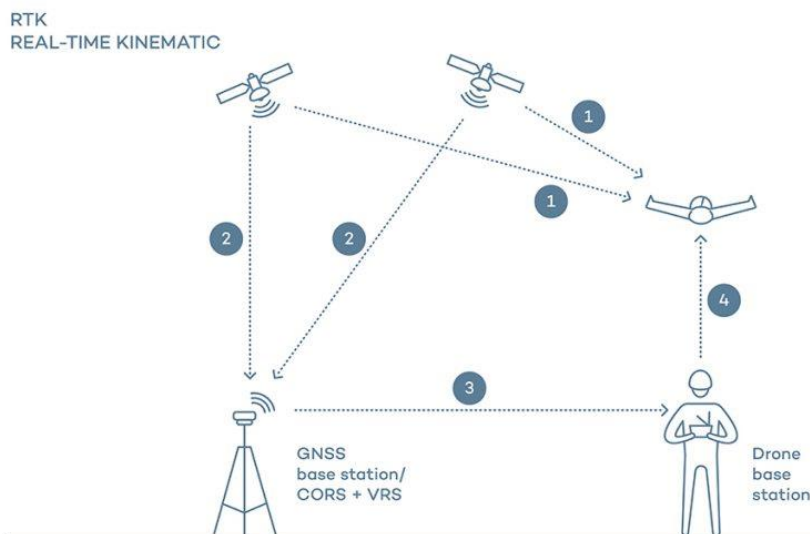


Figura 7. Sistema RTK requer quatro linhas de comunicação constante: (1) entre os satélites e o VANT; (2) entre os satélites e a estação GNSS de base; (3) entre a estação GNSS de base e a estação de base do VANT; (4) entre a estação de base do VANT e o VANT (Wingtra, 2020).

No entanto, é comum ocorrerem falhas de sinal nessas linhas de comunicação, o que resulta em perda de dados. E é neste contexto que o sistema PPK apresenta melhores resultados.

Um VANT com receptor PPK a bordo sobrevoa a área de estudo, recolhe dados recebidos por satélites e guarda-os para correção, após a finalização do voo. Dados de posicionamento numa estação GNSS terrestre também são reunidos e utilizados para corrigir os erros dos dados de satélite; este modo, aumentam a exatidão do levantamento aéreo. Com o PPK, não há necessidade de comunicação entre a estação GNSS terrestre e a base de controlo do VANT, e entre a base de controlo e o próprio equipamento. Após a conclusão do voo, o processo de correção deve ser realizado através de *software* específico – Figura 8 (Wingtra, 2020).

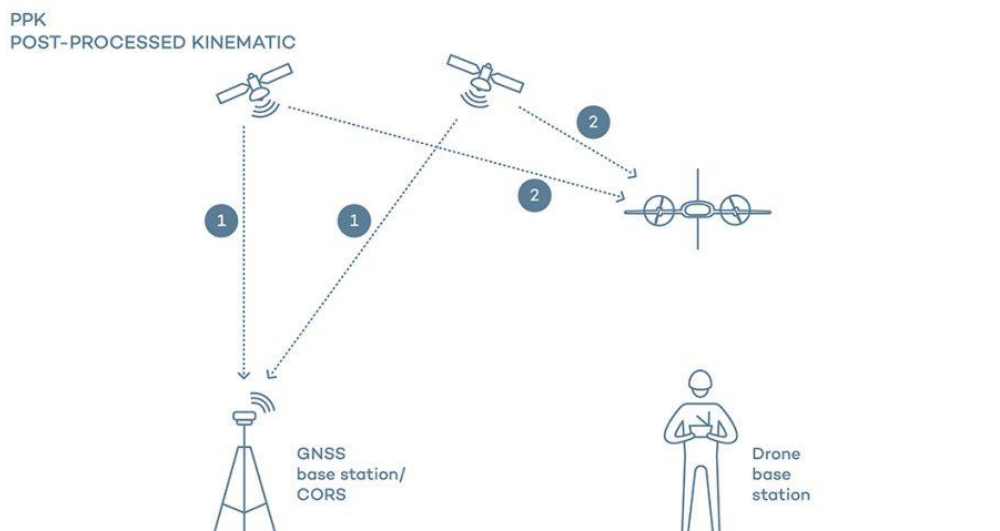


Figura 8. Sistema PPK exige apenas duas linhas de comunicação: (1) entre os satélites e a estação GNSS terrestre; e (2) entre os satélites e o VANT (Wingtra, 2020).

Por causa da exigência de apenas duas linhas de comunicação, o método PPK é mais estável, apresenta correções mais confiáveis e uma configuração mais simples. Em ambos os métodos – PPK e RTK – o processamento dos resultados precisa ser realizado em *software* e *hardware* específicos, ou seja, o grau de complexidade dos dados é maior, além do custo operacional ser também mais elevado, pois os VANTs com esses receptores a bordo são mais caros que os convencionais com GPS a bordo (Pix4D, 2020).

2.3.2 Monitorização de infraestruturas portuárias

Quaisquer ações tomadas de forma organizada e estruturada para a manutenção, preservação, ou para a melhoria do serviço de ativos durante a vida útil, levando em consideração a otimização de custos, fazem parte da gestão de ativos de um projeto (Wolf *et al.*, 2015). Dentro dos tipos de ativos tangíveis em portos, existem os ativos geotécnicos, como por exemplo taludes naturais ou antrópicos, fundações, molhes em enrocamento ou aterros, entre outros (Sydney Ports Corporation, 2002).

A gestão de ativos é baseada em oito pontos: (a) gestão de dados, que inclui a organização de dados obtidos em diferentes formatos – folhas de campo, tabelas ou dados de GPS, entre outros; (b) inventário de ativos e suas condições; (c) níveis de serviço, que são descritos pela qualidade do serviço oferecido, do ponto de visto do utilizador; (d) vida útil de ativos, que avalia como o seu desempenho deteriora com o tempo, (e) medidas de desempenho e índices, servem como indicadores para avaliação do sucesso da implementação da gestão de ativos; (f) gestão do risco, cuja função é identificar, analisar e mitigar riscos que podem causar danos às infraestruturas; (g) análise de custo-benefício por ciclo de vida, para avaliar e calcular os prós (benefícios) e contras (custos) dos ativos ao longo do ciclo de vida, considerando mudanças no desempenho, deterioração e perigo potencial para os ativos; (h) sistema de suporte à decisão (AASHTO, 2013).

Infraestruturas que interagem em meio marinho, tais como as portuárias, estão submetidas a condições mais severas do que em outros ambientes, aos processos de fendilhação, corrosão e degradação química, física e biológica. Por isso, a manutenção dessas infraestruturas, a partir da sua inspeção e reabilitação cíclica, é muito significativa no âmbito da engenharia civil, tendo em conta a importância econômica dessas infraestruturas para a sociedade (Del Grosso, 2001).

Dentro da zona portuária, as estruturas mais importantes talvez sejam os quebra-mares e molhes de proteção. Elas são projetadas e construídas para proteger o porto, e para resistir as condições temporais mais adversas e extremas. Devem suportar as ações de ondas, marés, correntes marítimas, ventos, dinâmica de sedimentos marinhos; e demais fatores que levam à sua degradação (Henriques *et al.*, 2014).

A monitorização de infraestruturas portuárias a partir de fotogrametria obtida por VANT é uma técnica de baixo custo, que produz dados precisos, flexíveis e que podem ser integrados com sistemas geográficos de informação (González-Jorge *et al.*, 2014).

Tal técnica torna-se uma alternativa interessante em relação a outros métodos geodésicos, devido ao seu custo relativo baixo, especialmente quando se trata da

monitorização de infraestruturas em pequenos portos, que não geram grande faturação, como é o caso do Porto da Ericeira, em Portugal (Henriques *et al.*, 2014).

No geral, quando comparados a outras estruturas, como barragens e pontes, os quebra-mares são muito menos monitorizados. Isto se deve ao fato de que a sua deterioração, usualmente, não coloca a vida de pessoas em risco e os deslocamentos estruturais são mais significativos após grandes tempestades (Henriques *et al.*, 2014). Sendo assim e considerando as vantagens já mencionadas da cartografia aérea por VANT, esta técnica pode-se tornar cada vez mais utilizada, promovendo a diminuição deste cenário de falta de monitorização de infraestruturas em portos e contribuindo para sua gestão mais sustentável.

A seguir apresentam-se alguns casos de estudo, nacionais e internacionais, em que a monitorização de infraestruturas portuárias recorreu a VANT.

2.3.2.1 Exemplos nacionais

Um estudo mais antigo realizado no Porto de Ericeira, em 2013, teve o objetivo de avaliar a qualidade do ortomosaico e do modelo digital de superfície gerado a partir de fotogrametria aérea obtida por VANT.

O molhe da Ericeira é uma infraestrutura com 440 m de comprimento e 35 m de largura. O coroamento tem 6,5 m de largura com uma altura de 9 m em relação ao zero hidrográfico. Ele é composto por um núcleo de material fino, revestido por uma camada filtrante para evitar a perda de finos, recoberto por blocos de betão armado. O paramento mais exposto, voltado para as ondas que o atingem de nordeste, é coberto por blocos tetrápodes; já a extremidade sudoeste do quebra-mar é coberta por cubos com arranhaduras; as outras partes do molhe são cobertas por grandes blocos de rochas (Henriques *et al.*, 2014).

O voo do drone foi realizado no dia 9 de fevereiro de 2013, em condições não muito favoráveis, pois teve que lidar com ventos fortes e com a maré alta que encobria parte dos blocos (Henriques *et al.*, 2014).

O modelo de VANT utilizado foi o *SenseFly Swinglelet CAM*, de asa fixa, muito leve, pesando apenas 500 gr, com uma câmara digital RGB acoplada da *Canon IXUS 220 HS* que possui uma resolução de 3000x4000 *pixels*. A unidade de controlo consiste no *software eMotion* (do próprio *SenseFly*) instalado em um computador portátil acoplado com uma antena externa para comunicação via rádio (*op. cit.*).

O software *eMotion* foi utilizado para o planeamento da rota de voo, a altura de voo e os pontos de interesse. Por fim, as configurações do voo determinaram uma sobreposição lateral entre fotos de 60%; uma sobreposição longitudinal de 90%; uma altitude de voo de 185 m; uma rota do tipo *waypoints* (pontos de passagem) com uma foto tirada a cada 2 s; e uma resolução espacial de 2 cm por *pixel* (*op. cit.*).

Diversos pontos de controlo terrestres (*ground control points*) tiveram as suas coordenadas levantadas por GNSS, com o objetivo de auxiliar no georreferenciamento do ortomosaico e modelo digital de superfície gerados, e para verificar a qualidade do posicionamento planimétrico e altimétrico gerados. O sistema de coordenadas geodésico adotado foi o ETRS89 e o sistema de coordenadas cartográfico aplicado o português PT-TM06 (*op. cit.*).

O processamento dos dados de voo foi executado através do software *PostFlight Terra 3D V1* também da empresa *SenseFly*, para gerar o ortomosaico e o modelo digital de superfície - Figuras 9 e 10 (*op. cit.*).

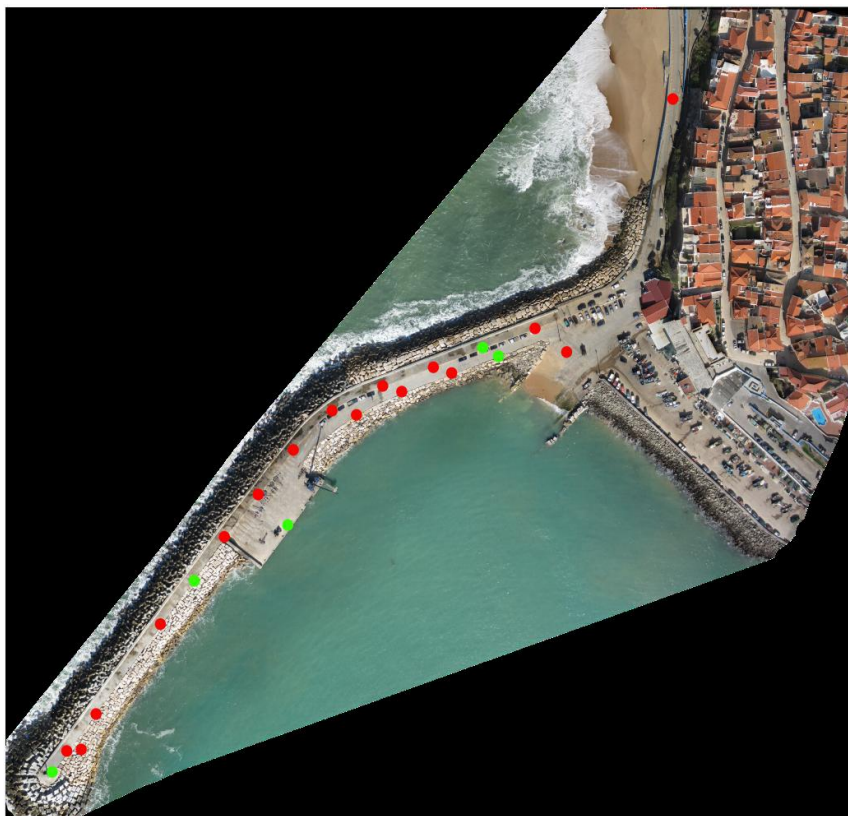


Figura 9. Ortomosaico do molhe da Ericeira e pontos de controlo terrestres marcados a verde e vermelho, sem escala (Henriques *et al.*, 2014)

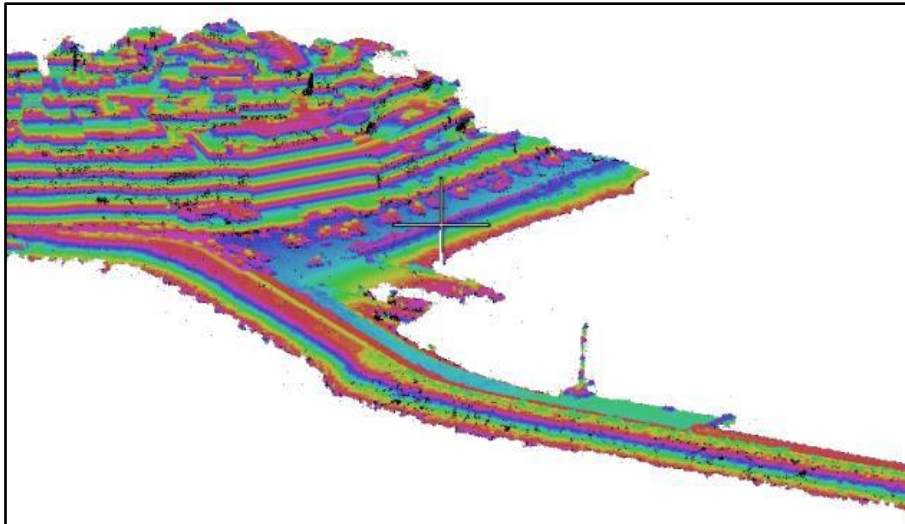


Figura 10. Infografia da nuvem de pontos do MDS, no qual o esquema de cores representa a altitude dos pontos (Henriques *et al.*, 2014)

No entanto, como o voo apresentou falhas de transmissão de dados, provocadas por influência de sinais de antenas de comunicação disponíveis na área, acrescida da altitude relativamente elevada de voo do VANT, que acabou por diminuir a precisão dos modelos gerados, registaram-se erros significativos nos modelos, que chegaram a ser de 116 m em planimetria, na extremidade sul do quebra-mar. Para contornar essa situação, 5 pontos de controlo terrestre foram utilizados para georreferenciar o molhe (*op. cit.*).

Após a análise estatística dos dados de coordenadas obtidos no pós-processamento, identificou-se que a raiz do erro quadrático das coordenadas era de 10 cm em planimetria e 8 cm em altimetria. A precisão do modelo digital de superfície foi de 20 cm e no ortomosaico foi de 15 cm (Henriques *et al.*, 2014). É fundamental notar que esses erros não são frutos da ineficácia da metodologia aplicada, mas sim das dificuldades que ocorreram durante o voo, como ventos fortes, problemas de transmissão de dados, distância entre o operador e o VANT, por falta de local seguro para decolagem e aterragem, entre outros.

É importante salientar que o uso de VANT tem sido incluído na metodologia do novo programa de Observação Sistemática de Obras Marítimas (OSOM+), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para o acompanhamento do comportamento das estruturas e para a recomendação de intervenções de manutenção, em tempo útil, em infraestruturas (Fortes *et al.*, 2019).

A proposta do programa segue quatro componentes principais: (a) Inspeções visuais periódicas realizada por um técnico experiente; (b) Inspeções aéreas periódicas com utilização de VANT; (c) Criação da base de dados ANOSOM-GIS, para armazenar e/ou

consultar as informações obtidas, bem como para avaliar os estados atuais, de evolução e de risco das estruturas; e (d) Utilização de uma aplicação móvel para preenchimento, em tempo real, e visualização das informações da base de dados ANOSOM-GIS (op. cit.).

Outro caso de estudo em Portugal, consiste num levantamento por VANT realizado na foz do Rio Arade, em Portimão, Algarve, que é protegida por um par de quebra-mares, um do lado poente e outro do lado nascente - Figura 11. Estas estruturas têm cerca de 805 m de comprimento, disposição norte-sul, e 645 m de comprimento e azimute 235°, respectivamente (Henriques *et al.*, 2016).

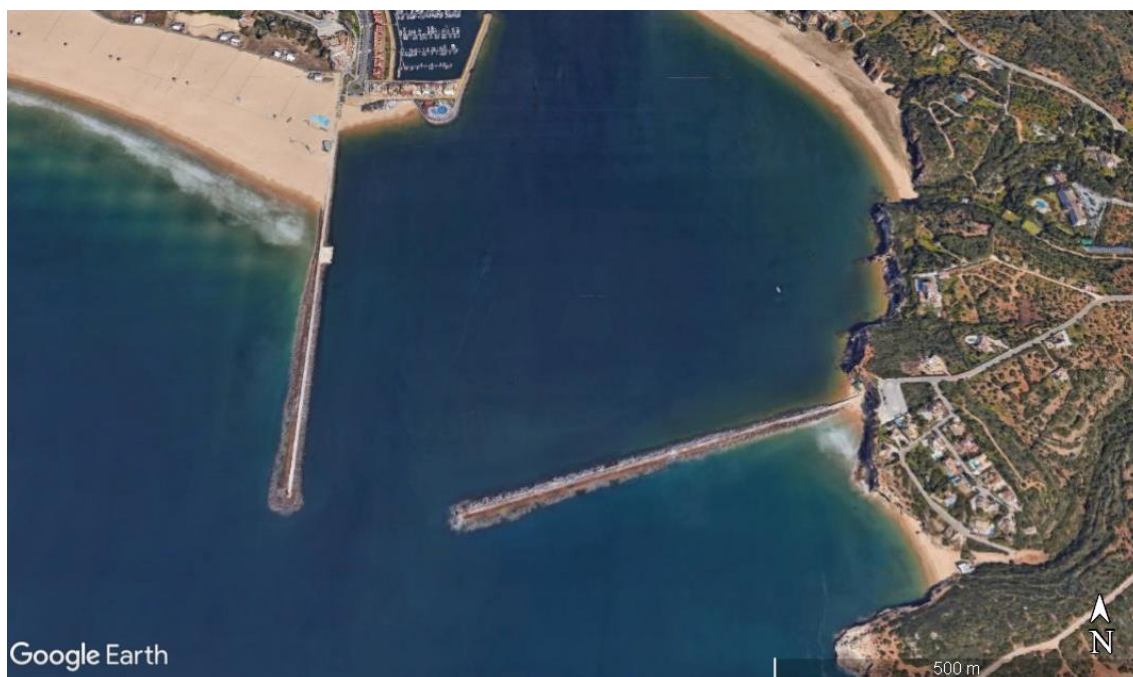


Figura 11. Foz do rio Arade com o quebra-mar nascente e o quebra-mar poente (Google Earth Pro, 2020).

Ambas são estruturas de proteção em talude, formados por blocos de rocha, e têm uma superestrutura em betão, que vai da costa até a cabeça. No lado mais exposto, o extradorso, existem blocos em paralelepípedo de betão, que servem para conferir maior resistência as ondas marítimas. O quebra-mar de poente tem um pequeno cais em betão (*op. cit.*).

O levantamento fotogramétrico foi realizado em 2015 e contou com o uso do VANT *Phantom 3 Pro* da empresa *DJI*. O plano de voo foi efetuado a partir da aplicação para *Android* denominada *Pix4D Capture*, as imagens obtidas com uma resolução espacial de 3 cm por *pixel*, a partir de uma sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70%, tendo sido capturadas a 80 m de altitude e a cada 2 s. O levantamento aéreo do quebra-mar nascente levou 8 min e foram tiradas 204 imagens; enquanto que o voo sobre o

quebra-mar poente, mais extenso, teve 11 min de duração e retiraram-se 285 imagens. Para auxiliar no georreferenciamento, foram obtidas as coordenadas de pontos de controlo nos quebra-mares, através de GNSS RTK (*op. cit.*).

O software *Pix4D* possibilitou obter as nuvens de ponto, ortomosaicos e modelos numéricos de superfície (MNS). A partir dos ortomosaicos, foi possível observar que, em certas zonas, blocos de rocha tinham sido projetados para cima dos blocos de betão, e no caso do quebra-mar nascente, blocos de rocha também ocorriam sobre a estrutura - Figura 12 (*op. cit.*).

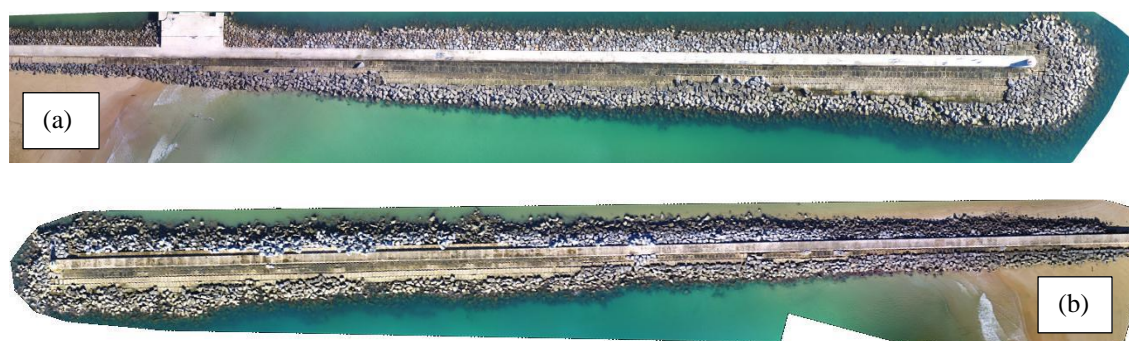


Figura 12. (a) Ortomosaico do quebra-mar Poente; (b) ortomosaico do quebra-mar Nascente (modificado de Henriques *et al.*, 2016)

Com base nos dados obtidos nesta campanha de 2015, desenvolveu-se a comparação com os dados do projeto de reparação dos quebra-mares realizado na década de 1990. Verificou-se que, em 2015, as estruturas diferiam do previsto: os coroamentos estavam mais estreitos e situavam-se a uma cota inferior à de projeto. Em relação ao quebra-mar poente, a largura da superestrutura no coroamento passou de 9 m, na década de 1990, para 4,2 m, em 2015, assim como a cota do coroamento passou de +6,5 m para +5,27 m. Já o quebra-mar nascente, sofreu uma menor degradação, tendo a largura do coroamento diminuído de 6,0 m para 4,2 m, e a cota do coroamento passou de +6,0 m para +5,09 m (*op. cit.*).

2.3.2.2 Exemplos internacionais

O Porto de Baiona, localizado no noroeste de Espanha, na costa atlântica da região da Galícia (42.124792° N; -8.844616° E), é mais usado, atualmente, como marina (González-Jorge *et al.*, 2014).

O respetivo molhe de proteção é constituído por uma camada única de blocos cúbicos de 1,2 m de aresta; a sua morfologia é caracterizada por 340 m de comprimento,

uma coroa com 8,4 m de largura e 8,5 m de altura, uma base estrutural com 21,7 m de largura com um ângulo de inclinação de 49° - Figura 13 (González-Jorge *et al.*, 2014).

A região de Baiona sofre com as tempestades marítimas, especialmente no inverno, o que reforça a importância da monitorização portuária para melhorar sua gestão (*op. cit.*).

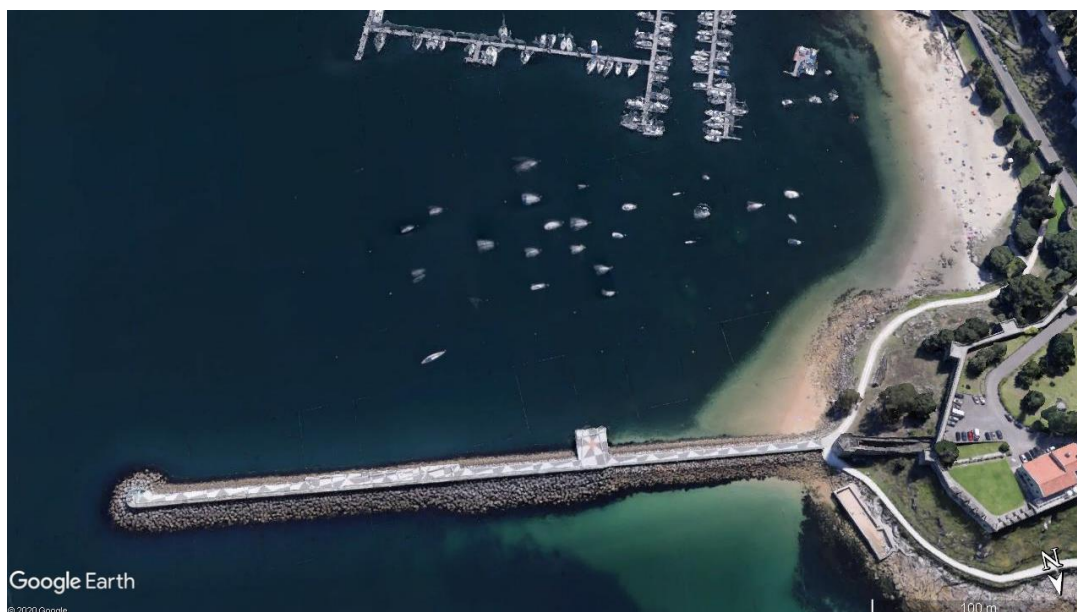


Figura 13. Porto de Baiona e seu molhe de proteção de enrocamento (Google Earth Pro, 2020)

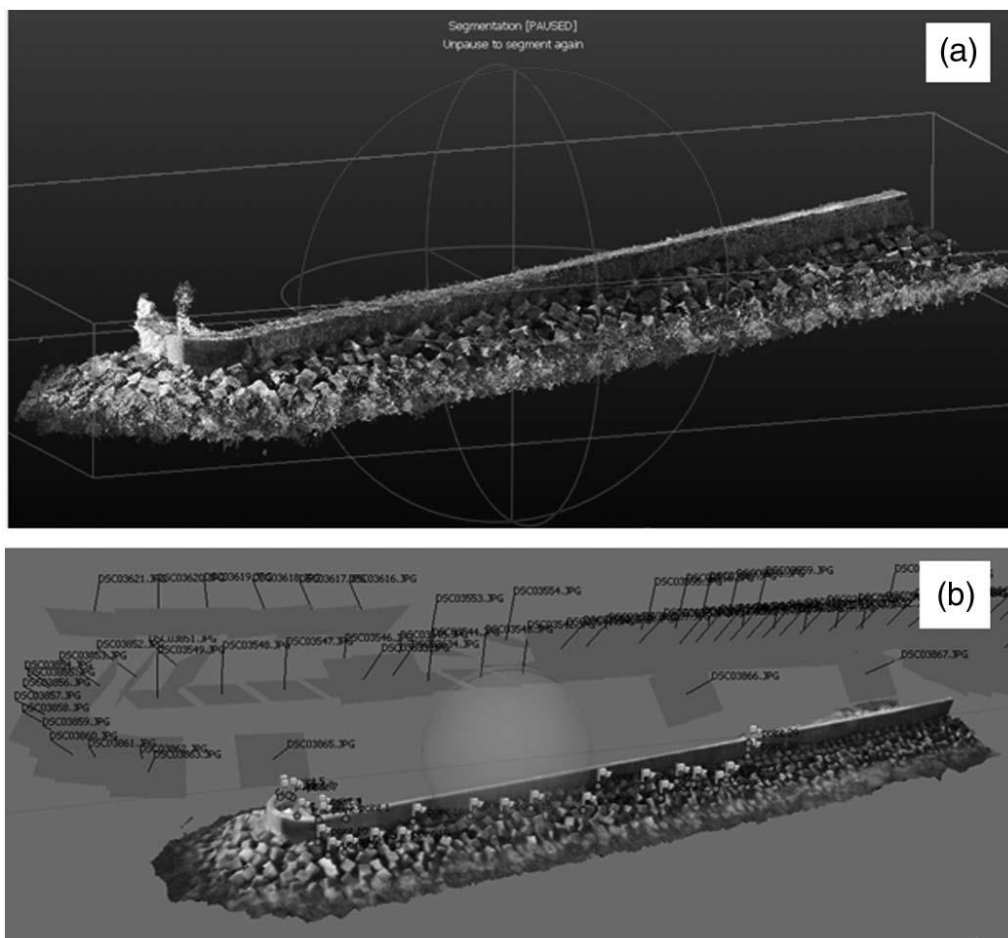
O levantamento fotogramétrico foi realizado com o VANT *Mikrokopter Okto XL*, que possui uma câmera RGB acoplada da *Sony*, modelo *Nex 7*, cuja resolução é de 24,3 MP e cuja lente possui uma distância focal de 16 mm (*op. cit.*).

O plano de voo foi desenvolvido no *software* do próprio VANT, que gera pontos de passagem que são carregados para o controlo de voo do aparelho. A altitude de voo foi de 25 m e as imagens tiveram uma sobreposição de 75%. No total, foram geradas 68 imagens (*op. cit.*).

Para auxiliar no georreferenciamento, 28 pontos serviram de referência topográfica (*ground points*), tendo as suas localizações sido obtidas com o GPS *Settop AL-102*. Este GPS usa o sistema RTK, o que proporciona uma precisão horizontal de 2 cm e na vertical de 3,5 cm (*op. cit.*).

O processamento dos dados das imagens foi feito através do uso do *software Photogrammetry Workbench* da Universidade de Salamanca, Espanha - Figura 14. Após a análise das distâncias entre os pontos do primeiro e do último levantamentos, verificou-se que os valores obtidos apresentaram uma distribuição gaussiana, com um desvio padrão (σ) de 0,026 m ($2\sigma = 0,052$ m com 95% de nível de confiança), isto é,

qualquer alteração na distância entre pontos que seja superior a 0,052 m entre dois levantamentos, tem 95% de probabilidade de indicar um deslocamento no bloco (*op. cit.*).



(a) nuvem de pontos do modelo 3D gerado; (b) superfícies do modelo 3D.

Figura 14. Modelo tridimensional gerado após o processamento através do *software Photogrammetry Workbench* (González-Jorge *et al.*, 2014)

Quanto maior o ângulo de rotação do cubo, maior o deslocamento vertical no eixo z. Neste caso, foi possível detectar rotações inferiores a 1° . A rotação do cubo produz deslocamentos verticais superiores a 10 cm, que são facilmente monitorizados, já que são cerca do dobro dos valores do desvio padrão obtido para o modelo (*op. cit.*).

Outro caso de estudo mais recente corresponde a um porto turístico e privado na Itália - Porto Sole, em Sanremo, onde se recorreu a fotogrametria aérea por VANT aliada a um levantamento batimétrico por rastreamento a *laser*. Tal metodologia teve por objetivo verificar o estado de conservação de infraestruturas marítimas, além de verificar aspectos como erosão e sedimentação na sua envolvente. A integração desses métodos é importante para verificar as regiões emersas e imersas de quebra-mares, já

que a fotogrametria só é capaz de capturar imagens em áreas emersas (Lucarelli *et al.*, 2019).

A fotogrametria também pode ser utilizada para avaliar as condições de outros ativos da área portuária, tais como: o estado de degradação do pavimento betuminoso das vias – em especial perto da zona dos postes de amarração; verificação de passeios e docas, posicionamento de placas de sinalização, colunas de água e espaços de estacionamento. Toda esta informação, ao ser integrada num sistema de informação geográfico, permite uma gestão mais adequada dos ativos portuários, promovendo a sua manutenção atempada (*op. cit.*).

O quebra-mar da área em referência – Figura 15, foi levantado pelo VANT *DJI Phantom 4 Pro* em fevereiro de 2019. A altitude de voo foi de 35 m e, tanto a sobreposição longitudinal quanto a lateral entre imagens, foram de 80%, resultando num GSD de 7,2 mm. No total, foram capturadas 1148 imagens que foram processadas pelo *software* comercial *Agisoft Metashape* para produzir uma nuvem de pontos tridimensional.



Figura 15. Quebra-mar de um porto privado em Sanremo, Itália (Google Earth Pro, 2020)

Os dados de nuvens de pontos obtidos pelos levantamentos batimétrico e fotogramétrico foram integrados e restituídos de forma a gerar um modelo digital de superfície, contínuo, das zonas emersas e submersas com uma resolução espacial de 10 cm. Esta etapa foi realizada através do *software* gratuito e de livre acesso *CloudCompare* (*op. cit.*).

2.3.3 Monitorização de taludes litorais

A monitorização de taludes em ambientes litorais pode ser uma tarefa desafiadora consoante as adversidades que podem ser encontradas nesses meios: vento forte e neblina, bem como zonas pouco estáveis que apresentam risco de queda de blocos e escorregamentos, frequentemente em trechos de difícil acesso para a realização de levantamentos *in situ* e que, portanto, representam um perigo a equipa de levantamento no local.

É neste contexto que o uso de tecnologias de detecção remota, em especial a fotogrametria aérea digital por VANT, apresenta diversas vantagens. Além de aspectos de garantia da segurança, ao permitir que o operador do equipamento esteja numa zona estável, vizinha, acresce a rapidez do levantamento, a representatividade espacial dos dados, os custos e a qualidade dos resultados – resolução, exatidão e precisão, que constituem fatores que tornam a utilização de VANT uma mais valia na monitorização destes taludes.

No caso de estudo de taludes costeiros subverticais, como é o caso da Ericeira, o levantamento aéreo por VANT apresenta uma outra vantagem que é a flexibilidade na mudança da inclinação da câmara para uma melhor cobertura da face vertical da arriba, evitando-se assim a ocorrência de intervalos sem informação (Jaud *et al.*, 2019).

Jaud *et al.* (2019) desenvolveram diversos levantamentos por VANT com diferentes inclinações de câmara - nadir (vertical), 20°, 30° e 40°, com o objetivo de avaliar o impacto da angulação da câmara na reconstrução tridimensional e identificar a melhor configuração para recobrir taludes subverticais. Voos automáticos que seguem trajetória planeada por *software*, não permitem alteração na inclinação da câmara. Portanto, quando a câmara está inclinada, o voo é executado manualmente, e a trajetória do VANT é menos regular e deve ser ajustada pelo operador.

Os resultados obtidos mostram que levantamentos com a câmara em posição nadir são pouco relevantes para taludes subverticais. Os valores mais satisfatórios, em termos de exatidão e qualidade textural dos modelos 3D gerados, foram obtidos com as inclinações de 30° e 40° (*op. cit.*).

Para além da inclinação da câmara, outros aspectos devem ser considerados na reconstrução 3D de taludes subverticais: a inclinação do próprio talude, a sobreposição entre imagens, a resolução das imagens e, por fim, a iluminação da face da encosta. A formação de sombras no talude dificulta o processamento 3D, pois confunde a amarração de pontos comuns em duas ou mais imagens sucessivas (*op. cit.*).

Descrevem-se, seguidamente, casos de estudo recentes que tratam da monitorização de movimentos de massa em taludes costeiros por VANT.

Letortu *et al.* (2018) compararam modelos tridimensionais obtidos por LiDAR terrestre, fotogrametria terrestre, e por VANT, fotogrametria aérea, para avaliar os respetivos pontos fortes e fracos na monitorização de erosão costeira. A área estudada localiza-se em Varengeville-sur-Mer, na Normandia, noroeste da França. É formada por arribas litorais com 70° de inclinação, com uma extensão de 250 m e com altura média entre 30 e 40 m, constituídas por calcário branco (Cretáceo Superior). A monitorização da área entre 1966 e 2008 mostra um recuo da encosta numa taxa de 0,15 m por ano. A área também é caracterizada pela queda de detritos – com blocos individuais de poucos decímetros, e queda de blocos de rochas – movimentos de maior escala. O acesso à base da encosta é dificultado pela instabilidade dos blocos superiores e pelo avanço da maré (*op. cit.*).

O levantamento aéreo foi efetuado com o VANT multirrotores DRELIO 10, pesando 4 kg, com capacidade de voo de 20 min e com uma câmara Nikon D800 de 36 MP. A parte do topo da encosta foi levantada com a câmara em posição nadir, enquanto para o recobrimento da face da arriba, a câmara apresentava uma inclinação de 25°. O voo foi feito de modo manual, teve duração de 8 min e obteve um total 110 imagens, em posição nadir e oblíqua, que foram processadas em conjunto (*op. cit.*).

Os pontos de controlo terrestre foram dispostos de forma paralela à linha de costa, posicionados na praia, na parte inferior da arriba e no topo desta. No total, foram colocados 22 alvos circulares de 23 cm de diâmetro cada (*op. cit.*).

As nuvens de pontos tridimensionais foram geradas pelo *software* comercial *PhotoScan Professional* da *AgiSoft*. E após a filtragem e eliminação de erros grosseiros na face da arriba e na área da praia, compararam-se as nuvens de pontos geradas por LiDAR terrestre, fotogrametria terrestre e fotogrametria aérea por VANT (*op. cit.*).

As conclusões obtidas a partir dessas comparações foram as seguintes: (i) o número de pontos na nuvem do modelo gerado a partir do LiDAR é superior aos dos outros modelos; (ii) no entanto, a densidade de pontos é muito mais homogênea nos modelos gerados por fotogrametria, especialmente a aérea; (iii) foram encontradas algumas oclusões nos modelos feitos a partir de LiDAR e fotogrametria terrestre; (iv) a nuvem de pontos geradas por fotogrametria aérea, devido ao seu melhor recobrimento espacial, não apresentou oclusões, nem no topo nem na base da falésia (*op. cit.*). Segundo os autores, a qualidade de textura dos modelos obtidos pelos métodos de fotogrametria

aérea é superior à do *laser scanner*, o que facilita a interpretação e análise do modelo. Outra vantagem do VANT é a maior cobertura espacial da seção investigada.

Kersten *et al.* (2020) utilizaram dois VANTs da *DJI* para o levantamento aéreo da arriba Brodten, na baía de Lübeck, na costa alemã do Mar Báltico. A arriba tem 4 km de comprimento e uma altura média de 20 m. Os processos erosivos relacionados com a ação de ondas de tempestades, precipitação intensa e congelação de água que infiltra e percola pelas camadas, contribuem para o recuo da arriba em cerca de 1 m por ano (*op. cit.*).

A monitorização da área iniciou-se com o uso de LiDAR terrestre no período entre 2004 e 2016; ulteriormente, entre 2016 e 2020, recorreu-se a VANTs - *DJI Phantom 3 Advanced* com uma câmara de 12 MP e *DJI Phantom 4 Pro* com uma câmara de 20 MP e sistema PPK da *Klau Geomatics*. Os voos realizados pelo *DJI Phantom 3 Advanced* foram feitos nos dias 21 de junho de 2016 e 10 de dezembro de 2018, e o voo mais recente, do dia 20 de janeiro de 2020, recorreu ao *DJI Phantom 4 Pro* (*op. cit.*).

Para o processamento dos resultados, foram utilizados: 15 pontos de controlo terrestre para as imagens de 2016, 12 pontos para as de 2018 e 9 pontos para as de 2020. Os resultados da triangulação aérea mostraram um desvio padrão médio inferior a 1 cm para o posicionamento dos pontos de controlo (*op. cit.*).

As nuvens de pontos de alta densidade foram geradas através dos *software PhotoScan* –imagens de 2016 e 2018, e *Metashape* –imagens de 2020. Foram aplicados filtros para eliminar erros grosseiros. A Figura 16 representa a comparação entre os modelos tridimensionais de 2016 e 2020. A maioria dos deslocamentos observados está na escala azul (entre 2 e 5 m aproximadamente) e na escala verde (50 cm), (*op. cit.*).

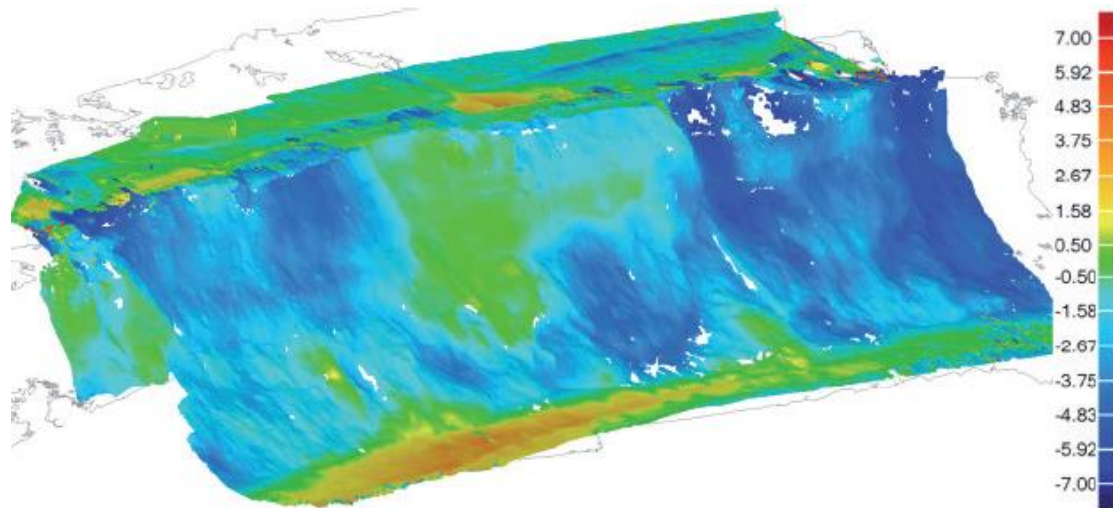


Figura 16. Comparação entre modelos tridimensionais de 2016 e 2020 (Kersten *et al.*, 2020)

3. CASO DE ESTUDO – TRECHO SUL DO PORTO DA ERICEIRA

3.1 Área estudada

A área estudada localiza-se na Ericeira, no município de Mafra, cerca de 45 km de distância a partir de Lisboa, Portugal. Seu acesso a partir de Lisboa é dado pela rodovia A21.

É caracterizada por um pequeno porto piscatório e uma praia urbana, cercada por arribas com estruturas e infraestruturas diversas construídas no seu topo, frequentemente até à crista. É limitada, de norte a sul, por arribas com 75° a 80° de inclinação; a norte, os taludes chegam a ter 30 a 40 m de altura, e a sul têm 25 m (Santos-Ferreira *et al.*, 2019).

Os objetos de estudo são as arribas a sul do molhe da Ericeira, e o próprio molhe – Figura 17, ambas partes integrantes do porto de pesca, sob responsabilidade da DGRM.

Os taludes são formados pela alternância de camadas areníticas, calcareníticas, margosas e argilosas atribuídas ao Cretáceo Inferior (Barremiano, Aptiano e Albiano) representativos do enchimento da Bacia Lusitaniana. Tal intercalação de rochas mais rijas e outras mais brandas, propiciam o processo de erosão diferencial, que conforma frequentemente consolas das bancadas mais rijas. A progressão da erosão nas camadas mais brandas provoca o descalce das camadas mais rijas, que ao ficarem em balanço se tornam instáveis, o que ocasiona a queda de blocos, às vezes de grandes dimensões; posteriormente, nas camadas mais brandas e espessas, provocam escorregamentos (Silva *et al.*, 2014). Outro processo erosivo que atua nestas arribas é a erosão interna, que atua no contato entre camadas de diferentes permeabilidades; quando a água infiltra e percola na camada permeável, e posteriormente encontra um contacto com a camada de menor permeabilidade, acaba por provocar o arraste de partículas, aparecendo locas na arriba.

Nos taludes a sul, existem diversos blocos semi-instáveis e instáveis, e marcas de ravinamento nas arribas, que causam risco para a circulação de pessoas que acessam a pequena praia ou circulam na rua e passeio que sulcam encostadas à crista da arriba ou mesmo suspensa para lá dela.



Figura 17. Localização da área de estudo formada pelo molhe de proteção (em vermelho) e arribas (em amarelo) situadas para sul sob responsabilidade da DGRM.

3.2 Metodologia utilizada

No âmbito de um protocolo de colaboração entre a DGRM e a FCT NOVA, foi lançada em setembro de 2019 a presente investigação que incluiu a familiarização com um VANT que seria utilizado para inspeção aérea das arribas a sul do molhe da Ericeira. Durante o período inicial da dissertação, em meados de dezembro de 2019, como forma de treinamento para o levantamento aéreo e com o objetivo de entender o funcionamento do equipamento e das calibrações necessárias, foram realizados voos testes no Campus da FCT com o VANT da DGRM - *DJI Mavic Pro 2*, que se descreve mais adiante.

Contudo, em dezembro de 2019, as depressões Elsa e Fabien provocaram danos na estrutura do molhe da Ericeira, especialmente na sua cabeça, conduzindo ao seu colapso, à remobilização de blocos e ainda à destruição do farolim que sinalizava a cabeça do molhe. As obras de reabilitação provisória, com caráter emergencial, iniciaram-se em abril do ano seguinte e ficaram concluídas em julho de 2020. Assim, o plano de investigação passou a incorporar também a fiscalização da construção do molhe. A metodologia adotada passou a incluir levantamentos aéreos com o VANT da DGRM em diversas datas durante o período de reabilitação estrutural da cabeça do molhe, além do levantamento das arribas para a identificação de blocos instáveis.

Os equipamentos utilizados na investigação para os levantamentos aéreos são considerados de VANT do tipo multirrotor leve. Um deles é o modelo *DJI Mavic Mini*, com um peso aproximado de 250 gr, e de pequenas dimensões (160 x 202 x 55 mm quando aberto). É capaz de manter voo por 30 min se não houver vento (DJI, 2020). A câmara é formada pelo sensor óptico do tipo CMOS 1/2.3" (6,17 x 4,55 mm) de 12 MP, e lentes com campo de visão de 83°, com distância focal nominal de 24 mm (equivalente a 35 mm) e distância focal real de 4,3 mm e com abertura f/2,8. Produz imagens com tamanho de 4000 x 3000 (4:3) ou 4000 x 2250 (16:9) *pixels*. O sistema GNSS do sensor é GPS e GLONASS (op. cit.).

O outro VANT utilizado foi o *DJI Mavic Pro 2*, considerado também como um VANT de pequenas dimensões (322 x 242 x 84 mm quando aberto) e com um peso aproximado de 907 gr. É capaz de manter voo por 31 min se não houver vento (DJI, 2020). A câmara é formada pelo sensor óptico do tipo CMOS 1" (13,2 x 8,8 mm) de 20 MP, e lentes com campo de visão de 77°, com distância focal nominal de 28 mm (equivalente a 35 mm) e distância focal real de 10,3 mm e com abertura f/2,8-f/11. Produz imagens com tamanho de 5472 x 3648 *pixels* (DJI, 2020). O sistema GNSS do sensor é idêntico ao do modelo mini.

Na investigação recorreu-se ainda imagens obtidas por um *DJI Phantom 4 Pro RTK*, da empresa ETERMAR, responsável pela reabilitação do molhe, e que foram gentilmente cedidas para o âmbito desta investigação. Trata-se de um VANT com sistema RTK, mais robusto, com um peso de 1388 gr e com tamanho diagonal aproximado de 350 mm, também capaz de manter voo até cerca de 30 min, caso não haja vento. Sua câmera é formada por sensor óptico do tipo CMOS 1" (13,2 x 8,8 mm) de 20 MP, e lentes com campo de visão de 84°, com distância focal nominal de 24 mm (equivalente a 35 mm) e distância focal real de 9 mm e com abertura f/2,8-f/11. Produz imagens com tamanho de 5472 x 3648 (3:2), 4864 x 3648 (4:3) ou 5472 x 3078 (16:9) *pixels* (DJI, 2020).

Os levantamentos foram realizados em 19 de abril, 27 de maio, 04 de junho e 16 de julho de 2020. Por questões relacionadas com o confinamento obrigatório que o país sofreu associados à pandemia do Covid-19 a partir de meados de março de 2020; os voos de abril e maio foram realizados pelos Mestres Eng. Santos-Ferreira e Eng. Sofia Frade da DGRM. Detalha-se, em seguida, a metodologia adotada.

3.2.1 Planeamento e aquisição de dados

A determinação dos parâmetros do projeto e o planeamento do voo são fundamentais para que seja feita uma adequada reconstrução fotogramétrica digital da área em referência e de forma a minimizar erros, maximizando a precisão.

Diversos aspetos devem ser considerados:

- Primeiramente, deve-se obter a permissão de voo junto da Autoridade Nacional de Aviação Civil (ANAC) que exige tal autorização para qualquer tipo de VANT. E, caso se sobrevoe sobre o mar, também é necessário requerer uma autorização junto a capitania do respetivo porto.
- Tipo do modelo de VANT adequado para o caso que for necessário, nesse caso, adequado a ambiente costeiro;
- Conhecimento prévio da área de estudo – locais para aterragem, pouso, manobras, morfologia da área, e estruturas e infraestruturas (como postes e antenas, entre outros) na zona envolvente;
- Escolha do dia com condições meteorológicas favoráveis – pouco vento e sem chuva, e do horário – condicionamentos devidos à preia-mar e a formação de sombras;

- Requisitos de calibração prévia do sistema de unidade de medição inercial (*inertial measurement unit* - IMU) e bússola do sensor do VANT;
- Determinação da rota de voo, que pode ser automatizada por *software*;
- Determinação da altura de voo, atendendo ao facto que o VANT deve manter, quando possível, uma altitude constante durante o voo;
- Cálculo da resolução espacial, percentagem de sobreposição longitudinal e lateral entre as imagens;
- Identificação e determinação das coordenadas de pontos de controlo terrestre;

Os levantamentos aéreos foram realizados maioritariamente na parte da manhã, após as 11 h, após certificação prévia das condições meteorológicas no local de estudo, ou seja, escolha de dias de sol e com vento fraco. Uma vez que o molhe é uma estrutura que se projeta em direção ao oceano, não houve preocupações com o horário do levantamento em relação à formação de sombras.

No caso das arribas, por serem subverticais, dependendo do horário, acabam por projetar sempre sombras sobre elas. O horário recomendado para o levantamento aéreo nas arribas é por volta de 12h. No entanto, foram realizadas por diversas vezes tentativas de voos próximas deste horário em que não foi possível aproveitá-las devido a ventos fortes.

Antes de iniciar o voo, já tendo em mãos o VANT adequado para o levantamento aéreo na região costeira, recomenda-se a prévia calibração do sistema inercial, que é uma etapa automática que leva poucos minutos. Também se recomenda a calibração da bússola do VANT, em que o operador do equipamento segue um procedimento “passo-a-passo” exibido pela aplicação *DJI GO 4* embutida no controlo remoto do VANT da DGRM. Tal processo também leva poucos minutos.

Os voos não foram planeados por meio da aplicação *Pix 4D Capture*, que permite criar planos de voo automáticos pelo motivo de não ser possível instalar aplicativos de terceiros no controlo remoto do *DJI Mavic Pro 2*, isto é, não é possível utilizar outras aplicações além da aplicação *DJI GO 4* já instalada. A aplicação gratuita *Pix 4D Capture* também não é compatível com o modelo *DJI Mavic Mini*. Portanto, o traçado da rota de voo foi realizado de forma manual, em um estilo livre, e de modo que as imagens fossem capturadas a cada 2 s.

Uma vantagem de realizar o voo de forma manual é a possibilidade de mudar a angulação da câmera do VANT durante o voo. Isto mostra-se vantajoso, principalmente no levantamento de arribas subverticais, por permitir o seu recobrimento de forma a minimizar oclusões na sua superfície.

A altura de voo do VANT é importante que permaneça constante durante o levantamento, uma vez que influencia outros parâmetros que são facilmente calculados, tais como o *ground sampling distance* (GSD), bem como as sobreposições longitudinal e lateral entre imagens. No entanto, devido a condicionantes do local de estudo, tais como a presença de guias e outros equipamentos pesados, além do cuidado em relação aos pássaros que voam próximos ao VANT e que podem vir a danificá-lo, a altura de voo do VANT teve que ser ajustada em alguns levantamentos.

Sabendo as especificações da câmera e a altura do voo, é possível calcular o GSD, a distância no terreno entre dois *pixels* na imagem, que é diretamente proporcional à altura de voo. Quanto maior a altura, maior será o GSD, ou seja, menor será a resolução espacial e o nível de detalhe. A Equação 1 mostra o cálculo do GSD (Seifert *et al.*, 2019).

$$GSD = \left(\frac{p}{f}\right) \times H \quad (1)$$

Onde: *GSD* é em cm, *p* é o tamanho do pixel em mm, *f* é a distância focal real em mm e *H* é altura do voo em cm. Para a câmera do *DJI Mavic Mini*, *p* é 0,0015 mm e *f* é 4,3 mm; para o *DJI Mavic Pro 2*, *p* é 0,0024 mm e *f* é 10,3 mm; para o *DJI Phantom 4 Pro RTK*, *p* é 0,0024 mm e *f* é 9 mm.

O levantamento feito no dia 19 de abril, realizado antes do início da obra, altura em que ainda não havia maquinaria pesada no molhe, teve como objetivo detalhar a região da cabeça do molhe, seguiu uma altura constante de 10 m, o que resultou num GSD de 0,36 cm. Outro levantamento realizado nesse mesmo dia pela equipe da ETERMAR, seguiu uma altura constante de 110 m e o GSD obtido nas imagens foi de 2,95 cm.

O voo do dia 16 de julho teve uma altura constante de 27 m e um GSD de 0,97 cm. Os demais levantamentos (dia 27 de maio e 04 de junho) não mantiveram altura de voo constante, portanto o GSD das imagens obtidas pelo drone não pôde ser calculado.

Como mencionado anteriormente, as linhas de voo foram sobrevoadas de modo manual, com uma velocidade constante de 4 m/s, para uma frequência de captura de imagem a cada 2 s. Deste modo, é possível calcular a sobreposição longitudinal entre as imagens através da Equação 2 (Seifert *et al.*, 2019).

$$\theta_{long} = \left(1 - \frac{\Delta_{long} \times f}{H \times w}\right) \times 100 \quad (2)$$

Onde: θ_{long} representa a sobreposição longitudinal em percentagem; Δ_{long} é a distância frontal entre pontos, em m; f é a distância focal real, em mm; H é a altura de voo e w é a largura do sensor, em mm.

Portanto, para o levantamento realizado no dia 19 de abril com ênfase na cabeça do molhe, a sobreposição longitudinal foi de 23,5%, o que é considerada uma taxa de sobreposição baixa e isto deve-se ao fato do voo ter sido feito com uma altura fraca. Uma sobreposição longitudinal adequada é superior a 80%. Para o levantamento do dia 16 de julho, a sobreposição foi de 72%. Os demais levantamentos como não mantiveram altura constante durante o voo, não foi possível calcular a sobreposição longitudinal entre as imagens.

Como as linhas de voo foram feitas num estilo manual e mais “livre”, os espaçamentos laterais entre as linhas de voo são variáveis e, portanto, não é possível calcular a sobreposição lateral entre as imagens.

Como mencionado anteriormente, a equipe da ETERMAR cedeu suas fotografias aéreas levantadas no dia 19 de abril de 2020. No entanto, como não se tem o conhecimento da velocidade de voo e dos espaçamentos laterais das linhas de voo, não é possível obter as taxas de sobreposição, longitudinal e lateral.

A Tabela 1 resume as características dos voos, tais como data, objeto de estudo, sua duração, número de fotos tiradas, inclinação da câmera, altura média de voo, além dos parâmetros que foram calculados posteriormente, como a sobreposição longitudinal e o GSD, quando possíveis.

Tabela 1. Resumo dos levantamentos aéreos efetuados e dos respectivos parâmetros associados

Data	Objeto de estudo	Número de fotos	Inclinação da câmera (°)	H (m)	θ_{long} (%)	GSD (cm)
19 de abril	Cabeça do molhe	80	45 e 90	10	23,5	0,36
19 de abril	Molhe (ETERMAR)	433	45	110	X	2,95
27 de maio	Molhe	145	90	Variável	X	X
27 de maio	Arriba	267	0 e 45	Variável	X	X
4 de junho	Molhe	283	0, 45 e 90	Variável	X	X
16 de julho	Molhe	219	45 e 90	27	72	0,97

Por fim, para auxiliar na etapa seguinte de processamento das imagens capturadas, é necessário fazer o levantamento dos pontos de controle terrestres. A DGRM cedeu os pontos de controle ao longo do molhe da Ericeira, num total de 8 pontos. Estes pontos de referência da DGRM estão no sistema de coordenadas PT-TM06-ETRS89. A Tabela 2 mostra as coordenadas X, Y e Z destes pontos de controle terrestres. A Figura 18 apresenta a localização desses pontos ao longo do molhe.

Tabela 2. Coordenadas dos pontos de controle terrestres no molhe

Ponto	X	Y	Z (m)
GCP-1	-111596,37	-77240,54	8,33
GCP-2	-111653,38	-77261,91	8,31
GCP-3	-111680,21	-77275,05	8,32
GCP-4	-111701,38	-77296,29	8,31
GCP-5	-111834,5	-77463,44	8,99
GCP-6	-111820,33	-77477,93	8,73
GCP-7	-111689,74	-77322,77	4,98
GCP-8	-111712,78	-77354,15	4,97

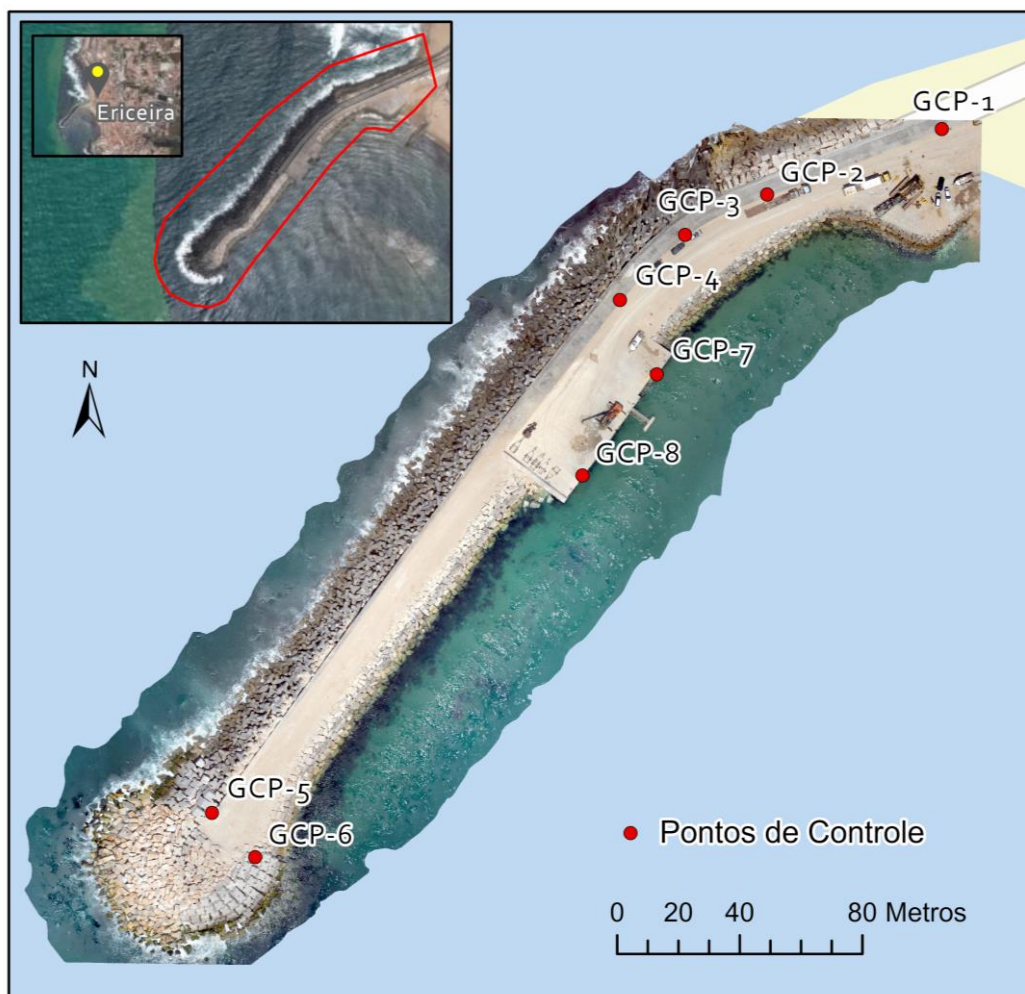


Figura 18. Localização dos pontos de controle terrestres ao longo do molhe.

Em relação às arribas, os pontos de controlo foram coletados a partir da identificação de pontos facilmente reconhecíveis na arriba e no passeio acima desta, através do *Google Earth Pro*. No futuro, caso se pretenda monitorizar o comportamento periódico da arriba, estes pontos de controlo (e outros mais, se for necessário) devem ser coletados a partir de um levantamento topográfico de precisão.

A Tabela 3 inclui as coordenadas X, Y e Z dos pontos de controlo considerados na arriba e no passeio sobrejacente. A Figura 19 mostra a localização desses pontos ao longo do trecho estuda

Tabela 3. Coordenadas dos pontos de controlo terrestres para a arriba

Ponto	X	Y	Z (m)
GCP-1A	-111518,73	-77656,45	9,00
GCP-2A	-111482,7	-77633,23	12,00
GCP-3A	-111440,28	-77589,6	14,00
GCP-4A	-111424,29	-77567,71	16,00
GCP-5A	-111420,38	-77458,18	5,00
GCP-6A	-111441,85	-77535,73	2,00
GCP-7A	-111437,01	-77553,33	5,00
GCP-8A	-111466,58	-77606,79	7,00
GCP-9A	-111512,27	-77627,69	2,00
GP-10A	-111519,6	-77641,04	5,00



Figura 19. Localização dos pontos de controle terrestres ao longo da arriba.

3.2.2. Processamento de dados

Inicialmente, o processamento das imagens aéreas era para ter sido realizado através do programa *Photomodeler Premium* que permite gerar ortomosaicos, calcular áreas e volumes, e produzir modelos 4D, isto é, modelos que permitem visualizar alterações/movimentações na superfície 3D entre levantamentos de datas diferentes. No entanto, tal programa está instalado em um computador na sede da DGRM, em Algés, que não pôde ser acessado devido as restrições a circulação de pessoas e pela política do teletrabalho impostas pela pandemia neste ano e seguidas pela DGRM.

Portanto, o processamento dos dados nesta investigação optou pelas plataformas dos sites da *DroneDeploy* e *Maps Made Easy*. O utilizador faz o carregamento das imagens obtidas através do VANT, enquanto o programa se encarrega de fazer o

processamento das imagens. A maior vantagem deste tipo de processamento *online* é a sua rapidez, pois não exige que o utilizador tenha um computador com elevada capacidade de processamento interno.

Nesta investigação e como referido, optou-se pelo uso da versão de teste gratuita do *DroneDeploy*, licença disponível por 14 dias, e *Maps Made Easy*, versão paga mas de baixo custo. No *Maps Made Easy* os mapas são gerados através da compra de pontos, que varia consoante o tamanho das imagens, número de imagens e urgência na finalização do processamento dos dados. Após o carregamento das imagens nos *sites*, o processamento *online* dá-se por finalizado em cerca de 2 h, dependendo do tamanho do projeto.

Antes de fazer a exportação dos resultados gerados, é necessário fazer a calibração do modelo, ou seja, fazer a correção de sua cota.

No *DroneDeploy*, por ser a versão teste, a introdução do ponto de controlo terrestre é feita manualmente no modelo, da forma mais aproximada possível, com o objetivo de minimizar erros, a partir da identificação do ponto gerado no modelo. No *Maps Made Easy*, a introdução dos pontos de controlo é feita através do carregamento de um arquivo *Excel* e, posteriormente, realiza-se o ajuste de posicionamento dos pontos referidos no modelo. Na versão paga do *DroneDeploy*, a introdução dos pontos de controlo também se dá a partir do arquivo *Excel* com as coordenadas X, Y e Z.

No final do processamento, são gerados os resultados, tais como ortomosaicos georreferenciados, modelos digitais de elevação a 2,5D, nuvens de pontos e modelos tridimensionais, que são facilmente exportados em diferentes formatos.

Salienta-se que, no *DroneDeploy*, os arquivos *GEOTIFF* podem ser exportados já georreferenciados e em qualquer sistema de coordenadas. Podem ainda ser exportados num sistema de coordenadas diferente dos pontos de controlo inseridos.

Neste tipo de processamento *online*, o utilizador perde um pouco da autonomia na parte do controlo da qualidade do modelo. Por exemplo, estes *software* não permitem a filtragem/limpeza manual da nuvem de pontos; e outros aspectos, intrinsecamente relacionados a exatidão do modelo, não ficam muito claros, tais como: o número de imagens em que os pontos de controlo foram identificados pelos programas; e a que nível de ampliação (*zoom*) e tamanho de pixel foram considerados pelos programas para registar a posição/localização dos pontos de controlo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo contém as secções em que se apresentam e se discutem os resultados gerados entre os programas utilizados no processamento das imagens, além dos resultados mês a mês da monitorização do molhe da Ericeira, e por fim, os pontos de instabilidade identificados na arriba e as possíveis soluções para estes problemas.

4.1 Comparação entre os software *DroneDeploy* e *Maps Made Easy*

Ambos os programas apresentam a etapa de processamento *online* muito parecida, de forma bastante intuitiva e prática para o utilizador. Após o carregamento e processamento das imagens, os resultados gerados pelo *Maps Made Easy* ficam disponíveis para serem baixados por até 30 dias, enquanto no *DroneDeploy*, os resultados ficam disponíveis até o término da versão teste, ou seja, 14 dias.

O programa *DroneDeploy* disponibiliza um relatório que exhibe informações importantes sobre o resultado do processamento; este relatório indica: a resolução espacial (GSD) dos modelos digitais de elevação e dos ortomosaicos gerados; a área de cobertura do levantamento aéreo; a densidade de imagens identificadas por *pixel* no ortomosaico; o RMSE – raiz do erro quadrático médio, para a posição do GPS nas coordenadas X, Y e Z; número de pontos da nuvem 3D; densidade da nuvem de pontos; número total de triângulos que compõem a malha de superfície tridimensional; e percentagem das imagens em posição nadir, oblíqua e horizontal utilizadas para a reconstrução do modelo 3D.

Este relatório é útil para a avaliação quantitativa da qualidade do processamento *online*. Tendo em vista que o utilizador perde um pouco da tomada de decisão e do controlo do processamento, já que esta etapa é realizada através dos servidores destes programas, essas informações são significativas para a discussão de resultados.

No entanto, o *Maps Made Easy* não fornece esse tipo de relatório, apenas a resolução espacial dos modelos digitais e dos ortomosaicos são divulgadas; portanto, a comparação quantitativa dos resultados entre os dois programas fica prejudicada. Outros aspectos visuais podem ser comparados, tais como: a coloração e a textura dos ortomosaicos do *Maps Made Easy* são de menor qualidade relativamente aos do *DroneDeploy*; e o modelo 3D disponível para visualização *online* tem uma resolução menor no *Maps Made Easy* e mais elevada no *DroneDeploy*. Isto significa que, se o utilizador quiser ver com detalhes o modelo 3D gerado pelo *Maps Made Easy*, ele precisa baixar o arquivo em *.OBJ* e abri-lo num programa de visualização 3D.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos pelo *Maps Made Easy* referentes ao levantamento do dia 19 de abril de 2020, que precedeu a obra de reabilitação do molhe. Os resultados gerados pelo *DroneDeploy* são discutidos com maior detalhamento na secção 4.2.

O ortomosaico e o modelo digital de elevação produzidos pelo *Maps Made Easy* têm ambos uma resolução espacial de 2 cm/*pixel* e estão georreferenciados no sistema PT-TM06/ETRS89. Deste modo, aquele ortomosaico tem uma resolução inferior ao produzido pelo *DroneDeploy*, cuja resolução 1,34 cm/*pixel*, mas o modelo digital de elevação deste software, tem uma resolução inferior, que é de 5,36 cm/*pixel*.

O ortomosaico da Figura 20 apresenta uma coloração mais azulada, em especial na cabeça do molhe; tem uma textura mais grosseira em relação à restituição da superfície da água; e não possui oclusões.

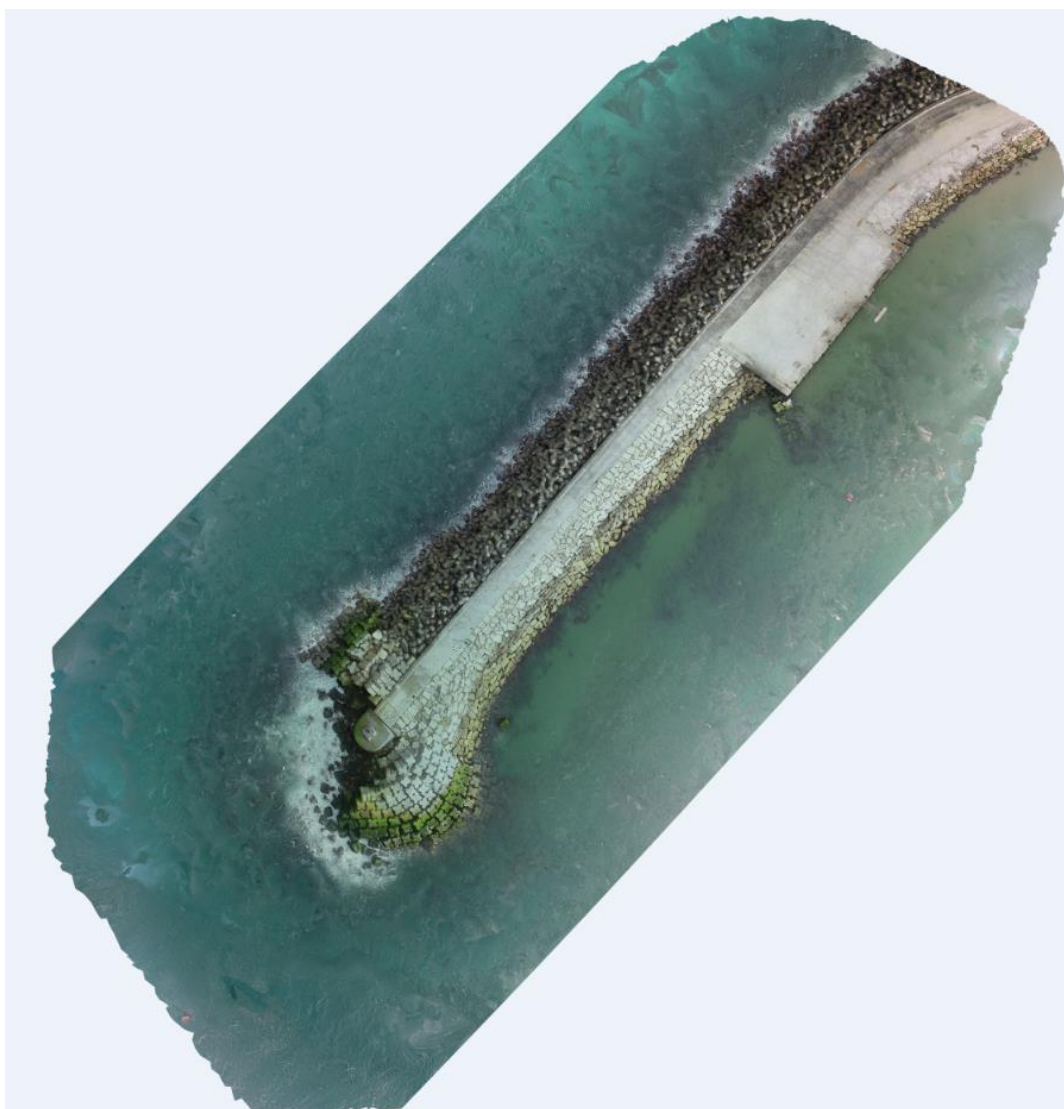


Figura 20. Ortomosaico referente ao levantamento aéreo do dia 19 de abril de 2020 produzido pelo *Maps Made Easy* (sem escala).

No modelo digital de elevação – Figura 21, mesmo após a calibração do modelo, as altitudes variam entre -22,19 e 30,8 m, devido as fortes deformações superficiais na região da água. Tal fenômeno é explicado nos maiores detalhes na próxima secção. Esta deformação superficial não afeta a estrutura do molhe, e as elevações perto da cabeça ficam em torno de 9 m, tonalidade verde claro, e vão diminuindo progressivamente ao longo do molhe, tonalidades verde mais claro e azul claro. Não há oclusões no modelo.

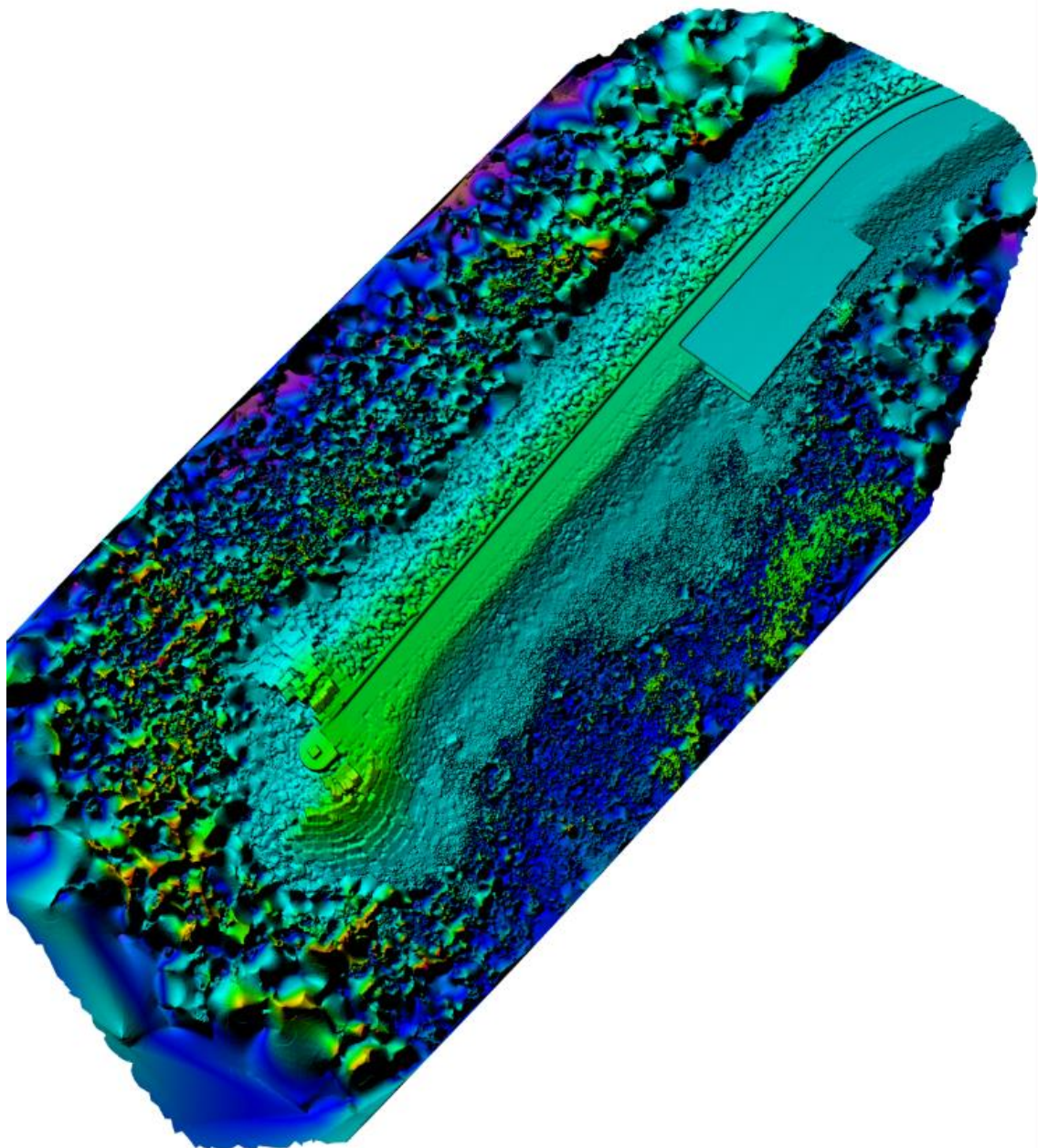


Figura 21. Modelo digital de elevação do levantamento de 19 de abril e processado através do *Maps Made Easy* (sem escala).

A Figura 22 representa o modelo 3D gerado pelo *Maps Made Easy*. Para além da resolução baixa, identifica-se uma acentuada deformação altimétrica na superfície da água. Na superfície do molhe, observa-se no modelo, a estrutura do farolim e um bloco lançado sobre o molhe – destaque em vermelho.

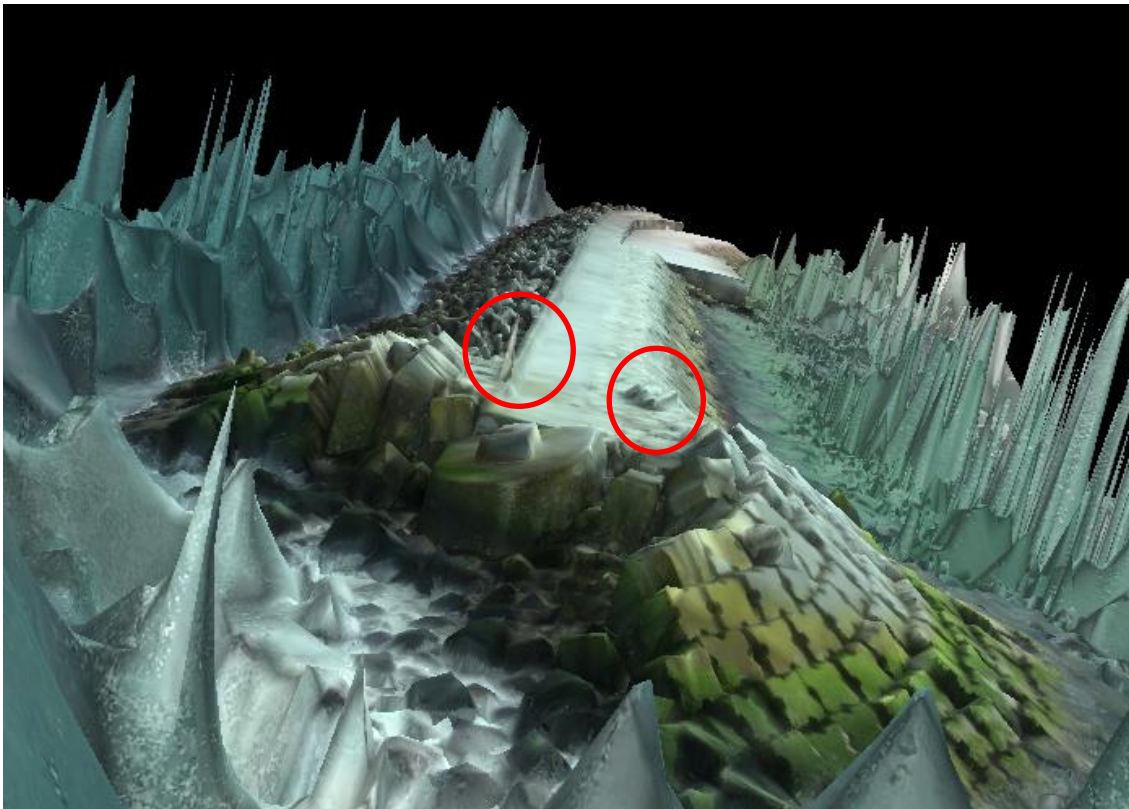


Figura 22. Modelo 3D, de baixa resolução, do *Maps Made Easy* para o molhe da Ericeira, onde se identificam deformações na superfície da água, além do farolim e do bloco de betão – em vermelho.

Outras pequenas comparações podem ser feitas, por exemplo: no *DroneDeploy*, os modelos digitais de elevação e os ortomosaicos, quando exportados em formato *pdf*, apresentam uma escala gráfica em metros, e no *Maps Made Easy*, não apresentam escala; por outro lado, a leitura da faixa de elevação do *Maps Made Easy* é mais fácil que a do *DroneDeploy*, ao apresentar uma melhor distribuição de intervalos numéricos/de cor, que facilitam a interpretação do resultado por parte do utilizador.

Atendendo a que a versão teste do *DroneDeploy* é gratuita (limitada ao máximo de 10 mapas e com um período de teste de apenas 14 dias) e, que os resultados gerados têm uma qualidade superior ao do *Maps Made Easy* (versão paga), recomenda-se a utilização do *DroneDeploy* em versão teste para projetos menores, tais como investigações de pequenas áreas.

4.2 Monitorização do molhe da Ericeira

Como mencionado na secção anterior e pelo processamento no software *DroneDeploy* apresentar resultados com uma qualidade superior aos do *Maps Made Easy*, nesta secção mostra-se e discute-se a evolução da monitorização da reabilitação do molhe a partir dos dados gerados com o primeiro programa.

Os resultados obtidos dividem-se em ortomosaicos e modelos digitais de superfície (MDS), em 2,5D e em 3D, e discutem-se dados relevantes, tais como: resolução de ortomosaicos e modelos digitais; RMSE relativo à posição do GPS nas direções X, Y e Z; número total de pontos no modelo 3D; densidade da nuvem de pontos; número de triângulos na malha de pontos, entre outros aspetos.

É importante destacar que a exportação dos resultados gerados pode ser feita em diversos formatos, por exemplo, os ortomosaicos já georreferenciados podem ser exportados em GEOTIFF; e os modelos digitais de elevação podem ser exportados em Countour SHP (Shapefile). Deste modo, eles podem ser integrados com outros sistemas de informação geográfica, como *ArcGis* e *QGis*.

No dia 19 de abril de 2020 e antes do início da obra de reabilitação do molhe, foram realizados dois levantamentos: um no trecho da cabeça do molhe, executado pela DGRM e outro na região do corpo, realizado pela equipa da ETERMAR.

A partir do levantamento aéreo referente à cabeça do molhe, geram-se os seguintes resultados: um ortomosaico georreferenciado referente ao sistema de coordenada PT-TM06-ETRS89 com uma resolução espacial de 0,89 cm por *pixel*; e um modelo digital de superfície em 3D.

O ortomosaico produzido possui uma densidade de imagem de 8 imagens por *pixel*, ou seja, cada *pixel* do ortomosaico é identificado em 8 imagens diferentes. O ortomosaico tem uma área de cobertura de 16.716,9 m². O RMSE – raiz do erro quadrático médio, da posição do GPS no eixo X é de 0,52 m, no eixo Y é de 0,39 m e no eixo Z é de 0,71 m.

Por fim, não há oclusões no ortomosaico, mesmo na região do oceano em volta do molhe, ou seja, não há áreas que não foram restituídas durante o processamento - Figura 23.



Figura 23. Ortomosaico da cabeça do molhe, sem oclusões, onde se detectam o colapso do setor da cabeça voltado para o mar, tetrápodes partidos, blocos de betão tombados, rotação da base da zona do farolim e fendilhamento na zona estreita do coroamento.

O processamento para gerar o modelo tridimensional seguiu o modo de elevada qualidade, tendo sido processadas em conjunto imagens em nadir (15%) e oblíquas (85%). O modelo 3D possui 3,1 milhões de pontos, a densidade da nuvem de pontos é de 353,5 pontos por m^2 e, no total, foram gerados 454.015 triângulos na malha de superfície.

A partir do modelo tridimensional, nota-se mais facilmente a condição da cabeça do molhe, em colapso. A ação das tempestades do inverno de 2019 remobilizou os blocos Antifer, expondo um substrato formado por blocos de rocha – Figura 24. Também se nota que partes de tetrápodes do paramento mais exposto foram transportados para a zona da cabeça do molhe. Observa-se um bloco de rocha que foi projetado para cima dos blocos com arranhaduras – Figura 24.

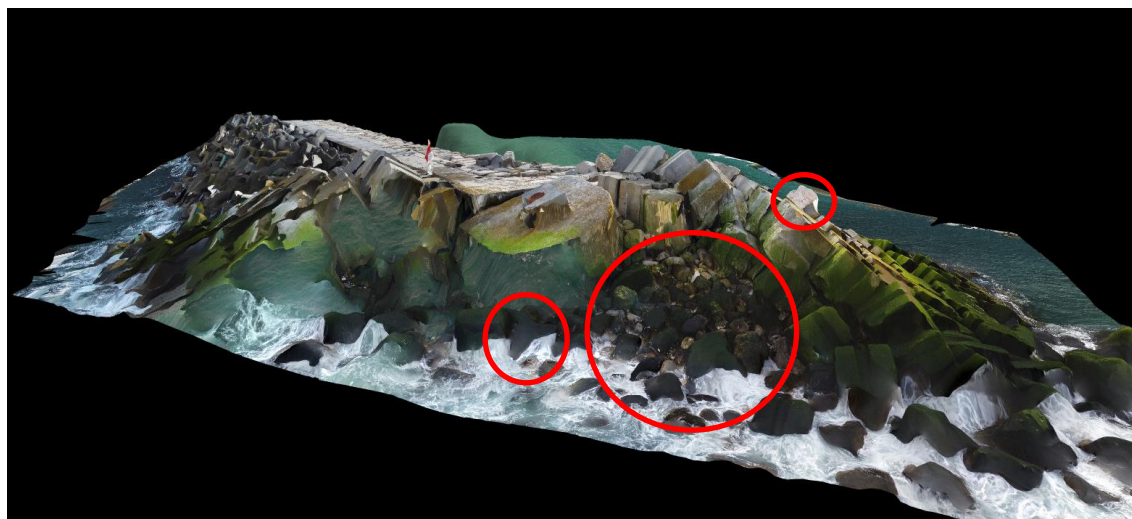


Figura 24. Vista frontal do modelo 3D da cabeça do molhe, onde se destaca a projeção de bloco de rocha para cima dos blocos de betão (círculo vermelho pequeno); um tetrápode partido e remobilizado (círculo vermelho médio); e exposição de substrato de camada de blocos rochosos (círculo vermelho grande)

O levantamento realizado pela equipe da ETERMAR, contemplou a estrutura total do molhe. Foram gerados os seguintes resultados: (i) ortomosaico com uma resolução de 1,34 cm por *pixel*; (ii) modelo digital de elevação em 2,5 D com resolução de 5,36 cm por *pixel*; e (iii) modelo digital de superfície em 3D. O MDE e ortomosaico estão georreferenciados no sistema de coordenadas PT-TM06-ETRS89.

O ortomosaico, cuja área é de 105.006 m² e com uma densidade de 34 imagens por *pixel* mostra - Figura 25, além das observações já discutidas sobre a cabeça do molhe, que o paramento formado por blocos de rocha, menos exposto, foi o menos afetado. Nota-se também alguns blocos de betão lançados na água perto da região do pequeno cais. O ortomosaico apresenta algumas oclusões, todas na parte submersa.



Figura 25. Ortomosaico do molhe inteiro, com algumas oclusões na parte da água, onde se identificam alguns blocos lançados perto da zona do cais.

Por utilizar o sistema RTK para correção do posicionamento geográfico, o RMSE do posicionamento é muito menor quando comparado com os anteriores obtidos com os VANT, apenas com GPS a bordo. No eixo X, o RMSE é zero e, em ambos os eixos Y e Z, é de apenas 1 cm.

A cota do modelo foi corrigida com a introdução dos pontos de controlo terrestres. O modelo digital de elevação mostra que o levantamento aéreo foi capaz de capturar detalhes nas porções submersas, mesmo que a escassos poucos centímetros abaixo do nível de água. As cotas variam entre -0,28 cm a 8,81 m, tendo em conta uma zona

elevada que representa uma ponte levantada e que permite a entrada e saída de pessoas quando atracam o barco no cais - Figura 26.

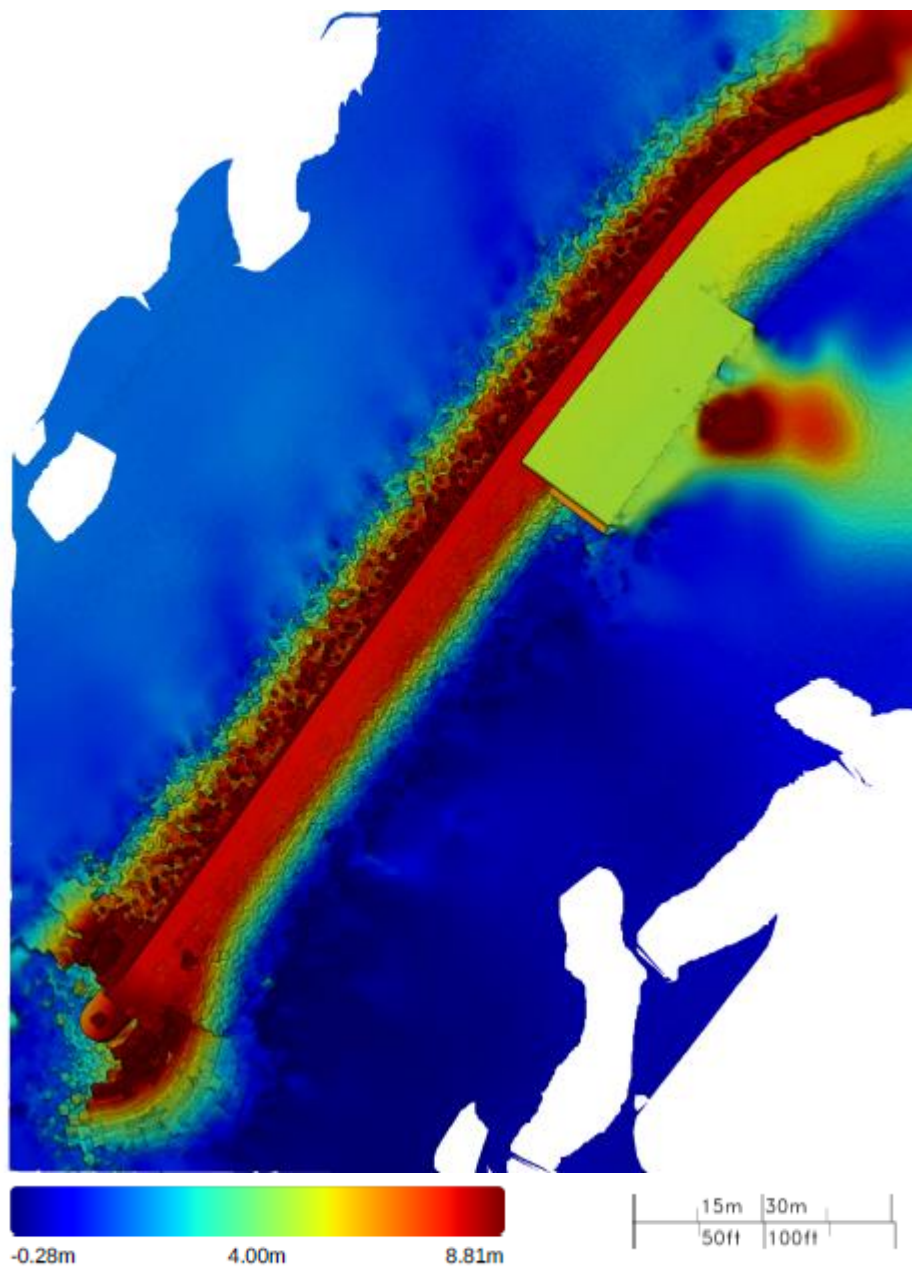
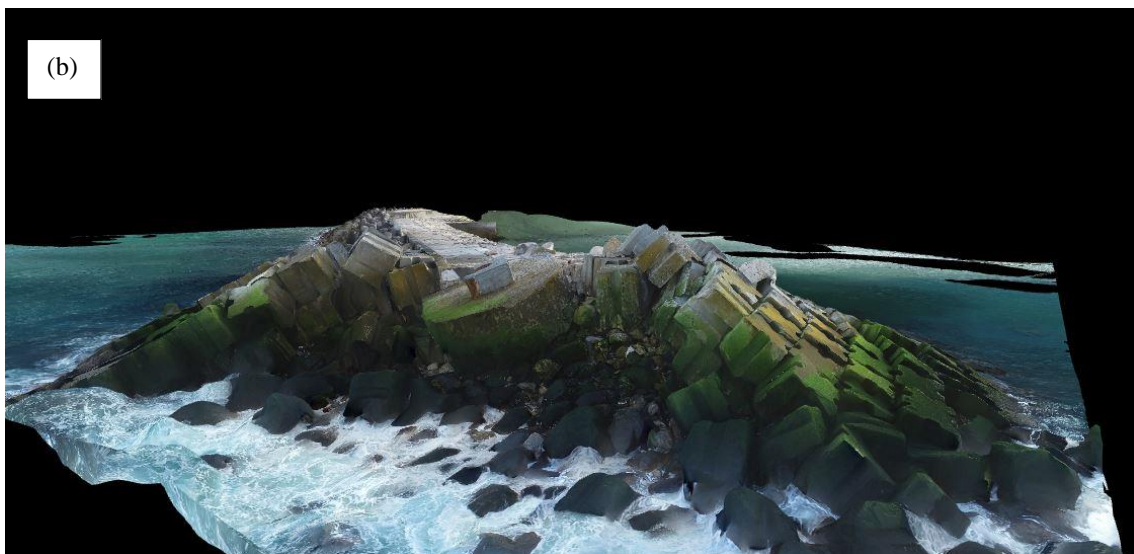


Figura 26. Modelo digital de elevação em 2,5D de todo o molhe antes da reabilitação

O modelo 3D foi gerado em modo de elevada qualidade de processamento e todas as imagens utilizadas foram obtidas em posição de nadir. Foi gerado uma nuvem com um total de 10,8 milhões de pontos e com uma densidade de 185,23 pontos por m^2 . A malha superficial em 3D é constituída por 968.513 triângulos.

O modelo 3D revela um detalhamento mais refinado: por exemplo, é possível notar com maior nitidez os blocos individuais, cujas características ficaram bem restituídas -

os seus contornos, colorações e texturas. A Figura 27 mostra (a) o modelo tridimensional do corpo do molhe e (b) com destaque para a cabeça.



(a) Modelo 3D do molhe inteiro; (b) destaque da região da cabeça, com melhor detalhe dos blocos individuais.

Figura 27. Modelo 3D do molhe referente ao levantamento aéreo de 19 de abril obtido com o *DJI Phantom 4 Pro RTK*

No dia 27 de maio de 2020, realizaram-se dois voos: um ao longo do molhe e o outro na área da arriba situada a sul do molhe. Em relação ao molhe, desenvolveram-se um ortomosaico e um modelo digital de elevação, ambos georreferenciados no sistema PT-

TM06-ETRS89 e com resolução de 2,34 cm por *pixel*, para além do modelo digital de superfície em 3D.

O ortomosaico do molhe completo – Figura 28, cobre uma área de 109.114 m², com uma densidade de 13 imagens por *pixel*. Nota-se, nesta fase da obra de caráter emergencial, a distribuição de blocos rochosos já colocados na ponta mais danificada da cabeça do molhe - Figura 29.



Figura 28. Ortomosaico do molhe inteiro durante a reabilitação com apenas uma pequena oclusão na parte da água



Figura 29. Detalhe da cabeça do molhe durante a reabilitação em ortomosaico

O RMSE da posição do GPS neste voo foi de 0,89 m no eixo X, 0,36 m no eixo Y e 2,2 m no eixo Z. Diversos fatores contribuem para um maior erro de posicionamento durante o voo, tais como: recepção fraca do sinal de GPS, interferência provocada por outros sinais ao redor e, talvez o principal motivo, ventos que prejudicam o sistema de navegação inercial, afetando a orientação espacial e a velocidade relativa do drone (Tahar e Kamarudin, 2016).

O modelo digital de elevação em 2,5D teve a sua cota corrigida com a introdução dos pontos de controlo. Considerando o modelo todo, isto é, as deformações da superfície de água, o próprio molhe e os equipamentos presentes nele, as cotas do

modelo variam entre -4,28 m e 16,77 m. Nota-se que as zonas mais elevadas, além de corresponder aos equipamentos de obras presentes no molhe, também são picos de deformação na superfície da água em zonas próximas ao paramento mais exposto e perto da cabeça do molhe - Figura 30.

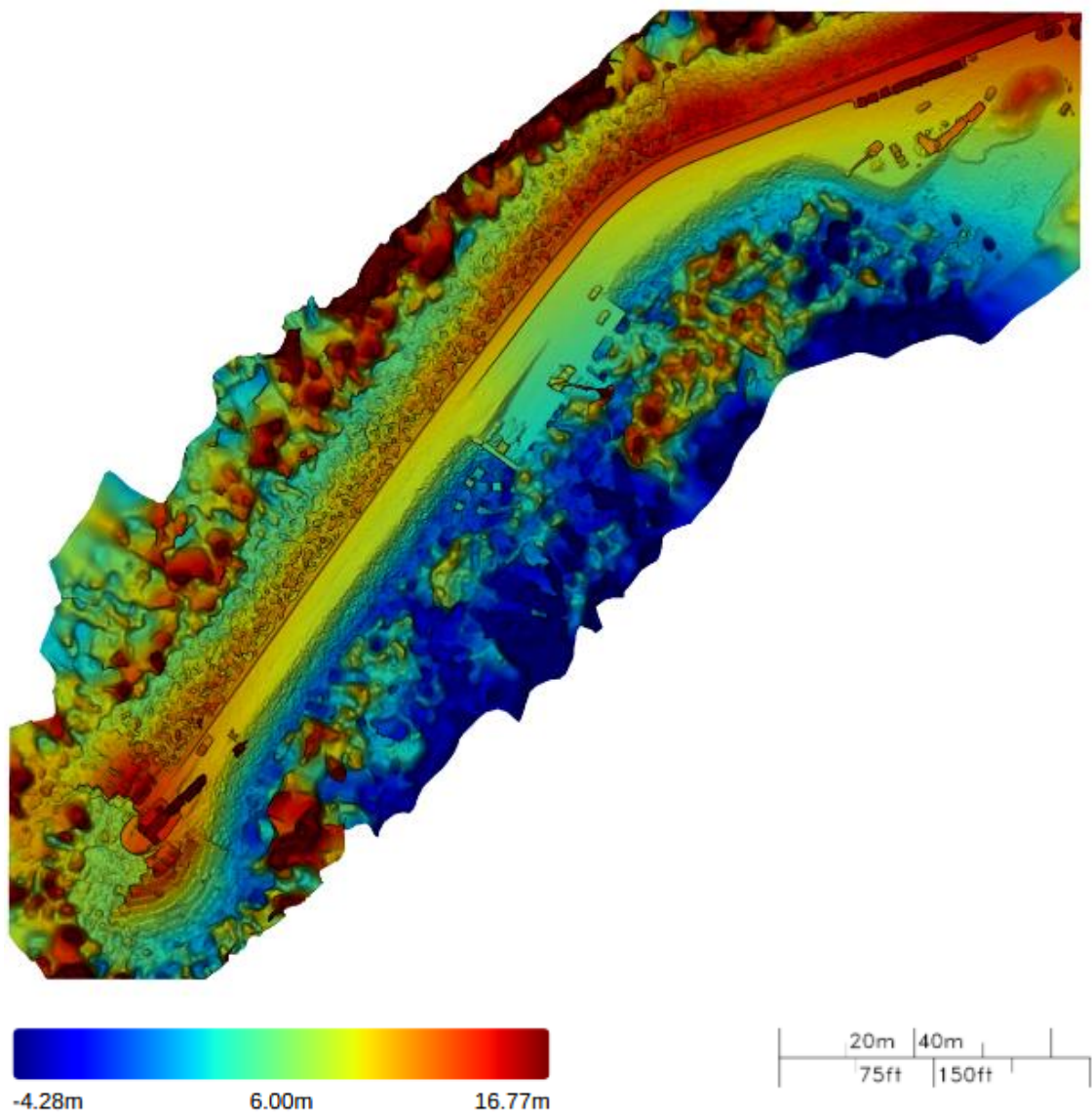


Figura 30. Modelo digital de elevação com distorções na superfície de água

O modelo tridimensional foi gerado através das imagens, todas em posição nadir, resultando numa nuvem de dados com 5,4 milhão de pontos, com uma densidade de 91,92 pontos por m^2 e com uma malha superficial composta por 438.719 triângulos. Devido às deformações na superfície da água, pelas razões aduzidas em seguida, a visualização 3D ficou prejudicada, especialmente na região próxima a cabeça do molhe – Figura 31.

A superfície da água apresenta características que dificultam a identificação de pontos em comuns nas imagens, ou seja, na amarração de pontos e, conseqüentemente, na construção do modelo tridimensional. Estas características estão relacionadas com: a homogeneidade da água nas imagens, a reflexão e refração de luz nessa superfície e as perturbações que provocam o constante movimento da água (Agrafiotis *et al.*, 2019). De acordo com a Lei de Snell, a refração da luz no meio aquático é afetada pela profundidade da água e pelo ângulo de incidência da luz na interface ar-água. No caso de levantamento aéreo por VANT, cria-se um padrão de múltiplos pontos de refração que são ajustados para representar um único ponto que sobrestima ou subestima a elevação do nível de água (Agrafiotis *et al.*, 2019). Em resumo, agitações marítimas provocadas por ondas e a refração da luz que varia a cada ponto em todas as imagens levam ao acumular de erros e distorções na superfície da água (*op. cit.*).

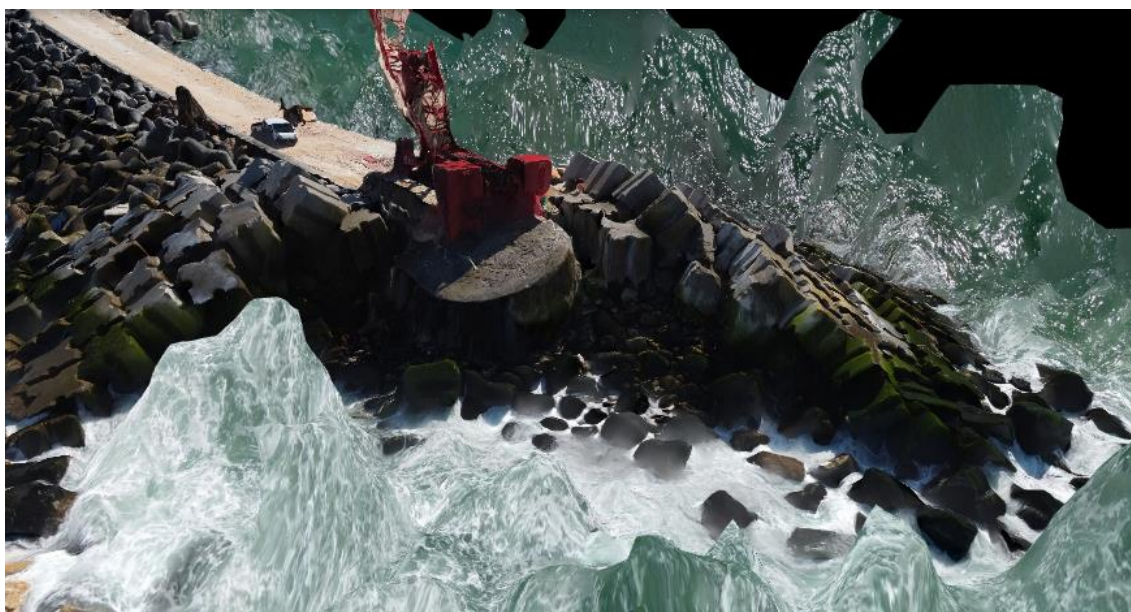


Figura 31. Modelo 3D com distorções na superfície de água.

No mês seguinte, no dia 04 de junho, foi realizado um levantamento aéreo que recobriu o molhe inteiro. A partir deste levantamento geraram-se: um ortomosaico e um modelo digital de elevação em 2,5D, ambos georreferenciados no sistema PT-TM06/ETRS89 e com uma resolução de 1,95 cm por *pixel*; e um modelo digital de superfície em 3D.

O ortomosaico do molhe inteiro representa uma área de 152.617 m², tem uma densidade de 11 imagens por *pixel* e não apresenta oclusões – Figura 32. Em

comparação com o mês anterior, nesta etapa da reabilitação já é possível observar o preenchimento da cabeça do molhe por blocos de rocha – Figura 33.



Figura 32. Ortomosaico sem oclusões do molhe inteiro em 04 de junho.

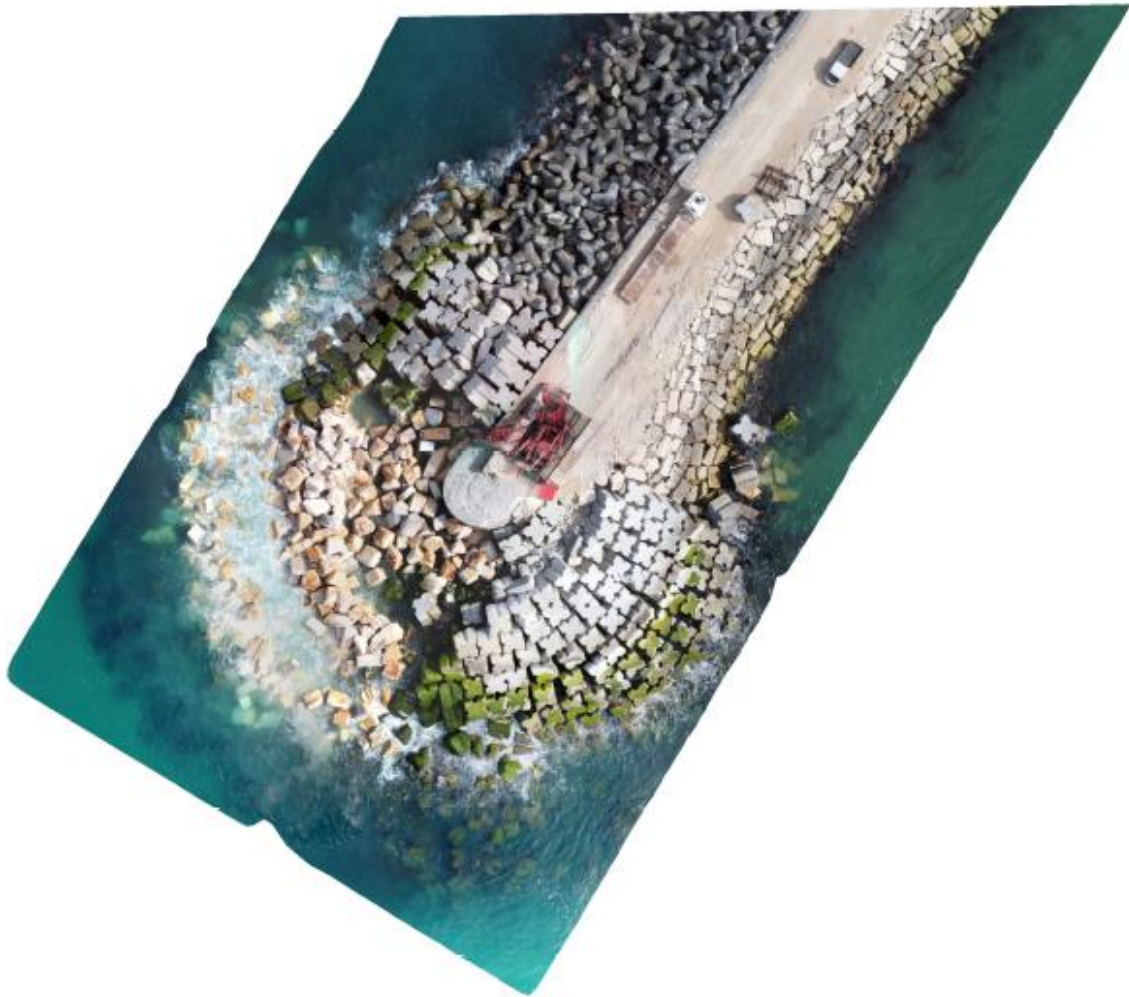


Figura 33. Ortomosaico com detalhe da cabeça do molhe no início de junho e que mostra o seu progressivo preenchimento por blocos rochosos.

O RMSE da posição do GPS neste voo foi de 0,82 m no eixo X, 0,80 m no eixo Y e 0,98 m no eixo Z.

O modelo digital de elevação em 2,5D, com a cota devidamente corrigida, apresenta uma série de deformações na superfície da água - Figura 34. Como já explicado anteriormente, é comum que haja oscilações altimétricas neste tipo de superfície devido a variação da refração de luz na água em cada ponto nas diversas imagens. Tal problema fica limitado à superfície da água e não à estrutura do molhe.

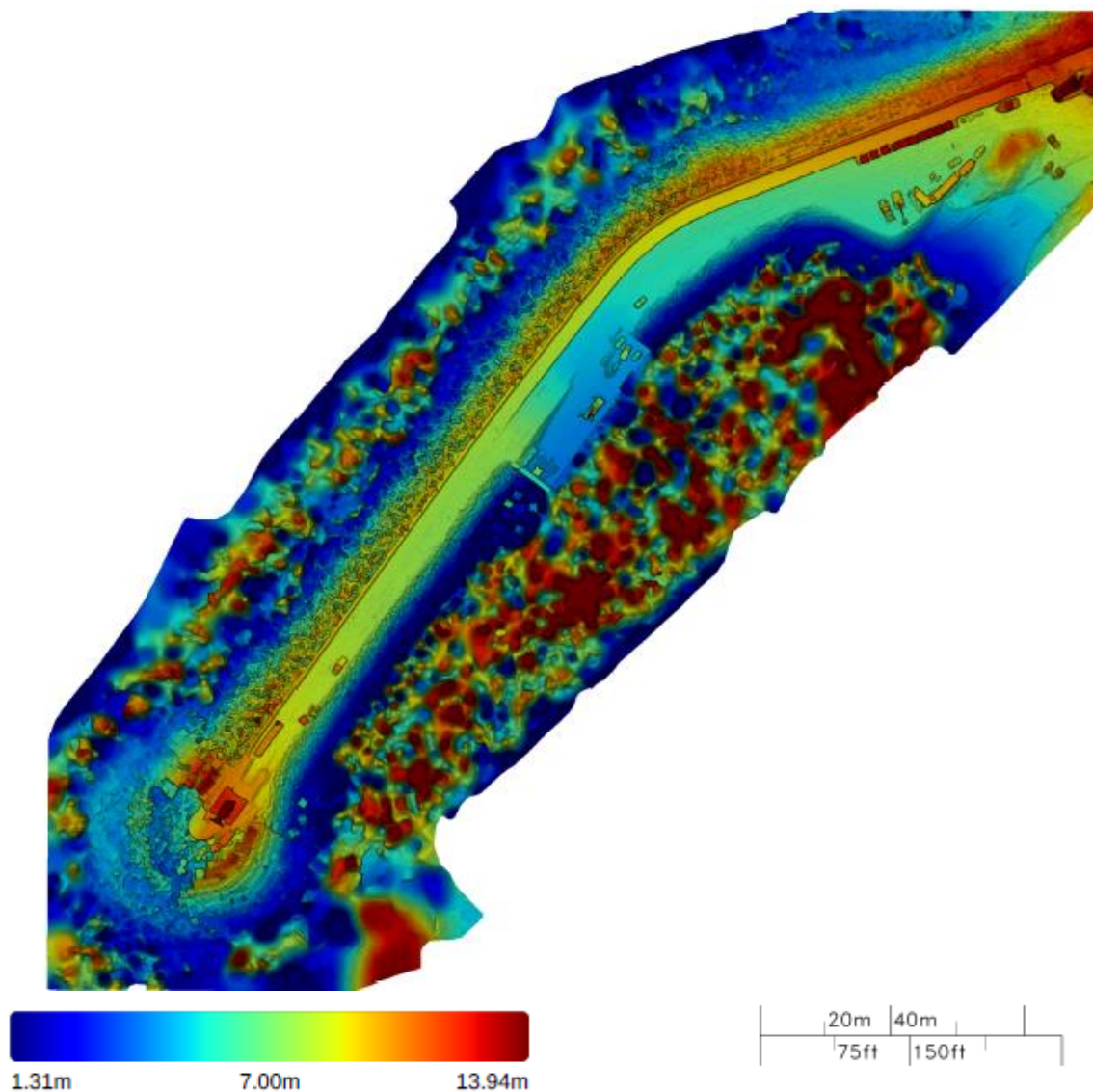


Figura 34. Modelo digital de elevação em 2,5D do molhe inteiro no início de junho.

O modelo de superfície em 3D foi processado em modo de qualidade elevada e gerado através de imagens em posição nadir (78%), imagens oblíquas (15%) e imagens horizontais (7%). A nuvem é formada por 7,3 milhões de pontos e possui uma densidade de 119,1 pontos por m². A superfície tridimensional é formada por uma malha composta por 792.726 triângulos. Neste modelo 3D identifica-se, mais facilmente, que o lado menos exposto da cabeça do molhe foi alargado para a acomodação de mais blocos; observa-se ainda o preenchimento com blocos rochosos da região da cabeça que estava colapsada. A superfície da água apresenta deformações - Figura 35.



Figura 35. Modelo 3D da cabeça do molhe, com destaque para o alargamento na porção menos exposta (em vermelho) e o preenchimento com blocos rochosos.

O levantamento do dia 16 de julho foi realizado após a conclusão da obra de caráter emergencial, que teve duração de 3 meses. Com base nas suas imagens desenvolveram-se: um ortomosaico com resolução de 1,33 cm por *pixel* e um modelo digital de elevação 2,5D com resolução de 5,32 cm por *pixel*, ambos georreferenciados no sistema PT-TM06-ETRS89; bem como um modelo digital de superfície em 3D.

O ortomosaico do molhe inteiro representa uma área de 94.722 m² e tem uma densidade de 17 imagens por *pixel* – Figura 36. Não há oclusões no ortomosaico, que permite observar a conclusão do preenchimento da cabeça do molhe com blocos rochosos, em detalhe na Figura 37.

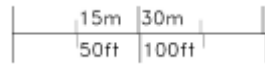


Figura 36. Ortomosaico do molhe após a conclusão da sua reabilitação, em julho.

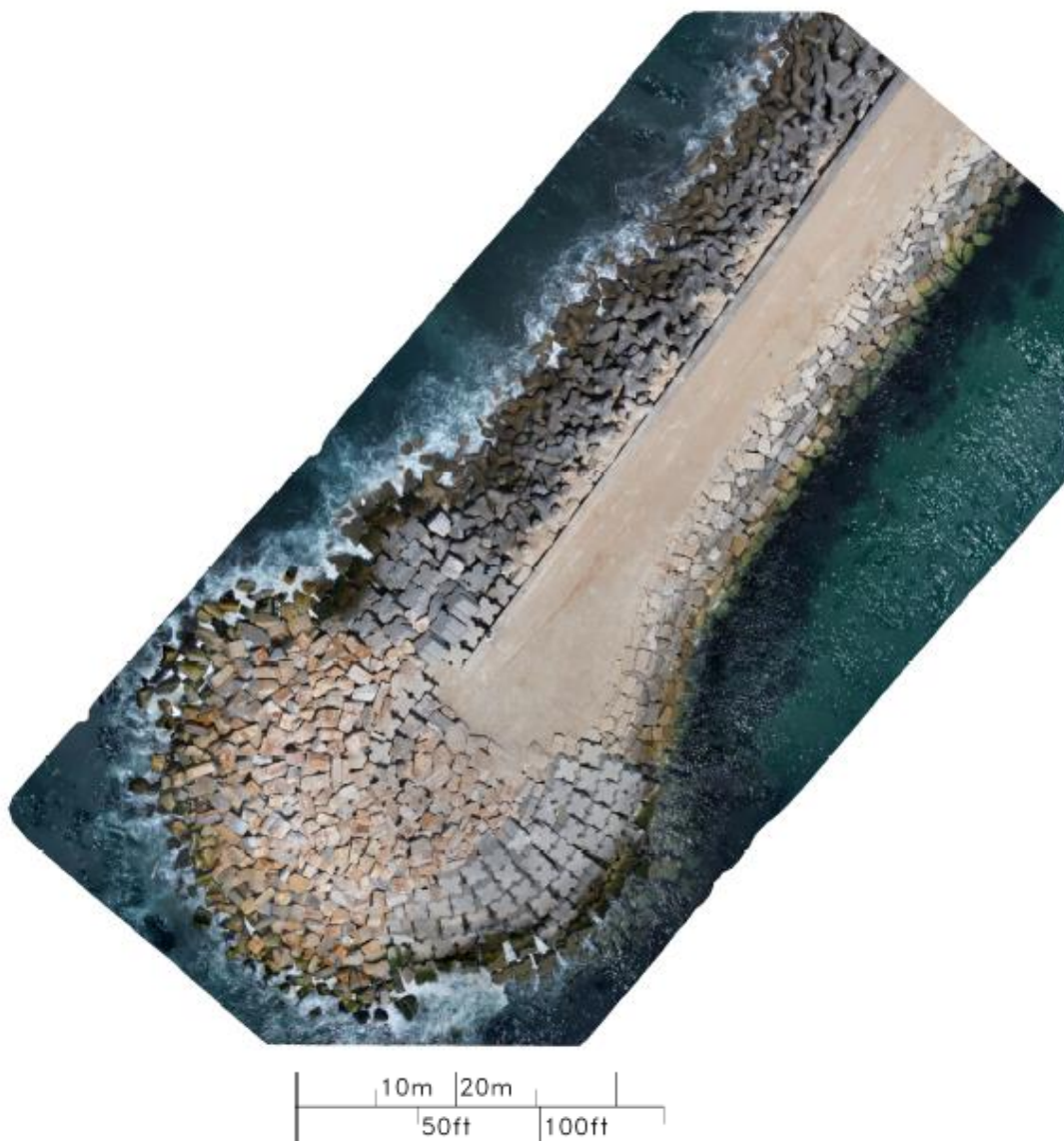


Figura 37. Detalhe da cabeça do molhe após a sua reabilitação.

O modelo digital de elevação, 2,5D – Figura 38, varia entre 1,77 m e 10,81 m e mostra a cabeça do molhe de uma altitude mais elevada, em média de 10 m; enquanto a estrutura do corpo do molhe está a uma cota média de 8 m e o cais numa cota média de 5 m. Em comparação com o primeiro levantamento realizado, em 19 de abril de 2020, a cabeça do molhe, parcialmente colapsada, tinha uma cota média próxima dos 9 m.

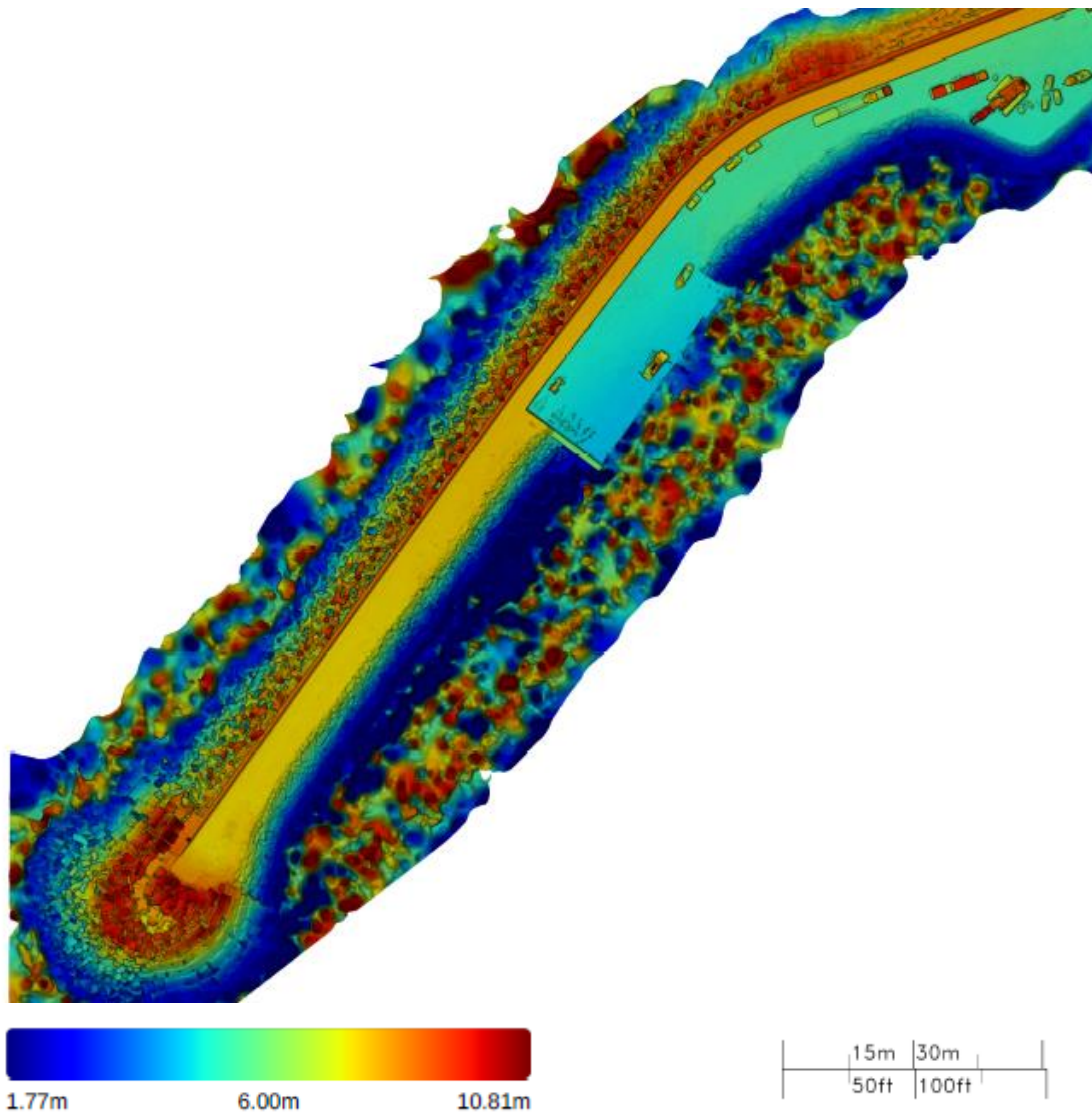


Figura 38. Modelo digital de elevação 2,5D do molhe após a sua reabilitação.

O modelo de superfície 3D foi processado em modo de qualidade elevada. Foram utilizadas imagens em nadir (52%) e oblíquas (48%) que resultaram numa nuvem de 12,8 milhões de pontos e com uma densidade de 339,7 pontos por m². O modelo conta com uma superfície composta por 955.703 triângulos. A Figura 39 mostra o estado final da cabeça do molhe após a finalização da obra de reabilitação visto no modelo 3D.



Figura 39. Detalhe da cabeça do molhe no modelo 3D no final da reabilitação

Em suma, a utilização de VANT para a monitorização de obras portuárias na Ericeira mostrou-se vantajosa pelos seguintes motivos:

- (i) permitiu um acompanhamento detalhado das fases de obra, através da reorganização de blocos Antifer e do preenchimento de blocos rochosos na cabeça do molhe, de forma que os levantamentos aéreos foram conduzidos sem a necessidade de interrupção dos trabalhos;
- (ii) a vista aérea permitiu uma melhor perspectiva e apreciação da cabeça do molhe, que não é possível quando a inspeção ocorre no mesmo nível que o da cabeça;
- (iii) maior facilidade na identificação de problemas estruturais, tais como perda de blocos, colapso parcial da cabeça, desorganização/rotação de blocos, partição de blocos, fissuras em betão, entre outros;
- (iv) redução no tempo de inspeções e a baixo custo;
- (v) diminuição dos riscos de exposição do operador, já que o VANT é controlado remotamente a partir de uma zona segura;
- (vi) boa resolução temporal entre os levantamentos; e
- (vii) boa qualidade dos dados coletados.

Desta forma, a aplicação sistemática desta metodologia durante a obra e de forma periódica após a sua finalização em trabalhos futuros permitirá acompanhar o estado de

conservação do molhe do Porto da Ericeira, a fim de otimizar a gestão dos ativos portuários durante a sua vida útil.

4.3 Monitorização das arribas a sul do molhe da Ericeira

No dia 27 de maio, realizou-se um levantamento na parte das arribas da Ericeira sobre jurisdição da DGRM e que se estendem para sul do molhe, entre a escadaria perto do estacionamento das Furnas e a rampa Sul que dá acesso à Praia dos Pescadores.

O processamento do modelo 3D foi realizado através do *DroneDeploy* e foi configurado no modo de qualidade elevada, com uso de imagens oblíquas (18%) e horizontais (82%), gerando uma nuvem com 13,8 milhões de pontos, com uma densidade de 116,54 pontos por m² e uma malha superficial composta por 744.964 triângulos.

Para facilitar a visualização espacial de blocos instáveis ou semi-instáveis ao longo dos 200 m de extensão daquele trecho de arriba – assinalados com círculos vermelhos na Figura 40, o modelo 3D foi dividido em três zonas: A, B e C.

Salienta-se que, para a região em apreço, a criação de ortomosaicos da área é pouco relevante, já que a vista em planta acaba por prejudicar a visualização da área. Neste caso, os modelos tridimensionais são mais interessantes e permitem uma melhor apreciação dos pormenores da arriba sub-vertical.



Figura 40. Visualização do modelo 3D completo da arriba da Ericeira a sul do molhe e dividido em três zonas: A, B e C, onde se salienta as regiões de instabilidade indicadas pelos círculos a vermelho.

A Figura 41 destaca uma parte dos taludes da zona A, onde se observam alguns pontos importantes: blocos rochosos metaestáveis na parte de cima à esquerda do talude (a); a erosão com formação de locas profundas (b); descalce na base do muro de alvenaria, com formação de fendas de tração (c); e o contato entre a base do muro e o maciço rochoso onde, no encontro à esquerda (d), se observa que as camadas são menos espessas e apresentam mais descontinuidades, quando comparadas com os estratos do encontro à direita (e).



Figura 41. Ampliação do modelo 3D dos taludes, onde se destaca a formação de locas e a potencial precariedade da estabilidade do muro de alvenaria.

As locas são formadas por erosão interna, que está relacionada com a percolação de água no interior do maciço, que apresenta camadas com contraste de permeabilidade. É possível notar que as camadas carbonatadas são mais espessas e coroam a arriba, e as camadas mais finas estão mais fendilhadas.

O processo de erosão interna pode advir do vazamento de água proveniente de infraestruturas de conduta de água da cidade (condutos de abastecimento, galerias de drenagem pluvial etc.). Para solucionar este problema, é necessário instalar drenos sub-horizontais no talude para abaixar o nível freático.

A estabilidade do muro de alvenaria pode ser resolvida com a construção de um muro suporte para reforçar a sua base, que apresenta um recuo significativo e fendas de tração.

Na base desta porção em apreço, encontra-se um muro de alvenaria que serve de suporte à sucessão de camadas rochosas suprajacentes. Observa-se, também, um pequeno pilar de alvenaria construído para sustentar a consola ali instalada – Figura 42.



Figura 42. Base do talude com algumas obras de estabilização, nomeadamente a construção de uma base de alvenaria e pequeno pilar e cavidades de dissolução à direita.

A Figura 43, em fotografia aérea para melhor detalhe, mostra um trecho ao lado direito do muro de alvenaria exibido na Figura 41, que apresenta uma fenda de dissolução que deve ser monitorizada a fim de verificar a sua taxa de abertura e que representa um risco de queda de bloco. Tal monitorização pode ser feita pela inspeção do tamanho da abertura. Também pode ser instalado um inclinômetro para a verificação de deslocamento no maciço.

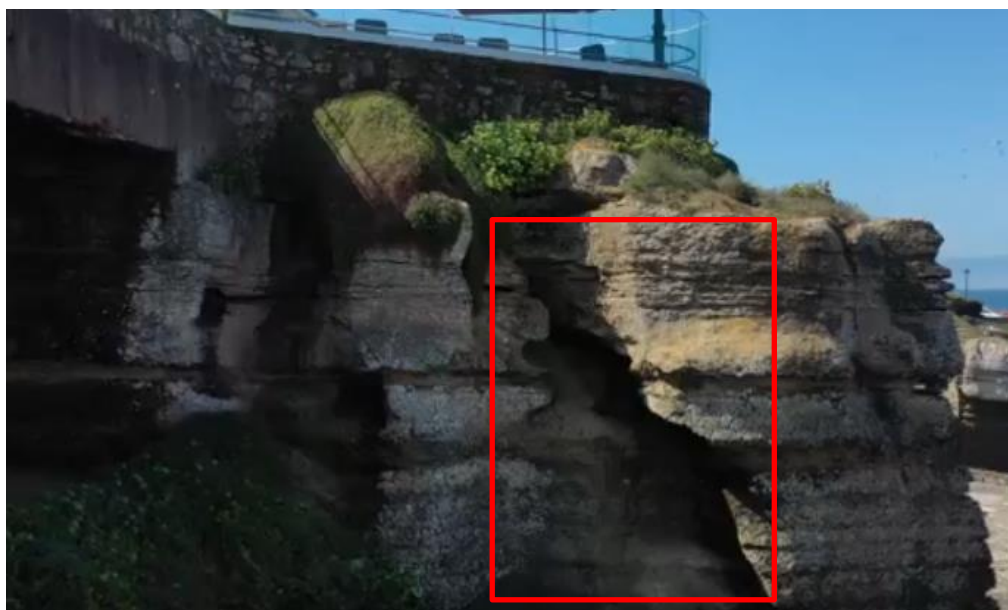


Figura 43. Fenda na parte de trás do bloco - destacada em vermelho.

A Figura 44, também da zona A da Figura 40, demonstra o recuo da arriba, com um bloco de grandes dimensões (cerca de 10 m x 11 m x 3 m) que se destacou em primeiro plano, que se encontra basculado e apoiado num depósito do tipo talus constituído por blocos rochosos menores. A visualização de pormenores fica um pouco prejudicada por conta da formação de sombra, aspeto problemático para a modelação 3D em arribas sub-verticais.



Figura 44. Perspectiva do recuo da arriba com a quedas de blocos de diversas dimensões.

A problemática da instabilidade da arriba é mais significativa na área B da Figura 40, pois é permitida a circulação de pessoas nesta zona, quer nas escadarias, quer por apresentar uma pequena área de lazer e descanso, como por exemplo num pequeno banco de alvenaria de pedra – à esquerda na Figura 45. Propõe-se a colocação de placas de aviso de perigo de derrocadas nesta área.

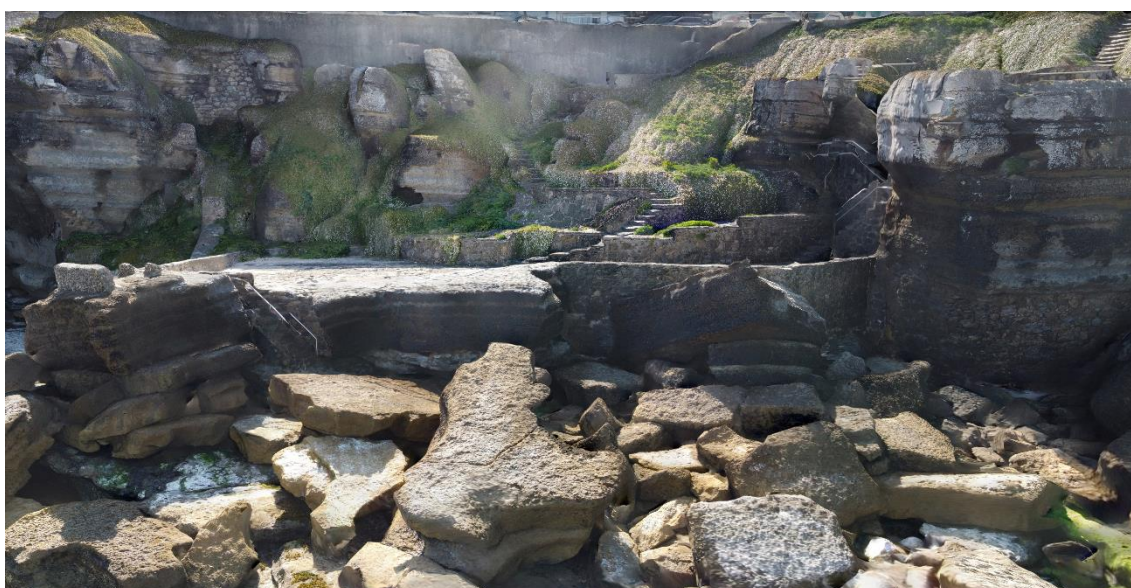


Figura 45. Detalhe da zona B da arriba da Figura 40.

Alguns pontos desta zona B ainda merecem destaque – Figura 46: a região à esquerda da arriba onde existem locas profundas, as quais estão encobertas parcialmente por vegetação (a); e a segmentação de blocos de rocha, isolados, junto à escadaria da direita (b).



Figura 46. Existência de locas profundas, por fenómenos de erosão interna, e blocos potencialmente instáveis na zona B da arriba.

Nas Figuras 47 (no modelo 3D) e 48 (imagem aérea para melhor detalhe), observa-se um bloco que representa um perigo potencial elevado para as pessoas que passam na escadaria embaixo. Este bloco encontra-se proeminente, quase isolado do restante do maciço, e como medida de contenção, possui uma pequena região da sua base suportada por uma barra esbelta de alumínio. O bloco em si apresenta uma descontinuidade horizontal com uma abertura significativa que acaba por dividi-lo ao meio. As dimensões deste bloco são cerca de 1,3 m x 1,2 m x 0,8 m.

Outro aspeto importante seria o assentamento que atua nesta barra de alumínio, pois ela está em contato no topo com o bloco rochoso, enquanto a sua base está fixada na estrutura do muro de alvenaria. Esta medida de contenção deveria ser substituída por um pilar de alvenaria com uma base mais larga. Outra medida pode ser o desmonte deste bloco.



Figura 47. Bloco em risco de queda – visto em 3D.



Figura 48. Imagem aérea de bloco assinalado em vermelho, em perigo elevado de queda, com destaque para a estrutura de suporte, junto à escadaria.

Próximo ao trecho anterior, num trecho da arriba que serve como um pequeno mirante – Figura 49, pode-se observar a formação de cavidades que contribuem para delimitar futuras quedas de blocos da arriba.



Figura 49. Aspecto de mais cavidades de dissolução na zona B da arriba.

A zona C da arriba da Ericeira é analisada em seguida. A Figura 50 mostra num extrato do modelo 3D, um outro bloco de grandes dimensões (8 m x 5 m x 2,5 m) em perigo de se destacar, numa perspectiva da sua retaguarda. Pode-se observar a variação da largura entre as camadas, provocada pela erosão diferencial. Tal efeito, associado a um posicionamento favorável na direção para fora do talude, pode provocar que o bloco tracione e se parta novamente.



Figura 50. Aspecto de bloco, destacado em vermelho, em perigo de tombamento na zona C.

Ao lado do trecho anterior e apesar da formação de sombra nesta região do modelo 3D – Figura 51, é possível observar o descalce significativo de zonas da arriba, que acarretam no isolamento de blocos calcários, mais rijos, na região superior. Tais blocos, como perdem o suporte de base, apresentam um perigo elevado de queda. Este trecho demonstra, de forma acentuada, a diferença de resistência à erosão entre as camadas inferiores e superiores que compõem o perfil da arriba.

Como forma de controlo desses trechos da arriba em que a erosão diferencial é significativa, propõe-se o uso de betão projetado no maciço, como forma de controlar a erosão superficial. Associado a esta solução, deve-se prever sistemas de drenagem que permitam a drenagem controlada da água do interior do talude.



Figura 51. Aspeto da erosão diferencial e descalce significativo que colocam blocos (em vermelho) em balanço na parte superior da arriba na zona C.

Na porção da arriba próxima ao estacionamento e à escadaria, é visível a formação de cavidades de dissolução profundas, que contribuem para a instabilidade de blocos e para o recuo dos taludes – Figura 52. Nota-se também como as camadas superiores são mais espessas e as camadas de base estão mais erodidas, deixando as primeiras em consola.



Figura 52. Aspeto de cavidades de dissolução profundas no trecho da arriba junto às Furnas.

Por fim, já na extremidade mais ao sul da zona C da arriba – Figura 53, outro bloco mostra-se proeminente e apresenta perigo elevado de queda; no entanto, já não apresenta grande risco para as pessoas, pois o acesso pedonal neste trecho é muito restrito.



Figura 53. Extrato do modelo 3D da arriba onde aparece um bloco proeminente, em perigo de queda, no extremo sul da zona C.

Em suma, a utilização de VANT para a monitorização da arriba mostra-se interessante, pois permitiu:

- (i) uma coleta de dados de forma segura para o operador;
- (ii) o recobrimento aéreo de zonas com visibilidade complicada e de difícil acesso pedonal ou inseguras;
- (iii) agilidade na coleta de dados, a baixo custo e com boa qualidade;
- (iv) o auxílio na identificação dos processos erosivos atuantes na arriba e da observação de blocos semi-instáveis e a obtenção de imagens que, futuramente, servirão de comparação para acompanhar a evolução dos fenómenos de instabilização; e
- (v) visualizar com mais facilidade a definição de propostas de remedeio para mitigar os potenciais perigos detetados;

Além da aplicação efetiva das propostas de remedeio, como o desmonte de blocos assinalados, construção de muros de suporte, instalação de drenos sub-horizontais, projeção de betão em porções da arriba, também é relevante a sinalização adequada dos trechos de arriba, principalmente na zona B de maior risco por conta da maior circulação de pessoas, através da instalação de sinais de alerta para o risco de derrocada.

Recomenda-se, também, a monitorização periódica por VANT neste trecho de estudo, pelo menos duas vezes ao ano, para o acompanhamento da evolução da morfologia da arriba, de forma a prevenir riscos para a população local.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A monitorização de infraestruturas portuárias e arribas através de levantamento aéreo por VANT tem tido um crescimento expressivo ao longo dos anos. Os motivos para esse aumento estão relacionados a diversos fatores:

- (i) Disponibilidade de diversos tipos de VANTs a preços acessíveis consoante a necessidade do operador e do projeto;
- (ii) Rapidez no levantamento das imagens em campo;
- (iii) Capacidade de recobrimento de grandes áreas;
- (iv) Redução do número de pessoas necessárias para realizar a monitorização;
- (v) Aumento da segurança, pois o operador pode realizar o voo a partir de uma zona segura;
- (vi) Acesso a diversos programas de tratamento de dados das imagens, quer de programas comerciais pagos adequados a grandes projetos e empresas (e.g., *Agisoft PhotoScan*, *Bentley*, *PhotoModeler*), quer de programas comerciais de processamento *online* de baixo custo (e.g., *Maps Made Easy*) ou até grátis em versão teste (e.g., *DroneDeploy*) e programas de livre acesso (e.g. *MicMac*, *Visual SFM*, *CloudCompare*); e
- (vii) Geração de dados de qualidade aferida, no que respeita a resolução temporal, espacial e a exatidão.

No entanto, enfrentam-se alguns desafios durante um levantamento aéreo por VANT:

- (i) Ventos fortes que diminuem a estabilidade de voo e, por consequência, reduzem a exatidão do posicionamento geográfico das imagens;
- (ii) Reflexividade e agitação da superfície de água que atrapalha os sensores ópticos de altitude do VANT durante o voo;
- (iii) Perda de sinal de satélite pela interferência de antenas ao redor; e
- (iv) Formação de sombra nas imagens dependendo da angulação com o sol.

Estes problemas influenciam na etapa do processamento das imagens, pelo que podem ocorrer alguns erros na exatidão do posicionamento e problemas de restituição, com a formação de oclusões.

Esta investigação, ao abrigo de protocolo entre a DGRM e a FCT NOVA, teve o objetivo de implementar a metodologia de levantamento aéreo por VANT na monitorização da fiscalização da reabilitação de emergência do molhe da Ericeira, assim

como na monitorização e identificação de zonas instáveis ou semi-instáveis no trecho de arribas situado a sul do molhe, entre a rampa sul de acesso à Praia dos Pescadores e o parque de estacionamento das Furnas, que representam um risco significativo à circulação de pessoas nessa área.

O levantamento de dados foi realizado em diversas datas, entre abril e julho de 2020. Para o efeito, foram utilizados três tipos de VANTs: *DJI Mavic Pro 2*, *DJI Mavic Mini* e *DJI Phantom 4 Pro RTK*. O processamento das imagens foi feito através das plataformas *online* da *DroneDeploy*, versão teste, e *Maps Made Easy*, versão paga, mas de baixo custo. Obtiveram-se diversos ortomosaicos, modelos digitais de elevação em 2,5D e modelos digitais de superfície em 3D.

A partir destes resultados, observou-se as diversas etapas de reconstrução da cabeça do molhe por reorganização de blocos Antifer e preenchimento por blocos rochosos. Os modelos 3D das arribas identificaram 6 situações que apresentam risco significativo de queda de blocos carbonatados com dimensões relevantes.

A partir da comparação entre os resultados dos dois programas, é possível afirmar que:

- (i) Os ortomosaicos produzidos pelo *DroneDeploy* apresentam uma resolução espacial superior e aspectos visuais melhores, como textura e coloração;
- (ii) Os resultados gerados pelo *Maps Made Easy* exibem uma menor quantidade de oclusões; e
- (iii) Os modelos digitais de elevação em 2,5D e modelos tridimensionais de superfície do molhe, gerados por ambos os programas, apresentam deformações altimétricas relevantes na restituição da superfície da água.

Além disso, o *DroneDeploy* disponibiliza um relatório que exhibe informações sobre área de cobertura, densidade de ortomosaico, resolução espacial, RMSE (raiz do erro quadrático médio) do posicionamento do GPS em planimetria e altimetria, número de pontos presentes no modelo 3D e densidade da nuvem de pontos. Estas informações são importantes para a avaliação da qualidade dos resultados gerados. Considerando que o utilizador perde um pouco do controlo de qualidade e tomada de decisão por causa do processamento *online*, tal relatório é de grande utilidade. O *Maps Made Easy* não fornece este tipo de relatório, e a própria comparação quantitativa entre os resultados dos dois programas fica dificultada.

Outra diferença entre as duas plataformas é o aspeto da visualização *online* do modelo 3D. No *DroneDeploy*, o modelo 3D *online* possui uma qualidade e resolução,

elevadas, enquanto a visualização *online* do modelo 3D no *Maps Made Easy* é de resolução baixa. O utilizador deve, portanto, fazer o *download* do arquivo do modelo 3D e abri-lo noutra programa para assim poder visualizar o modelo com qualidade elevada.

Em suma, a utilização de VANT para a monitorização de obras portuárias e dos taludes costeiros na Ericeira mostrou-se vantajosa pelos seguintes motivos:

- (i) permitiu um acompanhamento detalhado das fases de obra, nos quais os levantamentos aéreos foram conduzidos sem a necessidade de interrupção dos trabalhos;
- (ii) boa resolução temporal entre os levantamentos realizados no molhe;
- (iii) a vista aérea permitiu uma melhor perspectiva e apreciação da cabeça do molhe, que não é possível quando a inspeção ocorre no mesmo nível que o da cabeça;
- (iv) maior facilidade na identificação de problemas estruturais, tais como perda de blocos, colapso parcial da cabeça, desorganização/rotação de blocos, partição de blocos, fissuras em betão, entre outros;
- (v) permitiu o recobrimento aéreo de zonas com visibilidade complicada e de difícil acesso pedonal ou inseguras;
- (vi) auxiliou na identificação dos processos erosivos atuantes na arriba e da observação de blocos semi-instáveis e a obtenção de imagens que, futuramente, servirão de comparação para acompanhar a evolução dos fenómenos de instabilização;
- (vii) permitiu visualizar com mais facilidade a definição de propostas de remedeio para mitigar os potenciais perigos detetados;
- (viii) redução no tempo de inspeções e a baixo custo;
- (ix) diminuição dos riscos de exposição do operador, já que o VANT é controlado remotamente a partir de uma zona segura; e
- (x) boa qualidade dos dados coletados.

Relativamente a trabalhos futuros, e para além da implementação das medidas de remedeio apontadas neste documento para a estabilização das arribas - desmonte de blocos, construção de muros de suporte, instalação de drenos sub-horizontais e projeção de betão em trechos da arriba – acresce ainda a sinalização para o risco de derrocada.

Recomenda-se também a monitorização periódica tanto do molhe quanto das arribas, que deve ser feita pelo menos duas vezes ao ano: após o final do inverno e no

final do verão. É durante o inverno que as tempestades são mais fortes e podem vir a danificar a estrutura do molhe novamente. Deve-se acompanhar a evolução morfológica da arriba ao longo dos anos de forma a reduzir riscos para a população local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abidin, H.; Andreas, H.; Gamal, M., Hendrasto, M. (2004). On the Use of GPS Survey Method for Studying Land Displacements on the Landslide Prone Areas. FIG Working Week 2004. Athens, Greece.

Agrafiotis, P., Skarlatos, D., Georgopoulos, A., Karantzalos, K. (2019) Shallow water bathymetry mapping from UAV imagery based on machine learning, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W10, 916, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-9-2019>.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2013). AASHTO transportation asset management guide: a focus on implementation. AASHTO, Washington, D.C., 48 pages.

American Society of Photogrammetry (ASP) (1980). Manual of photogrammetry. 4th edition, 1056 pages.

Bajaj, R., Ranaweera, S., Agrawal, D. (2002). GPS: Location-Tracking Technology. *IEEE Computer*. 35. 92-94. 10.1109/2.993780.

Bartos, K., Pukanská, K., Sabová, J. (2014). Overview of Available Open-Source Photogrammetric Software, its Use and Analysis. *International Journal for Innovation Education and Research*, vol. 2-04.

Bitenc, M., Bloemsma, M. R., Duijnmayr, K., Lin, K., Pizziol, S., Saleh, M. A., *et al.* (2008). Novel Techniques for costal monitoring - A case study near Monster-Ter Heijde. Delf University of Technology.

Borges, R. O., Fazan, A. J., Sobral, L. T., Ribeiro, R. F., Lanza, D.S. (2015). Utilização de Vants de pequeno porte como alternativa de baixo custo para caracterização topográfica da infraestrutura de transportes no Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes - DNIT, Brasil.

Bueno, M., Díaz-Vilariño, L., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., Arias, P. (2015). Automatic modelling of rubble mound breakwaters from LiDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-3/W3, 2015 ISPRS Geospatial Week 2015, La Grande Motte, France.

Burnham, C. (2019). A Study of UAV Photogrammetry Software. Research paper. Universitat Politècnica de Catalunya (BarcelonaTech).

Cogima, C. K.; Nascimento, R. V. C.; Paiva, P. V. V.; Carvalho, M. A. G.; dezenkempter, E. (2020). Scan-to-HBIM aplicado à igreja da Pampulha de Oscar Niemeyer. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.15, n.1, p.117-134. <http://dx.doi.org/10.116/gtp.v14i1.152828>

Del Grosso, A. (2001). Monitoring of infrastructures in the marine environment. Conference paper.

Direção Geral do Território - DG Território website. <https://www.dgterritorio.gov.pt/cartografia/cartografia-topografica/modelos-digitais-do-terreno>. Acessado em 23 de janeiro de 2020.

DJI website. <https://www.dji.com/pt/mavic-2/info>. Acessado em 23 de janeiro de 2020.

DroneDeploy website. <https://www.dronedeploy.com/>. Acessado em 23 de janeiro de 2020.

Duarte, L., Teodoro, A. C., Moutinho, O., Gonçalves, J. A. (2017) Open-source GIS application for UAV photogrammetry based on MicMac. *International Journal of Remote Sensing*, 38:8-10, 3181-3202, DOI: 10.1080/01431161.2016.1259685

Duffy, J. P., Cunliffe, A. M., DeBell, L., Sandbrook, C., Wich S. A., Shutler, J. D., Myers-Smith, I. H., Varela, M. R. & Anderson, K. (2018). Location, location, location: considerations when using light weight drones in challenging environments. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*; 4(1), pp. 7–19.

Duque, L., Seo, J., Wacker, J. (2018). Synthesis of Unmanned Aerial Vehicle Applications for Infrastructures. *J. Perform. Constr. Facil.*, 32(4). DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001185.

Fortes, C. J. E. M., Capitão, R., Henriques, M. J., Lemos, R., Neves, M. G., Reis, M. T. and Silva, L. G. (2019). Observing and monitoring maritime works through the use of the new OSOM+ Methodology. Proc. VIII SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. In *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*. 4, n. 2.

Geoscience Australia website. Interferometric Synthetic Aperture Radar. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar#heading-1>. Acessado em 19 de fevereiro de 2020.

Gomez, C. & Purdie, H. (2016). UAV-based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring – A Review. *Geoenvironmental Disasters*, 3:23.

González-Jorge, H., Puente, I., Roca, D., Martínez-Sánchez, J., Conde, B., and Arias, P. (2014). UAV Photogrammetry Application to the Monitoring of Rubble Mound Breakwaters. *J. Perform. Constr. Facil.*, DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000702.

Heritage, G. L. & Large, A. R. (2009). Principles of 3D Laser Scanning. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. (pp. 21-34). Wiley-Blackwel.

Henriques, M. J., Fonseca, A., Roque, D., Lima, J. N., Marnoto, J. (2014). Assessing the Quality of an UAV-based Orthomosaic and Surface Model of a Breakwater. FIG Congress 2014, Engaging the Challenges, Enhancing the Relevance, Kuala Lumpur, Malaysia.

Henriques, M. J., Roque, D., Santos, A. (2016). Monitorização de quebra-mares com veículos aéreos não tripulados. I Seminário Internacional UAV, Lisboa, 3-4 março, 2016.

Hofmann-wellenhof, B.; Lichtenegger, H. & Collins, J. (2001). *Global Positioning System. Theory and practice*. Book, 5th edition, Springer. DOI:10.1007/978-3-7091-6199-9.

Huang, H. F., Yi, W., Lu, S. Q., Yi, Q. L. and Zhang, G. D. (2016). Use of Monitoring Data to Interpret Active Landslide Movements and Hydrological Triggers in Three Gorges Reservoir. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 30, no. 1, p. C4014005.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., abella'n, T., Derron, M., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural hazards*, 61, 5-28.

Jaboyedoff, M., Abellán, A., Carrea, D., Derron, M.H., Matasci, B. and Michoud, C. (2018) "17 Mapping and Monitoring of Landslides Using LIDAR." In *Natural Hazards: Earthquakes, Volcanoes, and Landslides*, 397–420. CRC Press Taylor & Francis Group.

Jaud, M., Passot, S., Allemand, P., Le Dantec, N., Grandjean, P., Delacourt, C. (2018). Suggestions to Limit Geometric Distortions in the Reconstruction of Linear Coastal Landforms by SfM Photogrammetry with PhotoScan® and MicMac® for UAV Surveys with Restricted GCPs Pattern. *Drones*, 3, doi: 10.3390/drones3010002.

Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S. *et al.* (2019). UAV survey of a coastal cliff face – Selection of the best imaging angle. *Measurement - Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO)*, Elsevier, 139, pp.10-20.

Kemeny, J. & Turner, K. (2008). Ground-Based LiDAR - Rock slope mapping and assessment. International Association for Engineering Geology and Environment.

Kersten, T.P., Lindstaedt, M., Mechelke, K. (2020). Coastal cliff monitoring using UAS photogrammetry and TLS. Journal of Applied Hydrography. HN 116. DOI: 10.23784/HN116-02.

Letortu, P., Jaud, M., Grandjean, P., Ammann, J., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Le Dantec, N., Delacourt, C. (2018). Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale, GIScience & Remote Sensing, 55:4, 457-476, DOI: 10.1080/15481603.2017.1408931.

Lim, M., Petley, D. N., Rosser, N. J., Allison, R. J., & Long, A. J. (2005). Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution. The Photogrammetric Record 20 (110), pp. 109-129.

Lucarelli, A., Brandolini, P., Corradi, N., De Laurentiis, L., Federici, B., Ferrando, I., Lanzone, A., Sguerso, D. (2019). Potentialities of integrated 3D surveys applied to maritime infrastructures and to the study of morphological/sedimentary dynamics of the seabed. IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea. Genoa, Italy, October 3-5, 2019.

Maps Made Easy website. <https://www.mapsmadeeasy.com/>. Acessado em 23 de janeiro de 2020.

Mlambo, R., Woodhouse, I. H., Gerard, F., Anderson, K. (2017). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry with Drone Data: A Low Cost Method for Monitoring Greenhouse Gas Emissions from Forests in Developing Countries. Forests, 8, 68; doi:10.3390/f8030068

NOAA. What is LIDAR? National Ocean Service website, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>, 25/06/18.

Pepe, A. and Calò, F. (2017). A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. Applied Sciences, 7, 1264; doi:10.3390/app7121264.

Pinto, J. (2000). Potencialidade do uso do GPS em obras de Engenharia. FAPEPE, São Paulo.

Pix4D. Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? Pix4D blog community. <https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison>, 14/07/2020.

Rodrigues, D. N. (2013). Estudo da manutenção e reabilitação de infraestruturas portuárias. Projeto de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ciências do Mar. Universidade Cabo Verde.

Rowe, E., Hutchinson, D. J., Kromer, R. A. (2017). An Analysis of Failure Mechanism Constraints on Pre-Failure Rock Block Deformation using TLS and Roto-Translation Methods. Railway Ground Hazard Research Program.

Rupnik, E., Daakir, M., Deseilligny, M. P. (2017). MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2:14. DOI 10.1186/s40965-017-0027-2.

Santos-Ferreira, A. (2015). Observação e comportamento de molhes. II Seminário de Geotecnia Portuária. 23 de novembro de 2015.

Santos-Ferreira, A., Dias, E., Silva, P. F. da, Figueiredo, V. (2019). UAV for port assets monitoring – An example from Ericeira (Portugal). Submitted Abstract. PIANC-COPEDEC X 2020 Congress.

Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing*, 10, 1606; doi:10.3390/rs10101606.

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, 1252; doi:10.3390/rs11101252.

Sharma, J., Busler, J., Francioni, M. (2016). Monitoring Landslides along Pipeline Corridors Using A Combined Satellite-Based InSAR and Geomechanical Modelling Approach. *GeoVancouver*. Conference paper.

Silva, A. P. F., Santos-Ferreira, A., Dias, E., Santos, C. (2014). Rochas de baixa resistência na Ericeira e a instabilização de arribas naturais portuárias. *Comunicações Geológicas*, 101, Especial III, pp. 1165-1168.

Silveira, G. C. (2008). Influência da Geometria dos Satélites na Precisão das Coordenadas Geodésicas Obtidas com o Sistema GPS. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Sydney Ports Corporation (2002). Draft final report on geotechnical assessment - proposed third terminal Port Botany. Volume 1. Project 35224.

Tahar, K. N. & Kamarudin, S.S. (2016). UAV onboard GPS in positioning determination. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 2016. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.

Tung, W. Y., Nagendran, S. K., and Ismail, M. A. M. (2018). 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare. IGRSM 2018. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 169 (2018) 012051. Doi :10.1088/1755-1315/169/1/012051.

Vacca, G., Furfaro, G., Dessì, A. (2018). The use of the uav images for the building 3d model generation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W8, FOSS4G 2018 – Academic Track, 29–31 August 2018, Dar es Salaam, Tanzania.

Wingtra. What's the difference between PPK and RTK drones, and which one is better? Wingtra website. <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones/>, 14/07/2020.

Wolf, R. E., Bouali, E. H., Oommen., T., Dobson, R. J., Vitton, S., Brooks, C., Lautala, P. (2015). Final Report: Sustainable Geotechnical Asset Management along the Transportation Infrastructure Environment Using Remote Sensing. Michigan Technological University. Technical Report. United States, Department of Transportation.

Zebker, H.A. and Villasenor, J. (1992). Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30, 950-959. <http://dx.doi.org/10.1109/36.175330>

Zekkos, D., Greenwood, W., Manousakis, J., Athanasopoulos-Zekkos, A., Clark, M., Cook, K.L. and Saroglou, C. (2018). Lessons Learned from The Application of UAV-Enabled Structure-From-Motion Photogrammetry in Geotechnical Engineering. International Journal of Geoenvironment Case Histories, Vol.4, Issue 4, p.254-274. doi:10.4417/IJGCH-04-04-03.