

**Otimização de métodos de auscultação de
pavimentos rodoviários com recurso à
geomática e veículos aéreos não tripulados
(VANT)**

Dayane Oliveira Nery

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(mestrado integrado)

Orientador: Prof. Doutora Bertha Maria Batista dos Santos
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida

setembro de 2023

Folha em branco

Declaração de Integridade

Eu, Dayane Oliveira Nery, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 36970 de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 25 /09 /2023

(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)

A handwritten signature in black ink that reads "Dayane Oliveira Nery". The signature is written in a cursive, flowing style.

Folha em branco

Agradecimentos

A realização dessa dissertação foi possível graças ao auxílio de diversas pessoas às quais gostaria de prestar meus sinceros agradecimentos.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura e à Universidade da Beira Interior por sempre fornecerem os recursos necessários para que fosse possível a conclusão deste curso.

Aos meus orientadores, Professora Doutora Bertha Maria Batista dos Santos e Professor Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida, que sempre estiveram disponíveis para auxiliar e transmitir os conhecimentos necessários para a realização deste trabalho.

À Câmara Municipal do Fundão, por ter apoiado a realização do levantamento de dados, os quais foram fundamentais para a realização deste estudo.

Aos meus pais, irmão e irmã, que sempre me apoiaram e inspiraram e que, independente da distância, sempre estiveram do meu lado me dando forças para que eu fosse capaz de seguir em frente.

E por fim, agradeço aos meus colegas de curso que estiveram comigo nessa etapa, cooperando nos estudos, trabalhos e confraternizações, e à todos os meus professores que disponibilizaram seu tempo e conhecimento para a formação neste curso.

Folha em branco

Resumo

Os pavimentos rodoviários estão continuamente sujeitos às cargas do tráfego e às condições climáticas. Estas ações causam o aparecimento de degradações que resultam na diminuição da sua qualidade funcional e estrutural. Sendo uma componente fundamental das infraestruturas de transporte, é de extrema importância garantir o seu bom estado de forma a assegurar condições adequadas de circulação e a segurança de utentes, bens e veículos. Para efetuar o diagnóstico do estado do pavimento, são realizadas inspeções à sua superfície que visam determinar o grau de degradação em que se encontram e a necessidade de serem reparados ou reconstruídos. O presente trabalho visa verificar a adequação da utilização da geomática e de veículos aéreos não tripulados (VANT) como uma opção tecnológica inovadora para a realização de operações de auscultação de pavimentos rodoviários que permitam obter os dados necessários para aferir o estado dos pavimentos.

Para se ter um conhecimento mais abrangente da tecnologia VANT, o trabalho apresenta um estudo detalhado sobre as suas características e os vários tipos de VANT disponíveis no mercado, assim como dos equipamentos acoplados ao veículo que auxiliam no levantamento de dados e dos requisitos que devem ser cumpridos para que esta tecnologia se estabeleça como uma técnica de auscultação de pavimentos rodoviários. Os requisitos apresentados, selecionados com base numa análise da bibliografia da especialidade, visam garantir níveis de precisão elevados para os modelos 3D derivados, o que resulta numa identificação e medição adequada das degradações superficiais dos pavimentos.

Para verificação da técnica proposta foram estudados um conjunto de dados levantados em uma inspeção realizada com recurso a VANT, relativos a um trecho de pavimento rodoviário. Foram analisados os dados recolhidos a duas alturas de voos diferentes: 3m e 20m. Para determinar o estado do pavimento da secção estudada foram utilizados modelos 3D do pavimento, o que permitiu identificar e medir as degradações superficiais no software Agisoft Viewer e calcular os índices globais de qualidade do pavimento 'Present Serviceability Index' (PSI) e 'Pavement Condition Index' (PCI). Com o objetivo de determinar a melhor altura de voo para a realização das operações de auscultação dos pavimentos com recurso a VANT, os valores obtidos nas medições das degradações e os resultados alcançados na determinação dos índices de qualidade, para as duas alturas de voo, foram comparados.

Os valores finais dos índices encontrados para as duas alturas de voo apresentaram diferenças pouco significativas, apesar da realização de voos a uma altura de 3m proporcionar imagens com melhor grau de precisão e detalhe das degradações para os diferentes graus de gravidade. O modelo construído com as imagens captadas a 20m se mostrou igualmente competente na determinação do estado do pavimento, no entanto, a comparação das degradações identificadas e quantidades medidas revela um desempenho menos eficiente para as degradações de nível de gravidade baixo. Deste modo, é possível concluir que a realização de inspeções com recurso a VANT, efetuadas para uma altura de voo de 20m, é adequada para a caracterização do estado do pavimento. De entre as vantagens da realização de voo a uma altura de 20m destacam-se a possibilidade de efetuar voos de forma automática, a redução do tempo de inspeção e a dimensão da área abrangida.

Palavras-chave

Veículos aéreos não tripulados (VANT); inspeção de pavimentos rodoviários; degradações superficiais; geomática; modelo 3D.

Folha em branco

Abstract

Road pavements are continuously exposed to traffic loads and weather. These actions lead to the emergence of distresses that results in a decreased functional and structural condition. As a fundamental component of transportation infrastructure, it is of utmost importance to ensure its good state to guarantee suitable conditions for circulation and the safety of users, goods, and vehicles. To diagnose the pavement's condition, surface inspections are carried out to determine the degree of damage and the need for repair or reconstruction. This study aims to verify the suitability of using geomatics and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as an innovative technological option for conducting road pavement inspections in order to obtain the necessary data to assess pavement conditions.

To gain a broader understanding of UAV technology, this study presents a detailed examination of UAV characteristics and types available in the market. The types of equipment attached to the vehicle, used to assist in data collection, and the requirements that must be met when it is used for road pavement inspection are also presented. The requirements, selected after a review of specialized literature, aims to ensure high levels of accuracy for derived 3D models, resulting in proper identification and measurement of surface pavement's distresses.

To verify the proposed technique, a set of data collected on a section of road pavement using UAVs was analysed. The data was collected at two different flight heights, 3m and 20m, and used to create 3D pavement models to identify and measure surface pavement's distresses using Agisoft processing and viewer software. This information was then employed to determine the global pavement condition indexes 'Present Serviceability Index' (PSI) and 'Pavement Condition Index' (PCI). To determine the optimal flight height for road pavement inspection using UAVs, the values of pavement's distress measurements and condition indexes, for both flight heights, were compared.

The final values of the condition indexes found for the two flight heights showed minor differences, even though 3m flights provided images with better accuracy and detail of distresses for different severity levels. The model created with images captured at 20m also proved to be equally competent in determining the pavement's condition. However, the comparison of identified distresses and measured quantities revealed to be less efficient for low-severity pavement distresses. Therefore, it can be concluded that conducting inspections at 20m height using UAVs is suitable for characterizing the pavement's condition. Among the advantages of conducting flights at 20m height are the possibility of performing automated flights, reduced inspection time and larger coverage areas.

Keywords

Unmanned aerial vehicles (UAV); road pavement inspection; surface distresses; geomatics; 3D model.

Folha em branco

Índice

1. Introdução	25
1.2 Enquadramento e justificação do tema	25
1.3 Objetivos	25
1.4 Estrutura da dissertação	26
2. Técnicas de recolha e análise de dados sobre o estado dos pavimentos	28
2.1 Enquadramento	28
2.1.1 Famílias de degradações	29
2.1.2 Índices de determinação da qualidade do pavimento	31
2.2 Técnicas de inspeção de dados sobre o estado dos pavimentos	36
2.2.1 Inspeção visual a pé	36
2.2.2 Inspeção visual com recurso a veículos terrestres multifuncionais	38
2.2.3 Inspeção visual com recurso a Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)	44
2.3 Técnicas de análise de dados sobre o estado dos pavimentos com recurso à geomática	46
2.3.1 Fotogrametria e fotorestituição	46
2.3.2 <i>Structure from Motion</i> (SfM)	47
2.3.3 <i>You Only Look Once</i> (YOLO)	47
2.3.4 <i>Convolution Neural Networks</i> (CNN)	48
2.3.5 Pix4Dmapper	48
2.3.6 Agisoft Metashape	48
3. Veículos Aéreos Não tripulados	49
3.1 Definição e utilização	49
3.1.1 Definições	49
3.1.2 Utilização	50
3.2 Tipos de VANT	51
3.2.1 Câmaras e sensores	56
3.3 Normas e regulamentos aplicáveis à operação de VANT	60
3.3.1 <i>European Union Aviation Safety Agency</i> (EASA)	60
3.3.2 <i>International Civil Aviation Organization</i> (ICAO)	61
3.3.3 Regulamentação Portuguesa Autoria Nacional de Aviação Civil (ANAC)	61
3.3.4 <i>Federal Aviation Administration</i> (FAA)	62
3.3.5 Principais tópicos a se considerar na operação SISVANT	63
4. Condições e fatores a considerar na aquisição e tratamento de imagens da superfície do pavimento com recurso a VANT	67
5. Caso de Estudo	75
5.1 Enquadramento	75
5.2 Critérios de identificação e medição das degradações	76
5.3 Determinação do estado do pavimento	83
5.3.1 Determinação do <i>Present Serviceability Index</i> (PSI)	83
5.3.1.1 Cálculo do PSI para as alturas 3m e 20m com áreas medidas no modelo 3D	84
5.3.1.2 Cálculos do PSI para as alturas 3m e 20m com áreas definidas pela medição do comprimento no modelo 3D e indicações da tabela 5.1	86
5.3.2 Determinação do <i>Pavement Condition Index</i> (PCI)	88
5.3.2.1 Determinação do PCI a partir das medições efetuadas no modelo 3D – 3m	89
5.3.2.2 Determinação do PCI a partir das medições efetuadas no modelo 3D – 20m	96
5.4 Análise e discussão de resultados	103

6. Conclusões	107
7. Referências Bibliográficas	110
8. Anexos	113

Folha em branco

Lista de Figuras

Figura 2. 1 Folha de dados de pesquisa de condição de pavimento flexível para unidade de amostra (ASTM D643 - 18, 2018).	37
Figura 2. 2 Folha de dados de pesquisa da condição do pavimento rígido para unidade de amostra (ASTM D643 - 18, 2018).	37
Figura 2. 3 Equipamento VIZIROAD com GPS associado (Horta et. al., 2013, cit. by Feitosa, 2020)	39
Figura 2. 4 Laser Crack Measurement System - LCMS (Fonte: https://romdas.com/romdas-lcms.html)	39
Figura 2. 5 Representação do sistema PASCO ROADRECON (Fonte: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1311/1311-025.pdf)	40
Figura 2. 6 GERPHO e pormenor do equipamento fotográfico (M. Santos, 2009).	40
Figura 2. 7 Esquema do Equipamento GERPHO (Alves, 2007).....	40
Figura 2. 8 Equipamento do sistema CALAO (Maganinho, 2013).	41
Figura 2. 9 Laser Road Surface Tester - LRST (Fonte: https://www.vti.se/en/services/highway-engineering-and-geotechnics/on-road-measurement/measurement-of-road-surface)	42
Figura 2. 10 Automated Road Analyzer - ARAN (Fonte: https://www.researchgate.net/publication/242130861_Correlation_of_Surface_Texture_Segregation_and_Measurement_of_Air_Voids/figures?lo=1)	42
Figura 2. 11 Sistema ROMDAS (Feitosa, 2020 adaptado de ROMDAS, 2016).....	43
Figura 2. 12 Sensor LiDAR (Fonte: https://mundoconectado.com.br/artigos/v/15382/sensores-lidar-entenda-o-que-sao-e-como-funcionam).....	43
Figura 2. 13 Hexacopter Bergen, usado para coletar dados ópticos, térmicos e LiDAR para avaliar a condição de pontes, rodovias e outros ativos de transporte (Brooks et al., 2014).....	44
Figura 2. 14 Esquema de um veículo aéreo não tripulado (Fonte: https://www.silvestrepe.com/single-post/2018/04/19/o-uso-de-drones-nos-estudos-de-fauna-silvestre)	45
Figura 2. 15 Tecnologia LiDAR em VANT (Fonte: https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/).....	45
Figura 2. 16 Fotogrametria em VANT (Fonte: https://www.geosensori.com.br/2019/07/17/os-segredos-e-revelacoes-da-fotogrametria/)	47
Figura 3. 1 Veículos aéreos não tripulados de grande e médio porte: (a) Ikhana da NASA; (b) SIERRA da NASA; (c) Pathfinder-Plus da NASA. (Pádua et. al., 2017).....	51
Figura 3. 2 Classificação de VANT (Shakhatreh, et. al., 2019).	52
Figura 3. 3 Dirigível sendo lançado para um voo de teste (Brooks et. al., 2014).....	53
Figura 3. 4 Exemplos de VANT de asa fixa: a) QuestUAV Q-Pod; (b) SenseFlyeBee; (c) Trimble UX5; (d) MAVinci Sirius Pro; e (e) PrecisionHawk Lancaster. (Pádua et. al., 2017).....	53
Figura 3. 5 Exemplos de VANT de asas rotativas: (a) Topcon Falcon 8; (b) DJI Phantom 4; c) 3DR SOLO Quadcopter; (d) SenseFly eXom; and (e) Yuneec Typhoon (Pádua et. al., 2017).	54
Figura 3. 6 À esquerda DJI Frame Hexacopter (Fonte: https://uavsystemsinternational.com/products/dji-s900-frame-hexacopter); à direita Aurelia X6 Pro V2 (Fonte: https://uavsystemsinternational.com/products/aurelia-x6-pro-v1)	54
Figura 3. 7 Phantom 4 Pro V2 (Fonte: https://www.dji.com/pt/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=eol_phantom-4-pro).	55

Figura 3. 8 DJI MAVic Air 2 (Fonte: https://www.worten.pt/produtos/drone-dji-mavic-air-2-4k-autonomia-ate-34-min-cinzeno-7159602).	55
Figura 3. 9 Da esquerda para a direita: Micro Drone Propel Atom 1.0 Titânio (Fonte: https://simracingtech.com/produto/micro-drone-propel-atom-1-0-titanio/); Micro Drone LDARC Tiny GT7 (Fonte: https://www.olx.pt/d/anuncio/micro-drone-ldarc-tiny-gt7-indoor-e-outdoor-	56
Figura 3. 10 Exemplo de câmeras RGB utilizadas em VANT: a) Sony Nex A6000; b) GoPro Hero Series; c) PhaseOne IQ3; d) Cannon G9X; e) FujiFilm FinePix JX580; f) Nikon D800 (Martins Neto, 2019; Breunig, 2019).	57
Figura 3. 11 Exemplos de câmeras termais utilizadas em VANT: a) Photon 320; b) IRMOD V640; c) FLIR Vue; d) Workswell WIRIS (Martins Neto, 2019; Breunig, 2019).	57
Figura 3. 12 Exemplos de câmeras multiespectrais utilizadas em VANT: a) Tetracam MCAW; b) Santera Quad; c) MicaSense Red-edge; d) Parrot SEQUOIA; e) Tetracam Mini MCA-12; f) MAIA WV (Martins Neto, 2019; Breunig, 2019).....	58
Figura 3. 13 Exemplos de câmeras hiperespectrais usadas em VANT: (a) Headwall Photonics Micro-Hyperspec; (b) Rikola Hyperspectral camera; (c) Surface Optics Corp. SOC710-GX (Pádua et. al., 2017).	58
Figura 3. 14 Exemplos de sensores LiDAR utilizados em VANT: (a) Routescene lidar Pod; (b) Yellowscan Mapper; (c) Velodyne PUCK (Pádua et. al., 2017).	59
Figura 3. 15 Exemplo de uma Nikon D800 montada na parte inferior de um VANT de rotor único Bergen Tazer 800 (Brooks et. al., 2014).	59
Figura 3. 16 Quadricóptero Crazyflie Nano com uma câmara de chaveiro montada na parte superior (Brooks et. al., 2014).	59
Figura 5. 1. Imagem da secção da estrada N18 - trecho estudado. Fonte: Google Earth	75
Figura 5. 2. Operação de levantamento com o VANT no trecho estudado.....	75
Figura 5. 3. a) Modelo 3D construído no Agisoft Viewer a partir das imagens captadas a 3m de altura. b) Pormenor do modelo 3D (3m)	76
Figura 5. 4. a) Modelo 3D construído no Agisoft a partir das imagens captadas a 20m de altura. b) Pormenor do modelo 3D (20m).....	76
Figura 5. 5. Exemplo de camada criada no Agisoft Viewer para registo dos perfis transversais	80
Figura 5. 6. Exemplos de medição do cavado de rodeira pelos métodos "straight edge" e "taut wire".....	82

Folha em branco

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 Índice de Condição do Pavimento (PCI), Escala de classificação e cores sugeridas (ASTM D643 - 18, 2018).....	32
Tabela 2. 2 Todos os passos a considerar quando existem três diferentes graus de gravidade (ASTM D643 - 18, 2018).	33
Tabela 2. 3 Avaliação da qualidade dos pavimentos através do índice PSI (Paterson, 1987, cit. por Branco et. al., 2008)	34
Tabela 2. 4 Previsão do PCI para várias classificações funcionais de estradas (adaptado de Ahin et. al., cit. buy Karballaezadeh).	35
Tabela 2. 5 Previsão do PCI para vários tipos de pavimento (adaptado de Ahin et. al., cit. buy Karballaezadeh).....	35
Tabela 3. 1 Definição de normas a ter em conta para operar o SISVANT - Parte 1.....	64
Tabela 3. 2 Definição de normas a ter em conta para operar o SISVANT - Parte 2.....	65
Tabela 4. 1. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Informação geral	68
Tabela 4. 2. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Informação sobre o uso de VANT	69
Tabela 4. 3. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Processamento de imagens e conclusões principais – Parte 1.....	70
Tabela 4. 4. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Processamento de imagens e conclusões principais – Parte 2.	71
Tabela 4. 5. Requisitos a ter em conta na inspeção de pavimentos com recurso a VANT.	73
Tabela 5. 1. Degradações, níveis de gravidade e valores a adotar no cálculo do PSI (M. Santos, 2009)	77
Tabela 5. 2. Degradações, níveis de gravidade e modo de medição a adotar no cálculo do PCI (ASTM D6433 - 18, 2018) – Parte 1.....	78
Tabela 5. 3. Degradações, níveis de gravidade e modo de medição a adotar no cálculo do PCI (ASTM D6433 - 18, 2018) – Parte 2	79
Tabela 5. 4. Comparação de medições reais com medições efetuadas no Agisoft.....	81
Tabela 5. 5. Áreas degradadas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 3m de altura.....	84
Tabela 5. 6. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 3m de altura.	84
Tabela 5. 7. Áreas degradadas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 20m de altura.	85
Tabela 5. 8. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 20m de altura.....	85
Tabela 5. 9. Áreas degradadas definidas pela medição do comprimento no AGisoft Viewer em imagens captadas 3m de altura.	86
Tabela 5. 10. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas determinadas pela medição do comprimento no Agisoft Viewer em imagens captadas a 3m de altura.	86
Tabela 5. 11. Áreas degradadas definidas pela medição do comprimento no AGisoft Viewer em imagens captadas 20m de altura.	87
Tabela 5. 12. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas determinadas pela medição do comprimento no Agisoft Viewer em imagens captadas a 20m de altura.	87
Tabela 5. 13. Valores obtidos no cálculo do PSI.	88
Tabela 5. 14. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, m, h).....	89
Tabela 5. 15. Determinação do CDV - PCI (l, m, h).	89
Tabela 5. 16. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (1M + 1H).	90
Tabela 5. 17. Determinação do CDV - PCI (1M + 1H).....	90
Tabela 5. 18. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (10M + 10H).....	91

Tabela 5. 19. Determinação do CDV - PCI (10M + 10H).....	91
Tabela 5. 20. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, M, h).	92
Tabela 5. 21. Determinação do CDV - PCI (o, M, h).	92
Tabela 5. 22. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, o, H).....	93
Tabela 5. 23. Determinação do CDV - PCI (l, o, H).	93
Tabela 5. 24. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, m, H).....	94
Tabela 5. 25. Determinação do CDV - PCI (o, m, H).	94
Tabela 5. 26. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, o, H).....	95
Tabela 5. 27. Determinação do CDV - PCI (o, o, H).	95
Tabela 5. 28. Resumo dos valores obtidos do cálculo do PCI no modelo 3D – 3m.....	96
Tabela 5. 29. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, m, h).....	96
Tabela 5. 30. Determinação do CDV - PCI (l, m, h).	97
Tabela 5. 31. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (1M + 1H).....	97
Tabela 5. 32. Determinação do CDV - PCI (1M + 1H).....	98
Tabela 5. 33. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (10M + 10H).....	98
Tabela 5. 34. Determinação do CDV - PCI (10M + 10H).	99
Tabela 5. 35. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, M, h).....	99
Tabela 5. 36. Determinação do CDV - PCI (o, M, h).....	100
Tabela 5. 37. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, o, H).	100
Tabela 5. 38. Determinação do CDV - PCI (l, o, H).	101
Tabela 5. 39. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, m, H).....	101
Tabela 5. 40. Determinação do CDV - PCI (o, m, H).	102
Tabela 5. 41. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, o, H).	102
Tabela 5. 42. Determinação do CDV - PCI (o, o, H).	102
Tabela 5. 43. Resumo dos valores obtidos do cálculo do PCI no modelo 3D – 2m.....	103
Tabela 5. 44. Comparação das medições e do índice PSI calculado a partir dos modelos 3D – 3m e 3D – 20m, a partir das áreas medidas nos modelos 3D.....	103
Tabela 5. 45. Comparação das medições e do índice PSI calculado a partir dos modelos 3D – 3m e 3D – 20m, para as áreas calculadas a partir da medição dos comprimentos e das indicações da tabela 1.....	104
Tabela 5. 46. Comparação das medições e do índice PCI a partir dos modelos 3D – 3m e 3D – 20m	105

Folha em branco

Lista de Acrónimos

AAN	Autoridade Aeronáutica Nacional
AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ANAC	Autoridade Nacional de Aviação Civil
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
APR	Aeronave Pilotada Remotamente
ARAN	<i>Automated Road Analyzer</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
BVLOS	<i>Beyond visual line of sight operation</i> (Operação para além da linha de vista)
CAA	<i>Civil Aviation Authority</i>
CCDs	<i>Charge-coupled devices</i>
CDV	<i>Corrected Deduct Value</i> (Valor de Dedução Correto)
CNN	<i>Convolution Neural Networks</i>
DSLR	<i>Digital Single Lens Reflex</i>
DSM	<i>Digital Surface Model</i>
DV	<i>Deduct Value</i> (Valor de Dedução)
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FPN	<i>Feature Pyramid Network</i>
FPS	<i>Frames per Second</i>
GCPs	<i>Ground Control Points</i>
GERPHO	<i>Groupe d'Examen Routier par PHOtographie</i>
GPPs	<i>Ground Control Ponits</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
HDV	<i>Highest Individual Deduct Value</i> (Maior Valor de Dedução Individual)
HRDMI	<i>High Resolution Odometer</i> (Hodómetro de Alta Resolução)
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>
InSAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
KNN	<i>K-Nearest Neighbours</i>
LCMS	<i>Laser Crack Measurement System</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LRST	<i>Laser Road Surface</i>
LUC	<i>Light UAS operator Certificate</i>
MCA	<i>Micro-Miniature Multiple Camera Array System</i>
MTOM	<i>Maximum take-off mass</i> (Massa máxima à decolagem)
MVS	<i>Multi-View Stereo</i>
NAA	<i>National Aviation Authorities</i>
NAS	<i>National Aispace System</i>
NIR	<i>Near-Infrared</i>
PAA	Plataforma de Alta Altitude
PANet	<i>Prototype Alignment Network</i>
PBA	Plataforma de Baixa Altitude
PCI	<i>Pavement Condition Index</i>
PSI	<i>Present Serviceability Index</i>
QE	Entidade Qualificada
RF	<i>Random Forest</i>
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
ROC	<i>Remote Operator Certification</i>
ROMDAS	<i>Road Measurement Data Acquisition System</i>

SCP	<i>Semi-Automatic Classification Plugin</i>
<i>SfM</i>	<i>Structure from Motion</i>
SGI	<i>Special Governmental Interest</i>
SGP	Sistema de Gestão de Pavimentos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SISAPR	Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente
SISVANT	Sistema de Veículo Aéreo não Tripulado
SLAM	<i>Simulation Localization and Mapping</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
TIR	<i>Thermal Imaging Radar</i>
TPL	<i>Transverse Profile Logger</i> (Registrador de Perfil Transversal)
UE	União Europeia
US-LTPP	<i>Long-Term Pavemente Performance</i>
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado
VLOS	<i>Visual line of sight operation</i> (Operação em linha de vista)
YOLO	<i>You Only Look Once</i>

Folha em branco

1. Introdução

1.1. Enquadramento e justificação do tema

Os pavimentos rodoviários deterioram-se ao longo do tempo devido às solicitações a que estão expostos, nomeadamente às cargas do tráfego e às condições ambientais de temperatura e de água. Para garantir a segurança dos usuários e dos veículos é necessário oferecer boas condições de circulação. Um dos principais fatores que contribui significativamente para este propósito é a adoção de estratégias adequadas de preservação dos pavimentos. Para dar suporte à definição destas estratégias, são realizados levantamentos de dados com o intuito de determinar o estado do pavimento e a necessidade de realizar reparações ou mesmo de refazer o pavimento.

As técnicas tradicionais de inspeção de pavimentos, a inspeção visual a pé e a inspeção visual com recurso a veículos terrestres multifuncionais, são as mais utilizadas atualmente. Uma das principais desvantagens apontadas à inspeção visual realizada a pé é o grau de subjetividade associado ao julgamento dos inspetores, que pode variar de acordo com cada observador. Requerem ainda um tempo elevado de recolha e tratamento de dados. A utilização de veículos terrestres multifuncionais equipados com tecnologia de recolha e extração de informação melhora os níveis de eficiência e de objetividade do levantamento. No entanto, o veículo pode afetar as condições de circulação do fluxo de tráfego no local da inspeção e podem ser necessárias várias viagens para a realização da inspeção total da superfície do pavimento.

O avanço tecnológico das técnicas de inspeção de infraestruturas vem modificando e aprimorando a forma de trabalho com o intuito de facilitar este tipo de operações e melhorar o nível de desempenho. Uma tecnologia que vem ganhando espaço neste âmbito, nos últimos anos, são os veículos aéreos não tripulados (VANT). Os VANT têm vindo a ser utilizados em operações de inspeção em diversas áreas, sendo uma opção favorável devido ao rápido desenvolvimento do hardware e software associado quando comparados com os veículos terrestres multifuncionais, assim como aos custos consideravelmente mais reduzidos de aquisição e operação do equipamento.

Existem vários tipos de VANT que podem ser equipados com câmeras e sensores de modo a ser possível a utilização da tecnologia em várias áreas. O VANT como técnica de inspeção é uma abordagem recente que possui poucos estudos sobre a sua aplicação efetiva, principalmente no que diz respeito a inspeção de pavimentos. Sendo assim, é importante estudar as melhores condições de uso desta tecnologia e os fatores a ter em conta para que seja possível tirar o maior benefício desta abordagem de forma a definir as melhores condições de voo e de operação para a inspeção de pavimentos.

1.2. Objetivos

Esse trabalho pretende apresentar a utilização de VANT como uma técnica alternativa de inspeção de pavimentos rodoviários, nomeadamente através da identificação das diversas condições e fatores a serem considerados na operação destes equipamentos para obtenção de dados representativos e fiáveis sobre o estado da superfície dos pavimentos. A definição de aspetos relacionados com o tipo de VANT a utilizar, as condições climáticas favoráveis para a realização dos voos, velocidade e alturas de voo para recolha de informação suficientemente detalhada sobre as degradações presentes na superfície dos pavimentos, condicionantes ligadas à autonomia de voo e à quantidade de pessoas necessárias para operações de inspeção, entre outras, serão abordadas para definir um conjunto de requisitos.

Estes requisitos permitem controlar vários aspetos de geomática, nomeadamente as relacionadas com a gestão adequada da aquisição e captura de dados, tratamento e modelagem, análise e exploração da informação, assim como da sua representação e disseminação. De forma objetiva, pretende-se que os requisitos (condições e fatores) a ter em conta na inspeção de pavimentos com recurso a VANT permitam construir modelos 3D com níveis elevados de precisão para medição adequada das degradações presentes na superfície de pavimentos. Estas medidas alimentarão as abordagens de avaliação da qualidade dos pavimentos, o que permitirá a definição de estratégias e planos de intervenção adequados.

Pretende-se ainda validar as condições e fatores recomendados com a análise de um caso de estudo.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos, apresentando o primeiro (Introdução) o enquadramento e a justificação do tema tratado, o objetivo do estudo e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo aborda as Técnicas de recolha e análise de dados sobre o estado dos pavimentos. O capítulo apresenta as principais famílias de degradações existente por tipo de pavimento (flexível, rígido e semirrígido) e os principais índices de avaliação global do estado do pavimento usados para avaliar a necessidade de intervenção. Em seguida o capítulo apresenta as principais técnicas de inspeção e de análise de dados sobre o estado dos pavimentos.

O terceiro capítulo (Veículos Aéreos não Tripulados (VANT)) apresenta uma análise detalhada sobre os veículos aéreos não tripulados (VANT), nomeadamente os principais conceitos associados a um sistema VANT, os tipos mais comuns de VANT e de câmaras e sensores que podem ser acoplados a esta tecnologia, assim como as vantagens e desvantagens da sua utilização como método para a inspeção de infraestruturas. Por fim são analisados as normas e regulamentos de âmbito nacional e internacional que definem os aspetos principais a se ter em conta na operação de VANT.

No quarto capítulo (Condições e fatores a considerar na aquisição de tratamento de imagens na superfície do pavimento com recurso a VANT) são analisados 15 artigos com foco na utilização da tecnologia VANT para auscultação de pavimentos rodoviários. Os principais aspetos analisados foram o local de estudo, o tipo de pavimento, o ambiente rodoviário, os tipos de degradações estudadas, o tipo de VANT utilizado, o tempo de voo, a altura de voo, as câmaras e sensores utilizados, o ângulo de captação de imagem e a taxa de sobreposição de imagem, o modelo de processamento de imagem utilizado, a precisão do modelo, a resolução da imagem e precisão das medições (variação com a medição real) e as principais conclusões. Em seguida, com base na análise feita foram identificados um conjunto de requisitos a ter em conta na inspeção de pavimentos com recurso a VANT.

No quinto capítulo é apresentado o Caso de estudo. Neste capítulo são analisados os dados levantados em um trecho de pavimento flexível com a utilização de um VANT. Com as imagens captadas foram construídos modelos 3D para as alturas de voo de 3 e 20m, nos quais foram identificadas as degradações presentes no pavimento (fendilhamento, pele de crocodilo, covas e reparações). Para verificar a precisão dos modelos, as medições efetuadas para caracterizar as degradações foram comparadas com as medidas reais e foram também comparadas as medições efetuadas nos modelos para duas alturas de voo consideradas. A informação obtida foi ainda usada para o

cálculo dos índices *Present Serviceability Index* (PSI) e *Pavement Condition Index* (PCI) de forma a aferir o estado do trecho de pavimento estudado.

As principais conclusões e limitações do trabalho desenvolvido, assim como propostas de trabalhos a serem realizados no futuro para aprimoramento da abordagem proposta, são apresentados no sexto capítulo (Conclusões).

2. Técnicas de recolha e análise de dados sobre o estado dos pavimentos

2.1. Enquadramento

As redes de transportes são um dos principais impulsionadores da viabilidade económica de um país. Elas permitem o movimento de pessoas, bens e serviços. Os pavimentos representam uma parte vital da rede viária, sendo imprescindível que sejam mantidos em condições adequadas para evitar acidentes e proporcionar um serviço eficiente aos usuários da via. As agências rodoviárias são incumbidas desta tarefa, tendo a responsabilidade de tomar decisões sustentadas sobre o desenvolvimento de estratégias de manutenção e reabilitação de estradas (Roberts et al., 2020).

Manter um nível de serviço estável para toda a rede rodoviária e avaliar um programa eficaz de manutenção e reabilitação de pavimento é um desafio para estas agências. Para alcançar estratégias de manutenção adequadas, um sistema de gestão de pavimentos (SGP) é comumente aplicado. O SGP é uma ferramenta de planeamento que auxilia os administradores da rede rodoviária no processo de tomada de decisão para manter os pavimentos da rede de forma eficiente, em tempo útil e a um custo reduzido, bem como a garantir o conforto e a segurança dos usuários (Ragnoli et al., 2018; Roberts et al., 2020).

Para garantir que os pavimentos das infraestruturas de transporte rodoviárias estejam em bom estado de utilização ou averiguar se é necessária à sua manutenção é preciso coletar dados sobre as condições das suas superfícies. Esses dados são obtidos por meio de levantamento do estado superficial do pavimento, fornecendo as informações necessárias para a avaliação da qualidade do pavimento. Em geral, as inspeções mais detalhadas coletam e avaliam quatro tipos de dados: dados de rugosidade, desgaste, capacidade de carga e resistência à derrapagem (Tan & Li, 2019).

Os dados coletados e produzidos são organizados e armazenados numa base de dados, que é a componente central do SGP que suporta a análise das informações sobre os pavimentos e o desenvolvimento do plano e programa de estratégia de manutenção, resultado nas saídas do sistema (Branco et al., 2008; DNIT, 2011; B. Santos et al., 2020).

Uma boa base de dados é essencial para determinar o estado do pavimento, permitindo definir as necessidades atuais e futuras de manutenção e reabilitação e a previsão dos efeitos das estratégias de intervenção na rede de pavimentos ao longo de sua vida útil. A eficiência de um sistema de gestão de pavimentos depende substancialmente da qualidade e quantidade de dados coletados sobre pavimentos (Feitosa et al., 2020).

Nos últimos anos foram implementadas diversas abordagens com o intuito de aprimorar as técnicas de levantamento visual de dados sobre o estado dos pavimentos tendo como objetivo superar os limites do levantamento manual, aumentar a precisão e a segurança operacional e melhorar a relação custo-benefício.

Para uma avaliação adequada do pavimento, em primeiro lugar é necessário recolher informação relativa às degradações que existem no pavimento, classificar por tipo, nível de gravidade e extensão. Na literatura existem diversos catálogos de identificação de degradações desenvolvidos por diferentes entidades, como o Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários, Estradas de Portugal, S.A.; a norma ASTM D6433-20; a norma DNIT 006/2003 – PRO (Avaliação objetiva da superfície de pavimentos

flexíveis e semirrígidos – Procedimentos); a norma DNIT 008/2003 – PRO (Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimentos). O objetivo principal destes documentos é fornecer um conjunto de critérios, da forma mais objetiva possível para avaliar o estado do pavimento.

2.1.1. Famílias de degradações

Segundo vários autores e entidades, as principais degradações e famílias de degradações presentes nos pavimentos rodoviários podem ser consideradas por tipo de pavimento (pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos e pavimentos semirrígidos) (Branco et al., 2008; EP - Estradas de Portugal, 2008; DNIT, 2011; Ragnoli et al., 2018).

As principais famílias de degradações encontradas nos pavimentos flexíveis são:

- Deformações

Esta família de degradação é subdividida em quatro tipos de degradações: o abatimento com extensão significativa, podendo apresentar-se ao longo do pavimento ou na direção transversal; a ondulação, deformação transversal que se repete com uma determinada frequência ao longo do pavimento; a deformação localizada, verificada em uma pequena área do pavimento, geralmente acompanhada de rotura do pavimento; e as rodeiras, que se desenvolvem com a passagem de pneus dos veículos, constituindo deformações e possuem duas configurações típicas, rodeiras de pequeno raio e rodeiras de grande raio.

- Fendilhamento

Esta família de degradação engloba um número elevado de tipos de degradações. As fendas podem ser isoladas ou ramificadas e são classificadas quanto a sua localização e origem em: fendas resultantes da fadiga do pavimento, fendas longitudinais (junto à berma ou junto ao eixo da estrada), fendas transversais e fendas parabólicas. O grupo mais importante do fendilhamento é a pele de crocodilo, que é resultado da evolução de fendas ramificadas, formando uma malha ou grelha, com fendas mais ou menos abertas. Existe também o fendilhamento com origem na superfície, que começa na superfície e progride em profundidade sem atingir a base das camadas betuminosas. Esta família de degradações é mais frequente em pavimentos flexíveis.

- Degradações da camada de desgaste

Esta família de degradações está relacionada com a perda de qualidade superficial da camada de desgaste, devido a evolução da própria camada, resultante da falta de estabilidade da ligação entre os materiais constituintes da mistura. Possui efeitos negativos ao nível do ruído e do desgaste dos pneus, apesar de beneficiar a capacidade drenante da superfície do pavimento. A degradação superficial é uma das degradações mais importantes desta família de degradações e é resultante do desprendimento dos agregados grossos. Nesta família de degradações encontram-se também as peladas (descamação), que corresponde ao desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste em relação à camada subjacente, e a formação de ninho ou covas, que correspondem a uma evolução natural da pele de crocodilo que conduz à degradação dos bordos das fendas.

- Movimento de Materiais

As degradações da família do movimento de materiais são resultantes da movimentação de materiais constituintes das camadas (betuminosas ou granulares) ou da fundação do pavimento. Esta família possui dois tipos de degradações, a “exsudação” e a “subida ou bombagem de finos”. A primeira acontece por causa da alteração da composição da camada de desgaste, devido à migração de um excesso de ligante para a superfície, com envolvimento de agregados grossos e redução da macrotextura. A segunda ocorre quando as camadas betuminosas fendilhadas possuem água retida no seu interior e no solo de fundação, e essa água é expulsa para a superfície através das fendas existentes devido a passagem de veículos que comprimem o pavimento.

As principais degradações encontradas nos pavimentos rígidos são:

- Fendilhamento das Lajes

Esse tipo de degradação pode acontecer devido à fadiga dos materiais quando sujeitos à repetição das tensões de tração provocadas pelas cargas dos veículos ao longo da vida do pavimento; devido à retração das lajes por ação da temperatura; devido ao encurvamento das lajes provocado pelo gradiente de temperatura entre as faces superior e inferior da laje de betão, conduzindo a esforços suplementares na laje, quer na face interior, quer na face superior, dependendo do período do dia considerado.

- Desagregação Superficial

Pode ocorrer ao longo das juntas pelo fato dessas serem demasiado estreitas ou possuírem uma selagem deficiente, permitindo a entrada e incrustação de agregados e o posterior esmagamento do betão por ação mecânica dos pneus; ou pode ocorrer em plena laje ao nível de superfície devido ao arranque de agregados ou ao desprendimento de placas (peladas), sendo causada pela ação de desgaste do tráfego e a utilização de materiais com qualidade deficiente.

- Escalonamento das Lajes

Ocorrência de deslocamentos verticais diferenciais e permanentes entre uma laje e outra adjacente, na região da junta. Este tipo de degradação ocorre quando, sob a ação repetida das cargas, a água acede à camada de sub-base e solo de fundação, devido a uma proteção insuficiente das juntas. Verifica-se essencialmente em situações anómalas como, por exemplo, quando a qualidade de construção é deficiente ou quando ocorre uma evolução anormal da fundação.

No que respeita aos pavimentos semirrígidos, as principais degradações são:

- Fendilhamento por Fadiga

Acontece devido à ação do tráfego combinada eventualmente com as ações de origem térmica. Se o pavimento semirrígido foi bem dimensionado, este tipo de degradação não deve ocorrer durante a maior parte da vida do pavimento.

- Fendilhamento por Retração

Este tipo de degradação é consequência intrínseca da evolução do material utilizado (material hidráulico), sendo função da composição da mistura, das características dos constituintes, com destaques para o ligante, e da qualidade de execução da camada.

- Degradação com perda de Coesão

A perda de coesão do material da “camada hidráulica” está associada a uma qualidade deficiente da “camada hidráulica” (deficiente teor em água ou sub-dosagem de ligante), a uma compactação incorreta ou a camadas inferiores muito deformáveis. Manifesta-se através da pele de crocodilo em malha estreita ao nível da camada de desgaste, acompanhada da subida de finos.

- Degradação de Interface

Essa degradação acontece quando se tem uma alteração das condições da interface da camada betuminosa de regularização com a “camada hidráulica”, que pode acontecer devido a uma rega de colagem deficiente, a compactidade e espessura insuficiente das camadas betuminosas, a permeabilidade excessiva da camada de desgaste, a falta de limpeza da interface, a ação dos movimentos da camada hidráulica de base, de origem térmica e/ou a ação do gelo na interface das camadas. Isso faz com que ocorra um aumento das tensões instaladas nas camadas betuminosas que contribuem para o aparecimento de fendas, pele de crocodilo e pelada.

2.1.2. Índices de determinação da qualidade do pavimento

A maioria dos SGP adotam índices que traduzem a qualidade do pavimento em termos de desempenho estrutural e operacional. Estes índices combinam as informações recolhidas sobre os diferentes tipos de degradações, expressas em termos de tipo, nível de gravidade (severidade) e extensão, para obter uma medida do estado do pavimento.

Existem vários métodos que permitem agregar a informação recolhida sobre as degradações dos pavimentos de forma a traduzir, num índice global, o seu estado atual. De entre os mais utilizados destacam-se o *Pavement Condition Index* (PCI) e o *Pavement Serviceability Index* (PSI).

O recurso a índice de avaliação global permite definir uma ordem de intervenção (priorização das intervenções), incluindo uma previsão do desempenho do pavimento e a análise econômica da sua manutenção.

➤ *Pavement Condition Index* (PCI)

O índice PCI fornece uma medida do pavimento e da condição operacional da superfície. O método é baseado no levantamento visual das degradações superficiais do pavimento, sendo o grau de deterioração uma função do tipo de degradação, do seu nível de gravidade e da quantidade ou densidade da degradação na unidade de amostra considerada. O método, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA foi adotado como procedimento padrão por muitas agências rodoviárias em todo o mundo e publicado na norma ASTM, tanto para pavimentos rodoviários como aeroportuários (ASTM D6433 - 18, 2018). Trata-se de um método que dá origem a resultados consistentes e precisos, desde que os dados de entrada apresentem uma precisão elevada. O PCI considera uma escala numérica, onde 100 representa as condições perfeitas e 0 representa falha estrutural do pavimento, como é possível ver na Tabela 2.1:

Tabela 2. 1 Índice de Condição do Pavimento (PCI), Escala de classificação e cores sugeridas (ASTM D643 - 18, 2018).

Escala de classificação do PCI	
Bom	85 - 100
Satisfatório	70 - 85
Razoável	55 - 70
Mau	40 - 55
Muito mau	25 - 40
Serriamente danificado	10 - 25
Falha estrutural	0 - 10

Para calcular o PCI é preciso identificar diferentes ramos do pavimento com diferentes usos e dividi-los em secções. Em seguida deve-se dividir as secções em unidades amostrais, cada amostra deve ser marcada ou identificada de forma a permitir que os inspetores e o pessoal de controle de qualidade as localizem facilmente na superfície do pavimento. O número de unidade de amostras selecionadas para serem inspecionadas pode variar desde todas as unidades de amostra na secção (o que não é recomendado devido a mão de obra, fundos e tempo disponível) ou um número de unidade de amostra que fornece nível de confiança de 95%. Para calcular o número mínimo de unidade de amostra (n) necessário para obter uma estimativa estatisticamente adequada do PCI da secção utiliza a seguinte equação:

$$n = \frac{N \times s^2}{\left(\left(\frac{e^2}{4}\right)(N - 1) + s^2\right)} \quad (1)$$

n – Arredonda para o próximo número inteiro mais alto.

e – Erro aceitável na estimativa do PCI; normalmente, e = ± 5 PCI pontos;

s – Desvio padrão do PCI de uma unidade de amostra para outra dentro da secção. Assume-se que, ao realizar a inspeção, o desvio padrão para pavimentos flexíveis é de 10 e o desvio padrão para pavimentos rígidos é de 15. Para as próximas inspeções, o desvio padrão da inspeção anterior deve ser usado para determinar n;

N – Número total de unidades de amostra na secção.

Para o cálculo do PCI em pavimentos flexíveis é necessário determinar a densidade de cada tipo de degradações por nível de gravidade. De acordo com o tipo de degradação é registada a informação relativo ao nº de ocorrências, comprimento, área ou profundidade. A densidade é obtida pela divisão da quantidade total de cada degradação pela área total de pavimento do trecho estudado, sendo expressa em percentagem.

O valor de dedução (DV) é determinado através das curvas de valor de dedução de degradação representados nas Figuras AIII1, AIII2, AIII3 e AIII4 do Anexo III. Após determinar todos os valores de deduções devem ser organizados em ordem decrescente e o maior dele será utilizado para o cálculo do HDV (maior valor de dedução individual), através da equação 2.

$$HDV = 1 + \left(\frac{9}{98}\right)(100 - DV_{m\acute{a}x}) = m \quad (2)$$

m – Maiores valores de dedução (DV).

Para determinar o CDV (valor de dedução correto) existem duas possibilidades: se nenhum ou apenas um DV for maior que 2, o valor total é usado no lugar do CDV; caso o contrário deve-se reduzir os n^{os} de valores de dedução aos m maiores valores, incluindo a parte fracionária. Se estiverem disponíveis menos de m valores de dedução, todos os valores serão usados.

Em seguida soma-se todos os valores de deduções e compara com os valores de q (número de valor deduzidos com valores maiores que 2) no ábaco da Figura AIII5 do Anexo III para encontrar o CDV. Deve-se iterar o cálculo até que o valor de q seja igual a 1.

O valor do PCI é determinado através da equação 3.

$$PCI = 100 - Máx CDV \quad (3)$$

Se houver apenas um grau de gravidade para cada degradação encontrada o cálculo termina assim, no entanto se existirem dois ou três níveis de gravidade para uma ou mais degradações é necessário refazer o procedimento tendo em atenção os seguintes aspetos:

- Se houver dois graus de gravidade na mesma degradação, define-se:

x1= menor nível de gravidade

x2= maior nível de gravidade

X2= x1+x2

Em seguida refaz os mesmos procedimentos de cálculos tendo em conta apenas o X2. O valor do PCI (x1, x2) deve ser maior quando comparado com PCI (o, X2) pois esse possui mais percentagem de degradações com maior de severidade. O PCI considerado no final deve ser o de maior valor.

- Se houver três graus de gravidade na mesma degradação, define-se:

L ou l = gravidade de nível baixo;

M ou m = gravidade de nível médio;

H ou h = gravidade de nível alto.

Tabela 2. 2 Todos os passos a considerar quando existem três diferentes graus de gravidade (ASTM D643 - 18, 2018).

	Degradações	Valores de PCI
Começar com:	l, m, h	→PCI (l, m, h)
Definir (l+m)=M	→o, M, h	→PCI (o, M, h)
Definir (m+h)=H	→l, o, H	→PCI (l, o, H)
Definir (l+h)=H	→o, m, H	→PCI (o, m, H)
Definir (l+m+h)=H	→o, o, H	→PCI (o, o, H)

O PCI a considerar deve ser baseado na combinação que fornece o maior valor.

➤ *Present Serviceability Index (PSI)*

O PSI é um parâmetro usado para descrever a qualidade funcional do pavimento em relação à qualidade de circulação. Estabelece uma estimativa da qualidade de serviço, pois além de conter as características da irregularidade longitudinal, inclui outras relativas ao estado do pavimento traduzido pelas degradações fendilhamento e pele de crocodilo, covas e peladas, rodeiras e reparações. O PSI foi resultado dos estudos realizados no ensaio rodoviário AASHO, tendo sido desenvolvidos dois modelos, um para pavimentos flexíveis e outro para pavimentos rígidos. Esse parâmetro avalia a qualidade do pavimento em uma escala de 0 a 5, que vai de muito mau até muito bom, como é representado na Tabela 2.3 (Branco et al., 2008).

Tabela 2. 3 Avaliação da qualidade dos pavimentos através do índice PSI (Paterson, 1987, cit. por Branco et. al., 2008)

PSI	Classificação
0 – 1	Muito mau
1 – 2	Mau
2 – 3	Regular
3 – 4	Bom
4 – 5	Muito bom

Branco et al., 2008 apresenta duas equações para o cálculo do PSI, para pavimentos flexíveis e para pavimentos rígidos.

Pavimentos flexíveis:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + \overline{SV}) - 1.38\overline{RD}^2 - 0.01\sqrt{C + P} \quad (4)$$

Pavimentos rígidos:

$$PSI = 5.41 - 1.78 \log(1 + \overline{SV}) - 1.38\overline{RD}^2 - 0.09\sqrt{C + P} \quad (5)$$

\overline{SV} – Média da variância da inclinação do perfil longitudinal, medido com o perfilómetro CHOLE, representa a irregularidade longitudinal, tendo cerca de 95% de contribuição para o cálculo;

\overline{RD} – Profundidade média (polegadas) das rodeiras;

P – Superfície com reparação localizada, expressa em 1/1000;

C – Superfície com pele de crocodilo ou com desagregação, expressa em 1/1000.

Apresenta-se ainda a expressão usada para avaliar a qualidade dos pavimentos da rede rodoviária de Lisboa (B. Santos, 2002).

$$PSI = 5 \times e^{-0.000259 \times \frac{1}{4} \times IRI} - 0,002139 \times \frac{1}{4} \times R^2 - 0,03 \times 7 \times (Ct + St + Pt)^{0.5} \quad (6)$$

IRI – Irregularidade longitudinal;

R – Rodeiras;

Ct – Área total degradada dos fendilhamentos e peles de crocodilo;

St – Área total degradada das covas e peladas;

Pt – Área total degradada das reparações.

- *Pavemente Condition Index (PCI)* em função do *International Roughness Index (IRI)*

O IRI foi desenvolvido pelo Banco Mundial em 1980 e é uma medida padronizada da regularização do pavimento que fornece uma classificação da qualidade de condução em termos de perfil longitudinal. Esse índice é obtido através de uma transformação matemática específica do perfil real levantado, tendo como base um modelo que constitui uma simulação de um veículo-tipo circulando a 80km/h. Com esse modelo, “calculam-se” os deslocamentos acumulados da suspensão simulada, divididos pela distância percorrida, exprimindo-se em m/km (Branco et al., 2008).

Karballaezadeh et al., 2020, analisou diversos estudos que trazem opções de cálculos para o PCI em função do IRI. Ahin et. al., cit. buy Karballaezadeh, apresentou um modelo de cálculo com base em dados coletados de 2009 a 2012 derivados do District Department of Transportation em áreas urbanas densas, representado na equação a seguir onde A e K são coeficientes constantes e ε é o erro do modelo.

$$PCI = A \times IRI + K + \varepsilon \quad (7)$$

Os coeficientes são calculados com base na classificação funcional da via e o tipo de pavimento apresentados nas Tabelas 2.4 e 2.5 a seguir:

Tabela 2. 4 Previsão do PCI para várias classificações funcionais de estradas (adaptado de Ahin et. al., cit. buy Karballaezadeh).

Modelo	Classificação Rodoviária
$PCI = -0.215 \times IRI + 110.73$	Autoestradas
$PCI = -0.206 \times IRI + 114.15$	Vias Coletoras
$PCI = -0.217 \times IRI + 115.32$	Vias Distribuidoras
$PCI = -0.186 \times IRI + 110.31$	Vias Locais

Tabela 2. 5 Previsão do PCI para vários tipos de pavimento (adaptado de Ahin et. al., cit. buy Karballaezadeh).

Modelo	Tipo de Pavimentos
$PCI = -0.224 \times IRI + 120.02$	Flexível
$PCI = -0.203 \times IRI + 113.73$	Semirrígido
$PCI = -0.172 \times IRI + 110.01$	Rígido

2.2. Técnicas de inspeção de dados sobre o estado dos pavimentos

As abordagens mais estudadas para a inspeção e análise de degradações superficiais em pavimentos são as técnicas que envolvem a inspeção visual direta, as que recorrem a sistemas baseados em laser e as que se baseiam de imagens através do uso de câmaras fotográficas/ vídeo instaladas em veículos terrestres ou aéreos.

O método de levantamento de dados mais simples é a inspeção visual a pé, avaliada por inspetores que transcrevem a informação de forma manual. Esta abordagem tradicional envolve custos elevados, é demorada e pode produzir resultados menos fiáveis e inconsistentes devido a subjetividade dos inspetores nas operações de identificação e avaliação das degradações. Além disso, expõe os inspetores às condições perigosas de trabalhos nas rodovias.

Existem vários equipamentos disponíveis no mercado que utilizam tecnologias baseadas em laser. Estes equipamentos são instalados em veículos com a finalidade de compreender o estado de conservação dos pavimentos das estradas. Os sistemas baseados em laser são geralmente considerados as técnicas mais precisas para deteção de degradações superficiais de pavimentos, mas também são geralmente mais caros e isso reduz a possibilidade de agências rodoviárias de dimensão menores serem capazes de utilizá-los. Existem também sistemas que incorporam a captação de imagens e o uso de lasers para produzir informações adicionais sobre a qualidade do pavimento (Roberts et al., 2020).

Uma nova tecnologia que surge como opção para a inspeção de pavimentos é a utilização de veículos aéreos não tripulados. Avanços recentes em câmaras de alta resolução e em técnicas de processamento de imagem possibilitou obter imagens de pavimentos com alta resolução. Os VANTs apresentam vantagens ao nível da flexibilidade do seu uso, do custo relativamente baixo quando comparado aos veículos terrestres equipados para inspeção e é de fácil manobrabilidade, sendo uma opção promissora na área de auscultação de pavimentos rodoviários e aeroportuários.

Neste capítulo serão analisadas as várias tecnologias existentes para a inspeção e análise de dados sobre o estado dos pavimentos, desde as formas mais tradicionais até as tecnologias mais avançadas, incluindo a utilização de veículos aéreos não tripulados e a construção de modelos 3D.

2.2.1. Inspeção visual realizada a pé

No levantamento tradicional, a auscultação do pavimento a pé é feita pelos inspetores, fazendo registo das degradações identificadas de forma visual e direta numa folha de inspeção em suporte digital ou em papel (Figura 2.1 e 2.2). As folhas de inspeção permitem registar os diferentes tipos de degradações presentes na superfície dos pavimentos e as quantidades e intensidades de cada degradação (nível de gravidade). O registo na ficha pode ser feito por trechos com determinada extensão de modo a permitir uma correta referência das degradações ou pode ser feito de modo contínuo.

Para a inspeção do pavimento é necessária uma roda de medição, giz e duas réguas, uma de 3 metros e uma de 40 centímetros com escala milimétrica. Este equipamento permite efetuar a localização das unidades de amostra a inspecionar e a aferição das áreas, comprimentos e profundidades das degradações.

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:				
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____					
SURVEYED BY _____		DATE _____		SAMPLE AREA _____					
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving			
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking			
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell			
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling			
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting					
DISTRESS SEVERITY	QUANTITY				TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE		

Figura 2. 1 Folha de dados de pesquisa de condição de pavimento flexível para unidade de amostra (ASTM D643 - 18, 2018).

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:				
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____					
SURVEYED BY _____		DATE _____		SAMPLE AREA _____					
Distress Types					• • • • • • • • • • 10 • • • • • 9 • • • • • 8 • • • • • 7 • • • • • 6 • • • • • 5 • • • • • 4 • • • • • 3 • • • • • 2 • • • • • 1 • • • • • 1 2 3 4				
21. Blow up/Buckling		31. Polished Aggregate							
22. Corner Break		32. Popouts							
23. Divided Slab		33. Pumping							
24. Durability Crack		34. Punchout							
25. Faulting		35. Railroad Crossing							
26. Joint Seal		36. Scaling							
27. Lane/Shoulder		37. Shrinkage							
28. Linear Cracking		38. Spalling Corner							
29. Patching (Large)		39. Spalling Joint							
30. Patching (Small)									
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE					

Figura 2. 2 Folha de dados de pesquisa da condição do pavimento rígido para unidade de amostra (ASTM D643 - 18, 2018).

Caso o suporte utilizado seja o papel, no final do levantamento realizado a pé, os dados anotados na ficha de inspeção devem ser transferidos para um suporte digital, de forma a permitir o armazenamento e tratamento da informação. Deste modo, é de interesse desenvolver um ficheiro digital que corresponde à versão em papel integrado a informação do estado do pavimento numa base de dados rodoviária, sendo possível utilizá-la através de programas informáticos.

O Levantamento tradicional possui como vantagem a capacidade de identificar no local de inspeção através de uma visualização direta, as degradações e os seus respetivos níveis de gravidade. Como desvantagens pode se destacar o tempo elevado de recolha de dados e a subjetividade associada ao julgamento dos inspetores, uma vez que a mesma degradação pode ser analisada de forma diferente e levar a diversas conclusões por observadores distintos. Este último fator pode ser minimizado com recurso à formação dos inspetores e à consulta de catálogos de degradação como documento de apoio às inspeções. As condições atmosféricas do momento em que foi realizado o levantamento e a hora do dia também podem influenciar no julgamento dos inspetores.

2.2.2. Inspeção visual com recurso a veículos terrestres multifuncionais

Um outro método utilizado para recolha de informações sobre o estado dos pavimentos é a utilização de veículos terrestres multifuncionais equipados com tecnologias de recolha e extração de informação sobre o estado dos pavimentos. Estes equipamentos têm como função observar os principais parâmetros de caracterização do estado do pavimento, nomeadamente o estado superficial, a irregularidade longitudinal e a irregularidade transversal, assim como as características geométricas do perfil longitudinal e transversal (Branco et al., 2008).

Existem inúmeros equipamentos disponíveis no mercado, desde sensores a laser até dispositivos de gravação de imagens vídeo da superfície do pavimento. Os dados de degradações coletados por meio de sensores a laser são passíveis de serem analisados instantaneamente, enquanto os dados levantados por meio de imagens de vídeo geralmente são pós-processados em gabinete (Fwa, 2006). Em seguida serão apresentados vários exemplos de equipamentos utilizados na auscultação de pavimentos.

O sistema VIZIROAD (Figura 2.3) é integrado por um computador portátil e dois teclados de registo de eventos pré-definidos e utilizados para o levantamento visual do estado do pavimento. O sistema é ligado ao conta-quilómetros da viatura que permite que os eventos sejam referenciados pela distância linear percorrida em metros desde o início da secção em análise até à degradação identificada (Feitosa et al., 2020; B. Santos, 2002). O software deste equipamento pode ser configurado, se adaptando ao tipo de informação que se pretenda observar.



Figura 2. 3 Equipamento VIZIROAD com GPS associado (Horta et. al., 2013, cit. by Feitosa, 2020)

O *Laser Crack Measurement System (LCMS)* (ver Figura 2.4) consiste em um laser de varredura de alta precisão que realiza uma captura detalhada da superfície do pavimento em 3D e que analisa e calcula uma variedade de dados que suportam a determinação do estado do pavimento. O LCMS é a base de muitos sistemas de laser acoplados em sistemas de inspeção de veículos terrestres. Os sistemas de medição de distância baseados em laser são geralmente as técnicas mais precisas e mais dispendiosas de entre as usadas para detetar danos nos pavimentos (Roberts et al., 2020).



Figura 2. 4 Laser Crack Measurement System - LCMS (Fonte: <https://romdas.com/romdas-lcms.html>)

O Sistema PASCO ROADRECON (Figuras 2.5), desenvolvido pela PASCO Corporation no Japão, passou por vários desenvolvimentos desde a sua forma original em 1956. É muito utilizado no Japão e foi usado no estudo US-LTPP (*Long-Term Pavement Performance*). O sistema é equipado com sensores a laser e uma câmara fotográfica que capta imagens automaticamente a intervalos de tempo regulares. O sistema permite praticar velocidades de inspeção até 80km/h, usa luzes artificiais para operar à noite e as fotografias registadas durante o levantamento são interpretadas visualmente para avaliar as degradações presentes no pavimento (Fwa, 2006).

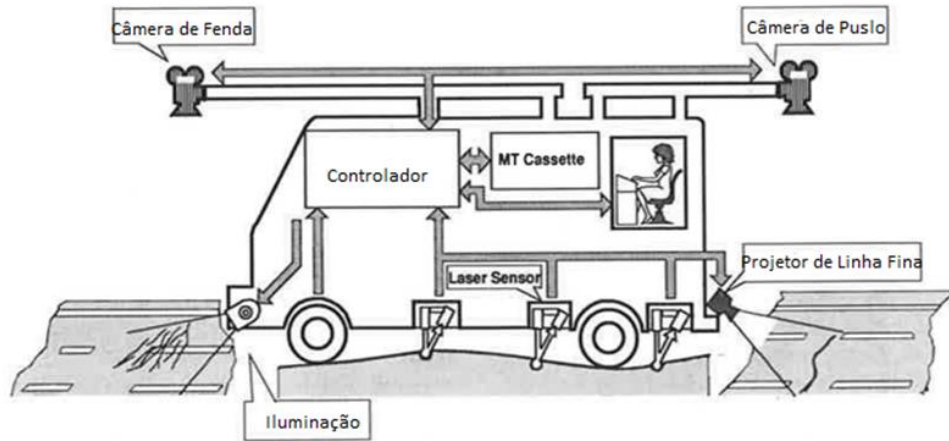


Figura 2. 5 Representação do sistema PASCO ROADRECON (Fonte: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1311/1311-025.pdf>)

O *Groupe d'Examen Routier par PHotographie* (GERPHO) (Figuras 2.6 e 2.7) é um veículo que possui acoplado uma câmera fotográfica, de saída contínua, apoiada em suporte mecânico de modo a permitir fotografar o pavimento na vertical, à velocidade de 60km/h. O sistema GERPHO foi desenvolvido pelo Laboratório Central *Des Ponts et Chaussées* (LCPC), na França. O sistema possui iluminação artificial para operar à noite. Foi projetado apenas para levantamento de degradações da superfície do pavimento, não permitindo detetar deformações importantes como as rodeiras e o microfendilhamento (Branco et al., 2008; Fwa, 2006).

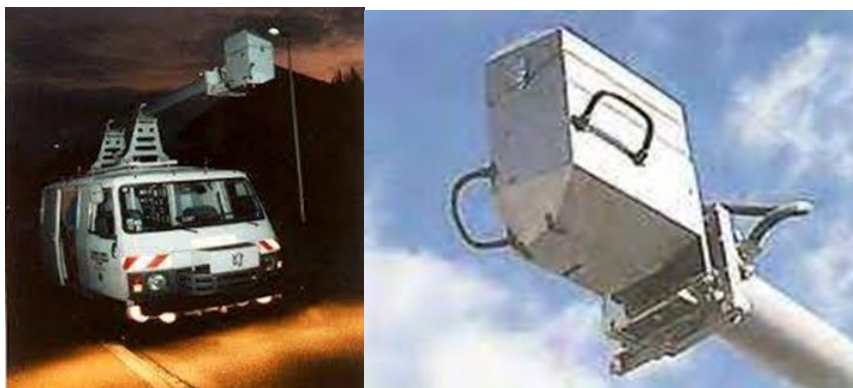


Figura 2. 6 GERPHO e pormenor do equipamento fotográfico (M. Santos, 2009).

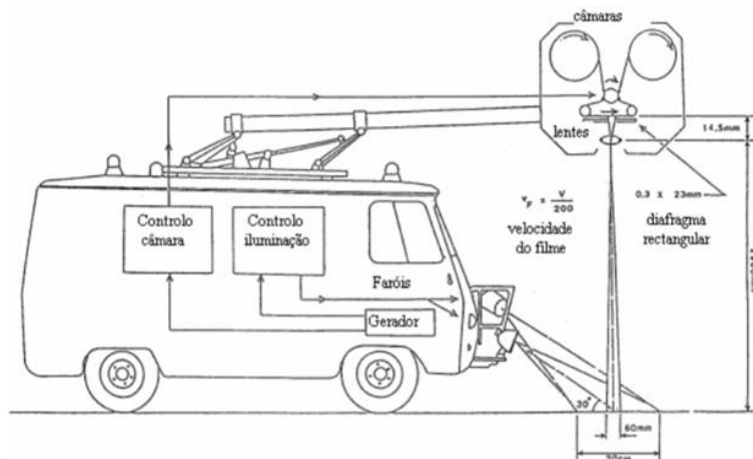


Figura 2. 7 Esquema do Equipamento GERPHO (Alves, 2007).

O CALAO (Figura 2.8), desenvolvido na França também pelo LCPC, é constituído por um veículo tipo furgão equipado com: câmara de vídeo de abertura pequena, usada para observar o estado superficial do pavimento, câmara de vídeo a abertura grande, usada para registrar elementos da estrada e a sua envolvente, barra transversal com sensores ultrassons que permite a observação do perfil transversal, giroscópio usado para determinar a inclinação longitudinal, sistema DESY usado para integrar informações complementares; “bump integrator” usado para determinar a irregularidade longitudinal, sistema ligado à coluna de direção para registo do raio de curvatura, sistema de armazenamento das imagens provenientes das câmaras e sistema informático de controle, registo e restituição da informação produzida (Maganinho, 2013). A auscultação de pavimentos deve ser efetuada durante o dia, o que é vantajoso em termos de custo de operação, mas pode levantar problemas quanto à sensibilidade para a identificação das degradações do pavimento. O equipamento realiza uma observação rápida e fiável e permite obter uma imagem mais abrangente do pavimento e do ambiente circundante. Possui um custo de operação inferior ao GERPHO, no entanto, as imagens obtidas são menos precisas quando comparadas com o mesmo (Branco et al., 2008).



Figura 2. 8 Equipamento do sistema CALAO (Maganinho, 2013).

O Instituto Sueco de Pesquisa de Estradas e Tráfego utilizou a tecnologia a laser no desenvolvimento do *Laser Road Surface* (LRST) (Figura 2.9). O sistema possui onze sensores laser montados na frente do veículo que são usados para medir parâmetros de degradações do pavimento, como profundidade e largura para traduzir o IRI, a macrotextura e a profundidade das rodeiras. Um computador de bordos simula o perfil transversal usando os dados fornecidos por todos os sensores para registrar as profundidades máximas das rodeiras. Existem oito interruptores manuais com a finalidade de identificar e registrar outras informações, como deformações longitudinais e pele de crocodilo. O sistema permite a obtenção dos dados para velocidade de circulação até 80km/h, pode ser operado tanto de dia quanto de noite e necessita de três operadores (Fwa, 2006).

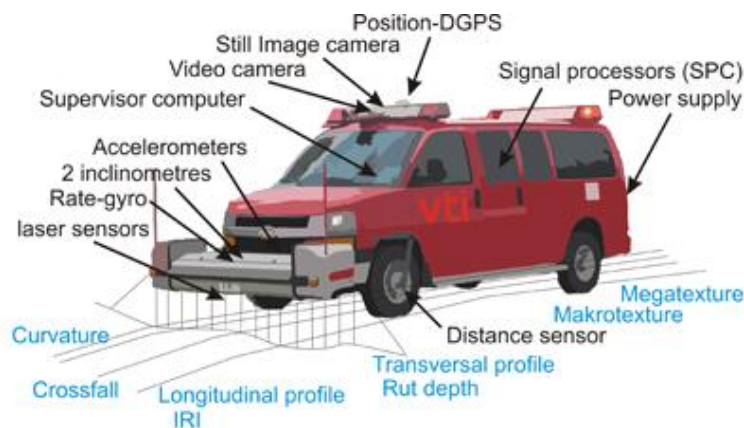


Figura 2. 9 Laser Road Surface Tester - LRST (Fonte: <https://www.vti.se/en/services/highway-engineering-and-geotechnics/on-road-measurement/measurement-of-road-surface>)

No *Automated Road Analyzer* (ARAN) (Figura 2.10) as degradações do pavimento são observadas através do para-brisas do veículo e os dados são registados usando dois teclados de classificação. A profundidade do fendilhamento é medida por sensores ultrassônicos instalados em uma barra instalada no para-choques dianteiro do veículo e a rugosidade é medida por um acelerômetro instalado no eixo traseiro. As imagens da superfície do pavimento são capturadas usando duas câmeras de vídeo. O sistema só pode ser operado durante o dia e com o tempo seco, é altamente dependente da mão-de-obra, pois precisa de três operadores para operar o sistema.



Figura 2. 10 Automated Road Analyzer - ARAN (Fonte: https://www.researchgate.net/publication/242130861_Correlation_of_Surface_Texture_Segregation_and_Measurement_of_Air_Voids/figures?lo=1)

O *Road Measurement Data Acquisition System* (ROMDAS) (Figura 2.11) foi desenvolvido pela *Data Collection Ltd.* (DCL), inclui em sua composição os principais elementos de hardware, um odômetro, interface e licenças de software para levantamento de dados dos pavimentos. O sistema pode ser instalado em qualquer veículo e o usuário tem a opção de personalizá-lo, adicionando módulos básicos para registrar conjuntos de dados adicionais de acordo com as necessidades do projeto (Feitosa et al., 2020). Os equipamentos que podem ser instalados são: perfilômetro a laser, GPS/GNSS, registrador de perfil transversal (TPL), registro de vídeo, *laser crack measurement system* (LCMS), hodômetro de alta resolução (HRDMI), integrador de “bump”, computador de levantamento, teclado de classificação de degradações e geometria rodoviária.

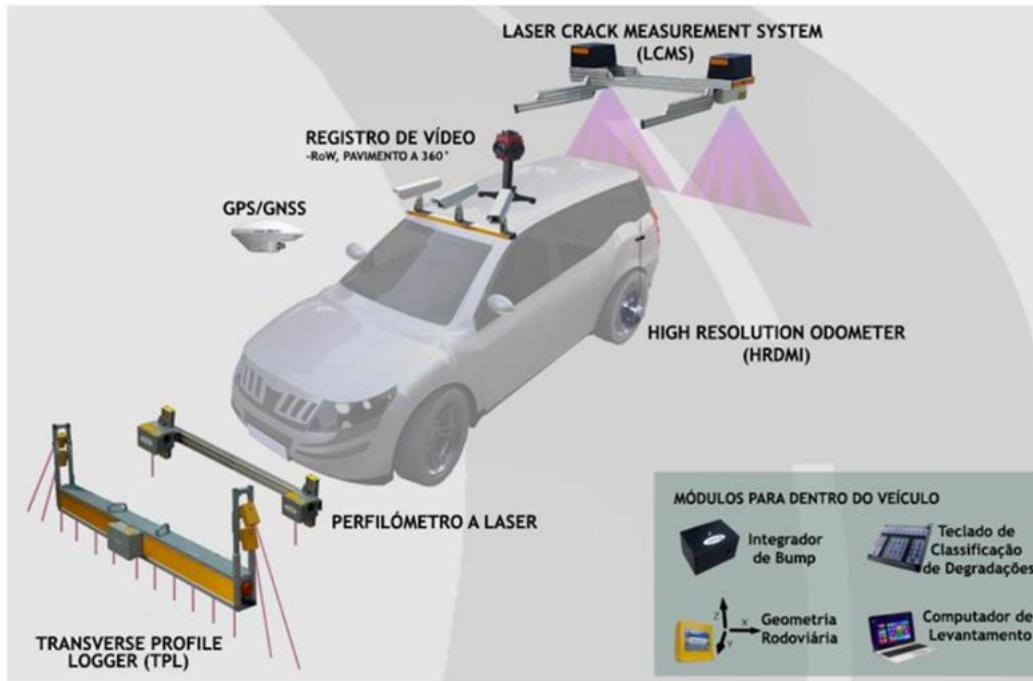


Figura 2. 11 Sistema ROMDAS (Feitosa, 2020 adaptado de ROMDAS, 2016).

Light Detection and Ranging (LiDAR) (Figura 2.12) é um método de levantamento que mede a distância de um alvo iluminando-o com um laser, oferecendo um método secundário para medir várias distâncias dentro de um projeto para garantir a concordância com os dados fotogramétricos.



Figura 2. 12 Sensor LiDAR (Fonte:

<https://mundoconectado.com.br/artigos/v/15382/sensores-lidar-entenda-o-que-sao-e-como-funcionam>)

A utilização de veículos multifuncionais na inspeção de pavimentos melhora bastante a eficiência e a objetividade dos dados levantados quando comparados com a inspeção tradicional. No entanto, várias viagens podem ser necessárias para cobrir toda a largura da estrada com o veículo de inspeção. Além disso, o processo de inspeção no local da estrada onde será realizado o levantamento afeta o fluxo de tráfego, que é um fator desfavorável em vias de tráfego intensos (Romero-Chambi et al., 2020).

2.2.3. Inspeção visual com recurso a Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)

A alternativa mais recente para a inspeção de degradações na superfície dos pavimentos é a tecnologia VANT, que vem sendo desenvolvida e adaptada para essa função. Possui custos relativamente baixos quando comparados com os veículos terrestres multifuncionais e podem atingir locais de difícil acesso ou inacessíveis com outros equipamentos de inspeção, sem comprometer a integridade do equipamento ou a segurança do operador. O uso do VANT denota um benefício relativamente a recolha de dados do pavimento, pois permite a construção de modelos 3D para a identificação e medição de degradações, possibilitando que as avaliações dos dados sejam feitas nas mesmas condições que as existentes no momento do levantamento. Possui também como vantagens a alta flexibilidade, a facilidade de manobra e a rápida velocidade de recolha de dados (Feitosa et al., 2020; Romero-Chambi et al., 2020). A Figura 2.13 apresenta um exemplo de inspeção realizado com VANT.

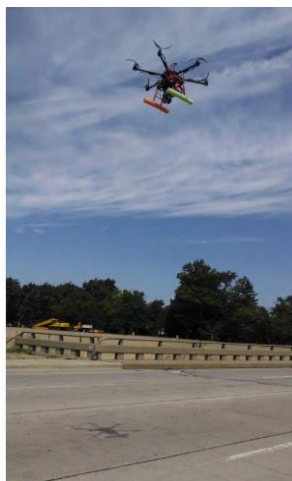


Figura 2. 13 Hexacopter Bergen, usado para coletar dados ópticos, térmicos e LiDAR para avaliar a condição de pontes, rodovias e outros ativos de transporte (Brooks et al., 2014).

Para o levantamento dos dados no pavimento geralmente é utilizado um sistema constituído por um VANT equipado com um scanner LiDAR. Atualmente, com a utilização da fotogrametria e de diversos softwares é possível obter facilmente modelos 3D a partir de imagens de VANT de forma automática. Com os recentes avanços em câmaras óticas de alta resolução e em técnicas de processamento de imagens torna-se possível derivar modelos 3D com boas precisões a partir de imagens oblíquas obtidas por VANT, fazendo do modelo 3D baseado em imagem um possível substituto ou suplemento mais económico para a digitalização LiDAR (Tan & Li, 2019; Ułanowicz & Sabak, 2021). Na Figura 2.14 está representado um esquema de um hexacóptero que demonstra as partes de um VANT.

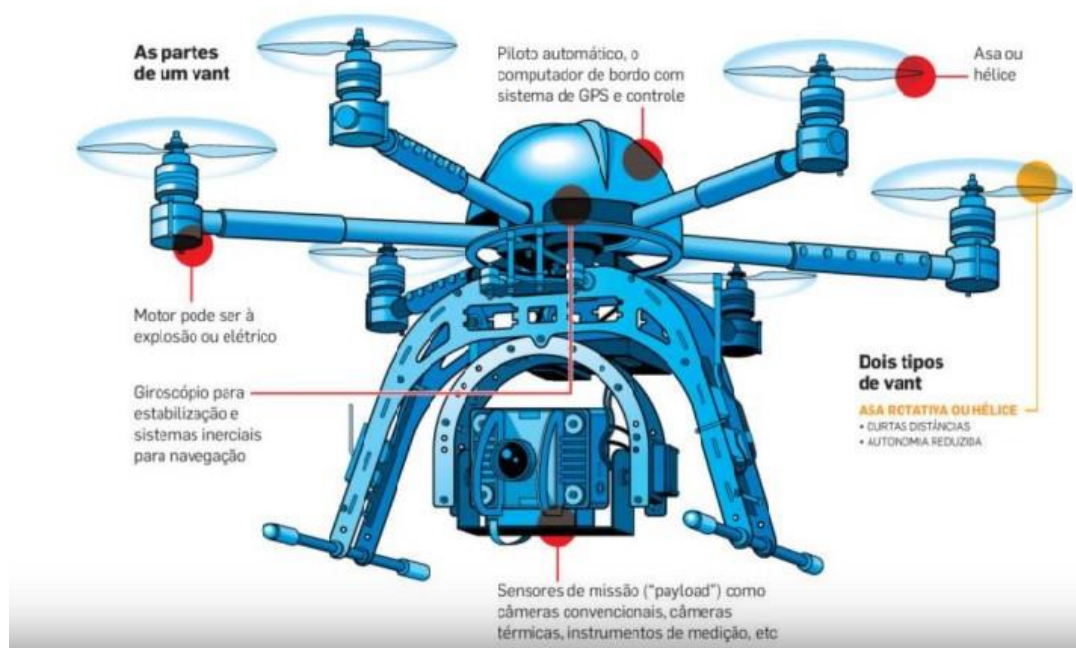


Figura 2. 14 Esquema de um veículo aéreo não tripulado (Fonte: <https://www.silvestrepe.com/single-post/2018/04/19/o-uso-de-drones-nos-estudos-de-fauna-silvestre>)

A tecnologia LiDAR instalada no VANT (Figura 2.15) é bastante utilizada para a inspeção de pavimento, o uso desta ocasiona um aumento da eficiência do levantamento de dados devido a sua precisão na recolha de imagens da superfície terrestre. A utilização de VANT com a tecnologia LiDAR tem como vantagem a capacidade de detalhar a informação recolhida devido as nuvens de pontos que possibilitam uma boa representação da realidade. No entanto, uma desvantagem da utilização dessa tecnologia em VANT é que ela pesa bastante fazendo com que seja difícil pilotar um VANT com menos de 25kg, já estão sendo projetados equipamentos LiDAR menores e mais leves com o intuito de resolver esse problema (Baker et al., 2019; Feitosa et al., 2020).

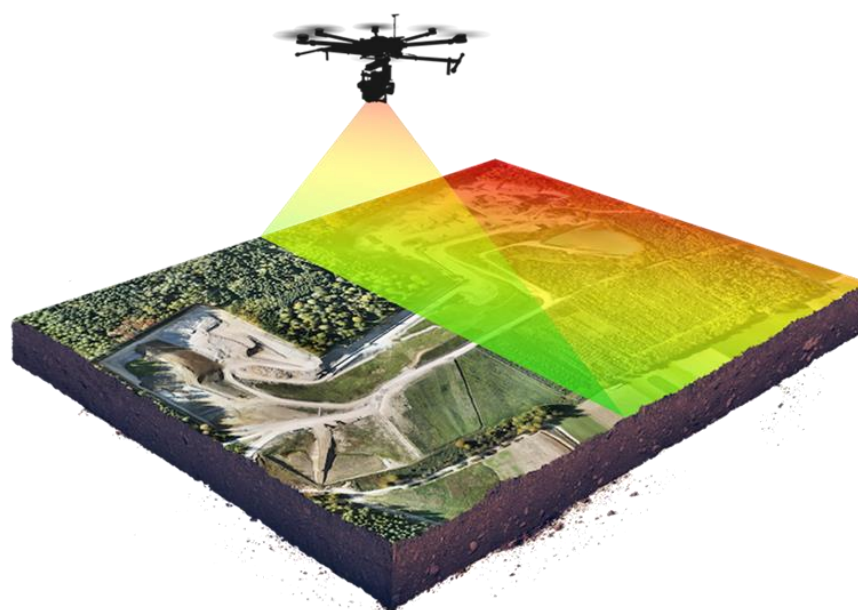


Figura 2. 15 Tecnologia LiDAR em VANT (Fonte: <https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/>)

Já existem atualmente diversos trabalhos realizados por diferentes autores que avaliam o uso da tecnologia VANT como técnica para o levantamento de dados na inspeção de pavimentos, essas pesquisas alcançaram resultados satisfatórios na identificação de degradações nos pavimentos, além de que, esse método economiza tempo, custo e mão-de-ora. No entanto, deve se ter em conta algumas restrições que essa tecnologia apresenta, como por exemplo, a duração da bateria não ser suficiente e ser necessário interrupções e a diminuição da qualidade das imagens em alturas de voo maiores, limitando a capacidade de detectar degradações de menores dimensões. Outras limitações também devem ser consideradas como a necessidade de pilotos qualificados para pilotar o VANT e a falta de um procedimento padrão para a inspeção do pavimento rodoviário com essa tecnologia.

2.3. Técnicas de análise de dados sobre o estado dos pavimentos com recurso à geomática

Para o tratamento das imagens capturadas durante o levantamento de dados nos pavimentos, existem várias técnicas de processamento de dados e de classificação automática testadas e aprovadas por diversos autores. Nesse capítulo serão apresentados alguns exemplos e como funcionam.

2.3.1. Fotogrametria e fotorestituição

A fotogrametria (Figura 2.16) baseia-se numa série de fotos bidimensionais (“vista aérea”) obtidas em voo e combinadas num mosaico fotográfico 2D. É diferente da fotografia aérea, pois é usada para gerar uma imagem composta restituída e ortoretificada, semelhante a um mapa que permite medir as distâncias entre objetos. A fotogrametria VANT apresenta um potencial significativo em aplicações geomáticas, incluindo na agricultura, silvicultura, arqueologia e arquitetura, meio ambiente, gerenciamento de emergência e monitoramento de tráfego. Na área da inspeção de pavimentos, novos softwares estão sendo constantemente desenvolvidos com algoritmos aprimorados que permitem avaliar com mais precisão e consistência o tipo, a gravidade e a quantidade de degradações no pavimento a partir de fotos bidimensionais (Baker et al., 2019; Tan & Li, 2019; Ułanowicz & Sabak, 2021).

Recentemente a tecnologia evoluiu para a construção de modelos 3D a partir de imagens, permitido gerar e reconhecer objetos tridimensionais, definindo-se como uma técnica inovadora no âmbito de processamento de imagem devido a avanços tecnológicos em informática e hardware. Para a construção de modelos 3D são levadas em consideração as características geométricas básicas como linhas, planos, circunferências, círculos e áreas de cor uniforme (Jacyna et al., 2017). Cada umas dessas características podem ser determinadas usando diversas técnicas de análise numérica, como o método dos mínimos quadrados, o método de divisão e fusão, a regressão linear, entre outros. Desse modo, o resultado da medição é uma informação 3D sobre a geometria do pavimento inspecionado (Ułanowicz & Sabak, 2021).

Estudos recentes feitos sobre a detecção de degradações em pavimentos com métodos que recriam modelos 3D de objetos, que incluem o uso de fotogrametria, alcançaram boas precisões, constituindo opções de baixo custo e eficazes para a inspeção de pavimentos.

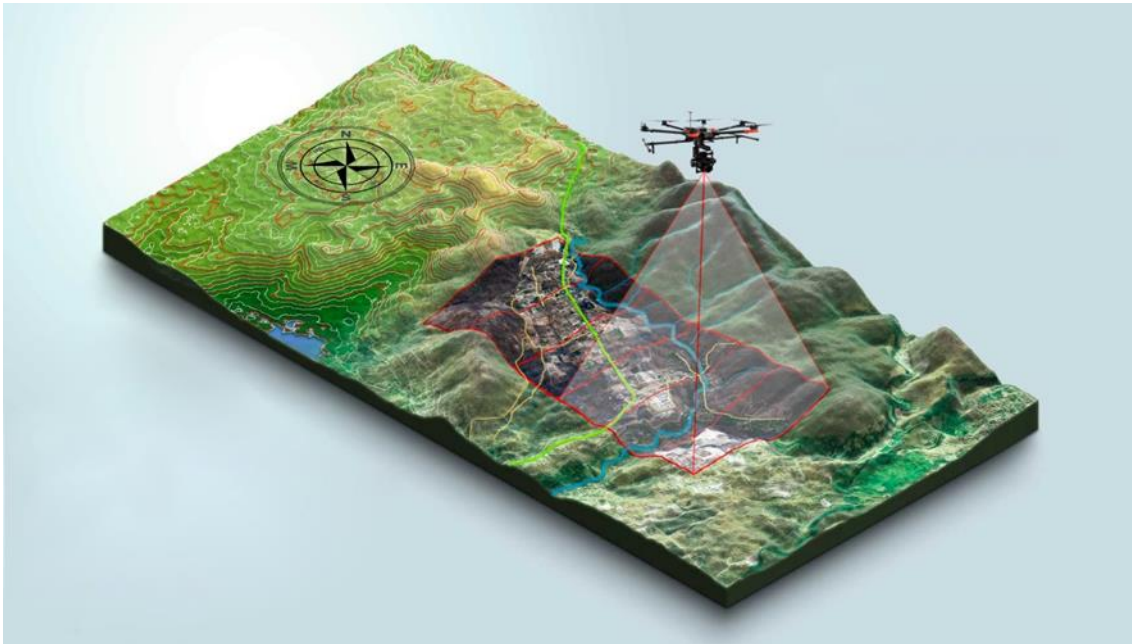


Figura 2. 16 Fotogrametria em VANT (Fonte: <https://www.geosensori.com.br/2019/07/17/os-segredos-e-revelacoes-da-fotogrametria/>)

2.3.2. Structure from Motion (SfM)

Structure from Motion (SfM) é uma técnica usada para o processamento de imagem através da reconstrução 3D, que faz a construção 3D a partir de uma série de imagens sobrepostas e deslocadas sem depender de informações prévias sobre alvos que possuem posições 3D conhecidas (Tan & Li, 2019). Normalmente, o processo desse algoritmo termina com duas saídas, uma nuvem de pontos dispersa e os parâmetros de câmara e de imagens. Uma nuvem de pontos dispersa é um passo intermediário na produção de nuvens de pontos muito mais densas. Essas nuvens de pontos densas são produzidas por um processo chamado *Multi-View Stereo* (MVS) (Romero-Chambi et al., 2020).

O SfM visa reconstruir simultaneamente a estrutura do plano 3D, a posição e orientação da câmara, juntamente com os parâmetros de calibração intrínsecos. A reconstrução 3D com essa técnica se mostrou bastante eficaz em diversas situações, como florestas, ambientes costeiros, dentre outros. O SfM vem sendo bastante melhorado em relação a robustez, precisão, integridade e escalabilidade, devido aos vários trabalhos realizados de aprimoramento. No entanto, este método apresenta grandes limitações nas estruturas lineares longas.

2.3.3. You Only Look Once (YOLO)

O You Only Look Once (YOLO) é um algoritmo que funciona em tempo real e em dispositivos computacionalmente limitados, pois, para determinar uma previsão é preciso de apenas uma única propagação direta pela rede neural (Silva et al., 2020). Esse aplicativo já foi testado e utilizado para a detecção de degradações em pavimentos, também foi usado para detecção de fendilhamento em diferentes superfícies, como defeitos em hélices de turbinas, fissuras em superfícies de cimento e em painéis compostos. Este algoritmo vem evoluindo em diferentes versões, as últimas versões usadas atualmente são YOLOv3 e YOLOv4.

O YOLOv3 usa redes de pirâmides de recursos (FPN – *feature pyramid network*) para a detecção de objetos. É um algoritmo de detecção de objetos de elevada velocidade e boa precisão. O YOLOv4 é uma versão aprimorada do YOLOv3, usa um método de agregação de caminho (PANet – *Pototype Alignment Networ*) para diferentes níveis de detecção juntamente com um aumento na precisão média e frames por segundos (FPS – *frames per second*).

2.3.4. Convolution Neural Networks (CNN)

Os *Convolution Neural Networks* (CNN) é amplamente utilizado na análise de imagens, devido ao rápido desenvolvimento em algoritmos de aprendizado. A CNN é um tipo especial das redes neurais *feedforward*, onde os neurónios da rede de cada camada estão completamente conectados com todos os neurónios da próxima camada. A CNN demonstra um alto desempenho na classificação, localização e segmentação de degradações (Baker et al., 2019; Zhong et al., 2022a).

Algoritmos de detecção de objetos usando CNNs tornaram-se populares nos últimos anos, esses algoritmos fornecem resultados de classificação e também geram caixas de previsão para localização de objetos. Os algoritmos de detecção de objetos podem ser divididos em duas categorias: algoritmos baseados em âncoras e algoritmos livres de âncoras. Um algoritmo baseado em âncora é o Faster R-CNN, que é um algoritmo de detecção de objetos de dois estágios, que fornece propostas de regiões para reduzir o impacto do fundo. Exemplos de algoritmos livres de âncoras são o CornerNet e o CenterNet, que utilizam pontos-chave ao invés de âncoras, eles exibem detecção em tempo real mais rápido do que os algoritmos baseados em âncoras, no entanto, possuem uma menor precisão (Zhu et al., 2022).

2.3.5. Pix4Dmapper

O Pix4DMapper é um software que ao ser processado produz ortomosaicos fotográficos e modelo digital de superfície (DSM – *Digital Surface Model*). Essa técnica converte as imagens em mapas 2D e modelos 3D geo-referenciados altamente precisos. Os dados introduzidos são processados em três etapas:

Nível 1: Processamento Inicial;

Nível 2: Pontos de Nuvem e Malha;

Nível 3: DSM, ortomosaico e índice.

Antes do ortomosaico o programa gera uma nuvem de pontos, essa nuvem pode ser classificada em cinco grupos: solo, superfícies da estrada, vegetação elevada, edifícios e edificações realizadas pelo homem. A nuvem de pontos pode ser editada para remover quaisquer pontos falsos (Kaamin et al., 2022).

2.3.6. Agisoft Metashape

O Agisoft Metashape é um software para fotogrametria que gera dados espaciais 3D para serem utilizados em aplicações SIG (Sistema de Informação Geográfica). Este método permite gerar ortomosaicos georreferenciados de alta resolução, modelos digitais cartográficos como nuvens e pontos, medições aéreas de volumes, áreas e retas. É uma ferramenta capaz de gerar classificação de nuvens de pontos densas para outros DSMs (*Digital Surface Model*) de forma detalhada e pode reconstruir modelos poligonais de objetos de grande escala. É indicado para áreas de aplicação geomática com topografia e mapeamento, infraestruturas, arqueologia, arquitetura, património cultural, entre outros.

3. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)

Neste capítulo serão analisados os diversos tipos de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), suas características e as principais vantagens e desvantagens do recurso à sua utilização na inspeção de infraestruturas. Também serão expostas várias definições existentes para essa tecnologia e seu desenvolvimento na atualidade; os sensores e câmaras utilizados; e algoritmos de processamento de imagens. Finalmente serão apresentadas as regulamentações existentes a nível nacional e internacional relativas ao procedimento a adotar no uso correto e legal desses veículos. As apresentações destes aspetos têm como intuito compreender melhor a tecnologia VANT para poder apresentá-la como uma proposta viável a ser utilizada na auscultação de pavimentos rodoviários.

3.1. Definições e utilização

3.1.1. Definições

Um VANT é um veículo que não possui a presença de um piloto e é capaz de fazer levantamentos de dados através de captura de imagens de alta resolução. O veículo é pilotado à distância por um controle remoto, manejado por uma pessoa qualificada ou de forma automática através de coordenadas pré-definidas. Os veículos aéreos não tripulados surgiram de início com o intuito de serem usados para fins militares, devido à sua capacidade de realizar missões aéreas de risco, sendo uma opção mais segura. Com o tempo essa tecnologia vem apresentando um rápido desenvolvimento de hardware e software de fotogrametria, o que a define como uma opção inovadora e permite uma ampliação da sua utilização em diversos campos, não só militares, mas também civis.

Adota-se o termo Sistema de Veículo Aéreo não Tripulado (SISVANT) para definir todo o sistema desde o operador até à aeronave. Essa terminologia é utilizada pelos órgãos militares e também por órgãos regulatórios como a *European Union Aviation Safety Agency* (EASA), a *International Civil Aviation Organization* (ICAO), o *Federal Aviation Administration* (FAA), EUA, e a Autoridade Nacional de Aviação Civil (ANAC), Portugal. Esses órgãos apresentam normas e regulamentos que devem ser tidos em conta na utilização de veículos aéreos não tripulados. Algumas dessas regras serão apresentadas mais à frente neste capítulo.

Segundo o Regulamento Modelo da ICAO (ICAO, 2020), um operador de VANT é considerado uma pessoa, organização ou empresa que participa de uma operação VANT. É definido também que o piloto remoto é aquele que manipula os controles de voo e é responsável por realizar as funções essenciais da operação, estabelecido como o comandante que está encarregue da condução segura de um voo. Um observador de aeronave não tripulada é aquela pessoa que auxilia o piloto remoto com o intuito de garantir uma condução segura do voo, fazendo a observação visual da aeronave pilotada remotamente (APR), uma aeronave não tripulada que é pilotada de uma estação de pilotagem remota, e de sistema de aeronave pilotada remotamente (SISAPR) corresponde a todo o sistema de APR, isto é, estações de pilotagem remota associada às conexões de comando, controles necessários e quaisquer outros componentes que façam parte do sistema de APR.

O Regulamento de Execução (UE) 2019/947 da Comissão, de 24 de maio de 2019, também apresenta um conjunto de definições usadas no âmbito da utilização de veículos aéreos não tripulados. Em seguida são apresentadas as principais definições:

- Operador de sistema de aeronave não tripulada: uma ou mais pessoas que estejam utilizando ou pretendam utilizar um sistema de aeronave não tripulada.
- Modo follow-me: um tipo de operação de sistema de aeronaves não tripuladas em que a aeronave, em um raio predeterminado, segue constantemente o piloto remoto.
- Reconhecimento geoespacial (*geofencing*): função de alerta aos pilotos remotos de uma possível violação das limitações do espaço aéreo, cujos dados são fornecidos pelos Estados-Membros.
- Sistema de aeronave não tripulada de fabrico caseiro: é um sistema VANT fabricado com o intuito de ser utilizado pelo próprio construtor.
- Massa máxima à decolagem (MTOM): é a massa máxima com que se pode operar a aeronave não tripulada, incluindo a carga útil e o combustível, definida pelo fabricante ou construtor.
- Operação em linha de vista (VLOS): uma operação SISVANT em que o piloto à distância é capaz de manter o contato visual contínuo com o VANT.
- Operação para além da linha de vista (BVLOS): uma operação SISVANT que não é conduzida em VLOS.

3.1.2. Utilização

Os VANT podem ser utilizados em diversas áreas de aplicações geomáticas como na arqueologia e arquitetura, no monitoramento de ativos de infraestruturas, incluindo as de transporte, no monitoramento do tráfego, na agricultura, na silvicultura, em mapeamentos topográficos, na inspeção de estruturas, em missões de resgates e no auxílio ao desastre, dentre outros (Tan & Li, 2019). Esta tecnologia vem se tornando importante para engenheiros e cientistas, pois o número de sistemas com recurso a VANT, económicos e fáceis de usar, está aumentando rapidamente. A principal razão pela qual os VANT são escolhidos para reconhecer o terreno e obter conjuntos de dados é por possibilitarem a aquisição de um grande número de imagens em um curto período, com uma resolução aceitável.

O VANT possui uma indústria diversificada, inovadora e internacional. Tem um enorme potencial de crescimento com a possibilidade associada de criação de emprego. Os VANTs podem ir a locais difíceis de acessar ou mesmo inatingíveis em circunstâncias seguras. Com o avanço das câmeras digitais de alta resolução e das técnicas de processamento de imagem, já é possível derivar modelos tridimensionais de imagens obtidas por VANT com suficiente precisão e alta eficiência. Estas características têm sido evidenciadas em pesquisas recentes que avaliam favoravelmente a utilização de VANT como uma tecnologia para a captura de dados em aplicações de inspeção de pavimentos rodoviários (Romero-Chambi et al., 2020).

Os veículos aéreos não tripulados apresentam várias vantagens em relação à sua utilização para avaliar o estado de pavimentos de infraestruturas de transporte. Possuem uma alta flexibilidade de utilização, um custo relativamente baixo quando comparados com veículos de inspeção terrestres multifuncionais, a diminuição do tempo de inatividade da infraestrutura, a fácil manobrabilidade e a redução do tempo de trabalho de campo (Tan & Li, 2019). Para além disso, também é possível destacar como vantagens a capacidade dos VANT se aproximarem de locais de difícil acesso, a capacidade de coletar dados de forma rápida e fácil e, no que diz respeito ao ambiente, de possuírem um impacto menor quando comparado a outras técnicas de inspeção. Os VANT possuem também a capacidade de coletar informações de alta qualidade que permite localizar e diagnosticar degradações.

No entanto, os VANT possuem algumas desvantagens que devem ser levadas em conta, como o fato do seu funcionamento estar condicionado quando as condições climáticas são adversas, uma vez que não podem ser operados em situações em que se verifiquem ventos fortes, nuvens de poeira ou temperaturas extremas. A uma certa altura de voo, a resolução espacial das imagens limita a capacidade de detetar certas degradações do pavimento, como fendas isoladas de abertura estreita (Romero-Chambi et al., 2020) e degradações superficiais em estado inicial. A autonomia dos VANT pode ser considerada uma desvantagem, uma vez que é limitada, o que pode exigir a interrupção nas inspeções. No que diz respeito à inspeção de pavimentos também é necessário proceder à interrupção do tráfego em alturas mais baixas de voo devido aos obstáculos. Possuem ainda uma capacidade de carga limitada, o que pode ser considerado uma desvantagem quando há necessidade de incluir no sistema câmeras com características especiais, como sensores LiDAR, sistema GPS, etc.

3.2. Tipos de VANT

Os VANT podem ser classificados tendo por base a sua altura de voo ou tamanho (Neto & Breunig, 2019). Os VANT de grandes dimensões são geralmente adaptados de plataformas militares, são utilizados em tarefas que apresentariam riscos para voos de aeronaves tripuladas, como, por exemplo, o monitoramento de incêndios florestais. Os VANT de médio porte podem ser utilizados para avaliação de desastres, na agricultura, para o sensoriamento remoto de ilhas e zonas costeiras, entre outros. Tanto os VANT de grande porte, quanto os de médio porte (Figura 3.1) são geralmente de asas fixas e exigem um alto investimento financeiro devido à complexidade de desenvolvimento, implantação e operação (Pádua et al., 2017).

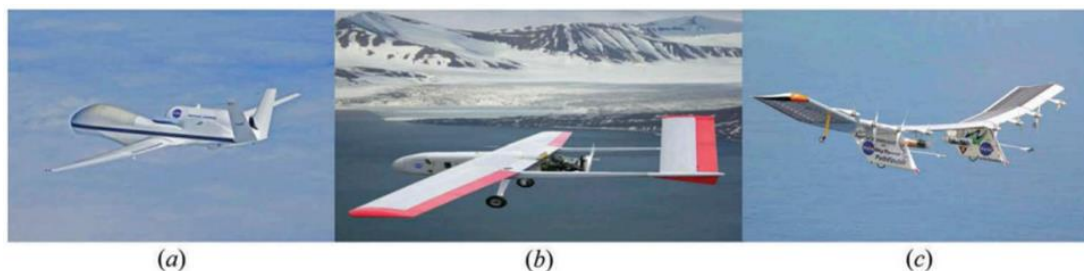


Figura 3. 1 Veículos aéreos não tripulados de grande e médio porte: (a) Ikhana da NASA; (b) SIERRA da NASA; (c) Pathfinder-Plus da NASA. (Pádua et al., 2017).

Os VANT pequenos, mini e micro apresentam um peso típico inferior a 25 kg, possuem um tempo de voo compreendido entre alguns minutos e algumas horas, dentro de uma faixa de distância limitada. São construídos direcionados para o uso civil e apresentam plataformas mais fáceis de serem utilizadas em relação aos VANT de grande e médio porte, podem ser VANT de asas fixas ou VANT de asas rotatórias (Pádua et al., 2017).

No que diz respeito a rede de comunicação os VANT usados como base aérea podem ser classificados como plataforma de baixa altitude (PBA) e plataforma de alta altitude (PAA) (Shakhatreh et al., 2019). Os VANT que se encaixam na categoria PBA operam a menos de 10km de altitude sendo veículos de decolagem e pouso vertical (VTOL – *vertical take-off and landing*), aeronaves de asas fixas e os balões. Quanto aos veículos do tipo PAA, operam a mais de 10km de altitude e são capazes de permanecer por muito tempo nas camadas superiores da estratosfera, tem-se os dirigíveis, as aeronaves de asa fixa e os balões. A Figura 3.2 apresenta um esquema que ilustra os tipos de VANT usados nestas duas classificações.

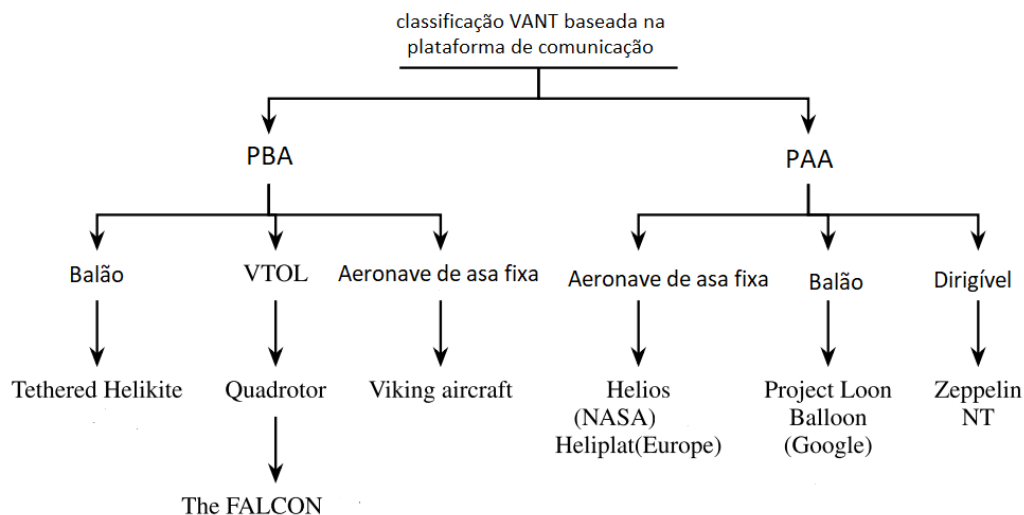


Figura 3. 2 Classificação de VANT (Shakhatreh, et. al., 2019).

Existem diversos tipos de veículo aéreos não tripulados, como dirigíveis, helicópteros, aviões, aeronaves de asas fixas e aeronaves de asas rotatórias, estas últimas podem ser classificadas como quadricóptero, hexacóptero ou multicóptero, prefixo que é determinado pela quantidade de motores (Neto & Breunig, 2019).

Cada tipo de veículo apresenta vantagens e desvantagens na sua utilização, e a escolha do tipo e modelo a usar está relacionada essencialmente com o tamanho e a complexidade da área a inspecionar, do tipo de sensor a ser embarcado, da resolução desejada no levantamento, das condições necessárias para a decolagem e pouso do veículo e também da experiência do operador no planeamento e gerenciamento do voo (Neto & Breunig, 2019).

Os dirigíveis, também conhecidos como aeróstatos, consistem em um envelope feito de um material impermeável ao gás que contém, que é um esferoide no caso de ser um aeróstato ou possui um formato de lágrima no caso de ser o que geralmente é considerado um dirigível. As aletas estabilizadoras são habitualmente adicionadas à parte de trás do envelope para ajudar a manter o dirigível apontado para o vento. Os aeróstatos, balões que se enchem de ar aquecido ou de gás mais leve que o ar atmosférico, sendo assim capazes de voar, possuem geralmente um aerofólio adicional, que é uma estrutura, semelhante a uma asa de um avião ou a lâmina de uma hélice, ou uma asa de tecido estabilizador, que mantém o aeróstato estável e minimiza a perda de altitude à medida que a intensidade do vento aumenta (Brooks et al., 2014).

Os dirigíveis e aeróstatos são úteis para aplicações que requerem observação temporária de uma área no solo. Podem fornecer uma opção de monitoramento de tráfego que pode permanecer na estação de observação por vários dias de cada vez, apresentando assim um tempo de operação muito maior do que as aeronaves não tripuladas de asa fixa ou rotativa, alimentados por baterias, ou combustível. Permitem uma fácil mudança de perspectiva e atitude da câmara com base nos requisitos de monitoramento. Um dirigível de tamanho apropriado também permite a instalação de sensores variados. Na Figura 3.3 apresenta-se um exemplo de dirigível.



Figura 3. 3 Dirigível sendo lançado para um voo de teste (Brooks et. al., 2014).

Os VANT de asas fixas são modelos preferíveis quando se deseja cobrir uma área maior com distância de amostra de solo (GSD – *Ground Sample Distance*) de precisão centimétrica (Neto & Breunig, 2019). Permitem praticar velocidades e alturas de voo superiores quando comparados com os VANT de asa rotatória e apresentam também uma resistência satisfatória ao vento. Percorrem grandes distâncias e conseguem voar por bastante tempo. São ideais para mapeamento horizontal de grande extensão.

No entanto, os modelos de asas fixas necessitam de uma maior área para decolar e pousar, ou para serem lançados manualmente. Apresentam dimensões maiores, custo mais elevado e possuem menor disponibilidade no mercado. Na Figura 3.4 apresentam-se alguns exemplos de VANT de asas fixas.



Figura 3. 4 Exemplos de VANT de asa fixa: a) QuestUAV Q-Pod; (b) SenseFlyeBee; (c) Trimble UX5; (d) MAVinci Sirius Pro; e (e) PrecisionHawk Lancaster. (Pádua et. al., 2017).

No que diz respeito aos VANT de asas rotatórias, esses possuem uma maior versatilidade de voo e permitem deslocamentos rápidos. São ideais para mapeamentos horizontais de extensão mediana e apresentam uma captura de imagem de boa qualidade. Também são adequados para a captura de imagens verticais simples, verticais oblíquas, horizontais e oblíquas invertidas (olhando para cima), o que é excelente para inspeção de estruturas. Requerem menor área para a decolagem e pouso e apresentam uma maior disponibilidade no mercado a preços mais acessíveis.

No entanto, os veículos aéreos não tripulados de asas rotatórias possuem uma maior resistência ao vento, em termos aerodinâmicos, tendo menor tempo de voo em condições de ventos fortes e moderados. Possuem baterias de curta duração, apresentando menor autonomia de voo. A altura de voo destes veículos é em geral mais baixa, a deslocação é efetuada a menor velocidade e requerem uma maior experiência do operador para serem manuseados. A Figura 3.5 apresenta alguns exemplos de VANT de asas rotatórias.



Figura 3. 5 Exemplos de VANT de asas rotatórias: (a) Topcon Falcon 8; (b) DJI Phantom 4; (c) 3DR SOLO Quadcopter; (d) SenseFly eXom; and (e) Yuneec Typhoon (Pádua et. al., 2017).

Os VANT de asas rotatórias podem ser do tipo quadricóptero, hexacóptero ou multicóptero, como referido anteriormente. A Figura 3.6 apresenta dois hexacópteros: o *DJI Frame Hexacopter* que é um tipo de hexacóptero altamente portátil e fácil de transportar, possui uma capacidade de carga útil de 3kg; o *Aurelia X6 Pro V2* que é um hexacóptero robusto, durável, leve e fácil de manter, com uma carga útil de 6kg.



Figura 3. 6 À esquerda DJI Frame Hexacopter (Fonte: <https://uavsystemsinternational.com/products/dji-s900-frame-hexacopter>); à direita Aurelia X6 Pro V2 (Fonte: <https://uavsystemsinternational.com/products/aurelia-x6-pro-v1>)

Quanto aos VANT de asas rotatórias do tipo quadricóptero, eles são menores e apresentam melhores desempenhos na inspeção de espaços confinados. De seguida são apresentados alguns exemplos de quadricópteros: o Phantom 4 Pro V2, que possui um sensor CMOS de 1 polegada (Figura 3.7); o DJI Mavic Air 2 (Figura 3.8), que possui um sensor de imagem Sony IMX586; os Micro VANT, pequenos o suficiente para caber na palma da mão, podem voar facilmente através de portas, salas, dentro de bueiros, etc. (Figura 3.9).



Figura 3. 7 Phantom 4 Pro V2 (Fonte: https://www.dji.com/pt/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=eol_phantom-4-pro).



Figura 3. 8 DJI Mavic Air 2 (Fonte: <https://www.worten.pt/produtos/drone-dji-mavic-air-2-4k-autonomia-ate-34-min-cinzento-7159602>).



Figura 3. 9 Da esquerda para a direita: Micro Drone Propel Atom 1.0 Titânio (Fonte: <https://simracingtech.com/produto/micro-drone-propel-atom-1-o-titanio/>); Micro Drone LDARC Tiny GT7 (Fonte: <https://www.olx.pt/d/anuncio/micro-drone-ldarc-tiny-gt7-indoor-e-outdoor->

3.2.1. Câmaras e Sensores

As câmaras utilizadas nos VANT podem ser de baixo custo, como câmaras digitais de lentes simples (como a DJI mavic pro 2), até câmaras profissionais de alto valor, como câmaras hiperespectrais ou sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*), especialmente projetadas para serem usadas em veículos aéreos não tripulados (Klemas, 2015; Pádua et al., 2017). De entre as câmaras mais utilizadas, tem-se as câmaras métricas de luz visível (RGB – *Red, Green and Blue*) e de infravermelhos.

As câmaras de luz visível, mostradas na Figura 3.10, são normalmente de pequeno e médio formato e fornecem imagens de alta resolução espacial (Colomina & Molina, 2014). Após um processamento inicial das imagens, é em geral utilizado o algoritmo de visão estéreo SfM (*Structure from Motion*) que reconstrói o espaço tridimensional com base nas imagens.

As câmaras de infravermelhoas podem operar na região do NIR (*Near-Infrared*), SWIR (*Short Wave Infrared*) e TIR (*Thermal Imaging Radar*). É possível transformar uma câmara digital de luz visível de matriz RGB em uma câmara NIR, removendo o filtro e substituindo-o por um que filtre as faixas da região do visível e, unindo as imagens RGB com NIR, é possível realizar composições coloridas de falsa-cor, que auxiliam na interpretação visual dos alvos. Estas câmaras apresentam um grande potencial para o uso em gestão agrícola e florestal (Neto & Breunig, 2019).

As câmaras métricas possuem a distância focal calibrada, alta precisão geométrica e alto grau de correção para lentes, para além de marcas fiduciárias no sensor para permitir correções e medições de elevado rigor, sendo mais indicadas para trabalhos de fotogrametria e de cartografia. No entanto, as câmaras não-métricas podem ser calibradas de forma a poderem ser utilizadas nesse tipo de trabalho através do ajustamento dos feixes de raios perspetivos considerando as equações de colinearidade e pontos de controlo na área a ser capturada, sendo assim realizada a reconstrução das feições do espaço objeto conjuntamente com o processo de calibração (Bazan, 2008).



Figura 3. 10 Exemplo de câmeras RGB utilizadas em VANT: a) Sony Nex A6000; b) GoPro Hero Series; c) PhaseOne IQ3; d) Canon G9X; e) FujiFilm FinePix JX580; f) Nikon D800 (Martins Neto, 2019; Breunig, 2019).

Os sensores que podem ser instalados nos VANT devem ser leves devido à capacidade de carga limitada dos veículos. Existe uma ampla variedade de sensores no mercado: sensores passivos que registam a energia eletromagnética refletida pelos alvos e incluem câmaras RGB e NIR, câmaras térmicas, multiespectrais e hiperespectrais, assim como magnéticos, radiológicos, EMF, gravíticos, etc. (Tang & Shao, 2015); e sensores ativos, como por exemplo o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), que é baseado na determinação de distâncias entre o sensor e a superfície a ser mapeada, através de um pulso de laser que se reflete no alvo.

Existem também os equipamentos de georreferenciamento. Para se construir modelos georreferenciados utilizando o SfM pode-se fornecer a posição das imagens captadas pelas câmeras ou usar pontos de controlo de solo (GPPs – *ground control points*), correspondendo a objetos naturais ou alvos artificiais com uma posição conhecida dentro da área a ser mapeada (Romero-Chambi et al., 2020). Existe também a possibilidade de se fazer o georreferenciamento com recurso a um sistema de posicionamento global por satélite (GNSS – Global Navigation Satellite System) como por exemplo o sistema norte americano GPS (*Global Positioning Systems*), que é útil para a navegação e fundamental para o sistema, permitindo a marcação localização das imagens recolhidas, e por consequência dos locais que apresentam degradações e que necessitam de reparação (Silva et al., 2020). No entanto, os GPS utilizados em VANT as vezes apresentam alguns problemas de cobertura e precisão, podendo ser utilizados modelos com correção em tempo real RTK multiconstelação com precisão centimétrica. (Shakhatreh et al., 2019).

Os sensores termais (Figura 3.11), quando comparados com as câmaras convencionais, possuem um custo mais elevado e as imagens obtidas possuem resolução espacial menor (Neto & Breunig, 2019).



Figura 3. 11 Exemplos de câmeras termais utilizadas em VANT: a) Photon 320; b) IRMOD V640; c) FLIR Vue; d) Workswell WIRIS (Martins Neto, 2019; Breunig, 2019).

Os sensores multiespectrais são geralmente usados na análise de vegetação, possuindo a capacidade de detecção de NIR e RGB. As câmaras hiperespectrais e multiespectrais só se tornaram disponíveis comercialmente para o uso em VANT nos últimos anos, uma vez que anteriormente eram consideradas muito pesadas para os VANT menores, enquanto as câmaras RGB e RGB modificada para aquisição de NIR eram consideradas como uma ferramenta padrão de aplicação de fotogrametria métrica e sensoriamento remoto com recurso a VANT (Pádua et al., 2017). Nas figuras 3.12 e 3.13 apresentam-se exemplos de câmaras multiespectrais e hiperespectrais.

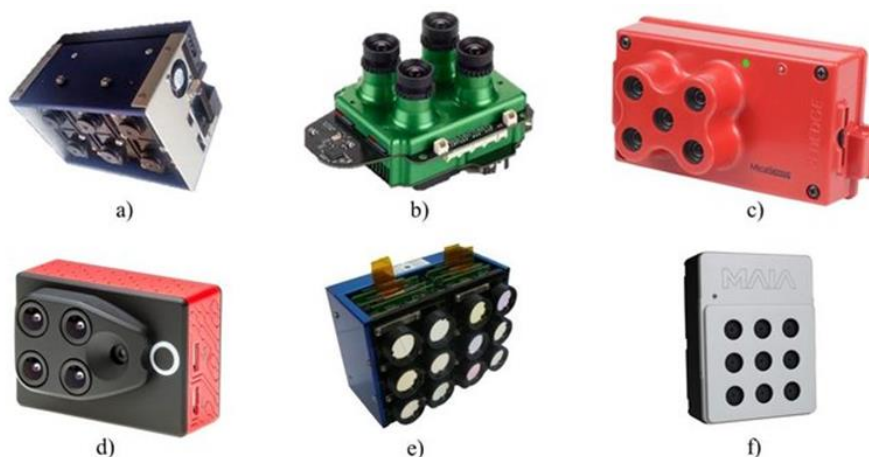


Figura 3. 12 Exemplos de câmaras multiespectrais utilizadas em VANT: a) Tetracam MCAW; b) Santera Quad; c) MicaSense Red-edge; d) Parrot SEQUOIA; e) Tetracam Mini MCA-12; f) MAIA WV (Martins Neto, 2019; Breunig, 2019).



Figura 3. 13 Exemplos de câmaras hiperespectrais usadas em VANT: (a) Headwall Photonics Micro-Hyperspec; (b) Rikola Hyperspectral camera; (c) Surface Optics Corp. SOC710-GX (Pádua et. al., 2017).

Os sensores LiDAR (Figura 3.14) são baseados em um sensoriamento remoto tal como as câmaras RGB e infravermelhas, que recorre à transmissão de pulsos de laser óticos sobre as superfícies com uma taxa de repetição rápida. É possível determinar a distância aos alvos (objetos na superfície) através da medição do caminho duplo do pulso emitido. A repetição desse processo em rápida sequência gera uma nuvem de pontos 3D da superfície. Os dispositivos de carga acoplada (CCDs – *Charge-coupled devices*) são os sensores óticos mais comuns e são usados em câmaras digitais típicas de consumo devido a sua alta disponibilidade de mercado e o seu baixo custo.



Figura 3. 14 Exemplos de sensores LiDAR utilizados em VANT: (a) Routescene lidar Pod; (b) Yellowscan Mapper; (c) Velodyne PUCK (Pádua et. al., 2017).

A figura 3.15 apresenta um exemplo de câmara acoplada a um VANT, a DSLR Nikon D800 conectada a um GPS, possui um sensor de alta resolução, no entanto, tem como desvantagem o seu peso e altura, necessitando de um VANT com uma capacidade de carga útil elevada. Na figura 3.16 é mostrado um exemplo de câmara embutida em um quadricóptero, uma boa opção para inspeções em espaços confinados.



Figura 3. 15 Exemplo de uma Nikon D800 montada na parte inferior de um VANT de rotor único Bergen Tazer 800 (Brooks et. al., 2014).



Figura 3. 16 Quadricóptero Crazyflie Nano com uma câmara de chaveiro montada na parte superior (Brooks et. al., 2014).

3.3. Normas e regulamentos aplicáveis à operação de VANT

A operação do SISVANT possui ao redor do mundo várias normas e regulamentos que visam garantir o uso seguro e correto desse tipo de veículo, garantindo dessa forma a segurança da operação das aeronaves no ar, assim como de pessoas e bens ao nível do solo. Visa também garantir que o desenvolvimento dessa tecnologia decorra de forma ecológica e adequada.

Para se ter uma noção melhor das principais regras existentes para a operação de um SISVANT no âmbito desse trabalho, foram analisados o enquadramento legislativo dos órgãos internacionais *European Union Aviation Safety Agency* (EASA) e *International Civil Aviation Organization* (ICAO) que definiram propostas de regulamentos modelos que visam facilitar e uniformizar o estabelecimento de normas para pilotar o VANT nos Estados que fazem parte dessas organizações. Para além disso foi analisado, também, a regulamentação nacional emitida pela Autoridade Nacional de Aviação Civil (ANAC) que define as regras para a operação de SISVANT dentro do território nacional. Para se ter uma ideia maior das diretrizes definidas para a utilização de um SISVANT foi também estudado a norma definida pela *Federal Aviation Administration* (FAA) nos Estados Unidos.

3.3.1. European Union Aviation Safety Agency (EASA)

Com o rápido desenvolvimento de pequenas aeronaves não tripuladas com massa máxima à decolagem inferior a 25kg, surgiram maiores desafios à aviação tradicional. De acordo com o Regulamento (CE) nº 216/2008, a regulação de um sistema de aeronave não tripulada com massa máxima à decolagem inferior a 150kg é da competência dos Estados Membros da União Europeia (UE), no entanto, os Estados Membros adotaram normas que não estavam em harmonia entre si. Em face do exposto, fabricantes e operadores de SISVANT solicitaram uma uniformização das regras para o mercado europeu, tendo surgido um acordo entre o Conselho, a Comissão Europeia e o Parlamento Europeu que resultou na criação de requisitos que regulam todos os sistemas de aeronaves não tripuladas exceto aqueles usados para operações “estatais” (como por exemplo, militares, aduaneiras, policiais, bombeiros, etc.).

A EASA, após a Conferência de Riga e a pedido da Comissão Europeia, desenvolveu uma estrutura regulatória direcionada aos VANT com o objetivo de garantir um desenvolvimento seguro e ecológico da utilização desta tecnologia, com respeito pela privacidade e pela proteção de dados dos cidadãos. A norma A-NPA 2015-10 publicada em 31 de julho de 2015, foi desenvolvida em conformidade com o Regulamento (CE) nº 216/2008, designado Regulamento Base, e com o Procedimento de Regulamentação. Esta norma possui uma abordagem baseada em risco e desempenho, define três categorias de operação de VANT: “aberta”, “específica” e “certificada”. A criação das categorias teve em conta os riscos que os VANT podem apresentar, dividindo-os de acordo com operações de baixo a alto risco.

Em 4 de maio de 2017 foram publicadas as normas NPA 2017-05 (A) e NPA 2017-05 (B) que propõem a criação de um novo regulamento que defina medidas para a diminuição do risco das operações na categoria aberta e específica. Possui como objetivo garantir um nível de segurança elevado e uniforme para os sistemas de aeronaves não tripuladas, fomentar o desenvolvimento do mercado de SISVANT e contribuir para melhorar a privacidade, a proteção de dados e a segurança. Em 22 de dezembro de 2017, foi alargada a competência da União Europeia com um novo Regulamento Base, para abranger a regulamentação de todos os sistemas de aeronaves

civis não tripuladas, independente de sua massa máxima de decolagem, conforme atesta o Parecer 01/2018 da EASA, publicado em 06 de fevereiro de 2018.

Em 4 de julho de 2018 foi publicado o novo Regulamento Base, o Regulamento (UE) 2018/1139 do Parlamento Europeu e do Conselho. Este regulamento inclui as mudanças propostas para as duas categorias “aberta” e “específica”. Em 12 de março de 2019 foi publicado o Regulamento Delegado (UE) 2019/945 da Comissão, que, se refere às aeronaves não tripuladas e aos operadores de países terceiros de sistema de aeronave não tripulada. Em 16 de dezembro de 2021 foi publicado pela EASA a NPA 2021-14 em conformidade com o Regulamento (UE) 2018/1139 e com o procedimento de Regulamentação. Possui como objetivo manter um alto nível de segurança para a operação de VANT no espaço aéreo U-space.

3.3.2. International Civil Aviation Organization (ICAO)

À semelhança do descrito anteriormente, foi solicitado à ICAO, pelos seus 191 Estados Membros, o desenvolvimento de uma estrutura regulatória para sistemas de aeronaves não tripuladas que operem fora da arena internacional IFR (*Instrument Flight Rules*). A ICAO analisou os regulamentos de SISVANT em vigor em alguns países como o Vanuatu, Nova Zelândia, Austrália, Canadá e Estados Unidos para identificar pontos em comum e identificar as melhores práticas que seriam consistentes com a estrutura de aviação da ICAO e que poderiam ser implementadas por uma ampla gama de Estados Membros. Como consequência, deste exercício resultou o Modelo ICAO de Regulamentação de SISVANT, nomeadamente as Partes 101, 102 e 149.

O Modelo ICAO tem como objetivo oferecer aos Estados uma linguagem modelo com o intuito de facilitar o estabelecimento de regulamentos para SISVANT específicos de cada Estado, não pretendendo ser obrigatório ou interpretado de forma a impedir as estruturas legais dos Estados Individuais. Os Estados são, portanto, livres de adaptar o modelo de forma a atender às suas necessidades específicas, levando em conta que os requisitos legislativos nacionais de cada Estado podem ser diferentes, como foi reconhecido nas Partes 101, 102 e 149.

3.3.3. Regulamentação Portuguesa Autoria Nacional de Aviação Civil (ANAC)

Em Portugal a regulamentação dos veículos aéreos não tripulados foi emitida pela ANAC. Esta regulamentação tem como objetivo garantir a segurança aérea adotando normas operacionais que tenham em conta os riscos existentes na utilização destes veículos, o que resultou na criação de um regime jurídico que garante mecanismos legais para uma supervisão e fiscalização mais eficaz do uso dessas aeronaves a nível nacional.

Nos últimos anos a utilização de VANT cresceu de uma forma significativa no país, se tornando uma realidade irrefutável, sendo utilizado em atividades de recreio, desportivas, de competição, de interesse público ou em atividade de natureza comercial. A operação massiva e desregulada da tecnologia VANT afeta negativamente a segurança da navegação aérea e, também, a segurança de pessoas e bens à superfície. Em 2016, a ICAO e a EASA possuíam iniciativas em curso para a determinação de normas aplicáveis a utilização e operação de SISVANT, no entanto, não havia ainda, a nível internacional ou europeu, uma legislação harmonizada. Tendo isso em conta, em 14 de dezembro de 2016, a ANAC publicou o Regulamento n^o 1093/2016 que estabelece as condições de operações aplicáveis aos sistemas de aeronaves pilotadas remotamente, tendo em consideração, nomeadamente, as normas aplicáveis à organização do espaço aéreo e as regras do ar, constantes do Regulamento de Execução (UE) n^o 923/2012 da Comissão, de 26 de dezembro de 2012.

A disponibilização do parecer nº 1/2018 da EASA, contendo uma proposta de regulamento que traz questões de segurança, impôs que o legislador nacional se antecipasse a uma eventual regulação a nível europeu. Portanto, foi necessário criar um regime jurídico que discipline a nível nacional a utilização de VANT, através de mecanismos legais que permitam uma supervisão e fiscalização mais eficaz. No mesmo caminho que diversos países europeus estavam fazendo, o Decreto-Lei nº 58/2018, de 23 de julho, adota uma legislação dirigida especificamente a criação de um registo dos operadores de VANT e da obrigatoriedade de constituição de seguro de responsabilidade civil quando se pretende operar aeronaves mais pesadas. O decreto-lei estabelece, também, o regime sancionatório a aplicar em caso de descumprimento das regras instituídas, que fica a cargo da ANAC.

O Regulamento (UE) 2018/1139 publicado em 4 de julho de 2018, entrou em vigor no dia 11 de setembro de 2018 e vem apresentando um conjunto de regras essenciais em relação ao sistema de veículos aéreos não tripulados. O regulamento possui como intuito uniformizar o quadro legal aplicável a este tipo de veículo em todos os Estados-Membros da União Europeia, independente do peso do mesmo, como já havia sido previsto. O artigo 131º do Regulamento (UE) 2018/1139 determina a obrigatoriedade dos Estados-Membros de estabelecerem sanções em caso de violações das regras, sendo essas sanções efetivas, proporcionadas e dissuasivas. Para além disso, o regulamento prever a forma de definir as áreas geográficas. O Regulamento de Execução (UE) 2019/947, de 24 de maio de 2019, estabelece a possibilidade de os Estados-Membros definirem as áreas geográficas de SISVANT, podendo aplicar um conjunto de restrições, determinadas por razões de segurança (segurança operacional e segurança contra atos de interferência ilícitas), de privacidade e de proteção ambiental.

Tendo em conta o que foi apresentado, em 20 de outubro de 2021 foi publicado o Decreto-Lei nº 87/2021 que estabelece normas de operação e o regime sancionatório aplicável às aeronaves não tripuladas. Foram determinados, também, os termos da definição das referidas áreas geográficas, que serão concretizadas por portarias. Foram ainda definidas as normas de operação de SISVANT utilizados em serviços aduaneiros, de busca e salvamento, de vigilância, prevenção e combate a incêndios ou em atividades e serviços similares, sob o controle e responsabilidade do Estado, não incluindo operações desenvolvidas pelas Forças Armadas e pela Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil.

3.3.4. Federal Aviation Administration (FAA)

Nos Estados Unidos da América (EUA), a FAA definiu a regulamentação dos veículos aéreos não tripulados. Em 2015, 45 estados do país consideraram restrições associadas à operação de VANT. Estas restrições estaduais e locais devem ser consistentes com a estrutura regulatória do país, de acordo com o controle de tráfego, segurança de navegação e regulação do ruído das aeronaves. Levando isso em consideração, o Congresso dos EUA encarregou a FAA de desenvolver planos e políticas para o uso do espaço aéreo dos veículos aéreos não tripulados visando garantir a segurança das aeronaves e o uso eficiente do espaço aéreo, desenvolvendo assim, o regulamento de tráfego aéreo sobre o voo.

A norma *National Airspace System* (NAS) que define operações de SISVANT com menos de 25 kg é a 14 CFR *Part* 107, conhecida como a *Small UAS Rule*. Operações mais complexas de VANT precisam de certificação adicional para além daquelas definidas pela *Small UAS Rule*.

3.3.5. Principais tópicos a se considerar na operação SISVANT

Tendo como objetivo assegurar uma abordagem correta e segura na operação de SISVANT, foi definindo um conjunto de tópicos retirados dos regulamentos desenvolvidos pelos órgãos citados (EASA, ICAO, ANAC e FAA), que determinam as principais normas apresentando suas exigências e limitações no que diz respeito a operação do SISVANT. Esses tópicos estão apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2.

De acordo com as normas definidas nas Tabelas 3.1 e 3.2 é possível concluir que existe uma semelhança no enquadramento legislativo dos órgãos estudados, no que diz respeito às operações de SISVANT. Isso se deve ao fato de existir um interesse internacional da criação de um quadro legal mais uniformizado para a utilização desta tecnologia. As normas da EASA propõe para a regulamentação europeia a criação de três categorias “aberta”, “específica” e “certificada”, que dividem as operações de VANT de acordo com o seu risco, sendo baixo, médio ou elevado. A ANAC, com intuito de possuir uma harmonização das normas nacionais com o enquadramento legislativo dos Estados Membros da União Europeia, adota as categorias de voo definidas pela EASA.

As operações da categoria “aberta” são operações realizadas em linha de visão, com VANT de MTOM menor de 25kg, operados a uma distância segura de pessoas no solo e separados de outros usuários. Essa categoria é dividida em subcategorias, a operação A1 é quando o VANT sobrevoa pessoas, e só pode ser realizada com o um veículo leve de classe Co ou C1. A operação A2 é quando o VANT voa perto de pessoas, deve ser de classe C2 e possuir um MTOM de até 4kg. A operação A3 é quando o voo acontece longe de pessoas, é de classe C3 e pode ter um MTOM de até 25kg. A categoria “específica” é quando a operação começa a apresentar riscos mais significativos para as pessoas sobrevoadas ou envolve o compartilhamento do espaço aéreo com a aviação tripulada. A categoria “certificada” é quando a aviação não tripulada atinge riscos semelhantes ao da aviação tripulada, as operações SISVANT são tratadas da maneira clássica da aviação.

Existe um consenso entre os órgãos apresentados em relação ao peso e a altura máxima de voo. Dessa forma, conclui-se que a altura mínima de voo é abaixo de 120m, quando a operação está sendo realizada em condições normais, e a massa máxima é de 25kg, ultrapassando essa massa é necessária uma avaliação extra da segurança operacional. Cada país em particular define o que é necessário para poder pilotar um VANT que ultrapassa a massa máxima, em Portugal é necessária uma autorização expressa pela ANAC, e nos Estados Unidos da América deve-se solicitar uma isenção no *Secretary of Transportation*.

Para operar um VANT deve ter em atenção as regras para utilização do espaço aéreo. O voo deve ser realizado a uma distância de 30m de pessoas não envolvidas na operação, e não é permitido sobrevoar obstáculos naturais ou artificiais em um raio de 75m. Não é permitido a operação de VANT em nuvens e nem no período da noite. Existem diversas restrições para a utilização do espaço aéreo, sendo proibidas as operações de VANT em concentrações de mais de 12 pessoas, em órgãos de soberania, em áreas de movimento de aeródromos, em instalações militares, em embaixadas e representações consulares, em locais de missão policiais, entre outros. Para realizar operação em zonas limitadas é necessária uma autorização do órgão determinado no local da operação.

Tabela 3. 1 Definição de normas a ter em conta para operar o SISVANT - Parte 1

Órgãos / Entidade	EASA					ICAO		ANAC					FAA					
Membros / Países	União Europeia (UE)					Estados Membros		Portugal					Estados Unidos					
Documentos Normativos	A-NPA 2015-10; NPA 2017-05 (A); NPA 2017-05 (B); NPA 2021-14					Regulamento Modelo de sistemas de veículos da ICAO, Partes 101, 102 e 149		Regulamento da ANAC nº 1093/2016; Decreto-Lei nº 58/2018; Portaria nº 2/2021 – Diário da República nº 1/2021, Série I de 04-01-2021; Decreto-Lei nº 87/2021					National Airspace System (NAS) 14 CFR					
Categorias de voo	Aberta					Específica	Certificada	Aberta					Específica	Certificada				
Subcategoria de voo	A1		A2	A3		-		A1					A2	A3	-			
Classe SISVANT	Co	C1	C2	C3	C4	-		Co					C1	C2	C3	C4	-	
Peso	< 0,25kg	< 0,90kg	< 4kg	< 25kg		25kg < 150kg (necessário estabelecer um processo de avaliação de segurança)	Não é facilmente expressa em termos de peso, pois está relacionada à aplicabilidade de avaliação de risco de segurança	< 25 kg; se o VANT pesar mais que 15kg deve ser inspecionado e aprovado sob as partes 101.2 ou 102.301		< 25 kg; (massa superior a 0,25kg possui a obrigatoriedade de registo dos operadores do SISVANT; massa superior a 0,90kg possui a obrigatoriedade de contratualização de seguros de responsabilidade civil)					< 25 kg; (para massas superiores é necessário solicitar uma isenção ao <i>Secretary of Transportation</i>)			
Altura máxima de voo	< 50m	< 120m ou até 50m acima de um obstáculo mais alto, a pedido do proprietário do objeto	< 120m ou até 50m acima de um obstáculo mais alto, a pedido do proprietário do objeto	< 120m ou até 50m acima de um obstáculo mais alto, a pedido do proprietário do objeto		< 120m ou até 50m acima de um obstáculo mais alto, a pedido do proprietário do objeto	-	< 120m acima do nível do solo		< 120m acima do nível do solo (apenas voos diurnos em operações VLOS); para voos em BVLOS, voos noturnos e/ou acima de 120m deve ter autorização da ANAC.					< 121.9m acima do nível do solo			
Espaço Aéreo restrito	O VANT não deve sobrevoar nenhuma pessoa não envolvida na operação. Na eventualidade de sobrevoo inesperado de pessoas não envolvidas, deve-se reduzir o tempo máximo possível que o VANT sobrevoe essas pessoas		As operações SISVANT devem manter uma distância horizontal segura de pelo menos 30m de pessoas não envolvidas nas operações.	As operações SISVANT devem manter uma distância horizontal de segurança de pelo menos 150m de locais residenciais, comerciais, industriais ou de recreio; o VANT deve voar em uma área onde não possua pessoas não envolvidas com a operação dentro do alcance do voo da aeronave.		Não voar dentro ou perto de áreas onde esteja em andamento um esforço de resposta a emergência, a menos que tenha permissão da autoridade local.	-	Não operar a menos de 30m, em uma medida horizontal, de uma pessoa não relacionada com a operação; Não operar um VANT dentro de uma área de 4Km de movimento de um aeródromo controlado; Não operar um VANT em espaço aéreo controlado sem autorização do órgão ATC (<i>Air Traffic Control</i>); Não operar um VANT em uma nuvem, ou à noite ou em condições diferentes das condições meteorológicas visuais, a menos que possua uma autorização sob a parte 102.13 permitindo a operação.		Não é permitido voar acima de um obstáculo natural ou artificial mais próximo da aeronave em um raio de 75m; Voo de um VANT em áreas de jurisdição militar, designadamente em áreas restritas ou em áreas temporariamente reservadas constantes das publicações aeronáuticas nacionais, incluindo na zona de controlo das Lajes, depende de autorização da AAN (Autoridade Aeronáutica Nacional); Não operar sobre concentrações de mais de 12 pessoas ao ar livre, a menos que tenha autorização da ANAC; Não voar nas áreas de proteção operacional dos aeródromos civis com zonas de controlo associadas definidas no Anexo do Regulamento da ANAC nº 1093/2016; Não operar sobre instalações onde se encontram sedeados órgãos de soberania, embaixadas e representações consulares, instalações militares, instalações das forças e serviços de segurança, locais onde decorram missões policiais, estabelecimentos prisionais e centros educativos da Direção-Geral de Reinserção e Serviços Prisionais.					Não operar dentro de um estádio no período de 1h antes até 1h depois de eventos esportivos; Não operar sobre instalações sensíveis à segurança nacional (base militar, marcos nacionais, usinas nucleares, etc.); Operações limitadas devido condições perigosas temporárias (incêndio florestal, furacão ou derramamento de produtos químicos); Operações limitadas em locais que estejam ocorrendo evento relacionado à segurança (exemplo, a Assembleia Geral das Nações Unidas); Não operar à noite, a menos que a aeronave acenda uma iluminação anticolisão visível por pelo menos 4.8 km.			
Fabricantes / Vendedores	Deve ser colocado no mercado com um manual de instruções que forneça as características do VANT e instruções de funcionalidade claras		Deve ser colocado no mercado com um manual de instruções que forneça as características do VANT e instruções de funcionalidade claras	Deve ser colocado no mercado com um manual de instruções que forneça as características do VANT e instruções de funcionalidade claras		Deve ser colocado no mercado com um manual de instruções que forneça as características do VANT e instruções de funcionalidade claras	Deve ser colocado no mercado com um manual de instruções que forneça as características do VANT e instruções de funcionalidade claras	O fabricante deve fornecer a CAA (<i>Civil Aviation Authority</i>) uma declaração que deve especificar o modelo do sistema, o peso máximo de decolagem do VANT, as operações que o VANT destina a realizar, a categoria do VANT e especificar que o SISVANT cumpre com as funções de operação as quais foram declaradas.		Declarar venda junto a ANAC;					<i>Type certification</i>	<i>Production certification</i>		
															Aprovação do SISVANT que está em conformidade com os padrões definidos de aeronavegabilidade, ruído, ventilação de combustível e emissões de escape.	Aprovação do fabrico de produtos de um projeto aprovado pela FAA		

Tabela 3. 2 Definição de normas a ter em conta para operar o SISVANT - Parte 2

Órgãos / Entidade	EASA					ICAO		ANAC					FAA		
Membros / Países	União Europeia (UE)					Estados Membros		Portugal					Estados Unidos		
Documentos Normativos	A-NPA 2015-10; NPA 2017-05 (A); NPA 2017-05 (B); NPA 2021-14					Regulamento Modelo de sistemas de veículos da ICAO, Partes 101, 102 e 149		Regulamento da ANAC nº 1093/2016; Decreto-Lei nº 58/2018; Portaria nº 2/2021 – Diário da República nº 1/2021, Série I de 04-01-2021; Decreto-Lei nº 87/2021					National Airspace System (NAS) 14 CFR		
Categorias de voo	Aberta				Específica	Certificada		Aberta					Específica	Certificada	
Subcategoria de voo	A1	A2	A3		–	–		A1	A2	A3	–		–	–	
Classe SISVANT	Co	C1	C2	C3	C4	–	–		Co	C1	C2	C3	C4	–	–
Operador	Leitura do manual; não possui limitação de idade	Leitura do manual mais treinamento online com teste; a partir dos 14 anos ou com supervisor	Leitura do manual mais certificado de competência (qualificação teórica) e exame em centro aprovado; a partir dos 16 anos ou com supervisor	Leitura do manual mais treinamento online com teste; a partir dos 16 anos ou com supervisor	Idade mínima de 16 anos; o operador VANT deve fornecer à autoridade competente uma avaliação do risco operacional para a operação pretendida, exceto se for titular de um LUC (<i>Light UAS operator Certificate</i>)	O piloto deve ser licenciado e o operador deve possuir um ROC (<i>Remote Operator Certification</i>)	Idade mínima de 16 anos; realizar um exame de conhecimento aeronáutico e um exame teórico de licença de aviação; deve possuir uma componente teórica de um curso de formação de pilotos à distância	Vale as mesmas regras definidas pela EASA.					Idade mínima de 16 anos; deve ser capaz de ler, escrever, falar e entender inglês; deve estar em condições físicas e mentais para pilotar com segurança um SISVANT.		
Avaliação / Mitigação de risco	Risco baixo				Risco médio	Risco elevado		A operação de VANT não deve ser feita de maneira descuidada de modo a colocar em risco a segurança da aviação ou a segurança de qualquer pessoa ou propriedade; Nenhum objeto deve ser derrubado em voo de VANT se esse criar risco para pessoas ou bens		O VANT deve manter distância segura de pessoas e bens patrimoniais, evitando danos em caso de acidentes ou incidentes			O piloto remoto deve relatar a FAA qualquer operação de VANT envolvendo ferimentos graves ou perda de consciência e danos a qualquer propriedade		
Certificados / Qualificações	É determinada por limitações de operação que estejam em conformidade com os padrões da indústria				Necessita de uma autorização por uma NAA (<i>National Aviation Authorities</i>), verificada por uma Entidade Qualificada (QE); Licença de exploração por parte de uma autoridade competente nacional do Estado-Membro	Fiscalizada pela NAA (<i>National Aviation Authorities</i>), emite uma licença e define a aprovação de organizações de manutenção, operação e formação; possui requisitos similares com os da aviação tripulada.		Certificado de piloto remoto			Registo da ANAC, válido por cinco anos; Atribuição de um código de identificação de 10 dígitos; Seguro de responsabilidade civil		Certificado de Piloto Remoto pela FAA; Quando o VANT está fora do âmbito da regra 14 CFR Part 107 é necessário um certificado <i>Airworthiness certification</i> .		
Limitações	O operador não deve estar sob a influência de substâncias, psicoativas ou álcool, nem deve estar ferido, fadigado ou doente ao conduzir a operação de VANT.				Não operar um VANT sob efeito de álcool ou uso de qualquer droga que prejudique a faculdade da pessoa; Não operar um VANT enquanto estiver pilotando um veículo em movimento, embarcação ou aeronave tripulada.		Não operar um VANT quando se encontrar em qualquer situação de incapacidade da sua aptidão física ou mental, nem quando se encontrar sob a influência de quaisquer substâncias psicoativas ou medicamento que possam afetar a sua capacidade de as exercer de forma segura e adequada.			Não operar um VANT quando o SISVANT não estiver mais em condições de operação segura; Não operar um VANT se estiver em uma condição física ou mental que interfira na operação segura do sistema; Não operar um VANT se estiver em uma aeronave em movimento ou em um veículo terrestre ou aquático em movimento.					
Tráfego Aéreo	Serviço U-Space;				–		Prioridade de passagem às aeronaves tripuladas e afastar-se das mesmas sempre que as aeronaves tripuladas estejam a voar a uma altura próxima do VANT.			Espaço aéreo controlado	Espaço aéreo não controlado				
										Em torno de aeroportos e em altitude onde estejam ocorrendo o tráfego aéreo	Abaixo de aproximadamente 121.9m acima do solo				

No que diz respeito ao fabrico e venda de VANT deve ser colocado no mercado com um manual que apresente suas características, em Portugal é preciso declarar venda junto a ANAC. Para operar um VANT o piloto deve ter no mínimo 16 anos (a classe Co da EASA não exige idade mínima e a classe C1 define a idade mínima de 14 anos), ser licenciado e estar registado na entidade legislativa do Estado onde acontecerá a operação.

Para que a operação de VANT seja feita em segurança as normas estudadas definem regras para mitigação de risco. O operador de um VANT deve estar em condições saudáveis, tanto físicas quanto mentais e não deve estar sob o consumo de álcool ou drogas. Não deve pilotar um VANT se: estiver em outro veículo em movimento, aéreo, terrestre ou aquático; o SISVANT não estiver mais em condições de operação segura.

Com o intuito de alcançar o uso seguro e eficaz do espaço aéreo a EASA apresenta o serviço U-space, que cria condições necessárias para que o VANT e as aeronaves tripuladas operem com segurança. O espaço aéreo U-space é estabelecido em áreas onde a operação de VANT possa apresentar riscos para outros usuários do espaço aéreo, ou para pessoas e bens que estejam em terra. Em Portugal, a ANAC determina a prioridade de aeronaves tripuladas no espaço aéreo, e o VANT deve-se afastar sempre que uma aeronave tripulada esteja a uma altura próxima. Nos Estados Unidos da América o espaço aéreo é dividido entre espaço aéreo controlado e não controlado.

4. Condições e Fatores a Considerar na Aquisição e Tratamento de Imagens da Superfície do Pavimento com Recurso a VANT

Nesse capítulo foram analisados 15 artigos científicos publicados nos últimos 7 anos, considerados os mais relevantes numa pesquisa efetuada na base de dados Scopus, que descrevem estudos em que é utilizada a tecnologia VANT para realizar a inspeção de pavimentos. São apresentados os métodos de levantamento de imagens, mas também as técnicas de processamento e reconstrução de imagens e o nível de qualidade dos resultados obtidos. Esta análise tem como objetivo identificar as principais condições e fatores a considerar neste tipo de aplicação dos VANT. Para ter uma melhor compreensão do que foi tratado e concluído em cada estudo, as informações principais foram reunidas nas Tabelas 4.1 a 4.4.

Tendo em conta a pesquisa feita e a informação apresentada nas Tabelas 4.1 a 4.4, é possível reunir um conjunto de condições e fatores de apoio à tomada de decisão sobre operações de auscultação de pavimentos rodoviários utilizando a tecnologia VANT, assim como para o tratamento das imagens retiradas da superfície do pavimento com essa tecnologia. Os estudos analisados indicam que existe um interesse significativo sobre essa temática na China, sendo o país em que mais estudos foram desenvolvidos nos últimos 7 anos (Pan et al., 2017), (Pan et al., 2018), (Tan & Li, 2019), (Wang et al., 2019), (Huang et al., 2019), (Zhu et al., 2021), (Zhong et al., 2022). Também é possível ver que outros países possuem um interesse significativo, como os Estados Unidos da América (Zhang et al., 2016), (Congress et al., 2021), Espanha (Silva et al., 2020), (Romero-Chambi et al., 2020), Itália (Garilli et al., 2020), (Nappo et al., 2021), Chile (Romero-Chambi et al., 2020), Malásia ((Kaamin et al., 2022) e República Checa (Maslan & Cicmanec, 2021).

A grande maioria das pesquisas focam seus estudos na captação de imagem e deteção automática de degradações em pavimentos flexíveis (betuminoso) (Zhang et al., 2016), (Pan et al., 2017), (Pan et al., 2018), (Tan & Li, 2019), (Wang et al., 2019), (Huang et al., 2019), (Silva et al., 2020), (Romero-Chambi et al., 2020), (Congress et al., 2021), (Nappo et al., 2021), (Zhu et al., 2021), (Kaamin et al., 2022), (Zhong et al., 2022), verificando-se que as efetuadas para pavimentos rígidos (betão) e em pedra são em número bastante mais reduzido (Maslan & Cicmanec, 2021) e (Garilli et al., 2020) respetivamente. Existe uma boa distribuição entre estudos realizados em ambiente rodoviário rural (Zhang et al., 2016), (Pan et al., 2017), (Pan et al., 2018), (Wang et al., 2019), (Nappo et al., 2021) e urbano (Tan & Li, 2019), (Huang et al., 2019), (Silva et al., 2020), (Garilli et al., 2020), (Zhong et al., 2022), com exceção do último que foi desenvolvido em um Aeroporto Militar (Maslan & Cicmanec, 2021). No respeito à análise do ambiente rodoviário em questão, deve ser tido em conta a quantidade e o tipo de tráfego que existem no local, pois interfere nos cuidados a ter na realização da auscultação dos pavimentos com o VANT, sendo esta operação facilitada em locais com menos trânsito e com veículos de pequeno porte.

Tabela 4. 1. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Informação geral

ID do artigo	Ano e citação	Autores	Local	Título do artigo	Tipo de pavimento	Ambiente rodoviário	Tipos de degradações estudadas
1	2016 (Zhang et al., 2016)	Zhang, S., Lippitt, C., Bogus, S., Neville, P.	Estados Unidos – Novo México	Caracterização das condições de desgaste da superfície do pavimento com <i>Hyper-Spatial Resolution Natural Color Aerial Photography</i>	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área rural	Sulcos, pele de crocodilo e fendilhamento transversal
2	2017 (Pan et al., 2017)	Pan, Y., Zhang, X., Sun, M., Zhao, Q.	China –Shihezi	Deteção supervisionada baseada em objetos aplicada a covas e fendas a partir de imagens da superfície do pavimento adquiridas com VANT	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área rural	Covas e fendilhamentos
3	2018 (Pan et al., 2018)	Pan, Y., Zhang, X., Cervone, G., Yang, L.	China –Shihezi	Deteção de covas e fendas em pavimentos betuminosos baseado em imagens obtidas por VANT	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área rural	Covas e fendilhamentos
4	2019 (Tan & Li, 2019)	Tan, Y., Li, Y.	China - Chongqing	Deteção de degradações de pavimentos usando a fotogrametria 3D a partir de imagens obtidas por VANT	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área urbana	Saliências e cavidades em pavimentos, estradas, covas, deslocamentos e ondulações.
5	2019 (Wang et al., 2019)	Wang, Y., Huang, Y., Huang, W.	China – Rodovia G45	Deteção de fendilhamento em imagem de pavimento usando análise de estrutura de correlação e votação de tensor iterativo	Pavimento Flexível e Rígido (Betuminoso e Betão)	Área rural	Fendilhamento transversal e longitudinal, pele de crocodilo
6	2019 (Huang et al., 2019)	Huang, H., Fan, R., Zhu, Y., Liu, M., Pitas, I.	China e Grécia	Um sistema robusto de mapeamento de pavimento baseado em odometria visual estéreo com restrição normal	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área urbana	-
7	2020 (Silva et al., 2020)	Silva, L., Blas, H., García, D., Mendes, A., Gonzáles, G.	Espanha - Salamanca	Um sistema arquitetónico multiagente para monitoramento de pavimento com reconhecimento de covas em imagens VANT	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área urbana	Covas e fendas
8	2020 (Romero-Chambi et al., 2020)	Romero-Chambi, E., Villarroel-Quezada, S., Atencio, E., Rivera, F.	Chile e Espanha	Análise de parâmetros ótimos de voo de VANT para deteção de covas em pavimentos	Pavimento Flexível (Prisma retangular de gesso usado para simular um pavimento betuminoso)	-	Covas
9	2020 (Garilli et al., 2020)	Garilli, E., Bruno, N., Autelitano, F., Roncella, R., Giuliani, F.	Itália –Ascoli Piceno, região de Marche – rua Via Pietro Alamanni	Deteção automática de degradações em pavimentos de pedra com base na fotogrametria com recurso a imagens VANT	Pavimento de pedra (blocos)	Área urbana – trânsito apenas de moradores e veículos não autorizados em períodos excepcionais; trânsito apenas de veículos de pequeno porte	Deslocamentos verticais (depressões, falhas, elevações e sulcos), deslocamentos horizontais (deformações) e fratura dos blocos.
10	2021 (Congress et al., 2021)	Congress, S., Puppala, A., Kumar, P., Patil, U.	Estados Unidos da América	Avaliação das características geométricas do pavimento usando dados VANT-CRP (Close range fotogrametria – fotografias com uma distância objeto – câmara inferior a 300m)	Pavimento Flexível (Betuminoso)	-	-
11	2021 (Nappo et al., 2021)	Nappo, N., Mavrouli, O., Nex, F., Westen, C., Gambillara, R., Michetti, A.	Itália – Província do Como	Uso de produtos de fotogrametria baseados em imagens captadas por VANT para deteção semiautomática e classificação de danos em pavimentos rodoviários flexíveis, em áreas afetadas por deslizamento de terras.	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área rural – rede rodoviária densa	Fendilhamento longitudinal e transversal em áreas onde ocorreram deslizamento de terras
12	2021 (Zhu et al., 2021)	Zhu, J., Zhong, J., Ma, T., Huang, X., Zhang, W., Zhou, Y.	China – Nanjing	Deteção de degradações em pavimento usando redes neurais convulsionais com imagens capturadas com VANT	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área urbana	Fendilhamento transversal e longitudinal, pele de crocodilo, fendas oblíquas, covas e reparações
13	2022 (Kaamin et al., 2022)	Kaamin, M., Tajudin, S., Basri, N., Rahman, R., Nor, A., Kadir, M., Mokhtar, M., Luo, P.	Malásia – Johor Bahru-Melaka, Fto05	Uso de tecnologia VANT na inspeção visual de pavimentos de estradas	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área rural	Pele de crocodilo, exsudação, fendilhamento longitudinal, reparações. Foram identificados 11 tipos de degradações para a determinação do PCI
14	2022 (Zhong et al., 2022)	Zhong, J., Zhu, J., Huyan, J., Ma, T., Zhang, W.	China – Nanjing (também usaram bases de dados públicas)	Rede de fusão de características em várias escalas para a deteção de degradações no pavimento ao nível do pixel	Pavimento Flexível (Betuminoso)	Área urbana	Fendilhamento, covas e reparações
15	2022 (Maslan & Cicmanec, 2021)	Maslan, J., Cicmanec, L.	República Checa – Bechyne	Parâmetros de voo de um VANT para deteção de degradações na pista de pavimento rígido	Pavimento Rígido (Betão)	Aeroporto militar – pista	Fendilhamento

Tabela 4. 2. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Informação sobre o uso de VANT

ID do artigo	Ano e citação	Tipo de VANT	Tempo de voo	Altura de voo	Câmaras / Sensores	Ângulo de captação de Imagem/ taxa de sobreposição de imagens
1	2016 (Zhang et al., 2016)	S-UAS (<i>small-unmanned aircraft system</i>): balão meteorológico de hélio amarrado, que pode voar mais baixo que as aeronaves tripuladas tradicionais, permitindo a coleta de imagens aéreas de resolução hiperespacial (HSR)	-	A pesquisa não apresenta uma altura de voo específica, mas refere que a altura de voo deve ser inferior a 120m e que o VANT deve ser usado a 8km de distância dos aeroportos, de acordo com o regulamento aplicável no local de estudo	Câmara digital Canon SX260 HS usada para coletar dados HSR-AP (fotografias aéreas em cores naturais)	80% de sobreposição longitudinal e 75% de sobreposição lateral. Foram usadas 300 imagens
2	2017 (Pan et al., 2017)	VANT de asa fixa	-	30m acima da superfície da estrada	Câmara multiespectral <i>Micro-Miniature Multiple Camera Array System</i> (MCA)	70% de sobreposição longitudinal e lateral. Foram usadas 126 imagens
3	2018 (Pan et al., 2018)	Hexacóptero	-	25m acima da superfície da estrada	Câmara multiespectral <i>Micro-Miniature Multiple Camera Array System</i> (MCA)	70% de sobreposição longitudinal e lateral. Foram usadas 201 imagens (para 500m de extensão)
4	2019 (Tan & Li, 2019)	Quadricóptero Phantom 4 Pro	Pode voar de 20 a 30 min com uma velocidade máxima de 20m/s (72km/h)	15m acima da superfície da estrada	Câmara com 1-polegada 20-MP complementada com um sensor CMOS de 20MP de uma polegada e distância focal de 8.8mm	Ângulo vertical (90°) de captação de imagem. 80% de sobreposição longitudinal e 50% de sobreposição lateral
5	2019 (Wang et al., 2019)	-	-	-	Filtro bilateral	-
6	2019 (Huang et al., 2019)	Quadricóptero DJI Matrice 1002	-	-	Câmara estéreo Intel RealSense D435i1, sensor SLAM (<i>simulation localization and mapping</i>), sensor DJI N3 GPS4	Foram usadas 26372 pares de imagens
7	2020 (Silva et al., 2020)	Quadricóptero DJI Mavic Air 2	Tempo máximo de 34 min	60m, 70m e 90m acima da superfície da estrada	Câmara digital 4K capaz de tirar fotos de 48MP	Foram usadas 568 imagens
8	2020 (Romero-Chambi et al., 2020)	Quadricóptero Phantom 4 Pro	-	10 a 15 m para a medição da largura e profundidade de covas. A pesquisa analisou dados de voos efetuados até uma altura de 40m acima da superfície da estrada	-	Foram incorporadas fotografias oblíquas num conjunto de fotografias verticais (90°); combinou-se os casos de: 90°, 90° - 80°, 90° - 70°, 90° - 60°, 90 -45°. 75% de sobreposição longitudinal e 60% de sobreposição lateral
9	2020 (Garilli et al., 2020)	Quadricóptero DJI Phantom 4 Pro	-	-	Sensor CMOS de 20MP de uma polegada e distância focal de 8.8mm	Foram usadas 194 imagens
10	2021 (Congress et al., 2021)	Quadricóptero VANT-CRP	-	-	Light Detection and Ranging (LiDAR)	80% de sobreposição longitudinal e 60% de sobreposição lateral
11	2021 (Nappo et al., 2021)	Quadricóptero DJI Phantom4 PRO	Aproximadamente 28 min	10m acima da superfície da estrada	Synthetic Aperture Radar (InSAR)	80% de sobreposição longitudinal e lateral
12	2021 (Zhu et al., 2021)	Hexacóptero DJI M600 Pro com <i>gimbal</i> de 3 eixos para transporte da câmara.	-	30m acima da superfície da estrada (mín 26m)	Digital câmara Sony Alpha 7R III	Ângulo vertical (90°) de captação de imagem. 75% de sobreposição longitudinal e 60% de sobreposição lateral. Foram usadas 3151 imagens
13	2022 (Kaamin et al., 2022)	Micro VANT	-	30m acima da superfície da estrada	Aplicativo Pix4Dcapture instalado em um smartphone	Foram usadas 728 imagens
14	2022 (Zhong et al., 2022)	-	-	Altura mínima de voo de 26m para cobrir o trecho de duas faixas de rodagem com seis vias	Câmara digital Sony Alpha 7R III	Ângulo vertical (90°) de captação de imagem. 75% de sobreposição longitudinal e lateral. Foram usadas 3151 imagens
15	2022 (Maslan & Cicmanec, 2021)	Quadricóptero DJI Mavic 2 Enterprise Dual	Tempo máximo de 31 min	15 a 50m acima da superfície da estrada. A altura de voo que resulta em imagens mais detalhadas é de 32m, com a pista dividida em quatro secções de 600m de comprimento e 60m de largura	Sensor CMOS de 1/2.3" e câmara térmica com um sensor microbolômetro Vox não resfriado	Ângulo vertical (90°) de captação de imagem. 80% de sobreposição longitudinal e 70% de sobreposição lateral. Campo de visão de 57°

Tabela 4. 3. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Processamento de imagens e conclusões principais – Parte 1.

ID do artigo	Ano e citação	Processamento de imagem (Modelo)	Precisão do modelo	Resolução da imagem e resolução espacial das medições (variação com a medição real)	Conclusões principais
1	2016 (Zhang et al., 2016)	Triangulação aérea (AT), também conhecido como SfM (Structure from Motion), usado para processar o HSR-Ap e gerar ortofotos em mosaico GSD milimétricos e modelos digitais de superfície (DSMs), para a avaliação padronizada de patologias horizontais e verticais. O software selecionado foi o Agisoft Photoscan	-	Distância de amostragem do solo de 0.002m/pixel	A pesquisa conclui que as ortofotos e DSMs gerados a partir do HSR-AP adquiridos do S-UAS detalham efetivamente degradações no pavimento, com as taxas de detalhamento de degradações estatisticamente diferentes das medidas levantadas manualmente apenas de 5%. Os autores destacaram o fato de que a avaliação manual é subjetiva enquanto a técnica usada no estudo é objetiva. O tempo de inspeção é menor, sendo que para uma inspeção tradicional de um pavimento de 8m x 6m exigiria três inspetores que levariam cerca de 20 minutos, e com a técnica proposta exige apenas um inspetor e um tempo de inspeção de cerca de 10 minutos. Concluem ainda que os custos também são acessíveis (custo de aquisição dos S-UAS) e que as técnicas de sensoriamento remoto utilizadas podem ser prontamente adotadas para a avaliação detalhada do estado da superfície do pavimento.
2	2017 (Pan et al., 2017)	Utilizaram quatro algoritmos populares de aprendizagem supervisionada: <i>K-Nearest Neighbours</i> (KNN), Support Vector Machine (SVM), <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) e Random Forest (RF)	O algoritmo ANN foi o melhor modelo para classificar as degradações do pavimento, com uma precisão de 98.81%	1 pixel 13.54x13.54mm	A pesquisa concluiu que os quatro algoritmos utilizados para identificar degradações no pavimento possuem uma alta precisão, sendo todos acima de 98%. O algoritmo que atingiu maior desempenho foi o RF, que teve maior precisão de classificação e tempo de execução mínimo (0,65s).
3	2018 (Pan et al., 2018)	O software Pix4D foi usado para criar o mosaico a partir das imagens recolhidas. Foram usados 14 pontos de controle (precisão 0.05m) para retificar a distorção do mosaico. Foram utilizados os algoritmos de <i>machine learning</i> SVM, ANN e RF para identificar as degradações do pavimento	O algoritmo RF foi o melhor modelo para classificar as degradações do pavimento, com uma precisão de 98.83%	1 pixel 13.54x13.54mm	A pesquisa conclui que a utilização do VANT com MSI (imagens multiespectrais) melhora a precisão de classificação para caracterizar as feições espectrais detalhadas dos objetos, conseguindo uma precisão de 98,3% na detecção de degradações no pavimento. Concluiu também que as características espaciais (textura e geometria) contribuem mais para a precisão da detecção de fendas e covas do que as espectrais para RGB e MSI de 12 bandas. As imagens do pavimento obtidas com o VANT não foram capazes de capturar fendas com abertura inferior a 13,54mm, devido às limitações de resolução espacial. Em trabalhos futuros, imagens de maior resolução devem ser obtidas para aumentar a precisão da avaliação das condições do pavimento.
4	2019 (Tan & Li, 2019)	SfM (Structure from Motion). Modelo 3D derivado de imagens verticais e oblíquas para reduzir o efeito "bowling". Software de fotogrametria Pix4Dmapper para criação do modelo 3D	O Pix4Dmappe teve uma boa precisão para o ponto de verificação com uma distância média de erro 3D para os pontos de controle de 15.4 mm	1pixel=2.34x1.98µm Resolução de 5472 x 3648 pixels (20MP)	A pesquisa conclui que o método utilizado identifica de forma precisa locais degradados nos pavimentos rodoviários, o erro da dimensão altura/profundidade foi centimétrico, o que indica que se trata de um método promissor para ser aplicado na prática.
5	2019 (Wang et al., 2019)	Estrutura de tensor tipo bola, tensor bastão	O método apresenta boa precisões, sendo 89.1% de correção e 88.7% de integridade	1pixel=2x2mm Resolução de 2048 x 1536 pixels	A pesquisa conclui que o método estudado pode ser aplicado para detecção do fendilhamento em pavimentos betuminosos e de betão, o método é independente do tamanho e do tipo de fendilhamento e é robusto para diferentes interferências e condições de imagem.
6	2019 (Huang et al., 2019)	Odometria visual Modelo 3D	-	Resolução de 1696 x 480 pixels para 30fps	A pesquisa conclui que o sistema de mapeamento de pavimentos utilizado é mais preciso que os de última geração.
7	2020 (Silva et al., 2020)	You Only Look Once (YOLO) YOLOv4, Sistema multiagente PANGEA	A plataforma atingiu uma precisão de 95% no nível de detecção de degradações	Resolução de 3840 x 2160 pixels	A pesquisa conclui que o método utilizado é uma boa opção para inspeção de pavimentos, é objetivo e economiza tempo, custo e mão de obra. Não houve variação nos resultados obtidos pelo algoritmo preditivo entre imagens obtidas a 70m e a 90m, também foram invariáveis independentemente da velocidade do VANT, que foi de 15 a 25km/h. A arquitetura multiagente PANGEA permitiu a paralelização do trabalho de acordo com os requisitos da plataforma a qualquer momento, adaptando-se às necessidades do contexto.
8	2020 (Romero-Chambi et al., 2020)	Structure from Motion-MultiView Stereo (SfM-MVS), modelos 3D	A 10m: erro planimétrico de 0.5 a 1.4% e erro altimétrico de 5 a 10%. A 15m: erro planimétrico de 0.7 a 2% e erro altimétrico de 8.6 a 13.7%	Resolução de 5472 x 3648 pixels (20MP). Distância de amostragem do solo de 1.07cm/pixel	A pesquisa conclui que a incorporação de fotografias oblíquas em um conjunto de fotografias não garante a redução significativa do erro. A pesquisa se concentrou na avaliação do erro para diferentes combinações de altura e sobreposição com o ângulo vertical de aquisição de foto.
9	2020 (Garilli et al., 2020)	Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), software QGIS e o método Convolutional Neural Network (CNN)	O método CNN foi o melhor modelo com uma precisão de 95.4%	Resolução de 5472 x 3648 pixels. Distância de amostragem do solo de 2mm/pixel. Os melhores resultados foram obtidos com a divisão em imagens menores de 128 x 128 pixels	A pesquisa conclui que a classificação utilizando CNN é uma abordagem flexível e eficiente, ela requer uma etapa de treinamento cuidadosamente planejada e provavelmente mais demorada que outras técnicas, mas fornece melhores resultados e um alto nível de confiabilidade. A análise apresentou bons resultados em pavimentos de pedra constituídos por cubos de pedra. A classificação U-Net CNN provou não ser afetada pela influência das condições de iluminação e sombras, não precisando de pré-processamento de imagem, essa classificação a partir de imagens obtidas por VANT se mostrou uma boa alternativa para a inspeção de pavimentos de pedra e pode ser utilizada para outros tipos de pavimentos.

Tabela 4. 4. Estudos sobre a inspeção de pavimentos com a utilização de tecnologia VANT: Processamento de imagens e conclusões principais – Parte 2.

ID do artigo	Ano e citação	Processamento de imagem (Modelo)	Precisão do modelo	Resolução da imagem e resolução espacial das medições (variação com a medição real)	Conclusões principais
10	2021 (Congress et al., 2021)	Fotogrametria de curto alcance (CRP), usando o software fotogramétrico SfM (Structure from Motion), Modelo 3D	-	-	A pesquisa conclui que o VANT com voos de sobreposição e a baixa altitude alcançam bons resultados, assim como um plano de voo autônomo facilita a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados dos dados. O mapeamento aéreo com essa tecnologia permite a integração de dados de monitoramento no gerenciamento de ativos da rede rodoviária. A utilização do conjunto de imagens e modelos 3D para definir informações longitudinais e transversais reduz significativamente os custos de inspeção em comparação com levantamentos tradicionais. Como o tráfego não estava parado foi necessário eliminar as imagens com veículos para poder obter o perfil real da superfície da estrada.
11	2021 (Nappo et al., 2021)	Fotogrametria digital baseada em VANT, modelo 3D construído com Structure from Motion (SfM)	-	Resolução de 5472 x 3078 pixels. Distância de amostragem do solo de 0,37cm/pixel	A pesquisa conclui que o procedimento baseado na combinação 3D e produtos fotogramétricos 2D recuperados de imagens VANT, permitiu detectar e classificar com sucesso fendas longitudinais e transversais com abertura superior a 1cm em estradas afetadas por deslizamentos de terra. O VANT Phantom4 PRO se mostrou adequado para a inspeção de estradas com custo relativamente baixo, no entanto, deve ser considerado que a estrada analisada era interurbana, apresentando menos restrições de voo. A aplicabilidade do procedimento a outras infraestruturas pode implicar diferentes alturas de voo para respeitar regulamentos locais.
12	2021 (Zhu et al., 2021)	Foram usados três algoritmos/métodos para classificação automática das degradações a partir das imagens: Faster R-CNN, YOLOv3 e YOLOv4	O Faster R-CNN apresentou uma precisão média menor que 50%, o YOLOv4 uma precisão média de 53,3% e o YOLOv3 uma precisão média de 56,62%	Resolução de 7952 x 5304 pixels. Com recursos computacionais limitados, as imagens em grande escala foram divididas em imagens menores de 512 x 512 pixels	A pesquisa conclui que o uso de VANT é uma boa opção para coletar imagens de seções do pavimento. O algoritmo que apresentou melhor desempenho no processamento das imagens foi o YOLOv3 que é robusto no reconhecimento do fendilhamento em diferentes ambientes, incluindo na presença de sombras, árvores e marcações no pavimento. Aumentar a precisão da detecção com base em imagens VANT e a avaliação do nível de gravidade das degradações são apontados como trabalhos futuros.
13	2022 (Kaamin et al., 2022)	Software Pix4Dmapper para produzir ortomosaicos e o Modelo Digital de Superfície (DSM) do pavimento, no qual um operador identifica as degradações e mede as suas características no Global Mapper software	-	-	A pesquisa conclui que a utilização de VANT na inspeção de pavimento é uma boa opção que simplifica a coleta e análise de dados, economizando tempo e energia.
14	2022 (Zhong et al., 2022)	W-segnet, arquitetura de rede	Precisão de classificação média de pixels (MPA) de 87,52% e uma interseção média sobre união (MioU) de 75,88%, superando outros modelos de última geração	Resolução de 7952 x 5304 pixels. Distância de amostragem do solo de 4mm/pixel.	A pesquisa conclui que o modelo W-segnet é robusto para vários tipos de segmentação de degradações de pavimentos, com maior velocidade de inferência, beneficiando-se de fusões de características em várias escalas. Os autores concluem ainda que o VANT é um meio econômico para coletar imagens de pavimentos e estabelecer uma plataforma de aquisição de imagens leve e rápida. O modelo W-segnet com a utilização de VANT é, portanto, uma opção viável.
15	2022 (Maslan & Cicmanec, 2021)	Agisoft Metashape Professional Edition	-	Resolução de 4056 x 2280 pixels. Distância de amostragem do solo de 1,08 cm/pixel	A pesquisa conclui que a altura de voo que alcança as imagens mais detalhadas é de 32m, como a pista dividida em quatro seções de 600m de comprimento e 60m de largura, com uma sobreposição frontal de 80% e uma sobreposição lateral de 70%. No entanto, esses parâmetros de voo apenas conseguem distinguir fendas de 3,24cm de abertura, o que não cumpre com os requisitos iniciais da pesquisa, isto é, identificar fendas com 1cm de abertura. Imagens mais detalhadas são possíveis com uma altura de voo de 12m acima do solo, no entanto, a pista teria de ser dividida em mais seções, e seria necessário mais tempo de voo.

As degradações mais comuns estudadas foram as covas e o fendilhamento, no entanto, os estudos mais recentes já consideram um número de degradações mais alargado, como por exemplo: reparações, pele de crocodilo, exsudação, depressões, elevações, sulcos, deformações, fratura de blocos de pedra e ondulações. Para a inspeção do pavimento e levantamento de dados existe uma preferência pela utilização de VANT de porte pequeno, geralmente do tipo quadricóptero, sendo o mais usado o DJI Phantom 4Pro, seguido pelo DJI Mavic Air 2. Também foram usados VANT de asa fixa, hexacópteros e um balão meteorológico de hélio. Esses veículos estão equipados com câmaras e/ou sensores que realizam a captação das imagens a partir das quais é efetuada a identificação das degradações presentes na superfície dos pavimentos. As autonomias das baterias utilizadas por estes equipamentos permitem em geral tempos de voo entre 20 e 30 min. Foram realizados voos de diferentes alturas ao longo das pesquisas, concluindo-se que a altura de voo mais frequente está compreendida entre 15 a 30m em relação à superfície do pavimento. Alturas de voo mais elevadas captam em geral imagens de pouca precisão, não sendo possível determinar todas as degradações e níveis de gravidade existentes. Para alturas de voo mais baixas o detalhe e a precisão melhoram, mas verificam-se problemas com o sinal GPS devido à presença de obstáculos e, é necessário realizar os voos de forma manual, tornando o procedimento mais demorado.

É ainda em geral necessário um alto grau de sobreposição das imagens para que se possa produzir corretamente modelos 3D e observar a geometria completa do pavimento. A maioria dos estudos analisados utilizam uma sobreposição lateral de 60 a 70% e uma sobreposição longitudinal de 75 a 80%. Para se obter as imagens, o VANT sobrevoa em um padrão determinado a uma altura estável, fazendo um bloco de fotografias em linha de voos paralelos com sobreposição constante e ângulo de captação de imagem vertical (90°).

Para o processamento de imagens as técnicas variam, sendo em geral utilizando softwares de reconstrução 3D, com uso de fotogrametria e técnicas de processamento de dados como SfM, assim como de classificação automática como o YOLO, RF, ANN, KNN, SVM Pix4Dmapper, entre outros. Os modelos analisados apresentam em geral boas precisões de classificação de degradações, conseguindo atingir os resultados esperados. No que diz respeito à resolução das imagens recolhidas e à precisão das medições, a resolução foi avaliada em função dos parâmetros de calibração das câmaras utilizadas e da altura de voo, com valores que variam entre 1696x480 e 7952x5304 pixéis. No que respeita à resolução espacial, esta é em geral centimétrica, com identificação de dimensões mínimas de degradações da ordem de 1 a 5cm (geralmente associado à identificação da abertura de fendas). A distância de amostragem do solo em cm/pixel ou mm/pixel, distância entre os centros de dois pixels adjacentes medida no objeto observado, varia entre 0.4 e 1.08cm. Quanto maior for o valor da distância de amostragem do solo da imagem, menor será a resolução espacial e menos detalhes serão visíveis.

No geral os estudos conseguiram alcançar os requisitos que se pretendiam inicialmente, apesar de alguns terem tido dificuldades para identificar degradações de menores dimensões (níveis de gravidade baixos). Tendo em conta que a diferença da taxa de detalhamento das degradações observadas com a utilização de VANT serem pouco significativas para níveis de gravidade médio e alto em comparação com as técnicas tradicionais (a pé), existe um consenso entre os autores que concluem que em comparação com a inspeção tradicional, a inspeção de pavimentos com a tecnologia VANT reduz os custos de inspeção e economiza tempo e mão-de obra, sendo também uma técnica mais objetiva em relação ao levantamento visual realizado a pé. Apesar da maioria das pesquisas serem feitas em pavimentos flexíveis rodoviários, os estudos

demonstram que as técnicas utilizadas podem se estender para outros tipos de pavimentos e infraestruturas de transporte.

Baseado na análise efetuada à literatura da especialidade, em especial aos estudos apresentados nas tabelas 4.1 a 4.4, a tabela 4.5 apresenta um conjunto de requisitos a ter em conta na auscultação de pavimentos com a utilização de veículos aéreos não tripulados.

Tabela 4. 5. Requisitos a ter em conta na inspeção de pavimentos com recurso a VANT.

Atributos	Requisitos
Degradações	É necessário identificar na imagem a dimensão planimétrica e altimétrica mais pequena considerada no catálogo de degradações adotado. Por exemplo, para a determinação do PCI (ASTM D6433 - 18, 2018) em pavimentos flexíveis: Fendas longitudinais e transversais de largura mínima de 10mm; Rodeiras com profundidade de 6mm.
Condições climáticas	O levantamento de dados com VANT não deve ser efetuado em casos de chuva, neve, calor intenso ou humidade.
Tipo de VANT	VANT de pequeno porte (quadricóptero ou hexacóptero).
Altura de voo	Entre 15 e 30m. Alturas menores permitem detalhamento ao milímetro.
Autonomia de voo	Aproximadamente 30 minutos (por bateria)
Câmeras / Sensores	Câmaras digitais de alta resolução, geralmente acompanhadas de um sensor(ex: CMOS de 20MP e a tecnologia LiDAR).
Ângulo de aquisição de imagens	Ângulo vertical (90°).
Taxa de sobreposição das imagens	Sobreposição lateral de 60 a 70% e sobreposição frontal de 75 a 80%
Recursos Humanos	No mínimo 2 pessoas
Pontos de Controlo	Devem ser identificados ao longo da estrada marcas estáveis com características geográficas conhecidas, utilizando-os como pontos de controlo de solo (GCPs – <i>ground control points</i>) que auxiliam a modelagem 3D e a extração de características do pavimento.

Com a verificação dos requisitos necessários para a utilização do VANT definidos, é possível apresentar um sistema satisfatório para a inspeção de pavimentos e análise de dados levantados. Tendo em conta as medidas mínimas necessárias das degradações que devem ser visualizadas na construção dos modelos 2D e 3D das imagens captadas,

para se ter resultados satisfatórios dos índices de qualidade do pavimento, é recomendada a utilização de VANTs de pequeno porte. As operações de auscultação devem ser programadas tendo em conta a autonomia de voo máxima dos equipamentos, que é de cerca de 30 min por bateria (por vezes os equipamentos usam mais de uma bateria por carga). Os voos devem ser feitos em condições climáticas favoráveis, com captação de imagens na vertical e as alturas de voo devem respeitar os regulamentos em vigor nos locais de inspeção e o grau de detalhamento desejado. Para ajudar na construção dos modelos 2D e 3D da superfície do pavimento, nomeadamente na calibração dos modelos, devem ser considerados pontos de controlo fixos existentes na estrada.

5. Caso de Estudo

5.1. Enquadramento

No presente capítulo será desenvolvido um caso de estudo usando os dados recolhidos com VANT numa secção da estrada N18, localizado no Fundão, Portugal (ver Figura 5.1). Os modelos 3D criados com as imagens recolhidas foram processados no software Agisoft Metashape, e já se encontravam disponíveis, tendo-se utilizado o software Agisoft Viewer para efetuar as medições de comprimentos, profundidade, áreas e volumes necessários para caracterizar as degradações do pavimento. A área do trecho estudado é de 179,2 m² e o equipamento utilizado foi um quadricóptero Mavic 2 Pro que oferece uma autonomia de voo de 20 minutos e se encontra equipado com uma câmara com resolução de 5472×3648 pixéis. Com o equipamento descrito foram realizados vários levantamentos com diferentes alturas de voo, nomeadamente 3m, 10m e 20m. Para garantir a precisão dos modelos 3D foram estabelecidos pontos de controle *in situ*. No presente estudo foram tratados os dados recolhidos a 3m e 20m de altura para avaliar o nível de detalhes alcançados desses dois levantamentos. A Figura 5.2 ilustra dois momentos da operação de levantamento efetuada com o VANT.



Figura 5. 1. Imagem da secção da estrada N18 - trecho estudado. Fonte: Google Earth



Figura 5. 2. Operação de levantamento com o VANT no trecho estudado.

Como referido anteriormente, alturas mais baixas permitem captar imagens com um grau de detalhe das degradações mais elevado, no entanto é necessário operar o VANT manualmente. Para voos efetuados a alturas mais elevadas é possível definir uma rota de voo automática, além de ser mais seguro, uma vez que evita obstáculos fixos como árvores e postes de iluminação, no entanto as imagens captadas apresentam menor detalhe das degradações presentes na superfície do pavimento. Nas Figuras 5.3 e 5.4 é apresentado um extrato dos modelos 3D do pavimento estudado, construídos com as imagens captadas para alturas de voo de 3m e 20m respetivamente.

Com o intuito de garantir uma precisão de medição elevada no programa utilizado, foram considerados alguns pontos de referência, os quais foram medidos no Agisoft Viewer para as duas alturas de voo e comparados com as medidas reais. Em seguida foram calculados os índices PSI e PCI com os dados levantados a 3m e 20m e comparados entre si para determinar se existe uma diferença significativa nos resultados alcançados com imagens capturadas a diferentes alturas.

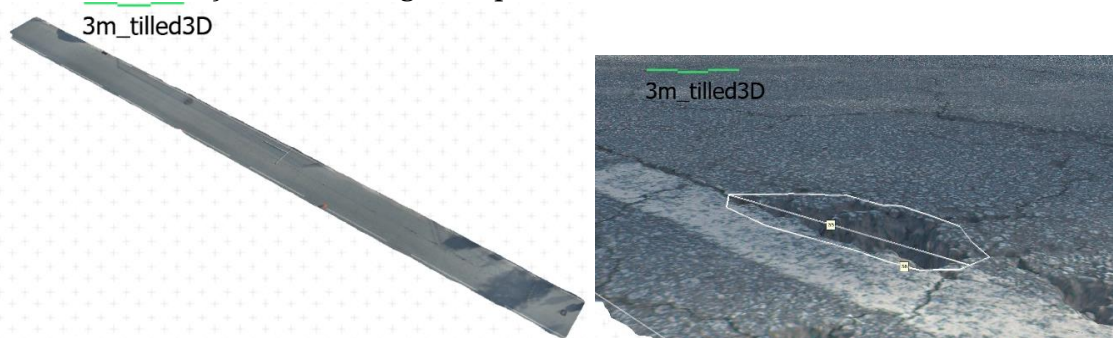


Figura 5. 3. a) À esquerda mostra o modelo 3D construído no Agisoft Viewer a partir das imagens captadas a 3m de altura. b) À direita mostra o pormenor do modelo 3D (3m)



Figura 5. 4. a) À esquerda mostra o modelo 3D construído no Agisoft a partir das imagens captadas a 20m de altura. b) À direita mostra o pormenor do modelo 3D (20m)

5.2. Critérios de identificação e medição das degradações

Para o cálculo dos índices PSI e PCI, as degradações foram identificadas e medidas de acordo com os catálogos de degradações adotados para avaliação da Rede Rodoviária de Lisboa (B. Santos, 2002) e com a norma ASTM D6433- 18 (ASTM D6433 - 18, 2018) respetivamente. A Tabela 5.1 apresenta os três níveis de gravidade que devem ser considerados para cada degradação no cálculo do PSI. Ao analisar o pavimento

rodoviário no Agisoft Viewer, de acordo com a Tabela 5.1, foram identificados quatro tipos de degradações: fendilhamento com os três níveis de gravidade, pele de crocodilo do nível 3 de gravidade, covas com os três níveis de gravidade e reparações do nível 3 de gravidade.

Tabela 5. 1. Degradações, níveis de gravidade e valores a adotar no cálculo do PSI (B. Santos, 2002)

Degradação	Níveis de Gravidade	Descrição do Nível de Gravidade	Área afetada/valor a adotar
Fendilhamento	Nível 1	Fenda isolada	0,5 x comprimento afetado
	Nível 2	2mm < Fenda ramificada com abertura < 4mm	2,0 x comprimento afetado
	Nível 3	Fenda ramificada com abertura > 4mm	Largura do trecho x comprimento afetado
Pele de Crocodilo	Nível 1	Fendas com abertura < 2mm e malha > 20cm	Largura do trecho x comprimento afetado
	Nível 2	Fendas com abertura < 2mm e malha < 20cm, ou fendas com abertura entre 2 e 4mm, ou fendas com abertura > 4mm e malha > 40cm	Largura do trecho x comprimento afetado
	Nível 3	Fendas com abertura > 4mm e malha < 40cm	Largura do trecho x comprimento afetado
Peladas	Nível 1	Peladas com largura < 30cm	0,5 x comprimento afetado
	Nível 2	30cm < Peladas com largura < 100cm	2,0 x comprimento afetado
	Nível 3	Peladas com largura > 100cm	Largura do trecho x comprimento afetado
Covas (Ninhos)	Nível 1	Profundidade máxima da cavidade < 2cm	0,5 x comprimento afetado
	Nível 2	2cm < Profundidade máxima da cavidade < 4cm	2,0 x comprimento afetado
	Nível 3	Profundidade máxima da cavidade > 4cm	Largura do trecho x comprimento afetado
Reparações	Nível 1	Reparações bem executadas	1/4 da largura do trecho x comprimento afetado
	Nível 2	Reparações com baixa qualidade de execução ou má elaboração das juntas	1/2 da largura do trecho x comprimento afetado
	Nível 3	Reparações mal executadas	Largura do trecho x comprimento afetado
Rodeiras	Nível 1	Profundidade máxima da rodeira < 10mm	10mm
	Nível 2	10mm < Profundidade máxima da rodeira < 30mm	30mm
	Nível 3	Profundidade máxima da rodeira > 30mm	50mm
Irregularidade longitudinal	Nível 1	Utilizador não sente vibrações quando se desloca num veículo ligeiro	IRI = 2000mm/km
	Nível 2	Pequenas vibrações são sentidas pelo utilizador ocasionalmente quando se desloca num veículo ligeiro	IRI = 3500mm/km
	Nível 3	Pequenas vibrações em quase toda a extensão e/ou grandes vibrações são sentidas ocasionalmente pelo utilizador quando se desloca num veículo ligeiro	IRI = 5500mm/km

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam as degradações e os respetivos níveis de gravidade a considerar no cálculo do PCI (L - *low* (baixo), M - *médium* (médio) e H - *high* (alto)). No trecho analisado, foram identificados quatro tipos de degradações: pele de crocodilo com os níveis M e H, fendilhamento longitudinal e transversal com os níveis L e M, reparações com nível H e covas com os níveis L, M e H.

Tabela 5. 2. Degradações, níveis de gravidade e modo de medição a adotar no cálculo do PCI (ASTM D6433 - 18, 2018) – Parte 1

Degradação	Nível de gravidade	Descrição do nível de gravidade	Como medir
1. Pele de Crocodilo (<i>Alligator Cracking</i>)	L	Fendas longitudinais finas paralelas umas às outras sem, ou apenas com algumas fendas interconectadas. As fendas não apresentam bordos desagregados.	Área da superfície em m ²
	M	Evolução das fendas de crocodilo do nível L para um padrão ou rede de fendas que podem apresentar bordos levemente desagregados.	
	H	Interconexão das fendas com peças bem definidas apresentando bordos desagregados. Algumas das peças podem movimentar-se sob a ação do tráfego.	
2. Exsudação (<i>Bleeding</i>)	L	Ocorre em um grau muito leve e é perceptível apenas durante alguns dias do ano. O betume asfáltico não adere ao calçado ou aos pneus dos veículos.	Área da superfície em m ²
	M	Ocorre quando o betume asfáltico adere ao calçado e aos pneus dos veículos, verificando-se ao longo de algumas semanas do ano.	
	H	Ocorre quando o betume asfáltico adere sistematicamente ao calçado e aos pneus dos veículos, verificando-se ao longo de várias semanas do ano.	
3. Fendas cruzadas – formando blocos (<i>Block cracking</i>)	L	Os blocos são definidos por fendas de baixa severidade.	Área da superfície em m ²
	M	Os blocos são definidos por fendas de média severidade.	
	H	Os blocos são definidos por fendas de alta severidade.	
4. Alteamentos e abatimentos (<i>Bumps and Sags</i>)	L	Alteamentos e abatimentos com baixa influência na qualidade de condução.	Comprimento em m
	M	Alteamentos e abatimentos com influência média na qualidade de condução.	
	H	Alteamentos e abatimentos com elevada influência na qualidade de condução.	
5. Ondulação (<i>Corrugation</i>)	L	Ondulações com baixa influência na qualidade de condução	Área da superfície em m ²
	M	Ondulações com influência média na qualidade de condução	
	H	Ondulações com elevada influência na qualidade de condução	
6. Depressões (<i>Depression</i>)	L	Profundidade da depressão: 13 a 25 mm	Área da superfície em m ²
	M	Profundidade da depressão: 25 a 50mm	
	H	Profundidade da depressão: superior a 50mm	
7. Fendas de canto (<i>Edge Cracking</i>)	L	Fendas pequenas ou médias sem rotura ou escorregamento.	m – Comprimento
	M	Fendas médias com algumas roturas e escorregamento.	
	H	Separação considerável da fenda ou escorregamento ao longo da borda.	
8. Fendas de reflexão no local das juntas de pavimentos rígidos – longitudinais e transversais (<i>Join reflection cracking from PCC</i>)	L	Fendas não preenchidas com abertura inferior a 10mm ou fendas preenchidas de qualquer largura (preenchimento em condições satisfatórias).	Comprimento em m
	M	Fendas não preenchidas com abertura $\geq 10\text{mm}$ e $< 75\text{mm}$; fendas não preenchidas com abertura $\leq 75\text{mm}$ circundadas por fendas secundárias de baixa gravidade; ou fendas preenchidas de qualquer largura cercadas por fendas secundárias de baixa gravidade.	
	H	Qualquer fenda preenchida ou não preenchida circundada por fendas secundárias de média ou alta gravidade; fendas não preenchidas com abertura $> 75\text{mm}$; ou, fendas de qualquer largura onde aproximadamente uma área circundante de 100mm de pavimento apresenta sinais de desagregação ou rotura.	
9. Desnível via/berma (<i>Lane / shoulder Drop – off</i>)	L	Diferença de elevação entre o pavimento e a berma $> 25\text{mm}$ e $< 50\text{mm}$.	Profundidade em m
	M	Diferença de elevação entre o pavimento e a berma $> 50\text{mm}$ e $< 100\text{mm}$.	
	H	Diferença de elevação entre o pavimento e a berma $> 100\text{mm}$.	
10. Fendilhamento longitudinal e transversal (<i>Longitudinal and transversal cracking</i>)	L	A abertura da fenda não preenchida é $< 10\text{mm}$; ou, fenda preenchida de qualquer largura (preenchimento em condições satisfatórias).	Comprimento em m
	M	A abertura da fenda não preenchida é $\geq 10\text{mm}$ e $\leq 75\text{mm}$; a fenda não preenchida apresenta abertura $\leq 75\text{mm}$ e está cercada por fendas de baixa gravidade, aleatórias; ou, fenda preenchida de qualquer largura cercada por fendas aleatórias.	
	H	Qualquer fenda preenchida ou não preenchida cercada por fendas aleatórias de média ou alta gravidade; fendas não preenchidas com abertura $> 75\text{mm}$; ou, fendas de qualquer largura onde aproximadamente 100mm de pavimento ao redor das fendas se apresenta severamente danificado.	
11. Reparações e cortes técnicos (<i>Patchig and utility cut patch</i>)	L	A reparação está em boas condições. A qualidade de condução é classificada como sendo de baixa gravidade ou melhor.	Área da superfície em m ²
	M	A reparação está moderadamente deteriorada ou, a qualidade de condução é classificada como de gravidade média, ou ambas as situações.	
	H	A reparação está muito deteriorada ou a qualidade de condução é classificada como sendo de alta gravidade, ou ainda ambas as situações. É necessário substituir a reparação com brevidade.	

Tabela 5. 3. Degradações, níveis de gravidade e modo de medição a adotar no cálculo do PCI (ASTM D6433 - 18, 2018) – Parte 2

Degradação	Nível de gravidade	Descrição do nível de gravidade	Como medir
12. Polimento de agregados (<i>Plished aggregate</i>)	L	Não são definidos níveis de gravidade. No entanto, o grau de polimento deve ser claramente evidente na unidade de amostra, devendo a superfície deve ser lisa ao toque.	Área da superfície em m ²
	M		
	H		
13. Covas (<i>Potholes</i>)	L	Profundidade máxima entre 13 a <= 25mm com diâmetro médio de 100 a 200mm; ou profundidade máxima entre > 25 e <= 50mm com diâmetro médio de 100 a 200mm; ou profundidade entre 13 a <= 25mm com diâmetro médio de 200 a 450mm.	Conta-se o n ^o de severidade L, M e H e as anota separadamente.
	M	Profundidade máxima > 50mm com diâmetro médio de 100 a 200mm; ou profundidade máxima entre > 25 a <= 50mm com diâmetro médio de 200 a 450mm; ou profundidade máxima > 50mm com diâmetro médio de 200 a 450mm; ou profundidade máxima entre 13 a <= 50mm com diâmetro médio de 450 a 750mm.	
	H	Profundidade máxima entre > 25 e <= 50mm com diâmetro médio de 450 a 750mm; ou profundidade máxima > 50mm com diâmetro médio de 450 a 750mm.	
14. Passagem de nível (<i>Railroad Crossing</i>)	L	Baixa influência da qualidade de condução.	Área da superfície em m ² . Se a passagem de nível não afetar a qualidade de condução, não deve ser contabilizada.
	M	Influência média da qualidade de condução.	
	H	Elevada influência na qualidade de condução.	
15. Rodeiras (<i>Rutting</i>)	L	Profundidade da rodeira compreendida entre 6 a 13mm.	Área da superfície em m ²
	M	Profundidade da rodeira compreendida entre 13 a 25mm.	
	H	Profundidade da rodeira superior a 25mm.	
16. Escorregamento (<i>Shoving</i>)	L	Baixa influência da qualidade de condução	Área da superfície em m ²
	M	Influência média da qualidade de condução.	
	H	Elevada influência na qualidade de condução.	
17. Fendas em forma de “meia-lua” (<i>Slippage cracking</i>)	L	Abertura média da fenda <10mm	Área da superfície em m ² É classificada de acordo com o maior nível de gravidade da área.
	M	Abertura média da fenda ≥10 e ≤40mm; ou área ao redor da fenda moderadamente desagregada ou cercada por fendas secundárias.	
	H	Abertura média da fenda >40mm; ou área ao redor da fenda está desagregada em pedaços facilmente removíveis.	
18. Empolamento (<i>Swell</i>)	L	Baixa influência da qualidade de condução Uma ondulação de baixa gravidade nem sempre é fácil de identificar, mas pode ser detetada dirigindo no limite de velocidade sobre a seção do pavimento em análise.	Área da superfície em m ²
	M	Influência média da qualidade de condução.	
	H	Elevada influência na qualidade de condução.	
19. Desagregação superficial do agregado em misturas betuminosas densas (<i>Raveling</i>)	L	–	Área da superfície em m ²
	M	Perda considerável de agregado graúdo, superior a 16,7 m ² ; ou ausência de aglomerado de agregados graúdo (ou ambos)	
	H	Superfície muito áspera e esburacada, em alguns lugares pode ser completamente removida	
20. Desagregação superficial da mástique (<i>Weathering</i>)	L	A superfície asfáltica começa a apresentar sinais de envelhecimento que podem ser acelerados pelas condições climáticas. A perda da matriz de agregado miúdo é perceptível e pode ser acompanhada pelo desbotamento da cor do asfalto. As bordas dos agregados grossos começam a ficar expostos (menos de 1mm). O pavimento pode ser relativamente novo (seis meses de idade).	Área da superfície em m ²
	M	A perda da matriz do agregado miúdo é perceptível e as bordas do agregado graúdo foram expostas até ¼ da largura (do lado mais longo) do agregado graúdo devido à perda da matriz do agregado miúdo.	
	H	As bordas do agregado graúdo foram expostas em mais de ¼ da largura (do lado mais longo) do agregado graúdo. Há uma perda considerável de matriz de agregados finos levando a potencial ou alguma perda de agregado graúdo.	

As marcações das degradações foram efetuadas no programa Agisoft Viewer com o auxílio de ferramentas que permitem a marcação de pontos, linhas e polígonos. O programa também permite o cálculo de comprimentos, perfis, áreas e volumes com os comandos *ruler*, *measure profile* e *measure volume* respetivamente. Para organização da informação, foram criadas camadas para cada tipo de degradação e nível de gravidade identificado no tratamento dos dados (ver exemplo de camada na Figura 5.5). As medições foram realizadas tendo em conta a informação contida nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

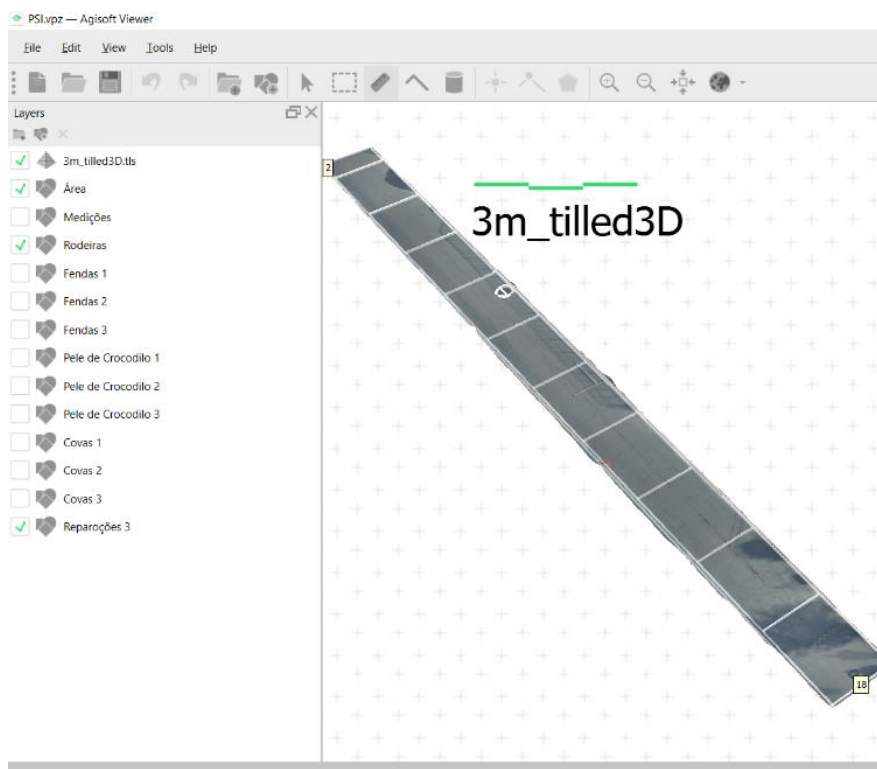


Figura 5. 5. Exemplo de camada criada no Agisoft Viewer para registo dos perfis transversais

Para validar as medições efetuadas no programa Agisoft Viewer, foram feitas medições de alguns elementos nos modelos 3D (3m e 20m) e *in situ* para comparação. Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 5.4. No Anexo I são apresentadas as imagens usadas nas medições realizadas no Agisoft Viewer para as duas alturas de voo estudadas. Da leitura da Tabela 5.4 verifica-se que as diferenças entre as medições realizadas no modelo 3D a 3m, relativamente à medição real, divergem aproximadamente em 1mm em planta e de 2-3mm em profundidade. Para as imagens captadas a 20m, esta variação é de 0 a 20mm em planta e de 2 a 8mm em profundidade.

Constata-se também que os elementos medidos com dimensões de até 5cm, possuem no modelo 3D a 3m um erro de 1 a 9% em planta e de 5 a 6% em profundidade. No modelo 3D a 20m, este erro é de 1 a 5% em planta e de 5 a 13% em profundidade. Em relação as medições que possuem dimensões maiores do que 5cm, o erro no modelo 3D em planta é de 0% nas imagens captadas a 3m, e de 0 a 2% nas imagens captadas a 20m. Não existem dimensões maiores de 5cm para medições em profundidade.

Tabela 5. 4. Comparação de medições reais com medições efetuadas no Agisoft

Elementos e dimensão medida	Medição real	Medição no modelo 3D - 3m	Diferença entre a medição real e no modelo 3D - 3m		Medição no modelo 3D - 20m	Diferença entre a medição real e no modelo 3D - 20m	
	m	m	m	%	m	m	%
Comprimento da régua	0,200	0,200	0,000	0%	0,200	0,000	0%
Largura da régua	0,015	0,015	0,000	-1%	0,015	0,000	-3%
Comprimento da mira 1 – 1m	1,000	0,999	0,001	0%	0,985	0,015	-2%
Comprimento da mira 1 – 10cm	0,100	0,100	0,000	0%	0,097	0,004	-4%
Comprimento da mira 1 – 1cm	0,010	0,009	0,001	-8%	0,010	0,000	-1%
Comprimento da mira 2 – 1m	1,000	1,000	0,000	0%	0,980	0,020	-2%
Comprimento da mira 2 – 10 cm	0,100	0,100	0,000	0%	0,093	0,007	-7%
Comprimentos da mira 2 – 1cm	0,010	0,009	0,001	-9%	0,010	0,000	-4%
Largura da mira	0,053	0,050	0,003	-6%	0,050	0,003	-5%
Profundidade da mira	0,032	0,030	0,002	-6%	0,030	0,002	-5%
Profundidade da Cova	0,059	0,056	0,003	-5%	0,051	0,008	-13%
Tampa de saneamento	0,600	0,600	0,000	0%	0,596	0,004	-1%

Nota: as imagens com as medições efetuadas são apresentadas no Anexo I.

O valor da Irregularidade Longitudinal (IRI) necessário para o cálculo do índice PSI foi efetuado segundo o descrito em (Maganinho, 2013):

IRI Nível 1: Fendilhamento \leq Nível 1, Pele de Crocodilo \leq Nível 1, Peladas \leq Nível 1, Covas \leq Nível 1 e Rodeiras \leq Nível 1.

ISI Nível 3: Fendilhamento = Nível 3, Pele de Crocodilo = Nível 3 ou Peladas = Nível 3, Covas = Nível 3 e Rodeiras \geq Nível 2.

IRI Nível 2: Situações que não se enquadram nas definições dos níveis 1 e 3.

Para a medição da Rodeira de forma tradicional existem dois métodos: “*straight edge method*” e “*taut wire method*” (Nogueira, 2015). O primeiro método consiste em colocar uma régua de um determinado comprimento ao longo do perfil transversal do trecho, em seguida determinar o valor da profundidade do cavado da rodeira medindo a distância máxima entre a régua e o ponto de referência mais baixo da rodeira. O segundo método consiste em determinar a média da profundidade máxima do cavado de rodeira de todo o perfil transversal, considerando o esticamento de um “fio” imaginário que é fixado nos pontos mais altos do perfil. A Figura 5.6 apresenta os procedimentos descritos.

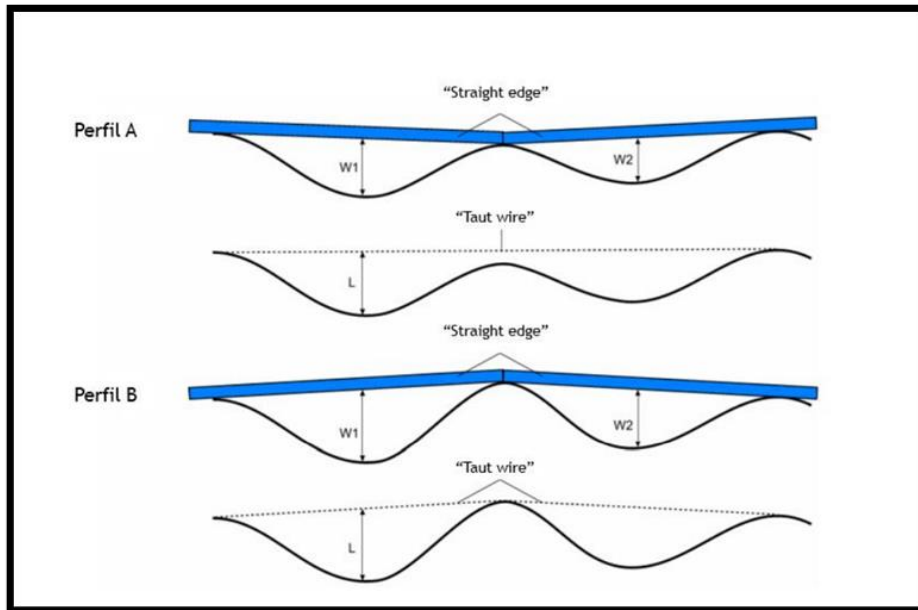


Figura 5. 6. Exemplos de medição do cavado de rodeira pelos métodos "straight edge" e "taut wire" (Nogueira, 2015).

Para determinar se existem rodeiras e determinar a sua profundidade com recurso ao software utilizado, foi simulado de forma virtual o método "taut wire". Para este efeito procedeu-se à exportação do polígono que representa os limites do trecho analisado para um programa de desenho assistido por computador (AutoCAD, no formato .dxf), o que permitiu desenhar perfis transversais de 10 em 10m. O resultado foi novamente importado para o Agisoft (formato .gpk), onde foram criados, com recurso à ferramenta *Measure profile*, os perfis que representam a variação altimétrica do pavimento em cada perfil transversal considerado.

Para facilitar a aplicação do método de medição da profundidade do cavado de rodeira os perfis altimétricos obtidos foram guardados em .dxf e analisados no AutoCAD. Traçando uma linha que une cada extremo da via foi possível simular a medição efetuada no método "taut wire" e determinar a profundidade máxima do cavado da rodeira.

Para determinar o valor da rodeira representativo do trecho a considerar no cálculo do PSI, teve-se em conta o que é indicado na norma do InIR (Disposição Normativa do InIR). Segundo esta norma, ao analisar os perfis anota-se a profundidade das rodeiras direita e esquerda, em seguida determina-se os valores correspondentes aos percentis de 5% e 95%, usando apenas os dados que se encontram dentro desse intervalo. A seguir calcula-se a média dos valores de cavado de rodeira da direita e da esquerda, por trecho; o desvio padrão, que define se existe muita dispersão de valores em relação à média; e o coeficiente de variação que é a razão entre o desvio padrão e a média multiplicado por 100%.

No Anexo II apresentam-se as medições efetuadas nos 11 perfis transversais considerados (nos programas Agisoft e AutoCAD), para as duas alturas de voo estudadas.

De seguida são apresentadas as medições e os cálculos efetuados para a determinação dos índices PSI e PCI.

5.3. Determinação do estado do pavimento

5.3.1. Determinação do *Present Serviceability Index* (PSI)

A expressão 6, apresentada no Capítulo 2, foi utilizada para determinar o PSI do pavimento no trecho analisado. As áreas das degradações presentes na superfície do pavimento foram determinadas de duas formas: pela medição das áreas das degradações no modelo 3D e pelo produto da medição da extensão da degradação, medida no modelo, pela largura indicada na tabela 5.1 de acordo com o nível de gravidade. Em ambos os cálculos o fendilhamento foi caracterizado pela medida do comprimento efetuada no modelo 3D.

A tampa de saneamento presente no trecho em análise foi considerada como uma reparação. Tendo em conta que o pavimento em redor estava bastante degradado, foi considerado um nível 3 de gravidade. Após a análise individual de cada perfil transversal concluiu-se que não existem rodeiras, apenas algumas pequenas deformações ao longo de alguns perfis. Após a análise dos níveis de gravidade das degradações do tipo fendilhamento, pele de crocodilo, covas, peladas e rodeiras, concluiu-se que a irregularidade longitudinal do trecho é de nível 2, portanto foi considerado um IRI=3500mm/km.

De seguida foram calculadas as áreas Ct (fendilhamento e pele de crocodilo), St (covas e peladas) e Pt (Reparações), e determinadas as respetivas percentagens de acordo com o valor da área total do pavimento.

As tabelas 5.5, 5.7, 5.9 e 5.11 apresentam as áreas e os comprimentos ocupados por cada degradação e as tabelas 5.6, 5.8, 5.10 e 5.12 os valores de Ct, St, Pt e PSI obtidos para as duas abordagens de medição e alturas voo (3m e 20m).

5.3.1.1. Cálculo do PSI para as alturas 3m e 20m com áreas medidas no modelo 3D

Tabela 5. 5. Áreas degradadas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 3m de altura.

Degradações identificadas	Comprimento	Nível de gravidade	Área afetada m ²
Fendilhamento	0,55	1	0,275
	0,4	1	0,200
	0,29	1	0,145
	0,66	2	1,320
	2,04	2	4,080
	1,02	2	2,040
	1,88	3	6,204
	0,45	3	1,485
	1,03	3	3,399
	2,64	3	8,712
	1,13	3	3,729
	1,2	3	3,960
Pele de Crocodilo	-	3	1,477
	-	3	60,814
	-	3	41,904
	-	3	24,307
	-	3	3,000
Covas	-	1	0,006
	-	2	0,040
	-	2	0,056
	-	2	0,0379
	-	2	0,010
	-	3	0,043
	-	3	0,011
Reparações	-	3	0,671
Irregularidade Longitudinal (IRI) (mm/km)	-	2	3500

Tabela 5. 6. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 3m de altura.

Degradações	Área total degradada (m ²)	Área total degradada (%)
Ct: Fendilhamento e Pele de Crocodilo	167,0510	93,21
St: Covas e Peladas	0,2032	0,11
PT: Reparações	0,6709	0,37
(Ct+St+Pt)		93,70
Rt: Rodeiras (mm)		0,000
PSI		1,95

Tabela 5. 7. Áreas degradadas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 20m de altura.

Degradações identificadas	Comprimento	Nível de gravidade	Área afetada m²
Fendilhamento	0,18	1	0,090
	0,6	2	1,200
	0,7	2	1,400
	0,8	2	1,600
	1,04	3	3,432
	0,5	3	1,650
	1,49	3	4,917
	2,3	3	7,590
	0,75	3	2,475
Pele de Crocodilo	1,3	3	4,290
	-	3	1,118
	-	3	43,343
	-	3	52,231
	-	3	28,076
Covas	-	3	3,598
	-	1	0,006
	-	2	0,030
	-	2	0,059
	-	2	0,039
	-	2	0,011
	-	3	0,038
Reparações	-	3	0,011
	-	3	0,654
Irregularidade Longitudinal (IRI) (mm/km)	-	2	3500

Tabela 5. 8. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas medidas no Agisoft Viewer em imagens captadas a 20m de altura

Degradações	Área total degradada (m²)	Área total degradada (%)
CT: Fendilhamento e Pele de Crocodilo	157,0100	87,61
ST: Covas e Peladas	0,1935	0,11
Pt: Reparações	0,6537	0,36
(Ct+St+Pt)		88,08
Rt: Rodeiras (mm)		0,000
PSI		2,01

5.3.1.2. Cálculo do PSI para as alturas 3m e 20m com áreas definidas pela medição do comprimento no modelo 3D e indicações da tabela 5.1

Tabela 5. 9. Áreas degradadas definidas pela medição do comprimento no Agisoft Viewer em imagens captadas 3m de altura.

Degradações identificadas	Comprimento	Nível de gravidade	Área afetada m ²
Fendilhamento	0,40	1	0,200
	0,55	1	0,275
	0,29	1	0,145
	0,66	2	1,320
	2,04	2	4,080
	1,02	2	2,040
	0,45	3	1,485
	1,88	3	6,204
	1,03	3	3,399
	2,64	3	8,712
	1,13	3	3,729
	1,20	3	3,960
Pele de Crocodilo	3,50	3	11,550
	18,00	3	59,400
	14,00	3	46,200
	11,00	3	36,300
	14,00	3	46,200
Covas	0,11	1	0,055
	0,33	2	0,660
	0,60	2	1,200
	0,50	2	1,000
	0,18	2	0,360
	0,55	3	1,815
	0,18	3	0,594
Reparações	0,90	3	2,970
Irregularidade Longitudinal (IRI) (mm/km)	-	2	3500

Tabela 5. 10. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas determinadas pela medição do comprimento no Agisoft Viewer em imagens captadas a 3m de altura.

Degradações	Área total degradada (m ²)	Área total degradada (%)
CT: Fendilhamento e Pele de Crocodilo	235,1990	131,23
ST: Covas e Peladas	5,6840	3,17
Pt: Reparações	2,9700	1,66
(Ct+St+Pt)		100,00
Rt: Rodeiras (mm)		0,000
PSI		1,88

Tabela 5. 11. Áreas degradadas definidas pela medição do comprimento no Agisoft Viewer em imagens captadas 20m de altura.

Degradações identificadas	Comprimento	Nível de gravidade	Área afetada m²
Fendilhamento	0,18	1	0,090
	0,60	2	1,200
	0,70	2	1,400
	0,80	2	1,600
	1,04	3	3,432
	0,50	3	1,650
	1,49	3	4,917
	2,30	3	7,590
	0,75	3	2,475
	1,30	3	4,290
Pele de Crocodilo	2,90	3	9,570
	14,00	3	46,200
	20,00	3	66,000
	14,00	3	46,200
	12,00	3	39,600
Covas	0,11	1	0,055
	0,30	2	0,600
	0,50	2	1,000
	0,40	2	0,800
	0,16	2	0,320
	0,50	3	1,650
	0,18	3	0,594
Reparações	1,00	3	3,300
Irregularidade Longitudinal (IRI) (mm/km)	-	2	3500

Tabela 5. 12. Cálculo do (Ct+St+Pt) com áreas determinadas pela medição do comprimento no Agisoft Viewer em imagens captadas a 20m de altura.

Degradações	Área total degradada (m²)	Área total degradada (%)
CT: Fendilhamento e Pele de Crocodilo	236,2140	131,80
ST: Covas e Peladas	5,0190	2,80
Pt: Reparações	3,3000	1,84
(Ct+St+Pt)		100,00
Rt: Rodeiras (mm)		0,000
PSI		1,88

A seguir a tabela 5.13 apresenta um resumo dos valores obtidos com os cálculos para determinar o PSI.

Tabela 5. 13. Valores obtidos no cálculo do PSI.

Métodos de medição das áreas degradadas	PSI_{3m}	PSI_{20m}
Medição de áreas no modelo 3D	1,95	2,01
Determinação das áreas a partir da medição do comprimento no modelo 3D e das indicações da tabela 1	1,88	1,88

5.3.2. Determinação do *Pavement Condition Index* (PCI)

Para o cálculo do PCI foi utilizado o método apresentado no Capítulo 2, as expressões 2 e 3 foram usadas para a determinação do HDV e PCI respectivamente. O trecho estudado apresenta degradações com dois e três níveis de gravidade. Dessa forma os cálculos foram realizados tendo em conta as seguintes combinações: PCI (l, m, h), PCI (o, $X_2 = 1M + 1H$), PCI (o, $X_2 = 10M + 10H$), PCI (o, $M = 13L + 13M$, h), PCI (l, o, $H = 3M + 13H$), PCI (o, m, $H = 13L + 13H$), PCI (o, m, $H = 13L + 13H$), PCI (o, o, $H = 13L + 13M + 13H$), para as alturas de 3m e 20m. O PCI a ser considerado é o de maior valor.

De notar que os seguintes significados devem ser considerados: l ou L significam nível de gravidade baixo, m ou M significam nível de gravidade médio, h ou H significam nível de gravidade alto, 1 corresponde à degradação do tipo pele de crocodilo, 10 corresponde à degradação do tipo fendilhamento longitudinal e transversal, 13 corresponde à degradação do tipo covas.

Assim como na medição do PSI, no PCI também foram encontrados quatro tipos de degradações, sendo elas: pele de crocodilo com níveis de gravidade M e H, fendilhamento com níveis de gravidade L e M, reparações com o nível de gravidade H e covas com os níveis de gravidade L, M e H. As degradações foram medidas no Agisoft Viewer de acordo com o que é definido nas Tabelas 5.2 e 5.3.

5.3.2.1 Determinação do PCI a partir das medições efetuadas no modelo 3D – 3m

Uma vez que se verificaram 2 níveis de gravidade para a degradação 1 (pele de crocodilo) e 10 (fendilhamento) e 3 níveis de gravidade para a degradação 13 (covas), foram consideradas as seguintes combinações na determinação do PCI:

a) PCI (l, m, h)

Tabela 5. 14. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, m, h)

Nível de degradação	Quantidade										Total	Densidade	Valor de Dedução	Ordem decrescente
1M	35,473										35,473	19,793%	55,200	83,100
1H	1,611	60,989	29,802	3,987							96,389	53,782%	83,100	65,000
10L	0,550	0,500	0,500	0,640	1,000	0,400	0,260	0,80	0,220	0,350	5,220	2,913%	1,200	55,200
10M	1,210	0,600	1,040	2,300	1,150	1,100					7,400	4,129%	9,300	30,500
11H	0,574										0,574	0,320%	10,200	28,000
13L	1,000	1,000	1,000								3,000	1,674%	28,000	10,200
13M	1,000										1,000	0,558%	30,500	9,300
13H	1,000	1,000	1,000								3,000	1,674%	65,000	1,200

Como o maior valor de dedução é 83,1, o HDV = 2,6 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 83,1; 65,00 e 33,12.

Tabela 5. 15. Determinação do CDV - PCI (l, m, h).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	83,10	65,00	33,12	181,22	3	98,60
2	82,50	65,00	2,00	149,50	2	93,00
3	82,50	2,00	2,00	86,50	1	84,20
PCI (l, m, H) = 100 – 98,60 = 1,40						

b) P

CI (0, $X_2 = 1M + 1H$)

Tabela 5. 16. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (1M + 1H).

Nível de degradação	Quantidade										Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	35,473	1,611	60,989	29,802	3,987						131,862	73,575%	87,200	87,200
10L	0,550	0,500	0,500	0,640	1,000	0,400	0,260	0,800	0,220	0,350	5,220	2,913%	1,200	65,000
10M	1,210	0,600	1,040	2,30	1,150	1,100					7,400	4,129%	9,300	30,500
11H	0,574										0,574	0,320%	10,200	28,000
13L	1,000	1,000	1,000								3,000	1,674%	28,000	10,200
13M	1,000										1,000	0,558%	30,500	9,300
13H	1,000	1,000	1,000								3,000	1,674%	65,000	1,200

Como o maior valor de dedução é 87,20, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 87,20, 65,00 e 6,10.

Tabela 5. 17. Determinação do CDV - PCI (1M + 1H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	87,20	65	6,1	158,30	3	90,80
2	87,20	65	2	154,20	2	94,80
3	87,20	2	2	91,20	1	88,60
PCI (l, m, H) = 100 - 94,80 = 5,20						

c) PCI (0, X₂ = 10M + 10H)

Tabela 5. 18. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (10M + 10H).

Nível de degradação	Quantidade																Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	35,473	1,611	60,989	29,802	3,987												132,862	73,575%	87,200	87,200
10M	0,550	0,50	0,500	0,640	1,000	0,400	0,260	0,800	0,220	0,350	1,210	0,600	1,040	2,30	1,150	1,100	12,620	7,042%	14,000	65,000
11H	0,574																0,574	0,320%	10,200	30,500
13L	1,000	1,000	1,000														3,000	1,674%	28,000	28,000
13M	1,000																1,00	0,558%	30,500	14,000
13H	1,000	1,000	1,000														3,000	1,674%	65,000	10,200

Como o maior valor de dedução é 87,20, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 87,20, 65,00 e 6,10.

Tabela 5. 19. Determinação do CDV - PCI (10M + 10H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	87,20	65,00	6,10	158,30	3	90,80
2	87,20	65,00	2,00	154,20	2	94,80
3	87,20	2,00	2,00	91,20	1	88,60
PCI (l, m, H) = 100 – 94,80 = 5,20						

d) PCI (o, M = 13L + 13M, h)

Tabela 5. 20. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, M, h).

Nível de degradação	Quantidade																Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	35,473	1,611	60,989	29,802	3,987												131,862	73,575%	87,200	87,200
10M	0,550	0,500	0,500	0,640	1,000	0,400	0,260	0,800	0,220	0,350	1,210	0,600	1,040	2,30	1,150	1,10	12,620	7,042%	14,000	65,000
11H	0,574																0,574	0,320%	10,200	43,500
13M	1,000	1,000	1,000	1,000													4,000	2,232%	43,500	14,000
13H	1,000	1,000	1,000														3,000	1,674%	65,000	10,200

Como o maior valor de dedução é 87,20, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 87,20, 65,00 e 8,70.

Tabela 5. 21. Determinação do CDV - PCI (o, M, h).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	87,20	65,00	8,70	160,90	3	91,50
2	87,20	65,00	2,00	154,20	2	94,80
3	87,20	2,00	2,00	91,20	1	88,60
PCI (l, m, H) = 100 – 94,80 = 5,20						

e) PCI (l, o, H = 3M + 13H)

Tabela 5. 22. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, o, H).

Nível de degradação	Quantidade																Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	35,473	1,611	60,989	29,802	3,987												131,862	73,575%	87,200	87,200
10M	0,550	0,500	0,500	0,640	1,000	0,400	0,260	0,800	0,220	0,350	1,210	0,600	1,040	2,300	1,150	1,100	12,620	7,042%	14,000	65,000
11H	0,574																0,574	0,320%	10,200	28,000
13L	1,000	1,000	1,000														3,000	1,674%	28,000	14,000
13H	1,000	1,000	1,000	1,000													4,000	2,232%	65,000	10,200

Como o maior valor de dedução é 87,20, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 87,20, 65,00 e 5,60.

Tabela 5. 23. Determinação do CDV - PCI (l, o, H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	87,20	65,00	5,60	157,80	3	90,60
2	87,20	65,00	2,00	154,20	2	94,80
3	87,20	2,00	2,00	91,20	1	88,60
PCI (l, m, H) = 100 - 94,80 = 5,20						

f) PCI (o, m, H = 13L + 13H)

Tabela 5. 24. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, m, H).

Nível de degradação	Quantidade																Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	35,473	1,611	60,990	29,80	3,987												131,862	73,575%	87,200	87,200
10M	0,550	0,500	0,500	0,640	1,000	0,400	0,260	0,80	0,220	0,350	1,210	0,600	1,040	2,300	1,150	1,100	12,620	7,042%	14,000	74,800
11H	0,574																0,574	0,320%	10,200	30,500
13M	1,000																1,000	0,558%	30,500	14,000
13H	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000											6,000	3,348%	74,800	10,200

Como o maior valor de dedução é 87,20, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 87,20, 74,80 e 6,10.

Tabela 5. 25. Determinação do CDV - PCI (o, m, H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	87,20	74,80	6,10	168,10	3	94,50
2	87,20	74,80	2,00	164,00	2	98,00
3	87,20	2,00	2,00	91,20	1	88,60
PCI (l, m, H) = 100 – 98,0 = 2,00						

g) PCI (0, 0, H = 13L + 13M + 13H)

Tabela 5. 26. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (0, 0, H).

Nível de degradação	Quantidade																Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	35,473	1,611	60,990	29,800	3,987												131,862	73,575%	87,200	87,200
10M	0,550	0,500	0,500	0,640	1,000	0,400	0,260	0,800	0,220	0,350	1,210	0,60	1,040	2,300	1,150	1,10	12,620	7,042%	14,000	82,300
11H	0,574																0,574	0,320%	10,200	14,000
13H	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000										7,000	3,906%	82,300	10,200

Como o maior valor de dedução é 87,20, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 87,20, 82,30 e 2,80.

Tabela 5. 27. Determinação do CDV - PCI (0, 0, H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	87,20	82,30	2,80	172,30	3	96,00
2	87,20	82,30	2,00	171,50	2	100,00
3	87,20	2,00	2,00	91,20	1	88,60
PCI (l, m, H) = 100 – 100 = 0,00						

A tabela 27 apresenta um resumo dos valores de PCI calculados com as medições efetuadas no modelo 3D – 3m.

Tabela 5. 28. Resumo dos valores obtidos do cálculo do PCI no modelo 3D – 3m

PCI	Valor (0 – 100)	Estado do pavimento
PCI (l, m, h)	1	Mau – Falha estrutural
PCI (o, $X_2 = 1M + 1H$)	5	
PCI (o, $X_2 = 10M + 10H$)	5	
PCI (o, $M = 13L + 13M, h$)	5	
PCI (l, o, $H = 3M + 13H$)	5	
PCI (o, m, $H = 13L + 13H$)	2	
PCI (o, o, $H = 13L + 13M + 13H$)	0	
PCI _{final}	5	

5.3.2.2 Determinação do PCI a partir das medições efetuadas no modelo 3D – 20m

a) PCI (l, m, h)

Tabela 5. 29. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, m, h).

Nível de degradação	Quantidade							Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1M	34,192							34,192	19,078%	54,700	82,500
1H	1,578	59,639	29,723	2,592				93,532	52,188%	82,500	65,700
10L	0,180	0,450	0,400	0,220	0,700	0,800	0,340	3,090	1,724%	0,100	54,700
10M	0,700	0,350	0,990	2,260	0,770	1,000		6,070	3,387%	6,900	30,500
11H	0,569							0,569	0,317%	10,200	28,000
13L	1,000	1,000	1,000					3,000	1,674%	28,000	10,200
13M	1,000							1,000	0,558%	30,500	6,900
13H	1,000	1,000	1,000					3,000	1,674%	65,700	0,100

Como o maior valor de dedução é 82,50, o HDV = 2,6 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 82,50, 65,70 e 32,82.

Tabela 5. 30. Determinação do CDV - PCI (l, m, h).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	82,50	65,70	32,82	181,02	3	98,50
2	82,50	65,70	2,00	150,20	2	93,20
3	82,50	2,00	2,00	86,50	1	84,00
PCI (l, m, H) = 100 - 98,50 = 1,50						

b) PCI (o, X₂ = 1M + 1H)

Tabela 5. 31. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (1M + 1H).

Nível de degradação	Quantidade							Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	1,578	59,639	29,723	2,592	34,192			127,724	71,266%	86,800	86,800
10L	0,180	0,450	0,400	0,220	0,700	0,800	0,340	3,090	1,724%	0,100	65,700
10M	0,700	0,350	0,990	2,260	0,770	1,000		5,070	2,829%	6,900	30,500
11H	0,569							0,569	0,317%	10,200	28,000
13L	1,000	1,000	1,000					3,000	1,674%	28,000	10,200
13M	1,000							1,000	0,558%	30,500	6,900
13H	1,000	1,000	1,000					3,000	1,674%	65,700	0,100

Como o maior valor de dedução é 86,80, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 86,80, 65,70 e 6,1.

Tabela 5. 32. Determinação do CDV - PCI (1M + 1H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	86,80	65,70	6,10	158,60	3	96,70
2	86,80	65,70	2,00	154,50	2	94,80
3	86,80	2,00	2,00	90,80	1	88,20
PCI (l, m, H) = 100 - 96,70 = 3,30						

c) PCI (0, X₂ = 10M + 10H)

Tabela 5. 33. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (10M + 10H).

Nível de degradação	Quantidade													Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	1,578	59,639	29,723	2,592	34,192									127,724	71,266%	86,800	86,800
10M	0,180	0,450	0,400	0,220	0,700	0,800	0,340	0,700	0,350	0,990	2,260	0,770	1,00	9,160	5,111%	11,000	65,700
11H	0,569													0,569	0,317%	10,200	30,500
13L	1,000	1,000	1,000											3,000	1,674%	28,000	28,000
13M	1,000													1,000	0,558%	30,500	11,000
13H	1,000	1,000	1,000											3,000	1,674%	65,700	10,200

Como o maior valor de dedução é 86,80, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 86,80, 65,70 e 6,10.

Tabela 5. 34. Determinação do CDV - PCI (10M + 10H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	86,80	65,70	6,10	158,60	3	96,70
2	86,80	65,70	2,00	154,50	2	94,80
3	86,80	2,00	2,00	90,80	1	88,20
PCI (l, m, H) = 100 - 96,70 = 3,30						

d) PCI (o, M = 13L + 13M, h)

Tabela 5. 35. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, M, h).

Nível de degradação	Quantidade												Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente	
1H	1,578	59,639	29,723	2,592	34,192									127,724	71,266%	86,800	86,800
10M	0,180	0,450	0,400	0,220	0,700	0,800	0,340	0,700	0,350	0,990	2,260	0,770	1,000	9,160	5,111%	11,000	65,000
11H	0,569													0,569	0,317%	10,200	43,800
13M	1,000	1,000	1,000	1,000										4,000	2,232%	43,800	11,000
13H	1,000	1,000	1,000											3,000	21,674%	65,000	10,200

Como o maior valor de dedução é 86,80, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 86,80, 65,00 e 8,76.

Tabela 5. 36. Determinação do CDV - PCI (o, M, h).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	86,80	65,00	8,76	160,56	3	85,50
2	86,80	65,00	2,00	153,8	2	94,40
3	86,80	2,00	2,00	90,8	1	87,80
PCI (l, m, H) = 100 - 94,40 = 5,60						

e) PCI (l, o, H = 3M + 13H)

Tabela 5. 37. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (l, o, H).

Nível de degradação	Quantidade													Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	1,578	59,639	29,723	2,592	34,192									127,724	71,266%	86,800	86,800
10M	0,180	0,450	0,400	0,220	0,700	0,800	0,340	0,700	0,350	0,990	2,260	0,770	1,000	9,160	5,111%	11,000	65,000
11H	0,569													0,569	0,317%	10,200	28,000
13L	1,000	1,000	1,000											3,000	1,674%	28,000	11,000
13H	1,000	1,000	1,000	1,000										4,000	2,232%	65,000	10,200

Como o maior valor de dedução é 86,80, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 86,80, 65,00 e 5,600.

Tabela 5. 38. Determinação do CDV - PCI (l, o, H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	86,80	65,00	5,60	157,40	3	90,00
2	86,80	65,00	2,00	153,80	2	94,60
3	86,80	2,00	2,00	90,80	1	87,80
PCI (l, m, H) = 100 – 94,60 = 5,40						

f) PCI (o, m, H = 13L + 13H)

Tabela 5. 39. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, m, H).

Nível de degradação	Quantidade													Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	1,578	59,639	29,723	2,592	34,192									127,724	71,266%	86,800	86,800
10M	0,180	0,450	0,400	0,220	0,700	0,800	0,340	0,700	0,350	0,990	2,260	0,770	1,000	9,160	5,111%	11,000	74,800
11H	0,569													0,569	0,317%	10,200	30,500
13M	1,000													1,000	0,558%	30,500	11,000
13H	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000								6,000	3,348%	74,800	10,200

Como o maior valor de dedução é 86,80, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 86,80, 74,80 e 6,10.

Tabela 5. 40. Determinação do CDV - PCI (o, m, H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	86,80	74,80	6,10	167,70	3	94,30
2	86,80	74,80	2,00	163,60	2	97,80
3	86,80	2,00	2,00	90,80	1	87,80
PCI (l, m, H) = 100 - 97,80 = 2,20						

g) PCI (o, o, H = 13L + 13M + 13H)

Tabela 5. 41. Determinação do Valor de dedução (DV) – PCI (o, o, H).

Nível de degradação	Quantidade													Total	Densidade	Valor de dedução	Ordem decrescente
1H	1,578	59,639	29,723	2,592	34,192									127,724	71,266%	86,800	86,800
10M	0,180	0,450	0,400	0,220	0,700	0,800	0,340	0,700	0,350	0,990	2,260	0,770	1,000	9,160	5,111%	11,000	82,300
11H	0,569													0,569	0,317%	10,200	11,000
13H	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000							7,000	3,906%	82,300	10,200

Como o maior valor de dedução é 86,80, o HDV = 2,2 < 3.

Os valores de dedução serão os mais elevados, correspondendo a: 86,80, 82,30 e 2,20.

Tabela 5. 42. Determinação do CDV - PCI (o, o, H).

#	Valor de dedução			Total	q	CDV
1	86,80	82,30	2,20	171,30	3	95,20
2	86,80	82,30	2,00	171,10	2	99,00
3	86,80	2,00	2,00	90,80	1	87,80
PCI (l, m, H) = 100 - 99,00 = 1,00						

A tabela 5.43 apresenta um resumo dos valores de PCI calculados com as medições efetuadas no modelo 3D – 20m.

Tabela 5. 43. Resumo dos valores obtidos do cálculo do PCI no modelo 3D – 20m

PCI	Valor (0 – 100)	Estado do pavimento
PCI (l, m, h)	2	Mau – Falha estrutural
PCI (o, $X_2 = 1M + 1H$)	3	
PCI (o, $X_2 = 10M + 10H$)	3	
PCI (o, $M = 13L + 13M, h$)	6	
PCI (l, o, $H = 3M + 13H$)	5	
PCI (o, m, $H = 13L + 13H$)	2	
PCI (o, o, $H = 13L + 13M + 13H$)	1	
PCI _{final}	6	

5.4. Análise e discussão de resultados

Os resultados obtidos na determinação dos índices PSI e PCI a partir da informação sobre as degradações presentes na superfície do pavimento medida nos modelos 3D construídos com as imagens obtidas a 3m e 20m de altura, foram comparados e analisados para avaliação da viabilidade da realização de inspeções com VANT a 20m de altura.

As Tabelas 5.44, 5.45 e 5.46 apresentam um resumo das medições e dos resultados obtidos no cálculo do PSI e PCI para o trecho analisado, assim como a variação entre medições e o erro relativo para as medições efetuadas no modelo 3D – 20m em relação às medições efetuadas no modelo 3D – 3m.

Tabela 5. 44. Comparação das medições e do índice PSI calculado a partir dos modelos 3D – 3m e 3D – 20m, a partir das áreas medidas nos modelos 3D.

Degradação identificada	Nível de gravidade	Medição da área degradada no modelo 3D – 3m (m ²)	Medição da área degradada no modelo 3D – 20m (m ²)	Variação (m ²)	Erro relativo (%)
Fendilhamento	1	0,620	0,090	0,530	-85%
	2	7,440	4,200	3,240	-44%
	3	27,489	24,354	3,135	-11%
Pele de Crocodilo	1	0,000	0,000	0,000	0%
	2	0,000	0,000	0,000	0%
	3	131,502	128,366	3,136	-2%
Covas	1	0,006	0,006	0,001	12%
	2	0,144	0,138	-0,005	-4%
	3	0,054	0,049	-0,005	-9%
Reparações	1	0,000	0,000	0,000	0%
	2	0,000	0,000	0,000	0%
	3	0,671	0,654	-0,017	-3%
IRI	1	0,000	0,000	0,000	0%
	2	3500,000	3500,000	0,000	0%
	3	0,000	0,000	0,000	0%
PSI	-	1,951	2,012	0,062	3%

Analisando comparativamente as medições e os cálculos obtidos é possível notar uma diferença significativa entre medições do fendilhamento, especialmente para o nível de gravidade 1. Esta evidência pode estar relacionada com o fato de as imagens captadas a 3m de altura apresentarem melhor resolução espacial do que as captadas a 20m de altura, o que influencia a precisão. As fendas de menor gravidade (nível 1) são mais fechadas, o que torna mais difícil a sua identificação em imagens captadas a alturas mais elevadas. No geral, imagens captadas para uma altura de voo de 20 m apresentam uma dificuldade maior na identificação visual de degradações do nível de gravidade 1, no entanto, essas diferenças, para o trecho analisado, traduzem-se numa variação baixa do PSI, nomeadamente de 3%.

Tabela 5. 45. Comparação das medições e do índice PSI calculado a partir dos modelos 3D – 3m e 3D – 20m, para as áreas calculadas a partir da medição dos comprimentos e das indicações da tabela 1

Degradação identificada	Nível de gravidade	Medição da área degradada no modelo 3D – 3m (m²)	Medição da área degradada no modelo 3D – 20m (m²)	Variação (m²)	Erro relativo (%)
Fendilhamento	1	0,620	0,090	0,530	-85%
	2	7,440	4,200	3,240	-44%
	3	27,489	24,354	3,135	-11%
Pele de Crocodilo	1	0,000	0,000	0,000	0%
	2	0,000	0,000	0,000	0%
	3	199,650	207,570	7,920	4%
Covas	1	0,0550	0,055	0,000	0%
	2	3,220	2,720	-0,500	-16%
	3	2,409	2,244	-0,165	-7%
Reparações	1	0,000	0,000	0,000	0%
	2	0,000	0,000	0,000	0%
	3	2,970	3,300	0,330	11%
IRI	1	0,000	0,000	0,000	0%
	2	3500,000	3500,000	0,000	0%
	3	0,000	0,000	0,000	0%
PSI	-	1,883	1,883	0,000	0%

Os cálculos com áreas determinadas a partir da medição dos comprimentos apresentam uma pequena variação nos resultados obtidos com a medição das áreas a partir do modelo 3D. O resultado do PSI é o mesmo para ambas as alturas, determinando um erro relativo de 0%. Isso se deve ao fato da degradação pele de crocodilo possuir uma largura que é contabilizada duas vezes. A área estimada dessa degradação é a largura vezes o comprimento total do trecho, sendo que no trecho estudado existem duas áreas de pele de crocodilo uma ao lado da outra, fazendo com que a área estimada seja maior que a área total. Como não é possível que a área total de pavimento degradado seja superior a 100%, o valor do Ct+St+Pt no cálculo do PSI é o mesmo para as duas alturas de voo.

Nota-se que em alguns casos os valores medidos no modelo 3D - 20m são superiores aos medidos no modelo 3D - 3m, ao contrário do que era esperado. Isso se deve ao fato

das imagens captadas a 3m serem mais precisas, possibilitando que as marcações sejam feitas exatamente no limite das degradações, enquanto nas imagens captadas a 20m a nitidez é menor, dando origem a marcações aproximadas feitas ao redor das degradações, resultando em áreas um pouco maiores.

Conclui-se que o PSI calculado com as áreas determinadas a partir do comprimento apresenta um resultado mais desfavorável do que o PSI calculado com áreas medidas a partir do modelo 3D. A determinação do PSI com áreas aferidas a partir dos comprimentos das degradações foi desenvolvido para considerar o caso mais grave, o que explica o resultado. No entanto, as diferenças nos valores de PSI são pouco significativas, pois os dois procedimentos para o cálculo resultaram em um estado mau do pavimento. Dessa forma, conclui-se que é necessário refazer o pavimento.

No que diz respeito ao erro relativo, nota-se que possui uma percentagem bastante alta no nível de gravidade 1. Isso se deve ao fato das imagens do fendilhamento obtidas a 3m de altura possibilitar uma medição mais precisa em relação às obtidas a 20m de altura. Como as degradações mais graves são mais visíveis, existe uma diferença menor entre as medições feitas nas imagens obtidas a alturas de 3m e 20m.

Tabela 5. 46. Comparação das medições e do índice PCI a partir dos modelos 3D – 3m e 3D – 20m

Degradação identificada	Nível de gravidade	Medição de área, comprimento ou densidade degradados no modelo 3D – 3m (m²)	Medição de área, comprimento ou densidade degradados no modelo 3D – 20m (m²)	Variação (m²)	Erro relativo (%)	
Fendilhamento	L	0,000	0,000	0,000	0%	
	M	5,220	3,090	2,130	-41%	
	H	7,40	6,070	1,330	-18%	
Pele de Crocodilo	L	0,000	0,000	0,000	0%	
	M	35,473	34,192	-1,281	-4%	
	H	96,000	94,000	-2,000	-2%	
Covas	L	3,000	3,000	0,000	0%	
	M	1,000	1,000	0,000	0%	
	H	3,000	3,000	0,000	0%	
Reparações	L	0,000	0,000	0,000	0%	
	M	0,000	0,000	0,000	0%	
	H	0,574	0,569	-0,006	-1%	
PCI	-	5	6	1	20%	Erro relativo (%) o - 100 1%

As comparações das medições e cálculos do PCI apresentam variações pequenas, sendo o fendilhamento o único a possuir um erro mais elevado devido aos motivos já explicados anteriormente. As medidas determinadas no modelo 3D - 20m são um pouco menores do que as medidas obtidas no modelo 3D - 3m, como já era esperado. Como o valor do PCI varia entre 0 e 100, o erro relativo foi de apenas 1%, com um PCI

de 5 para a análise das imagens obtidas a 3m de altura e um PCI de 6 para o caso de 20m de altura. Os dois valores de PCI determinam que o pavimento estudado se encontra em falha estrutural e necessita ser refeito.

No que diz respeito ao erro relativo foram encontrados bons valores, com percentagens baixas que determinam uma boa precisão do modelo. Percebe-se que não existem valores dos erros no nível de gravidade L, isso se deve ao fato de que apenas as covas possuem este nível de gravidade e, como ambas medições são iguais nas alturas de 3m e 20m a diferença das duas é zero

Tendo em conta a análise efetuada é possível verificar que a variação entre os valores de PSI e PCI obtidos a partir da informação recolhida para alturas de voo de 3m e 20m em inspeções de pavimentos realizadas com recurso a VANT, é reduzida. Conclui-se assim que apesar do levantamento a 3m ser mais preciso e apresentar mais detalhes, é possível considerar uma altura de recolha de dados de 20m para realizar a auscultação de degradações de pavimentos rodoviários com a utilização de VANT. A validação desta abordagem apresenta as seguintes vantagens:

- Realização de voos automáticos (para uma altura de inspeção de 3m os voos são efetuados de forma manual);
- Menor tempo de inspeção;
- Maior área inspecionada por passagem do VANT;
- Segurança das operações de inspeção (pelo menor número de obstáculos existentes a 20m).
- Inspeção sem interrupção do trânsito, uma vez que não exista obstáculos nas bermas da estrada, é possível realizar a captação das imagens a partir das bermas em fotografia oblíqua próxima da vertical.

Conclui-se também que o pavimento estudado está bastante degradado, pois tanto o PSI como o PCI apresentam valores muito baixos, evidenciando a necessidade de reconstrução do pavimento.

6. Conclusões

Os pavimentos rodoviários são ativos de extrema importância nas redes de transportes. Manter os pavimentos num estado de conservação adequado é importante para garantir a qualidade de circulação e a segurança dos utentes e veículos que os utilizam. Para isso, são realizadas inspeções visuais da sua superfície que têm como objetivo determinar o grau de deterioração do pavimento, e em função deste, a necessidade de efetuar intervenções de reparações ou de substituição do pavimento (em caso de degradações muito graves).

Uma tecnologia que vem sendo cada vez mais utilizada é a aplicação de conceitos de geomática associados à utilização de VANT, tendo sido já testada, com resultados satisfatórios, por diversos autores na inspeção de pavimentos rodoviários, nomeadamente na deteção de degradações. Para aplicação desta tecnologia na auscultação de pavimentos, é necessário conhecer as famílias de degradações que existem em cada tipo de pavimento (flexível, rígido e semirrígido), de forma a preparar a operação de inspeção para recolha de dados de imagem que permitam a sua identificação e medição. A informação obtida e medida a partir dos dados recolhidos é usada para determinar o estado de degradação do pavimento, através do cálculo de índices globais que representam a qualidade do pavimento, sendo os mais comuns o PCI e PSI.

A utilização de VANT surge assim como uma alternativa para a auscultação de degradações presentes na superfície dos pavimentos. De entre as vantagens da sua utilização destacam-se os custos mais acessíveis e tempos mais reduzidos de inspeção, quando comparados com a utilização de veículos terrestres multifuncionais e inspeções realizadas a pé. Salientam-se ainda as vantagens relacionadas com a redução do tempo de inatividade da via, a alta flexibilidade de utilização, a fácil manobrabilidade e um impacto menor no ambiente em comparação com as outras técnicas de inspeção. O uso dessa tecnologia possibilita ainda a construção de modelos 3D, o que torna possível a avaliação dos dados levantados nas mesmas condições existentes no momento do levantamento. No entanto, também existem algumas desvantagens como a perda de precisão nas medições efetuadas em imagens captadas em alturas de voo mais elevadas, que dificultam a visualização dos níveis de gravidade baixos das degradações; a autonomia limitada do VANT, que pode requerer a interrupção da inspeção; a necessidade de se verificarem condições climáticas favoráveis, pois não se recomenda a sua operação em circunstâncias de temperaturas extremas, ventos fortes ou nuvens de poeira; e a interrupção do tráfego.

Os VANT surgiram como uma tecnologia de uso militar. A evolução do hardware e software de fotogrametria associado a estes equipamentos expandiram a sua utilização para diversos campos, incluindo a inspeção de infraestruturas. Os VANT podem ser classificados tendo em conta a altura de voo como sendo de baixa altitude ou alta altitude, ou tendo em conta o seu tamanho, podendo ser classificados como grande, médio, pequeno, mini ou micro. Estão em geral equipados com câmeras e sensores que auxiliam na captação de imagem e levantamento de dados. O tipo de VANT a utilizar e as câmaras e sensores a serem acoplados, dependem do intuito para o qual será utilizado. As operações destes veículos devem satisfazer as indicações das normas e regulamentos aplicáveis, nomeadamente no que diz respeito aos aspetos relacionados com as restrições do seu uso no espaço aéreo, as alturas máximas de voo permitidas, o peso do VANT, os riscos de operação envolvidos e as autorizações de voo necessárias em função do local de inspeção.

No que diz respeito à análise de dados sobre o estado do pavimento, a revisão bibliográfica revelou que existem várias técnicas de processamento e classificação automática que podem ser adotados na identificação e medição das degradações. Nestas abordagens, geralmente são construídos modelos 3D com recurso à fotogrametria e técnicas de processamento como o SfM. Como técnicas de classificação automática, existem vários algoritmos cuja aplicação na identificação de degradações de pavimentos, sobretudo para o caso das degradações de tipo fendilhamento e pele de crocodilo, apresentam bons níveis de precisão na classificação das degradações. Os mais utilizados nos estudos existentes sobre a temática são YOLO, CNN, KNN, SVM, ANN e RF, recorrendo-se a softwares para a sua aplicação, como por exemplo o Pix4Dmapper e o Agisoft Metashape.

Com o intuito de determinar os requisitos necessários a ter em conta na inspeção de pavimento com recurso a VANT, foram analisados 15 artigos científicos que focam seus estudos nessa temática. Após uma análise minuciosa, concluiu-se que para a inspeção de pavimentos com recurso a VANT é necessário que as imagens captadas permitam identificar as menores dimensões planimétricas e altimétricas requeridas no catálogo de degradação adotado, o levantamento não seja efetuado em condições climáticas desfavoráveis (chuva, neve, calor intenso ou humidade), o VANT utilizado deve ser de pequeno porte, a altura de voo esteja compreendida entre 15m e 30m, estejam disponíveis várias baterias (uma vez que a autonomia do VANT é em geral de 30 minutos), sejam utilizadas câmaras digitais de alta resolução, ângulo de aquisição de imagem vertical (90°) e sobreposição lateral e frontal de imagens entre 60 a 70% e 75 a 80% respetivamente, equipas de levantamento constituídas pelo menos por 2 pessoas, e por fim, devem ser identificados na estrada pontos de controlo de solo que permitam calibrar os modelos 3D construídos a partir das imagens e dados de georeferenciação.

No que diz respeito ao caso de estudo, foi analisado um trecho de pavimento rodoviário com imagens captadas a 3m e 20m de altura. Para verificar o grau de precisão dos modelos 3D construídos a partir das imagens captadas, foram escolhidos elementos de comparação medidos *in situ* e nos modelos 3D. As variações percentuais verificadas na comparação das medidas apresentaram valores satisfatórios (com um erro para medições planimétricas de 0 a 9% em 3m e de 0 a 5% em 20m; e para medições em profundidade um erro de 5 a 6% em 3m e de 5 a 13% em 20m), o que permitiu verificar a precisão do modelo e validar a sua utilização para a extração de medições das degradações identificadas. A partir da análise do modelo 3D foram identificados quatro tipos de degradações: pele de crocodilo, fendilhamento, covas e reparações. As medições destas degradações permitiram determinar os índices de qualidade do pavimento PSI e PCI para as duas alturas de voo estudadas, o que resultou num PSI de 1,95 para altura de 3m e de 2,01 para a altura de 20m (áreas medidas no modelo), num PSI de 1,88 para as alturas de 3 e 20m (áreas aferidas a partir dos comprimentos das degradações) e num PCI de 5 para a altura de 3m e de 6 para a altura de 20m. Os valores encontrados permitem concluir que o pavimento da secção de estrada analisada se encontra em mau estado e deve ser reconstruído.

A comparação dos valores obtidos nas medições das degradações nos modelos 3D derivados das imagens captadas a 3m e 20m de altura, revelaram que as degradações com menor grau de gravidade apresentam variação significativa entre os dois modelos (por exemplo, de 85% para o fendilhamento). Este resultado deve-se ao facto das imagens captadas a alturas maiores apresentarem detalhes menores, uma vez que a área real coberta por cada pixel é maior, dificultando a identificação e medição de degradações de dimensões menores. No entanto, essa diferença se mostra pouco significativa no valor final dos índices calculados e na determinação do estado do pavimento, uma vez que a sua determinação é essencialmente influenciada pelos valores de medição das degradações de nível de gravidade superior, facilmente identificadas nos dois modelos. As medições das degradações com níveis de gravidade

superior apresentam variações menores, da ordem de 44% para o nível de gravidade intermédio e de 11% para o nível de gravidade mais elevado, no fendilhamento, e os índices verificaram uma percentagem baixa no cálculo do erro relativo: 3% para o PSI determinado com áreas medidas no modelo, 0% para o PSI determinado com áreas aferidas a partir do comprimento medido no modelo e 1% para o PCI. Dessa forma, apesar das medições realizadas a partir de imagens captadas a 3m de altura serem mais detalhadas, o modelo 3D construído com imagens captadas a 20m se mostra completamente capaz no que diz respeito ao estudo dos dados levantados na inspeção de pavimentos com recurso a VANT, para determinação dos índices de qualidade do pavimento e para a aplicação de estratégias de manutenção preventiva baseadas num nível de gravidade intermédio das degradações.

Apesar da altura de 3m permitir obter imagens e modelos mais detalhados, a inspeção realizada a essa altura apresenta desvantagens, como a necessidade de realizar voos de forma manual, resultando num processo de inspeção mais demorado em comparação com inspeções feitas a 20m de altura. As inspeções feitas com alturas de voos maiores permitem que os voos sejam efetuados de forma automática, o que reduz o tempo de trabalho de campo e permite melhores condições de segurança para utentes, veículos e outros bens que estejam na estrada, pois existem menos obstáculos a 20m de altura, não necessitam de interrupção de trânsito uma vez que a esta altura é possível efetuar a captura de imagens fazendo voar o VANT fora do pavimento. Desse modo, é possível concluir que a altura de voo de 20m pode ser adotada na auscultação de pavimentos com recurso a VANT, uma vez que apresenta resultados satisfatórios na avaliação da qualidade do pavimento.

Para trabalhos futuros sugere-se expandir o estudo do estado do pavimento efetuado com recurso a geomática e VANT, considerando uma área de inspeção maior que inclua vários trechos, de forma a permitir uma abordagem estatística para o cálculo mais sustentado de erros e análises de comparação de resultados. Sugere-se ainda incluir a análise de dados recolhidos a alturas de voos intermediárias, como 10m e 15m, assim como para alturas de voos maiores, como 30m (valor adotado em vários estudos existentes).

7. Referências Bibliográficas

- Alves, T. (2007). *Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários - Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Deflectómetro de Impacto*.
- ASTM D6433 - 18. (2018). *Designation: D6433 – 18 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys 1*. <https://doi.org/10.1520/D6433-18>
- Baker, C. D., Polito, K. E., Pollack, S., Mogawer, W., & Xie, Y. (2019). *The Application of Unmanned Aerial Systems in Surface Transportation-Volume II-B: Assessment of Roadway Pavement Condition with UAS*.
- Bazan, W. (2008). *Calibração de um Sistema Dual de Câmaras Digitais*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4730.2560>
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2008). *Pavimentos Rodoviários* (Edições Almeida, SA., Vol. 3).
- Brooks, C. N., Havens, T. C., & Ahlborn, T. (2014). *Evaluating the use of unmanned aerial vehicles for transportation purposes: A michigan demonstration*. www.mtri.org
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 92, pp. 79–97). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Congress, S., Puppala, A., Kumar, P., & Patil, U. (2021). *Assesment of Pavement Geometric Characteristics Using UAV - CRP Data*.
- Disposição Normativa do InIR. *Construção e Reabilitação de Pavimentos Indicadores de Estado de Conservação dos Pavimentos*. Retrieved July 4, 2023, from <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao%20Tcnica/ConstrucaoReabilitacaoPavimentosIndicadoresEstadoConservacaoPavimentos.pdf>
- DNIT. (2011). *Manual de Gerência de Pavimentos*.
- EP - Estradas de Portugal, S. A. (2008). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários*.
- Feitosa, I. T., Doutora Bertha Maria Batista dos Santos Co-orientador, P., & Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida, D. (2020). *Validação de um método indireto de auscultação de degradações para avaliação da qualidade de pavimentos aeroportuários* Ianca Teixeira Feitosa Engenharia Civil: Geotecnia e Ambiente.
- Fwa, T. F. (2006). *The handbook of highway engineering*. Taylor & Francis.
- Garilli, E., Bruno, N., Autelitano, F., Roncella, R., & Giuliani, F. (2020). Automatic detection of stone pavement's pattern based on UAV photogrammetry. *Automation in Construction*, 122(December 2020), 103477. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103477>
- Huang, H., Fan, R., Zhu, Y., Liu, M., & Pitas, I. (2019). *A Robust Pavement Mapping System Based on Normal-Constrained Stereo Visual Odometry*. <http://arxiv.org/abs/1910.13102>
- ICAO. (2020). *Model UAS Regulations - Parts 101 and 102*.
- Jacyna, M., Wasiak, M., & Bobiński, A. (2017). SIMMAG3D as a tool for designing of storage facilities in 3D. *Archives of Transport*, 42(2), 25–38. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.0525>
- Kaamin, M., Azhar, S., Tajudin, A., Athirah Basri, N., Rahman, R. A., Hakimi Mat Nor, A., Azraie, M., Kadir, A., Mokhtar, M., & Luo, P. (2022). Unmanned Aerial Vehicle Technology Use in Visual Road Inspection at Fto05, Johor Bahru-Melaka. In *International Journal of Nanoelectronics and Materials* (Vol. 15).
- Karballaezadeh, N., Danial, M. S., Moazemi, D., Band, S. S., Mosavi, A., & Reuter, U. (2020). Smart structural health monitoring of flexible pavements using machine learning methods. *Coatings*, 10(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/coatings10111100>

- Klemas, V. V. (2015). Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. *Journal of Coastal Research*, 31(5), 1260–1267. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>
- Maganinho, L. (2013). *Desenvolvimento de uma base de dados de patologias para a avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso a GPS, imagem vídeo e SIG*.
- Maslan, J., & Cicmanec, L. (2021, June 8). Setting the Flight Parameters of an Unmanned Aircraft for Distress Detection on the Concrete Runway. *2021 8th International Conference on Military Technologies, ICMT 2021 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICMT52455.2021.9502831>
- Nappo, N., Mavrouli, O., Nex, F., van Westen, C., Gambillara, R., & Michetti, A. M. (2021). Use of UAV-based photogrammetry products for semi-automatic detection and classification of asphalt road damage in landslide-affected areas. *Engineering Geology*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106363>
- Neto, R., & Breunig, F. (2019). Drones nas ciências florestais. In G. Prudkin & F. Breunig (Eds.), *Drones e Ciência: Teoria e aplicações metodológicas* (Vol. 1).
- Nogueira, A. B. M. B. dos S. C. P. (2015). *UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR Engenharia Avaliação de rodeiras de pavimentos rodoviários com recurso a varrimento laser Engenharia Civil: Estruturas e Construção*.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2349–2391. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1297548>
- Pan, Y., Zhang, X., Cervone, G., & Yang, L. (2018). Detection of Asphalt Pavement Potholes and Cracks Based on the Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10), 3701–3712. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2865528>
- Pan, Y., Zhang, X., Sun, M., & Zhao, Q. (2017). Object-based and supervised detection of potholes and cracks from the pavement images acquired by UAV. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4W4), 209–217. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-209-2017>
- Ragnoli, A., De Blasiis, M. R., & Di Benedetto, A. (2018). Pavement distress detection methods: A review. In *Infrastructures* (Vol. 3, Issue 4). MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058>
- Roberts, R., Inzerillo, L., & Di Mino, G. (2020). Exploiting low-cost 3D imagery for the purposes of detecting and analyzing pavement distresses. *Infrastructures*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/infrastructures5010006>
- Romero-Chambi, E., Villarroel-Quezada, S., Atencio, E., & Rivera, F. M. La. (2020). Analysis of optimal flight parameters of unmanned aerial vehicles (UAVs) for detecting potholes in pavements. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12), 1–33. <https://doi.org/10.3390/APP10124157>
- Santos, B. (2002). *Implementação de um Sistema de Gestão da Conservação de Pavimentos Rodoviários para a Cidade de Lisboa*.
- Santos, B., Almeida, P. G., Feitosa, I., & Lima, D. (2020). Validation of an indirect data collection method to assess airport pavement condition. *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00419>
- Santos, M. (2009). *Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis*.
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. In *IEEE Access* (Vol. 7, pp. 48572–48634). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- Silva, L. A., Blas, H. S. S., García, D. P., Mendes, A. S., & González, G. V. (2020). An architectural multi-agent system for a pavement monitoring system with pothole

- recognition in uav images. *Sensors (Switzerland)*, 20(21), 1–23. <https://doi.org/10.3390/s20216205>
- Tan, Y., & Li, Y. (2019). UAV photogrammetry-based 3D road distress detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi8090409>
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. In *Journal of Forestry Research* (Vol. 26, Issue 4, pp. 791–797). Northeast Forestry University. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>
- Ułanowicz, L., & Sabak, R. (2021). Unmanned aerial vehicles supporting imagery intelligence using the structured light technology. *Archives of Transport*, 58(2), 35–45. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.8796>
- Wang, Y., Huang, Y., & Huang, W. (2019). Crack junction detection in pavement image using correlation structure analysis and iterative tensor voting. *IEEE Access*, 7, 138094–138109. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942318>
- Zhang, S., Lippitt, C. D., Bogus, S. M., & Neville, P. R. H. (2016). Characterizing pavement surface distress conditions with hyper-spatial resolution natural color aerial photography. *Remote Sensing*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/rs8050392>
- Zhong, J., Zhu, J., Huan, J., Ma, T., & Zhang, W. (2022). Multi-scale feature fusion network for pixel-level pavement distress detection. *Automation in Construction*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104436>
- Zhu, J., Zhong, J., Ma, T., Huang, X., Zhang, W., & Zhou, Y. (2021). Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. *Automation in Construction*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103991>

8. Anexos

- I. Medição de elementos de referência.
- II. Medições efetuadas nos perfis transversais criados no Agisoft Viewer e AutoCad.
- III. Ábacos utilizados para o cálculo do PCI – Norma ASTM D6433 - 18

Anexo I – Medição de elementos de referência

Tabela AI 1. Medições efetuadas na mira 1, em imagens capturadas a 3m e a 20m de altura


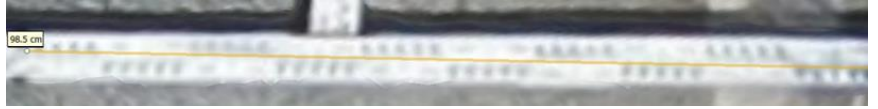
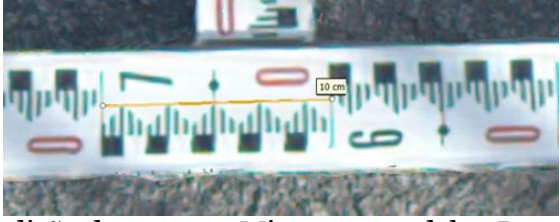

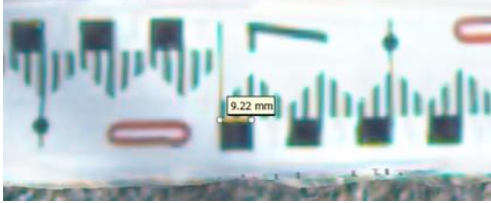

Mira 1	Medições
 <p>Medição de 1m na Mira 1, no modelo 3D – 3m</p>	<p>Medição real 1m Medição no modelo 3D – 3m 0,999m</p>
 <p>Medição de 1m na Mira 1, no modelo 3D – 20m</p>	<p>Medição real 1m Medição no modelo 3D – 20m 0,985m</p>
 <p>Medição de 10cm na Mira 1, no modelo 3D – 3m</p>	<p>Medição real 10cm Medição no modelo 3D – 3m 10 cm</p>
 <p>Medição de 10cm na Mira 1, no modelo 3D – 20m</p>	<p>Medição real 10cm Medição no modelo 3D – 20m 9,65cm</p>
 <p>Medição de 1cm na Mira 1, no modelo 3D – 3m</p>	<p>Medição real 1cm Medição no modelo 3D – 3m 0,922cm</p>
 <p>Medição de 1cm na Mira 1, no modelo 3D – 20m</p>	<p>Medição real 1cm Medição no modelo 3D – 20m 0,986cm</p>

Tabela AI 2. Medições efetuadas na mira 2, em imagens capturadas a 3m e a 20m de altura


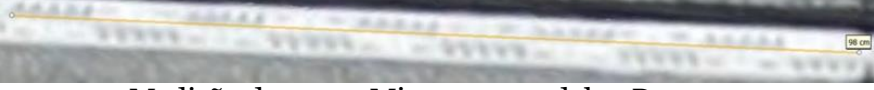

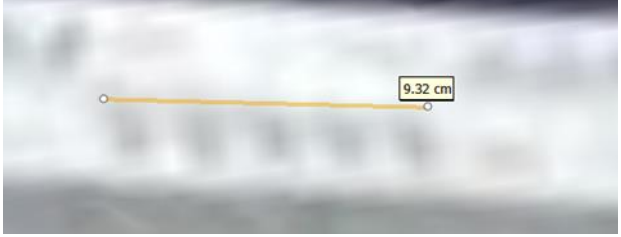
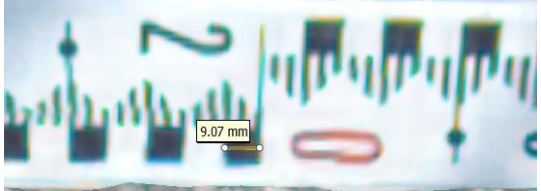

Mira 2	Medições
 <p>Medição de 1m na Mira 2, no modelo 3D – 3m</p>	<p>Medição real 1m Medição no modelo 3D – 3m 1m</p>
 <p>Medição de 1m na Mira 2, no modelo 3D – 20m</p>	<p>Medição real: 1m; medição no modelo 3D: 0,98m</p>
 <p>Medição de 10cm na Mira 2, no modelo 3D – 3m</p>	<p>Medição real 10cm Medição no modelo 3D – 3m 10cm</p>
 <p>Medição de 10cm na Mira 2, no modelo 3D – 20m</p>	<p>Medição real 10cm Medição no modelo 3D – 20m 0,932cm</p>
 <p>Medição de 1cm na Mira 2, no modelo 3D – 3m</p>	<p>Medição real 1cm Medição no modelo 3D – 3m 0,907cm</p>
 <p>Medição de 1cm na Mira 1, no modelo 3D – 20m</p>	<p>Medição real 1cm Medição no modelo 3D – 20m 0,958cm</p>

Tabela AI 3. Medições da largura da mira, em imagens captadas a 3m e a 20m de altura

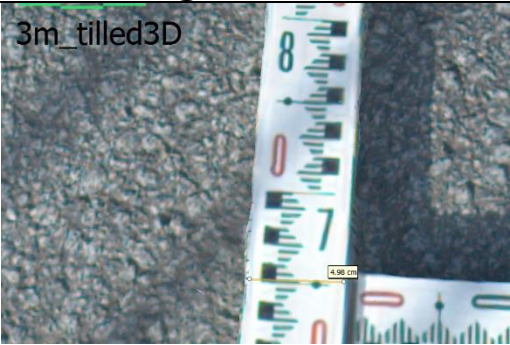
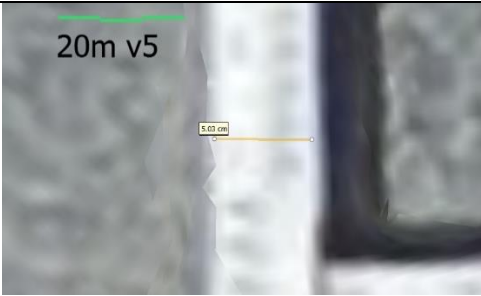
Largura da Mira	Medições
 <p data-bbox="316 629 943 663">Medição da largura da Mira no modelo 3D – 3m</p>	<p data-bbox="1129 286 1275 315">Medição real 5,3cm</p> <p data-bbox="1107 342 1294 423">Medição no modelo 3D – 3m 4,98cm</p>
 <p data-bbox="306 981 952 1014">Medição da largura da Mira no modelo 3D – 20m</p>	<p data-bbox="1129 687 1275 761">Medição real 5,3cm</p> <p data-bbox="1101 743 1300 824">Medição no modelo 3D – 20m 5,03cm</p>

Tabela AI 4. Medições da profundidade da mira, em imagens capturadas a 3m e a 20m de altura

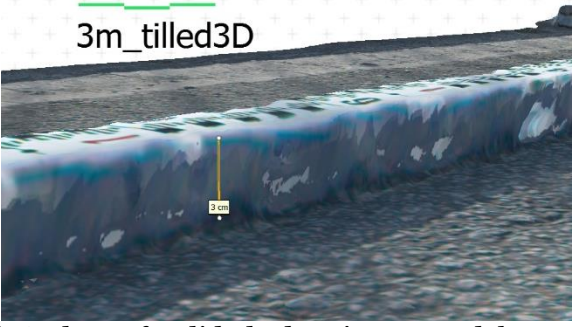
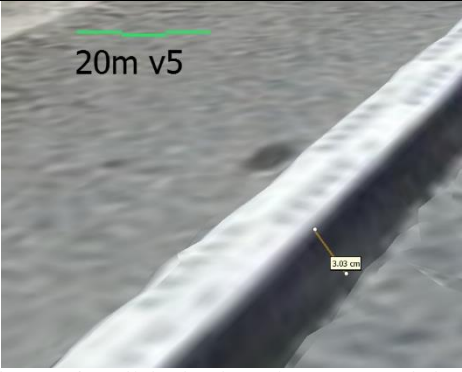

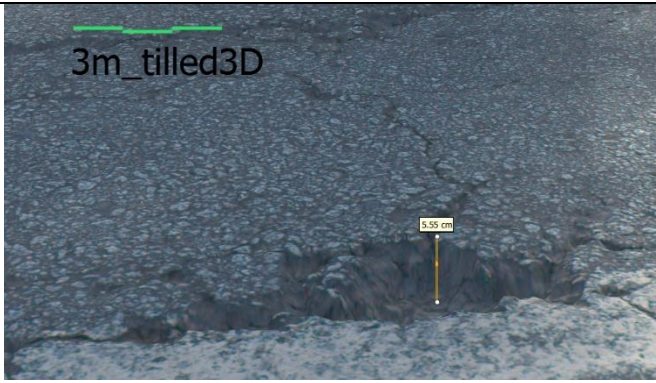
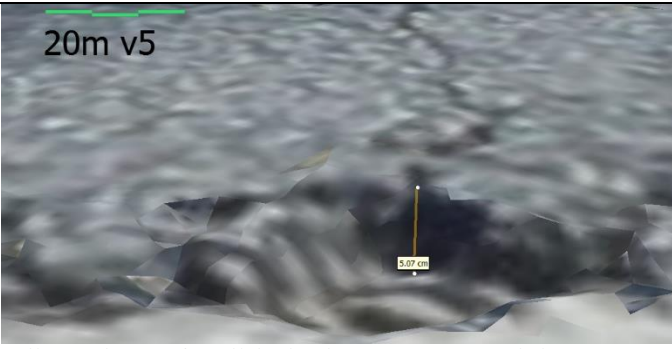
Profundidade da Mira	Medições
 <p data-bbox="352 667 1066 701">Medição da profundidade da Mira no modelo 3D – 3m</p>	<p data-bbox="1182 327 1366 461">Medição real 3,2cm Medição no modelo 3D – 3m 3cm</p>
 <p data-bbox="341 1093 1070 1126">Medição da profundidade da Mira no modelo 3D – 20m</p>	<p data-bbox="1177 730 1374 864">Medição real 1cm Medição no modelo 3D – 20m 3,03cm</p>

Tabela AI 5. Medições da profundidade da cova, em imagens capturadas a 3m e a 20m de altura

Profundidade de uma cova existente no trecho analisado	Medições
 <p data-bbox="360 898 906 931">Medição da profundidade da Cova in situ.</p>	<p data-bbox="1129 416 1273 472">Medição real 5,85cm</p>
 <p data-bbox="272 1335 986 1368">Medição da profundidade da Cova no modelo 3D – 3m</p>	<p data-bbox="1110 954 1289 1043">Medição no modelo 3D – 3m 5,55cm</p>
 <p data-bbox="264 1738 997 1771">Medição da profundidade da Cova no modelo 3D – 20m</p>	<p data-bbox="1102 1391 1299 1480">Medição no modelo 3D – 20m 5,07cm</p>

Anexo II – Medições efetuadas nos perfis transversais criados no Agisoft Viewer e AutoCad

Os perfis transversais criados ao longo do trecho analisado, assim como as medições efetuadas nos programas Agisoft Viewer e AutoCAD são apresentados nas Figuras AII 2 a AII 67. Na Figura AII 1 é apresentada a localização de cada um dos 11 perfis transversais considerados.

Após a análise individual e conjunta dos perfis, concluiu-se que não existem rodeiras, apenas algumas pequenas deformações, provavelmente associadas a escorregamentos, no extradorso de alguns perfis.



Figura AII 1. Localização de cada perfil transversal

a) Perfis medidos em imagem captada a 3m de altura.

- P1

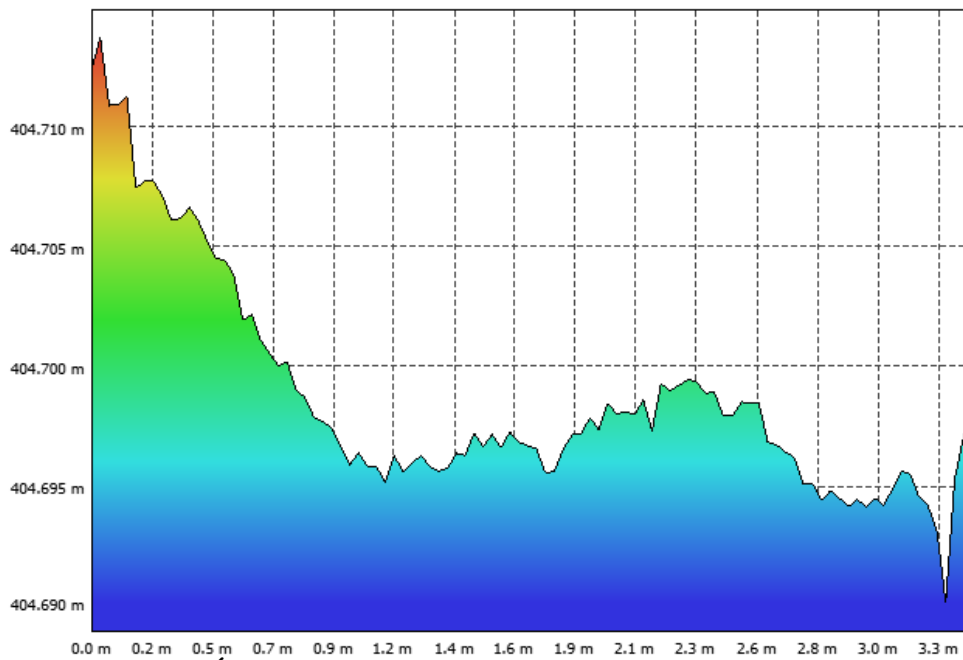


Figura AII 2. Ábaco do perfil transversal P1 criado no do Agisoft Viewer

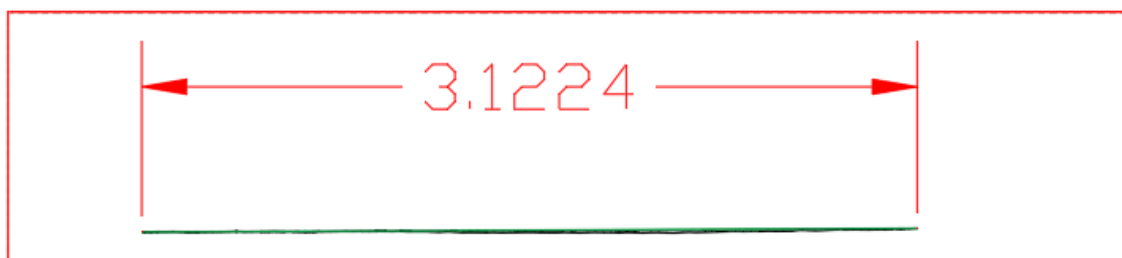


Figura AII 3. Largura do perfil P1 medida no AutoCad

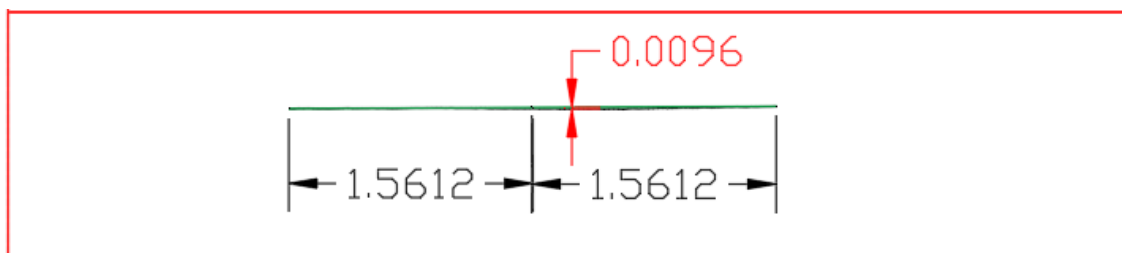


Figura AII 4. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P1

- P2

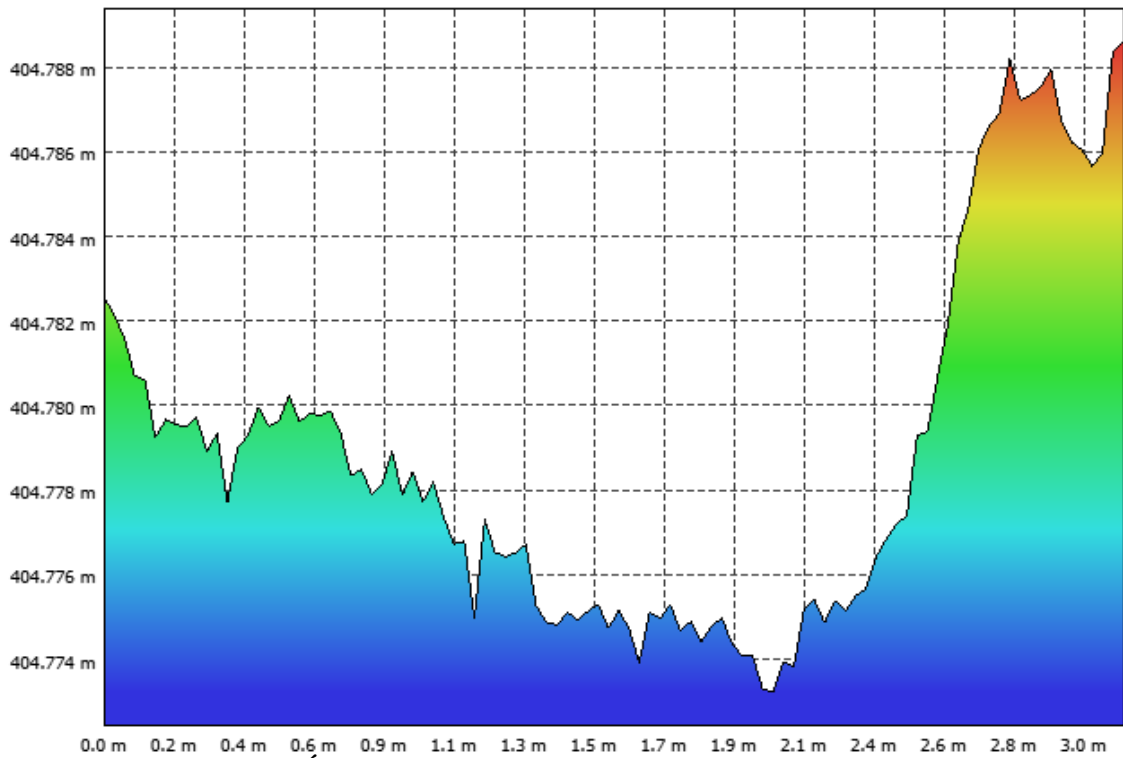


Figura AII 5. Ábaco do perfil transversal P2 criado no Agisoft Viewer

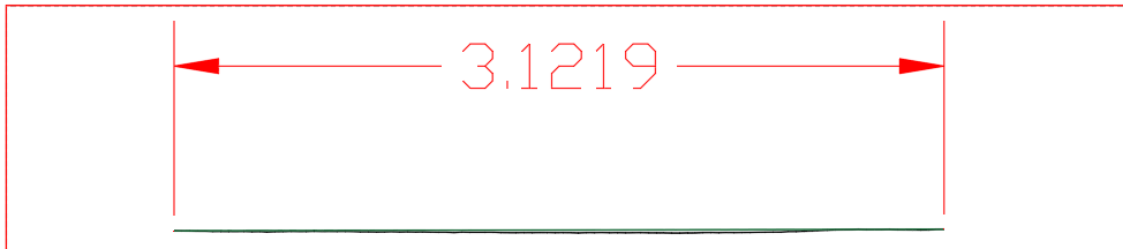


Figura AII 6. Largura do perfil P2 medida no AutoCad

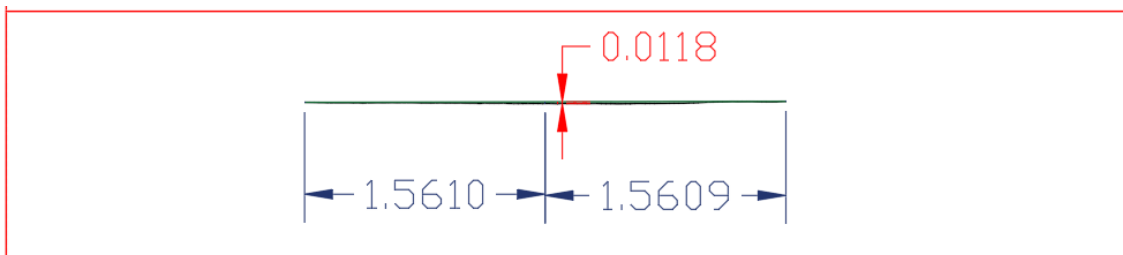


Figura AII 7. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P2

- P3

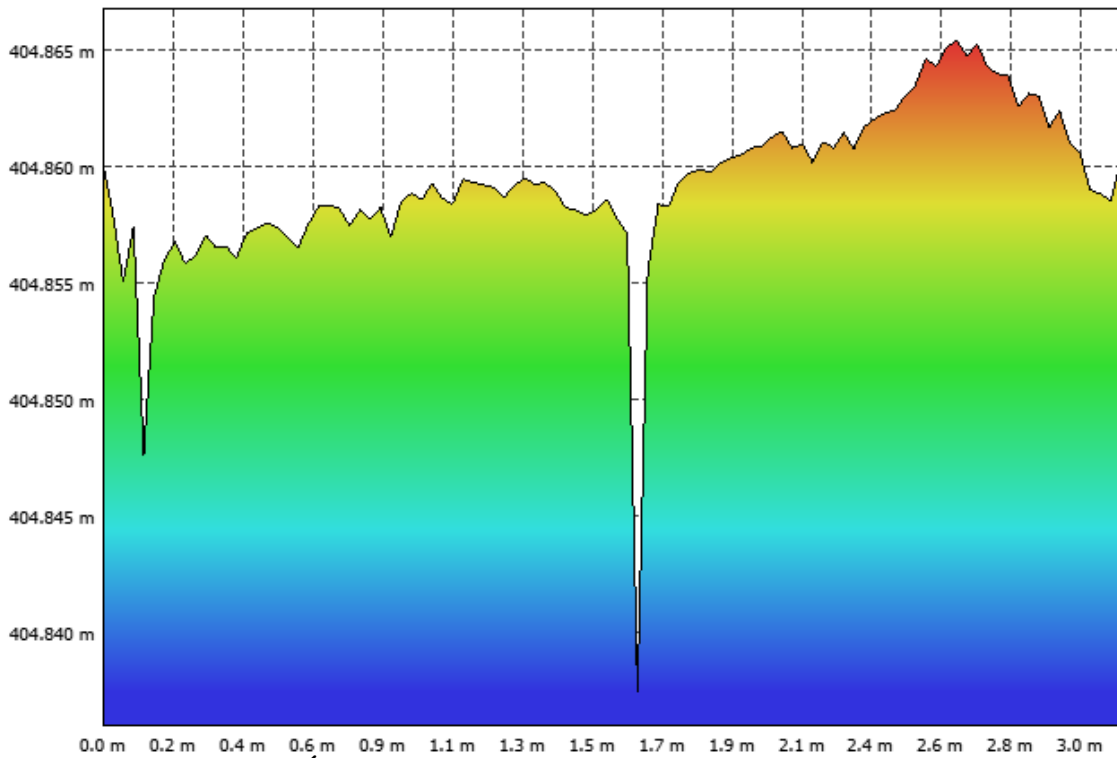


Figura AII 8. Ábaco do perfil transversal P3 criado do Agisoft Viewer

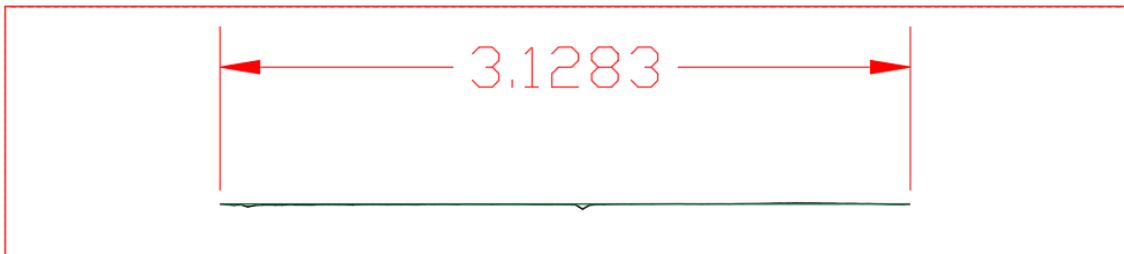


Figura AII 9. Largura do perfil P3 medida no AutoCad

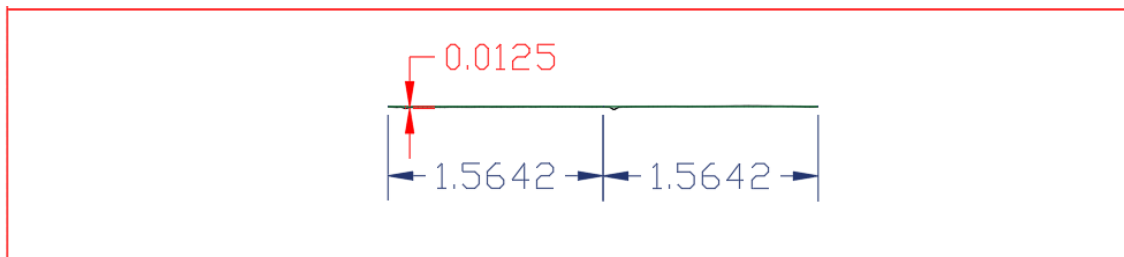


Figura AII 10. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P3

- P4

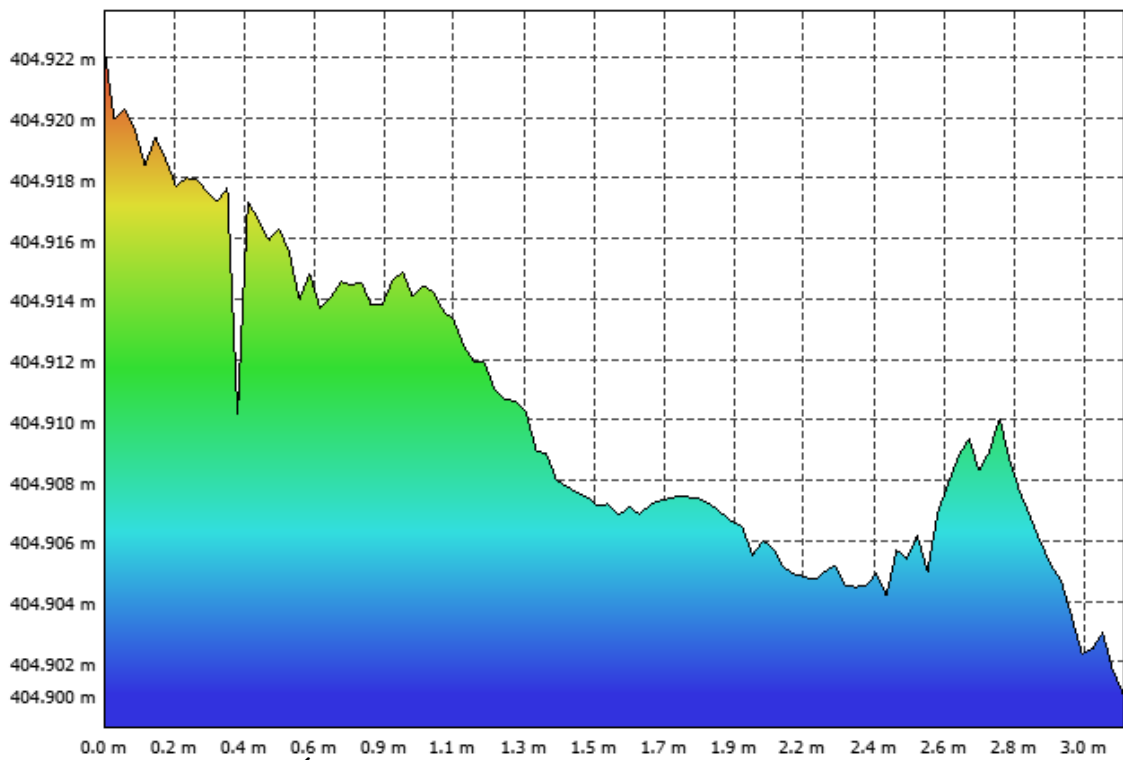


Figura AII 11. Ábaco do perfil transversal P4 retirado do Agisoft Viewer

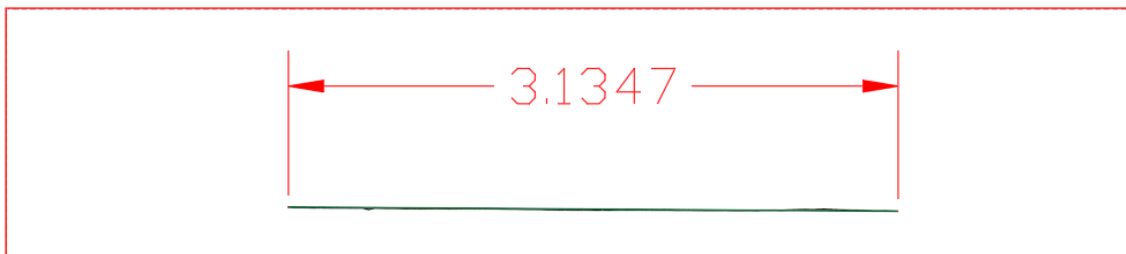


Figura AII 12. Largura do perfil P4 medida no AutoCad

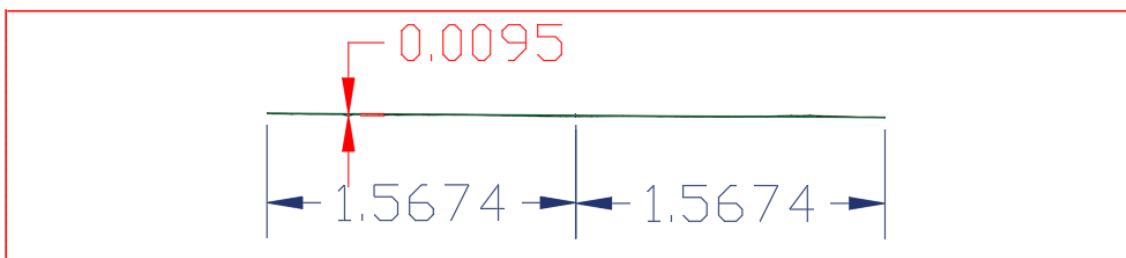


Figura AII 13. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P4

- P5

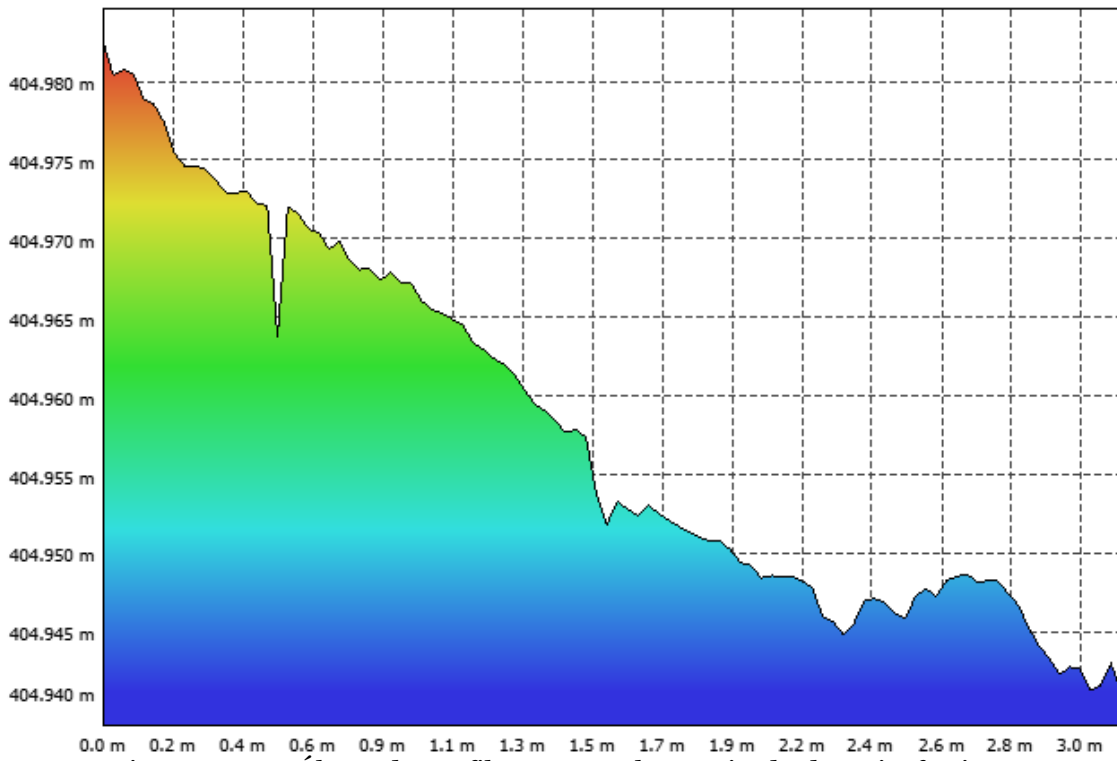


Figura AII 14. Ábaco do perfil transversal P5 retirado do Agisoft Viewer

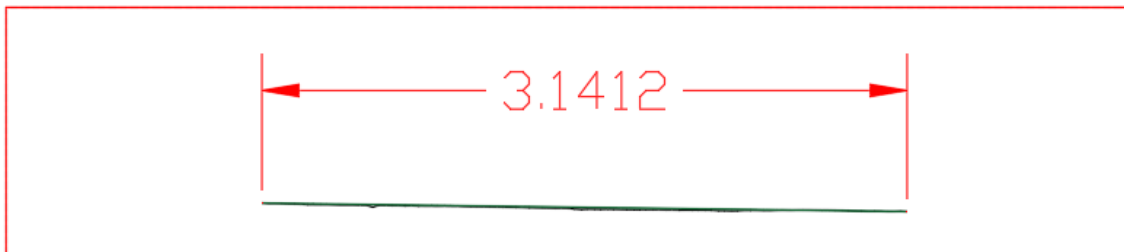


Figura AII 15. Largura do perfil P5 medida no AutoCad

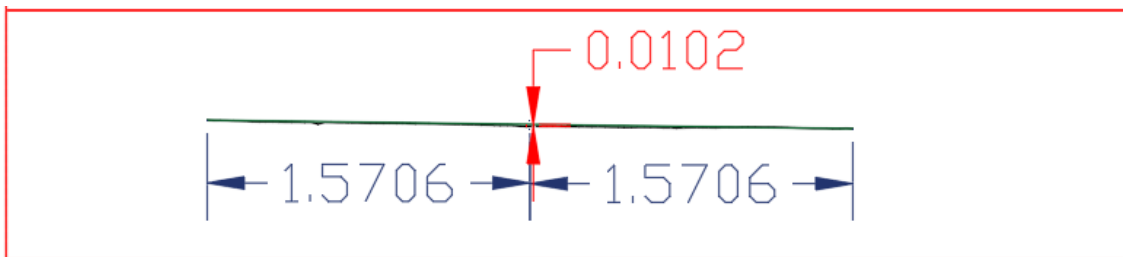


Figura AII 16. Aplicação do método “taut wire” para avaliação da existência de cavado de rodeira no P5

- P6

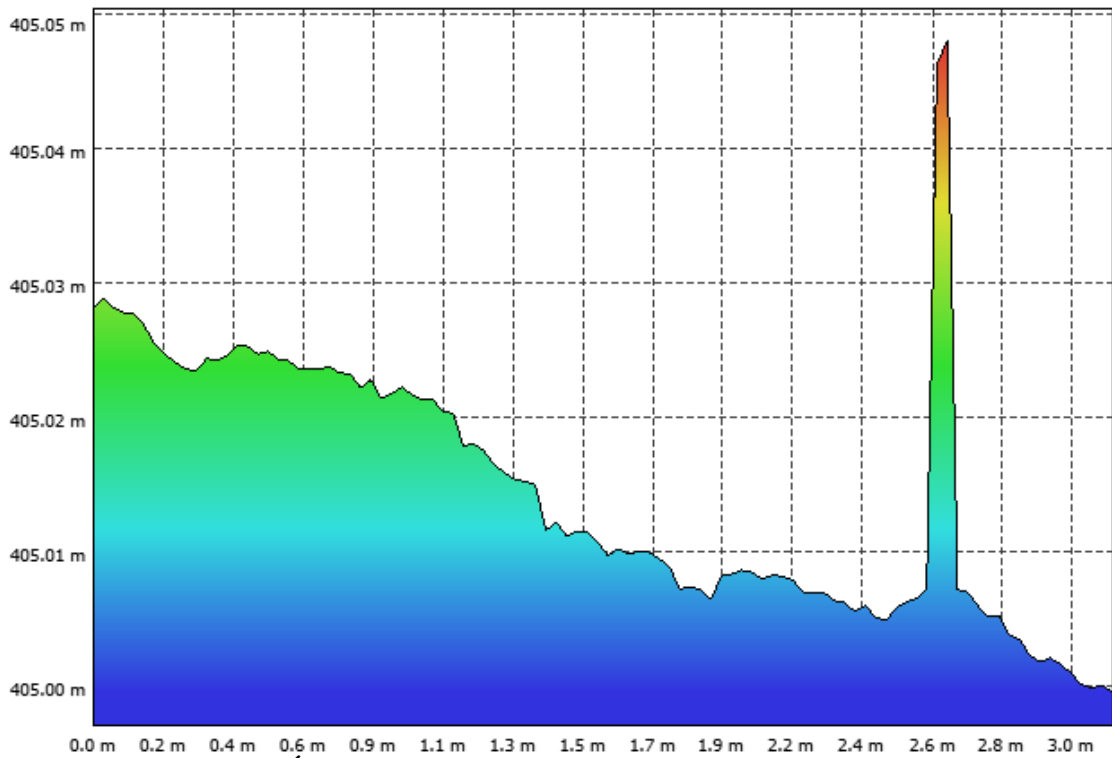


Figura AII 17. Ábaco do perfil transversal P6 retirado do Agisoft Viewer

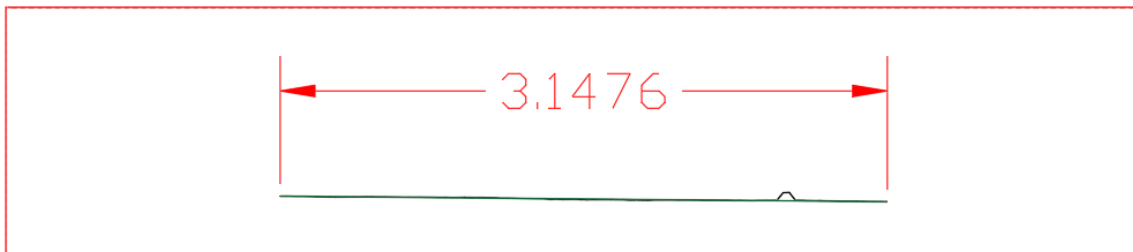


Figura AII 18. Largura do perfil P6 medida no AutoCad

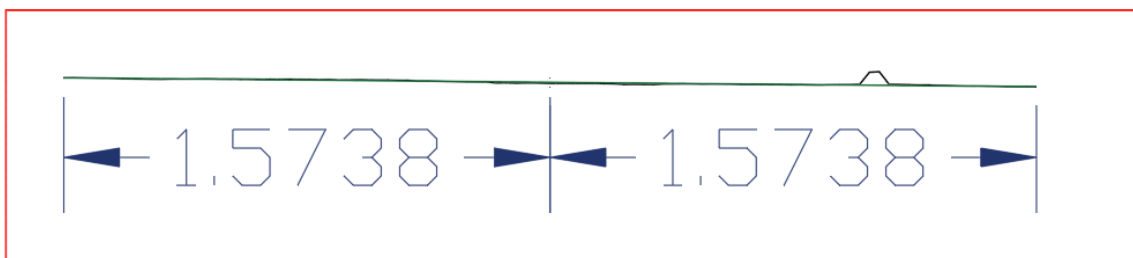


Figura AII 19. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P6

- P7

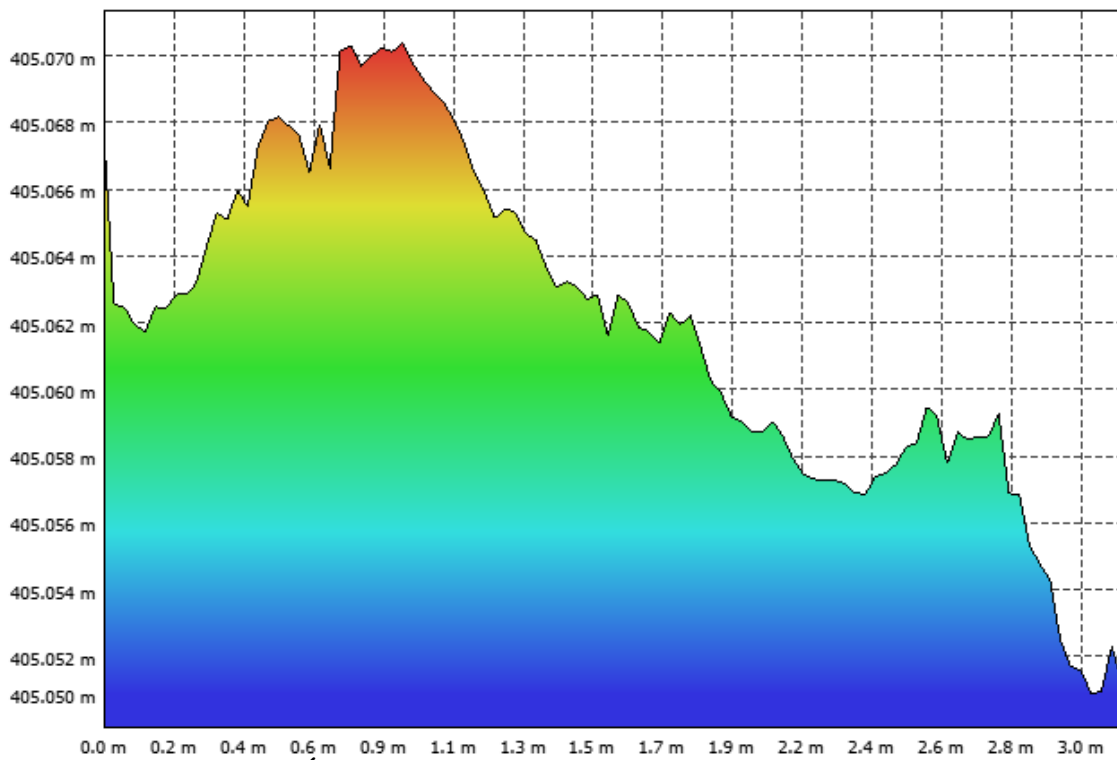


Figura AII 20. Ábaco do perfil transversal P7 retirado do Agisoft Viewer

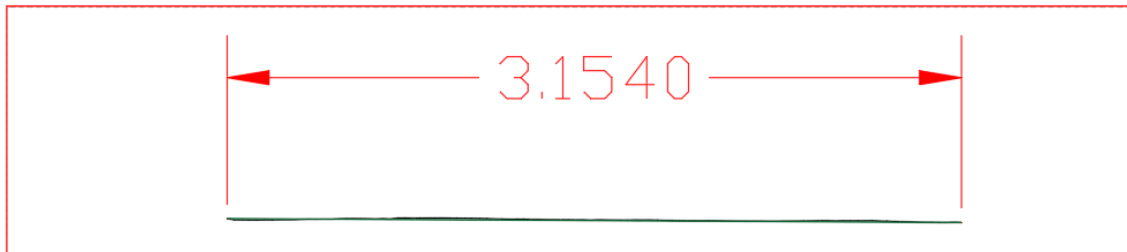


Figura AII 21. Largura do perfil P7 medida no AutoCad

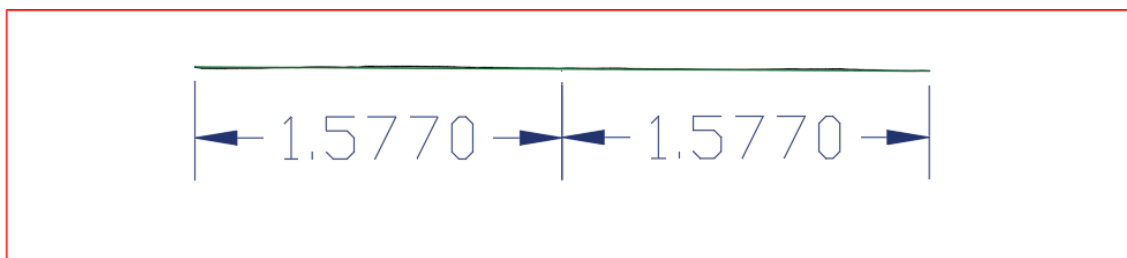


Figura AII 22. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P7

- P8

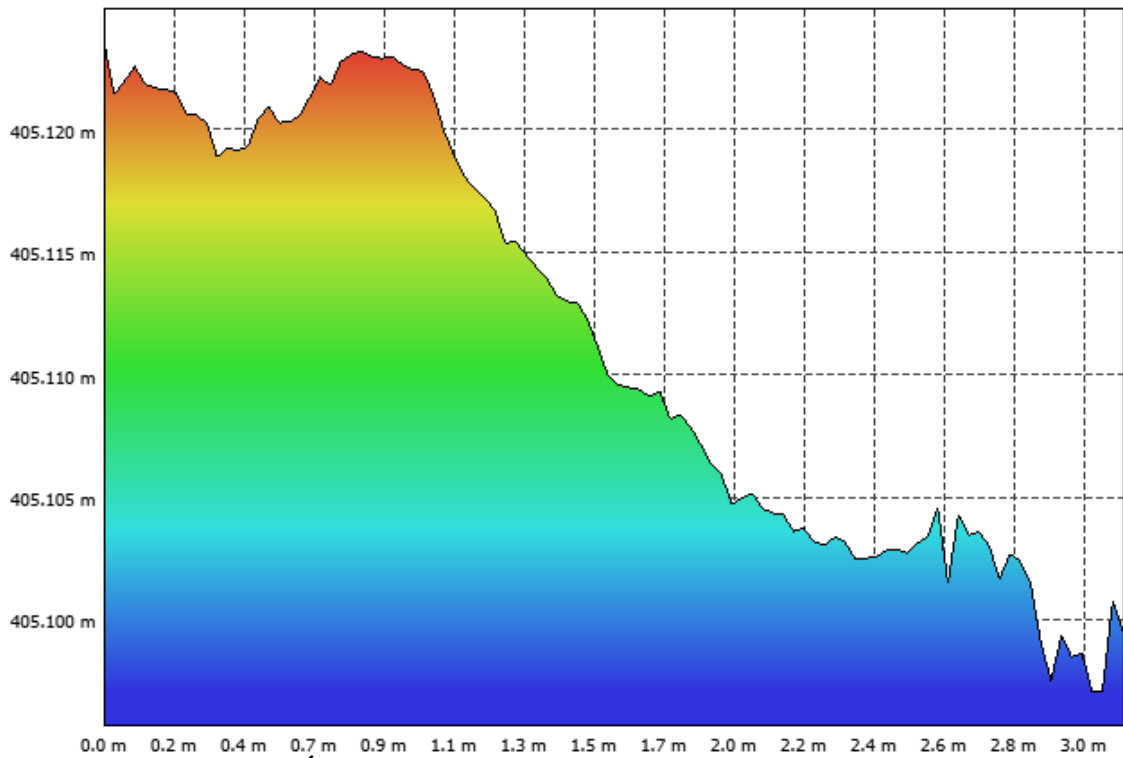


Figura AII 23. Ábaco do perfil transversal P8 retirado do Agisoft Viewer

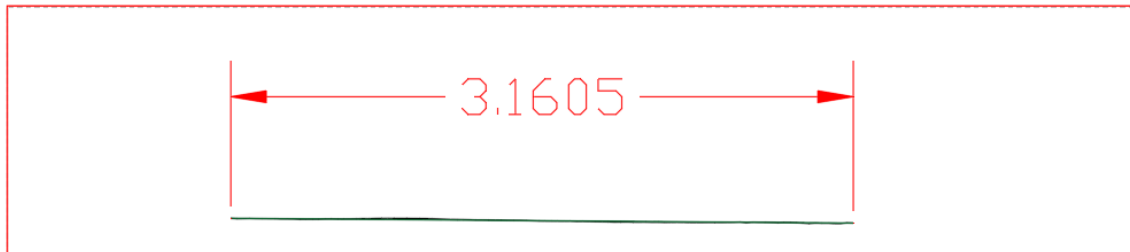


Figura AII 24. Largura do perfil P8 medida no AutoCad

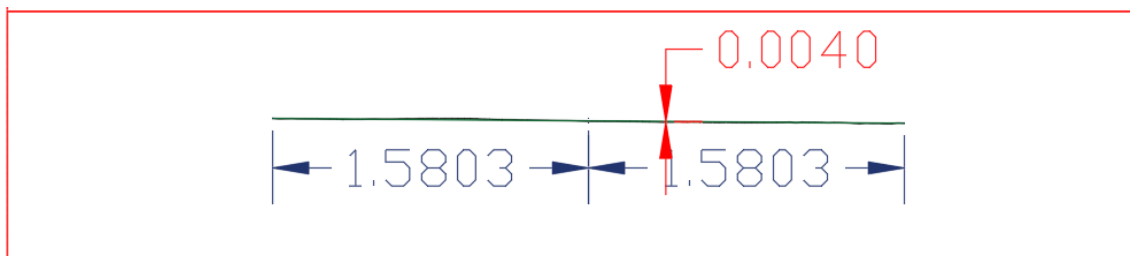


Figura AII 25. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P8

- P9

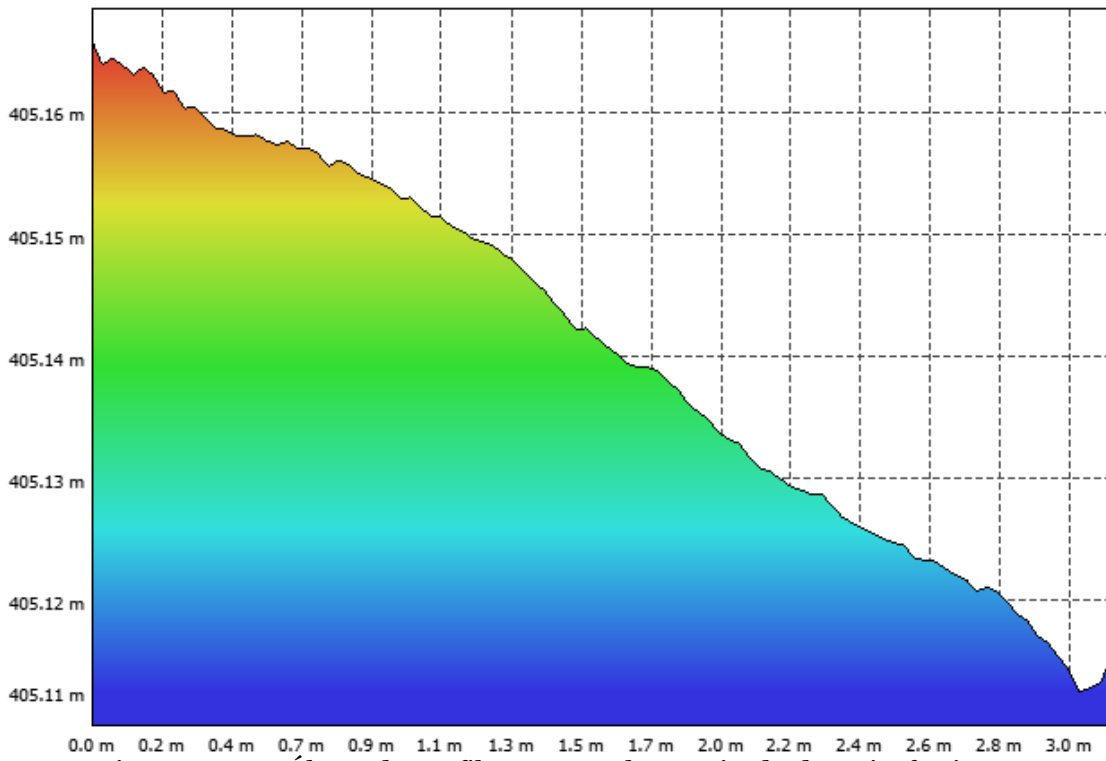


Figura AII 26. Ábaco do perfil transversal P9 retirado do Agisoft Viewer

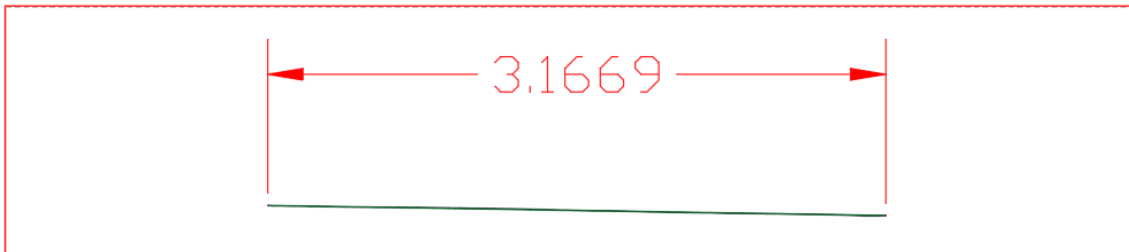


Figura AII 27. Largura do perfil P9 medida no AutoCad

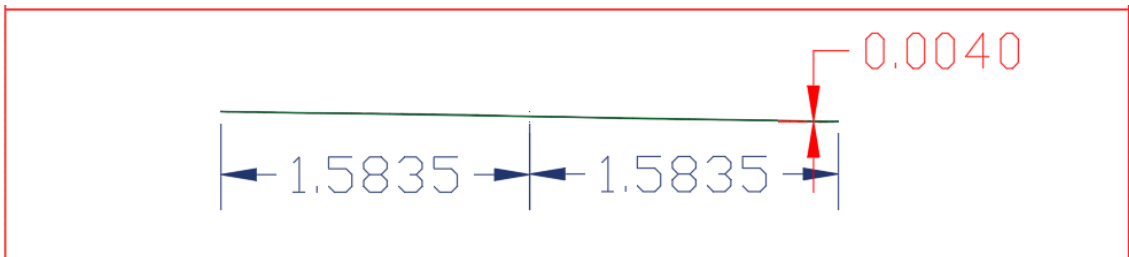


Figura AII 28. Aplicação do método “taut wire” para avaliação da existência de cavado de rodeira no P9

- P10

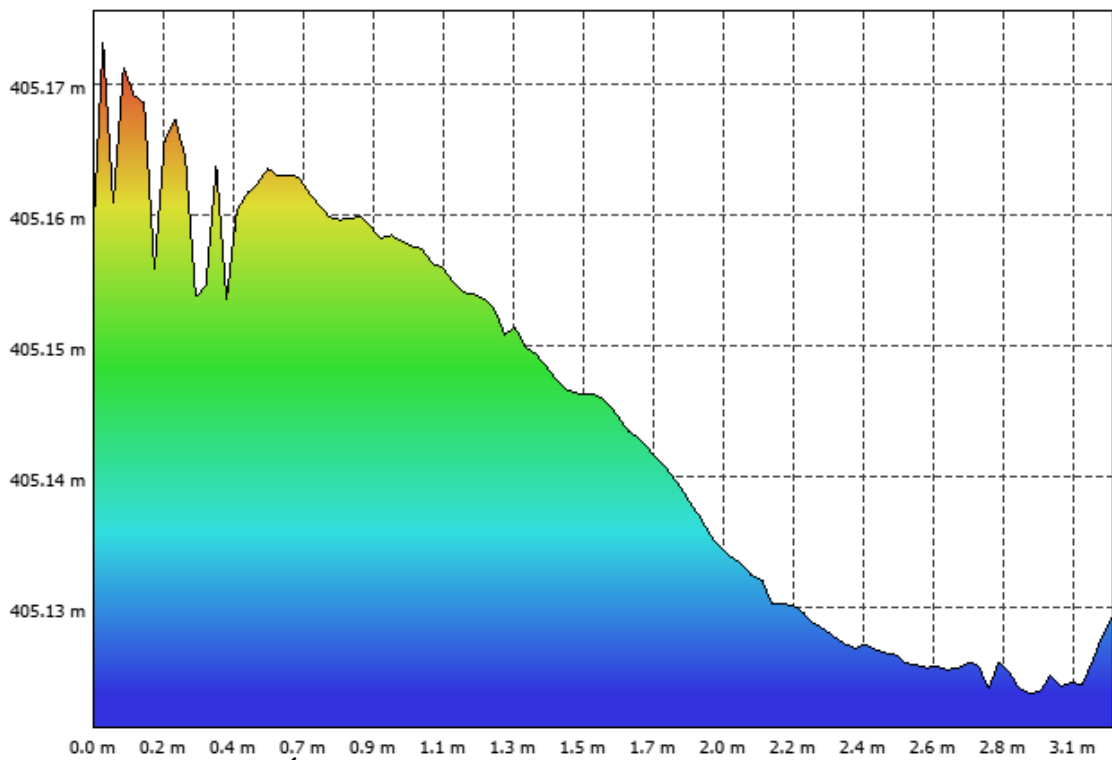


Figura AII 29. Ábaco do perfil transversal P10 retirado do Agisoft Viewer

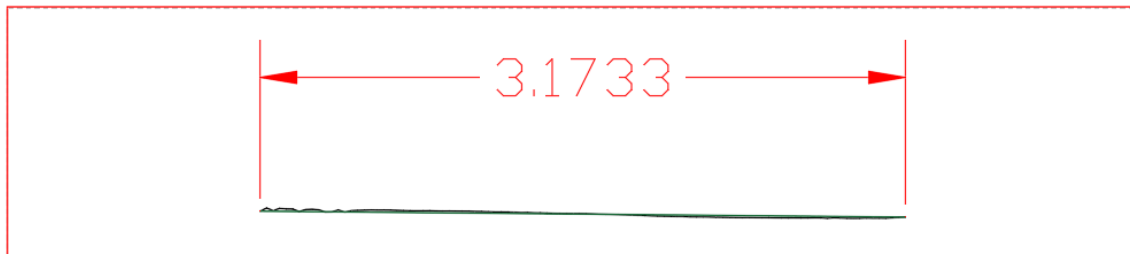


Figura AII 30. Largura do perfil P10 medida no AutoCad

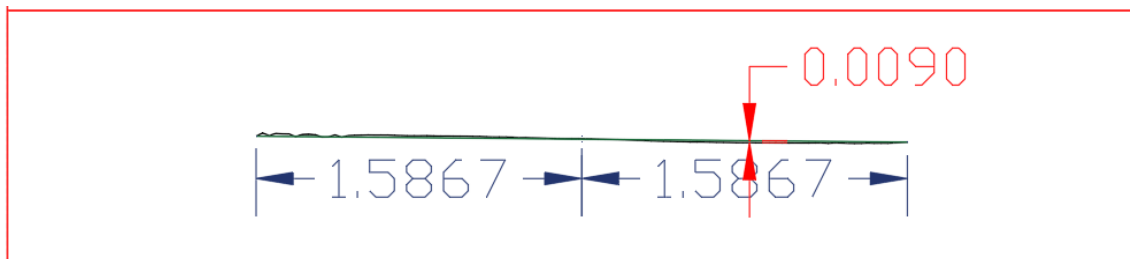


Figura AII 31. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P10

- P11

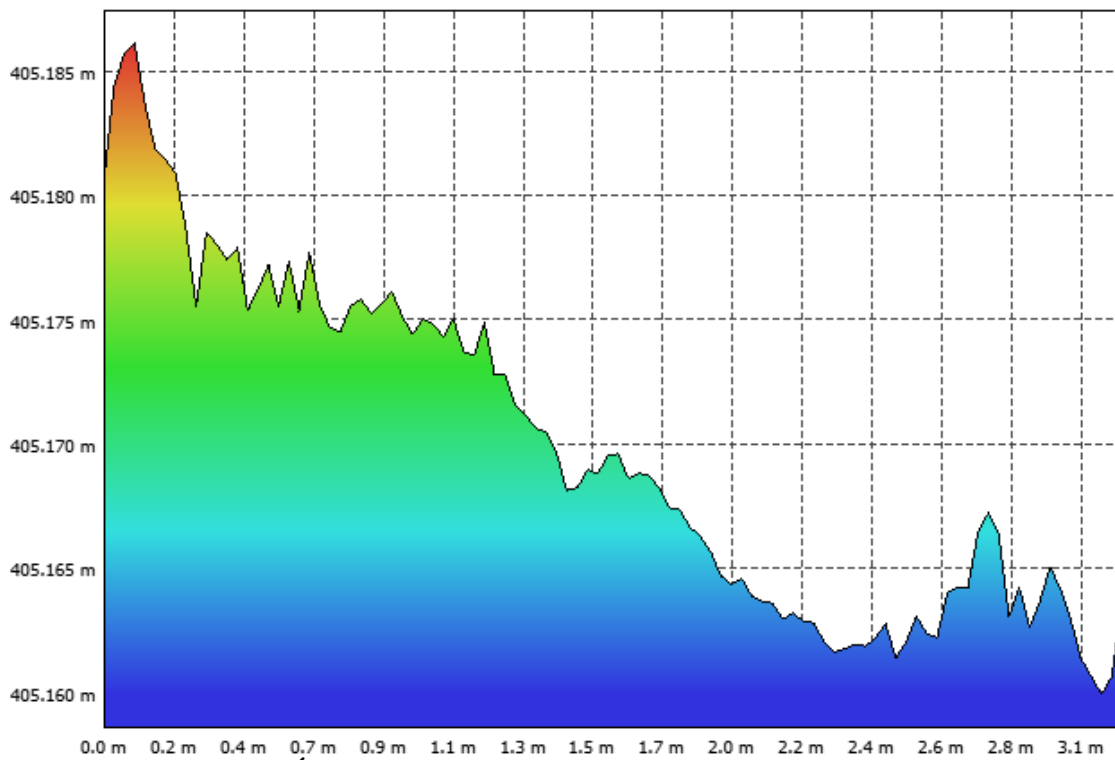


Figura AII 32. Ábaco do perfil transversal P11 retirado do Agisoft Viewer

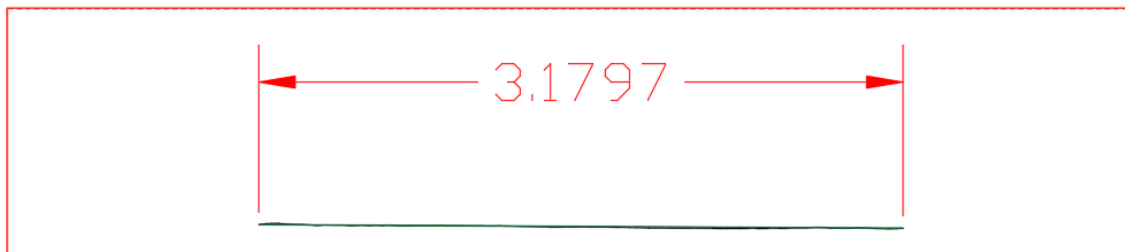


Figura AII 33. Largura do perfil P11 medida no AutoCad

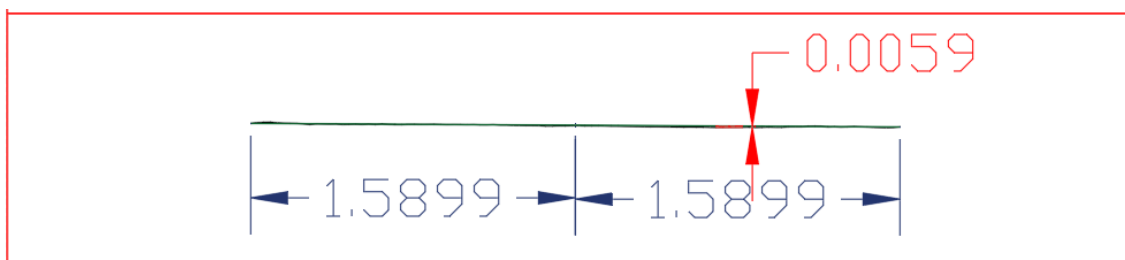


Figura AII 34. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P11

b) Perfis medidos em imagem captada a 20m de altura.

- P1

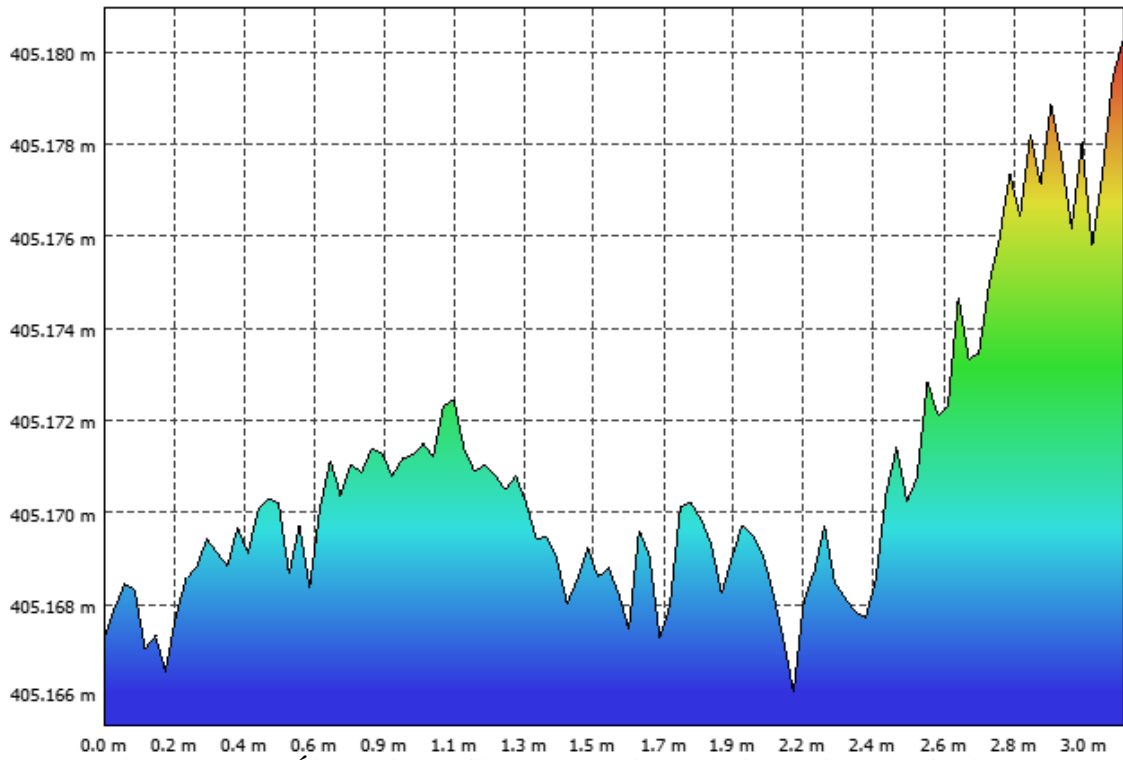


Figura AII 35. Ábaco do perfil transversal P1 criado no do Agisoft Viewer



Figura AII 36. Largura do perfil P1 medida no AutoCad

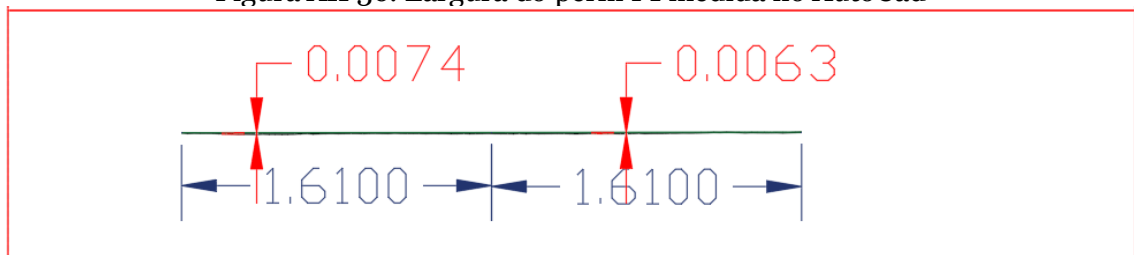


Figura AII 37. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P1

- P2

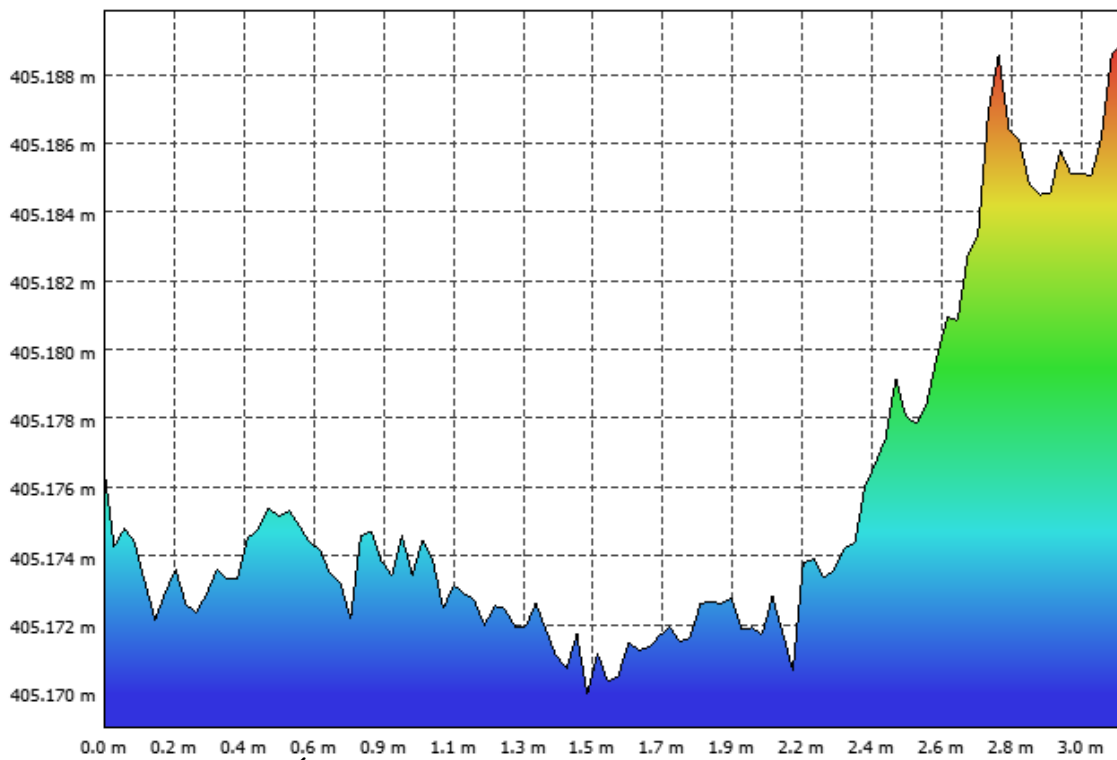


Figura AII 38. Ábaco do perfil transversal P2 criado no do Agisoft Viewer

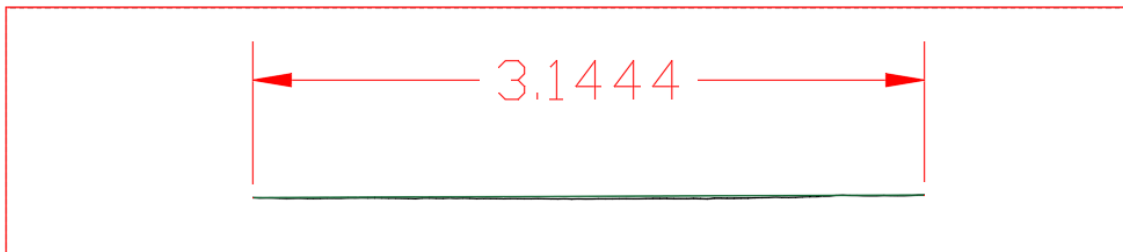


Figura AII 39. Largura do perfil P2 medida no AutoCad

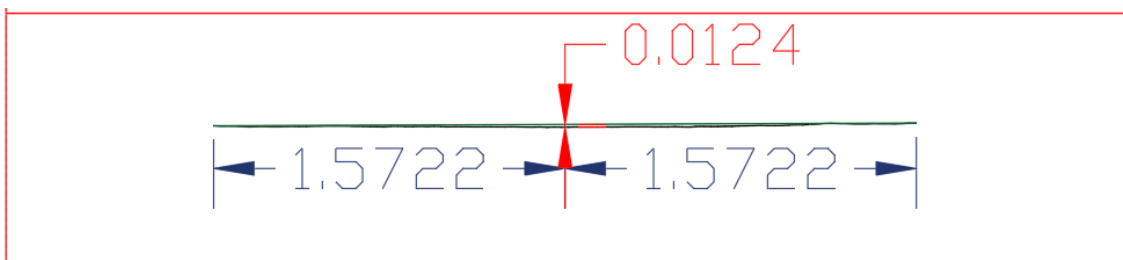


Figura AII 40. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P2

- P3

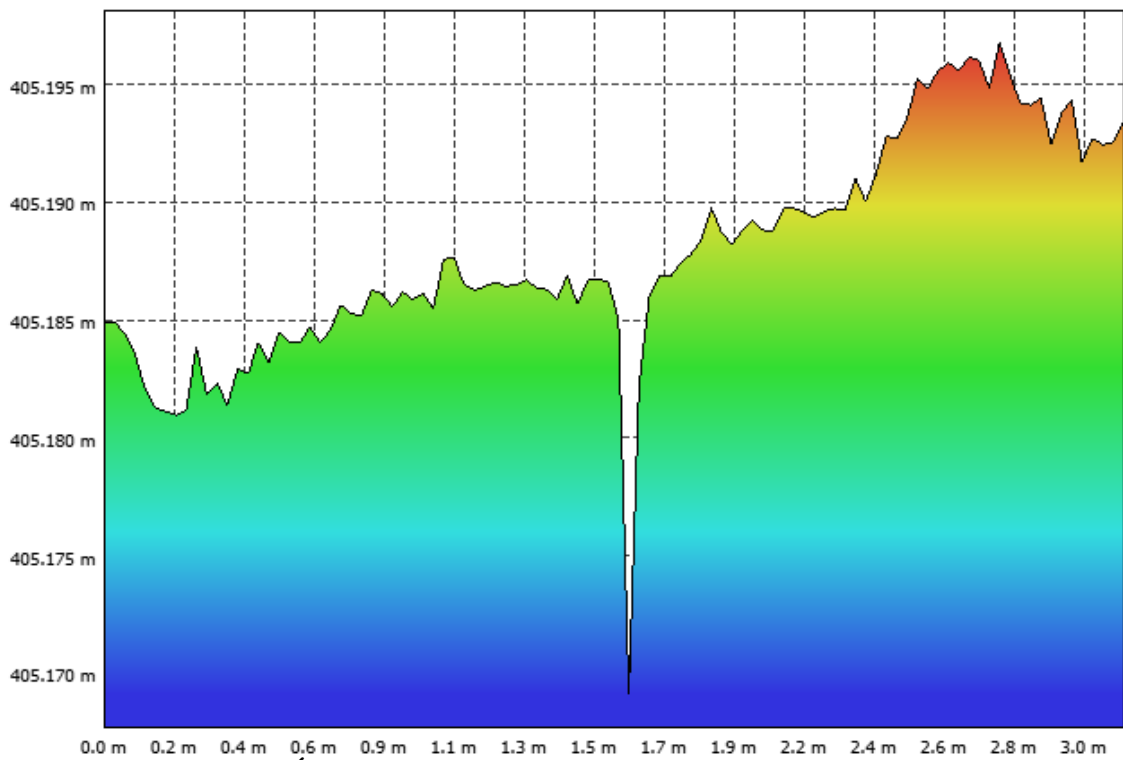


Figura AII 41. Ábaco do perfil transversal P3 criado no do Agisoft Viewer



Figura AII 42. Largura do perfil P3 medida no AutoCad

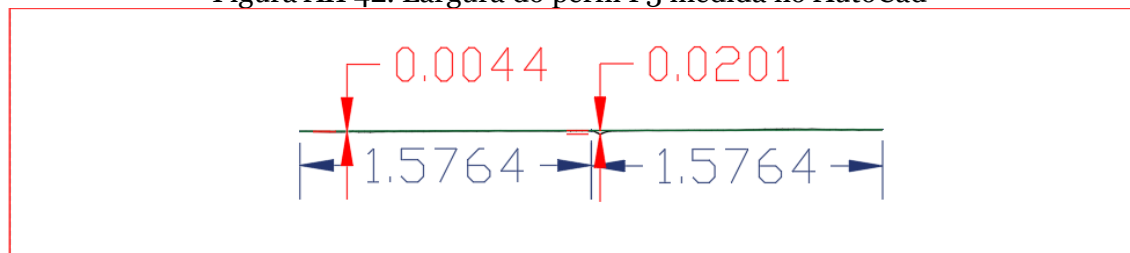


Figura AII 43. Aplicação do método “taut wire” para avaliação da existência de cavado de rodeira no P3

- P4

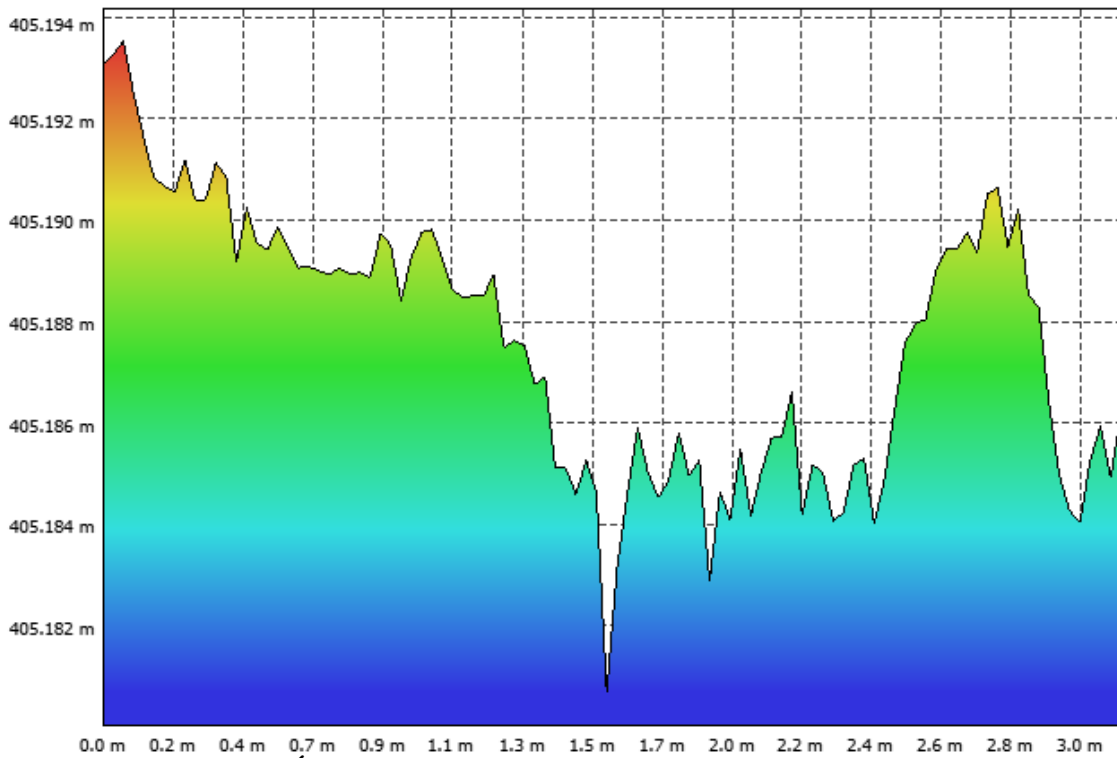


Figura AII 44. Ábaco do perfil transversal P4 criado no do Agisoft Viewer



Figura AII 45. Largura do perfil P4 medida no AutoCad

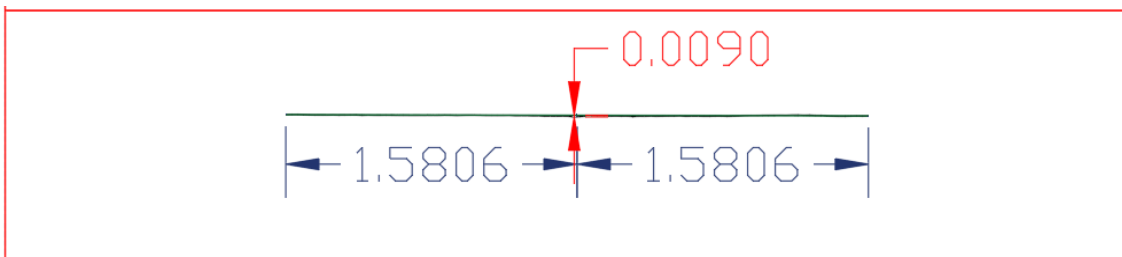


Figura AII 46. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P4

- P5

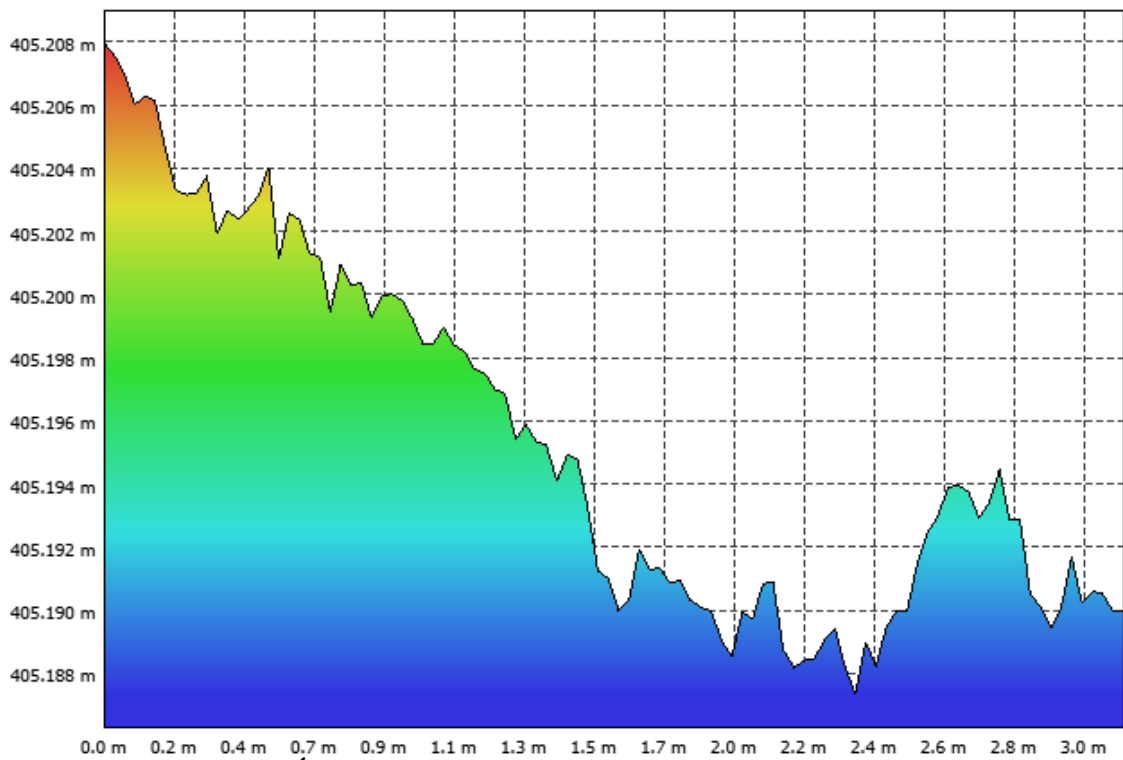


Figura AII 47. Ábaco do perfil transversal P5 criado no do Agisoft Viewer

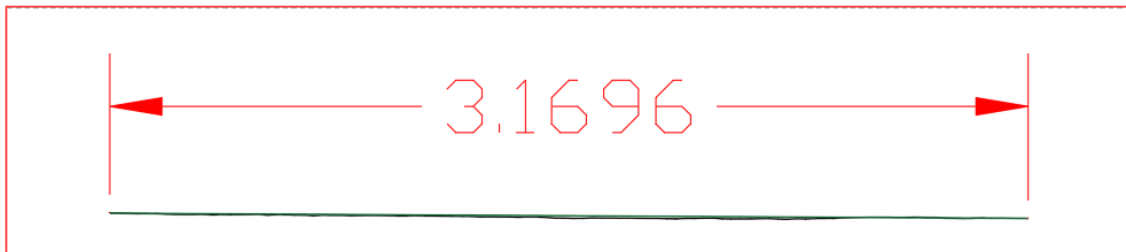


Figura AII 48. Largura do perfil P5 medida no AutoCad

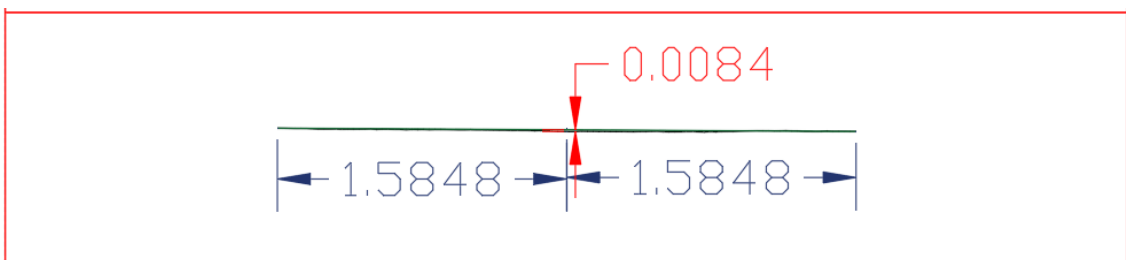


Figura AII 49. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P5

- P6

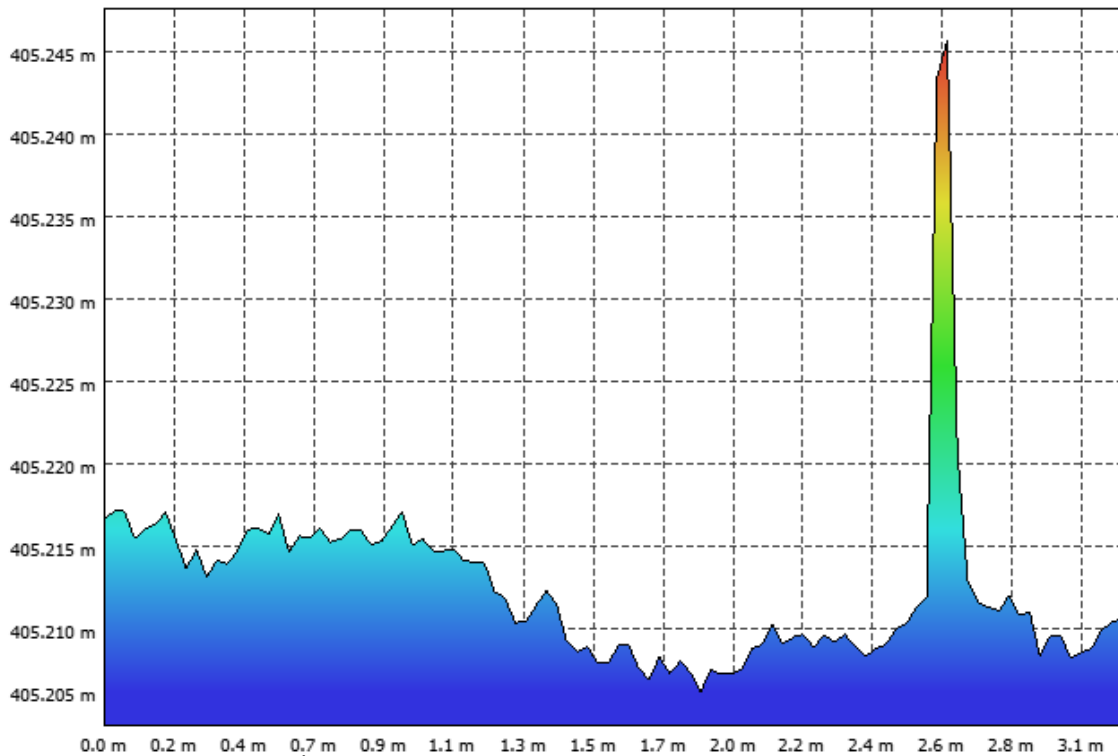


Figura AII 50. Ábaco do perfil transversal P6 criado no do Agisoft Viewer

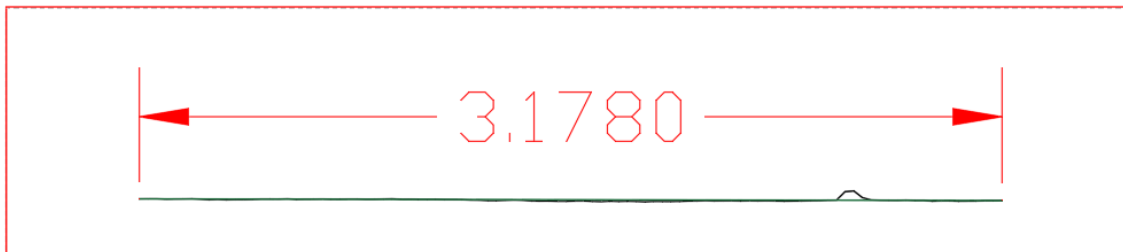


Figura AII 51. Largura do perfil P6 medida no AutoCad

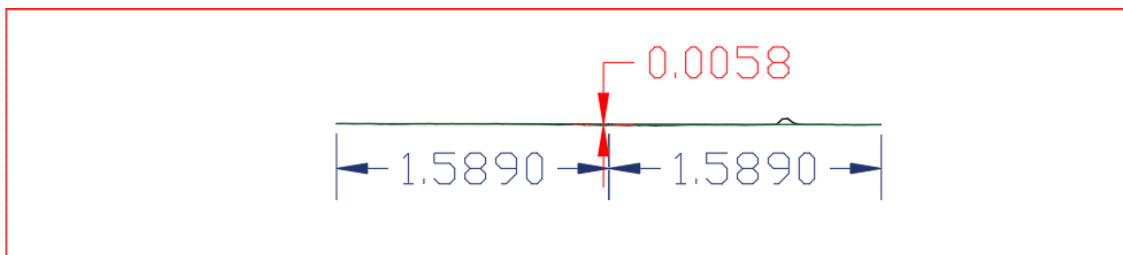


Figura AII 52. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P6

- P7

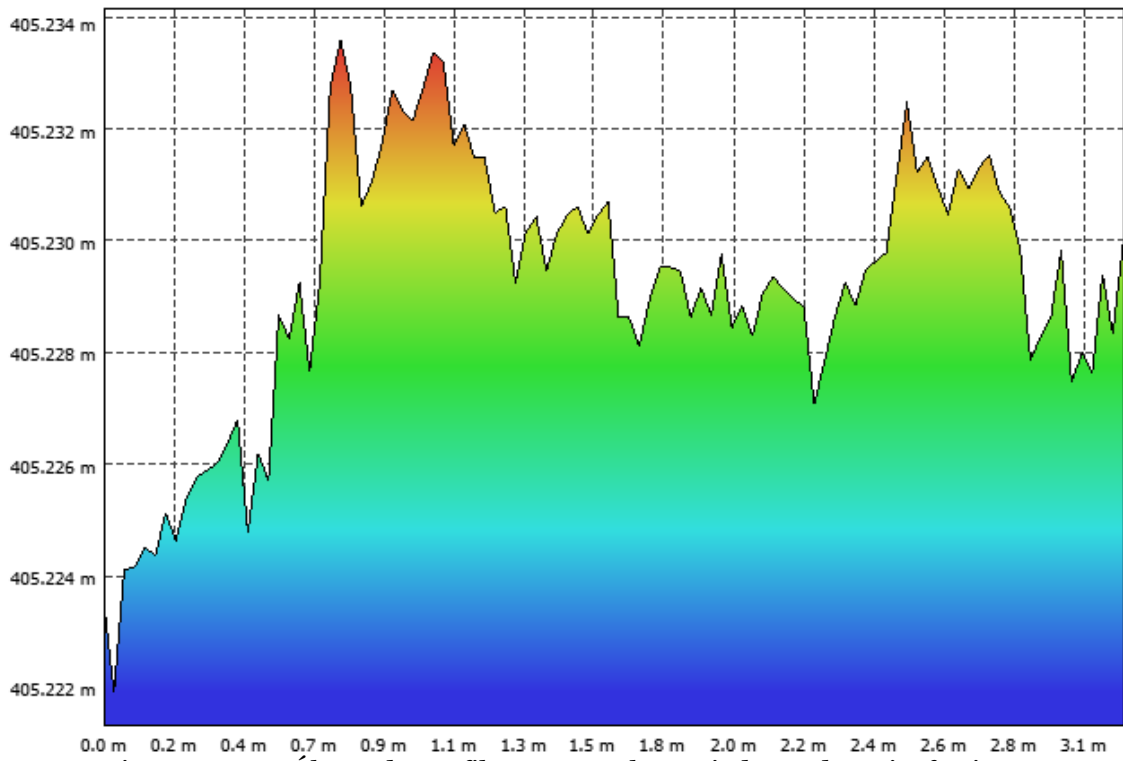


Figura AII 53. Ábaco do perfil transversal P7 criado no do Agisoft Viewer



Figura AII 54. Largura do perfil P7 medida no AutoCad

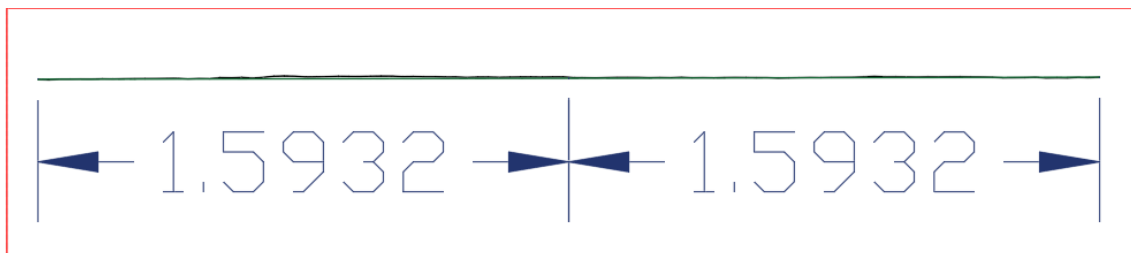


Figura AII 55. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P7

- P8

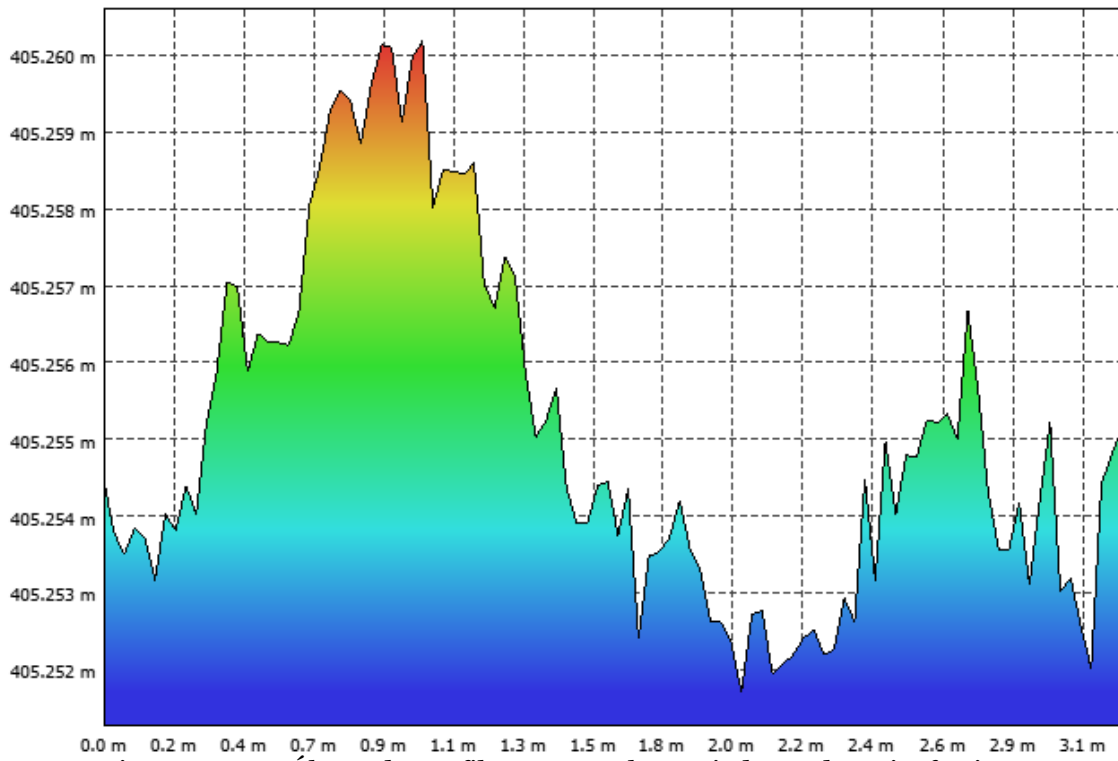


Figura AII 56. Ábaco do perfil transversal P8 criado no do Agisoft Viewer

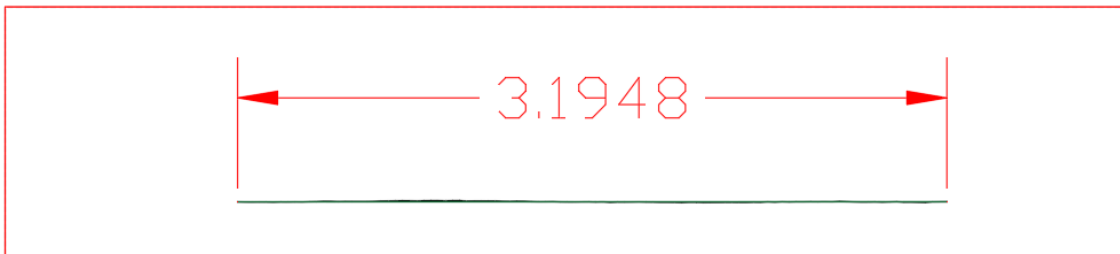


Figura AII 57. Largura do perfil P8 medida no AutoCad

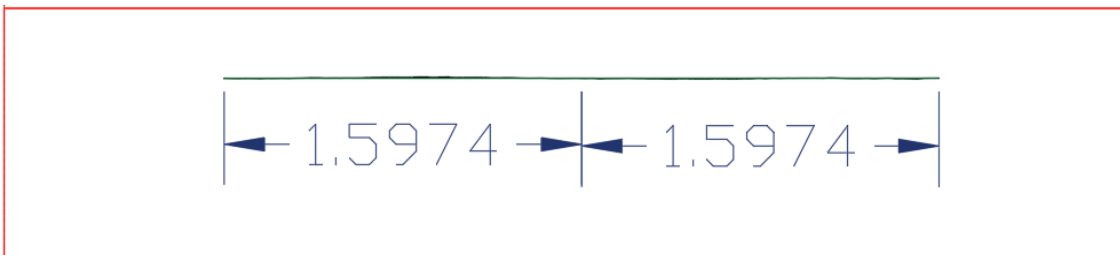


Figura AII 58. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P8

- P9

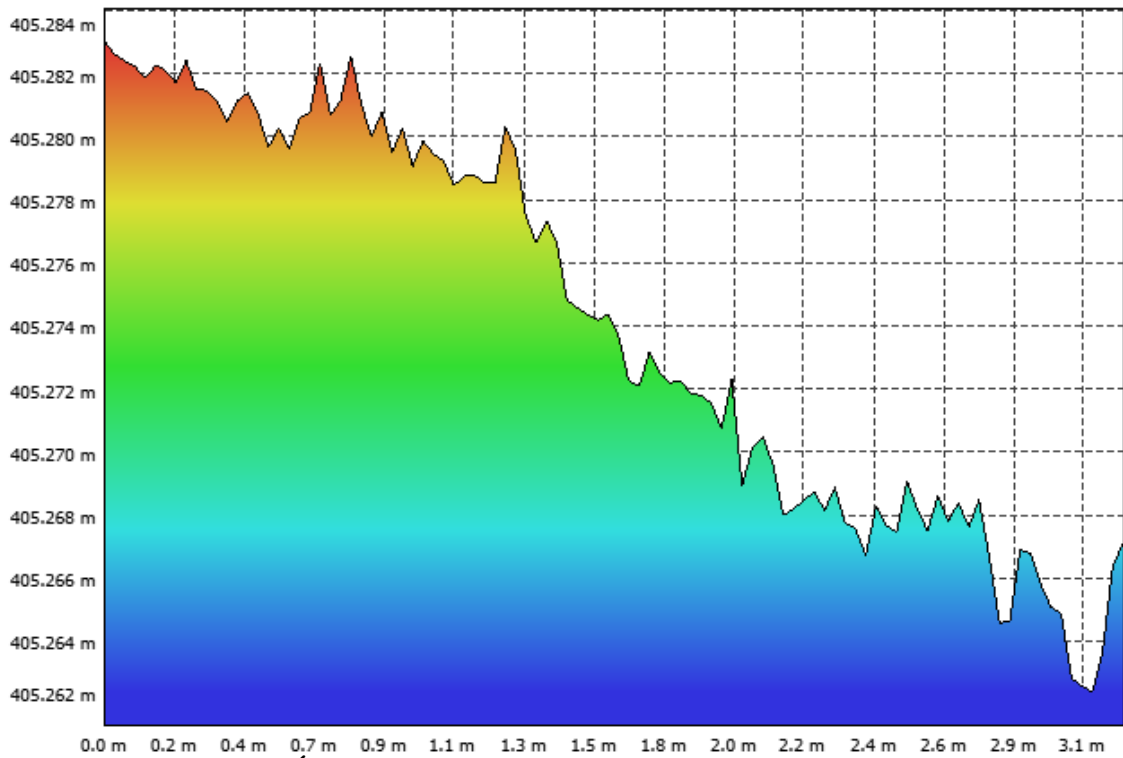


Figura AII 59. Ábaco do perfil transversal P9 criado no do Agisoft Viewer

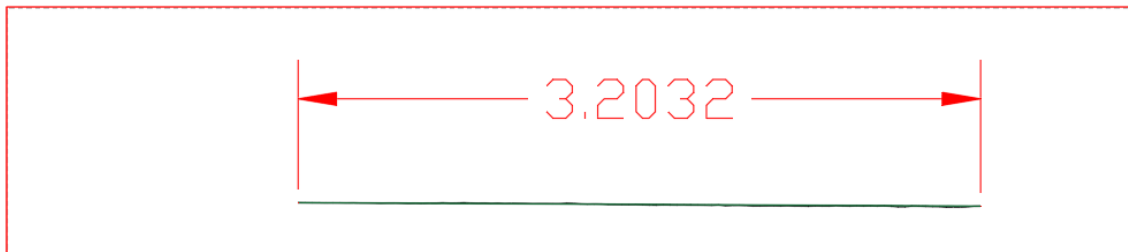


Figura AII 60. Largura do perfil P9 medida no AutoCad

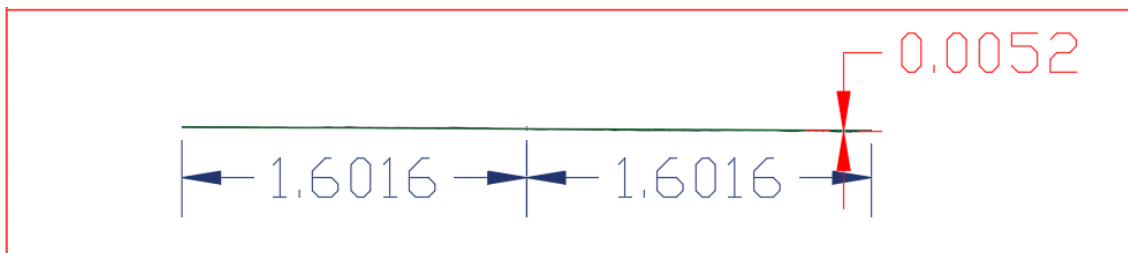


Figura AII 61. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P9

- P10

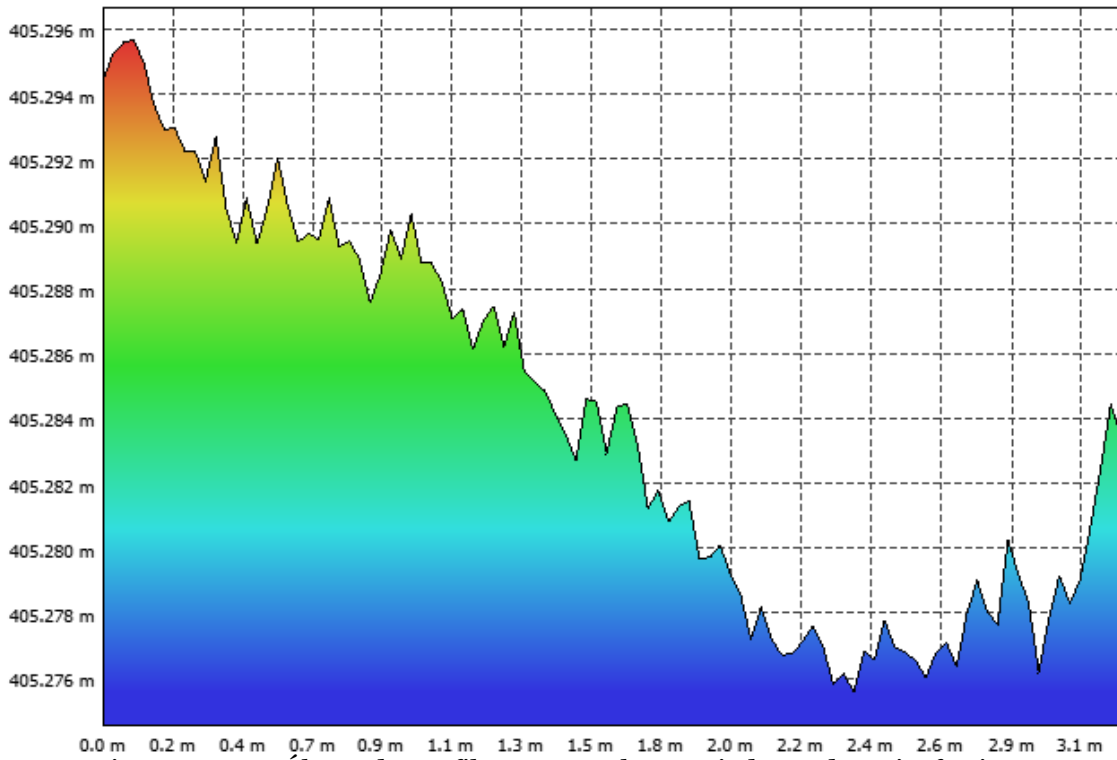


Figura AII 62. Ábaco do perfil transversal P10 criado no do Agisoft Viewer

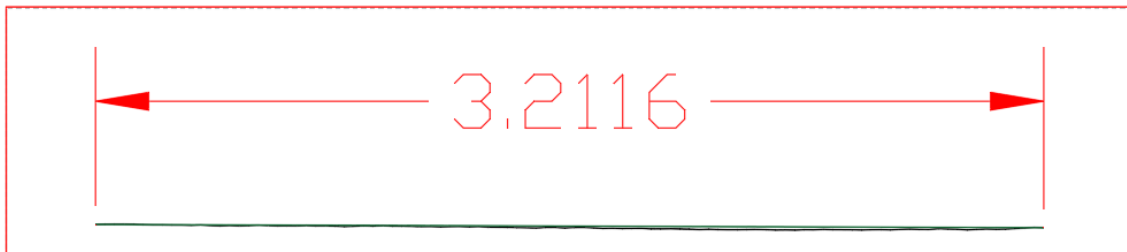


Figura AII 63. Largura do perfil P10 medida no AutoCad

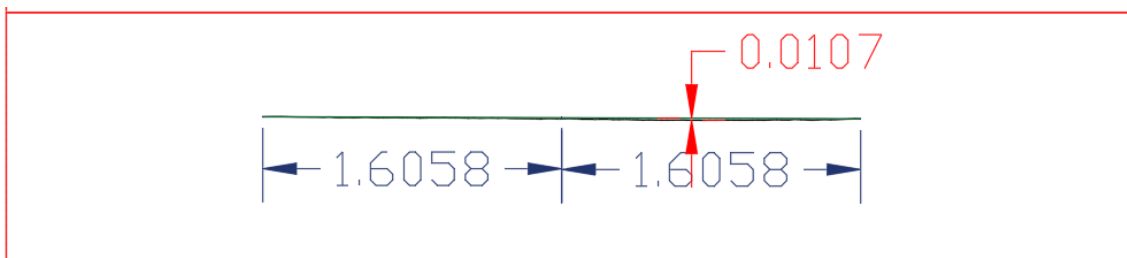


Figura AII 64. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodeira no P10

- P11

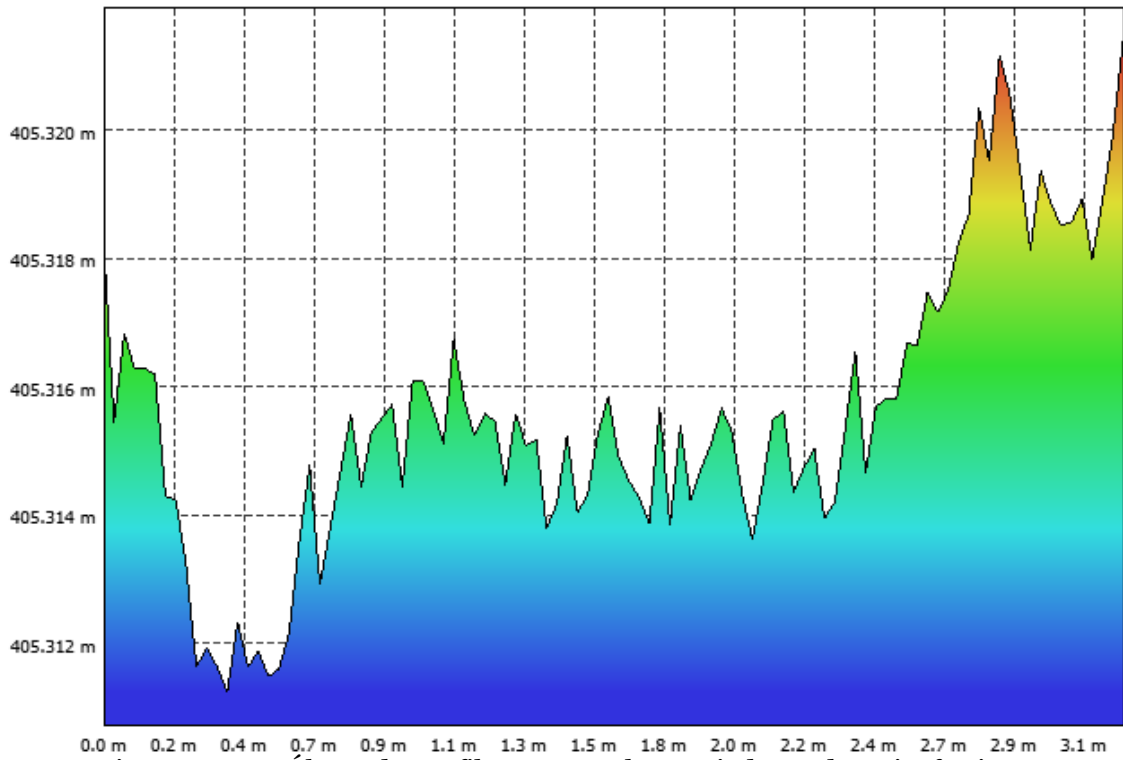


Figura AII 65. Ábaco do perfil transversal P11 criado no do Agisoft Viewer

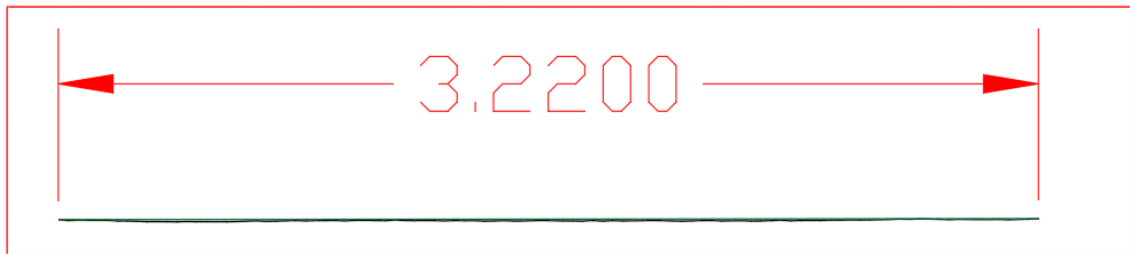


Figura AII 66. Largura do perfil P11 medida no AutoCad

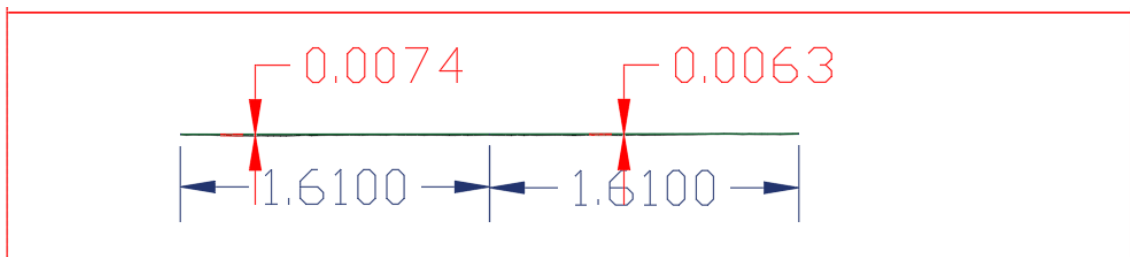


Figura AII 67. Aplicação do método "taut wire" para avaliação da existência de cavado de rodéira no P11

Anexo III – Ábacos utilizados para o cálculo do PCI – Norma ASTM D6433 - 18

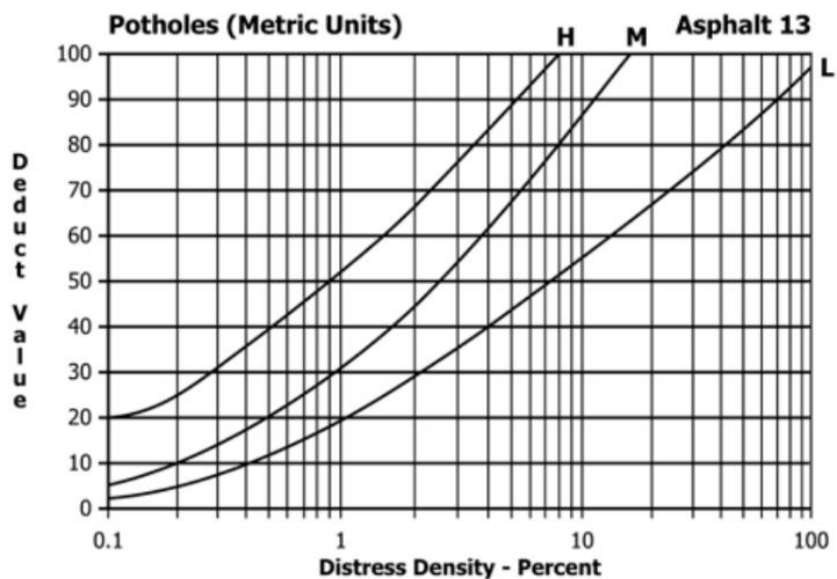


FIG. X3.19 Potholes (Metric Units)

Figura AIII 1. Valor de dedução da degradação tipo covas – Norma ASTM D6433-18

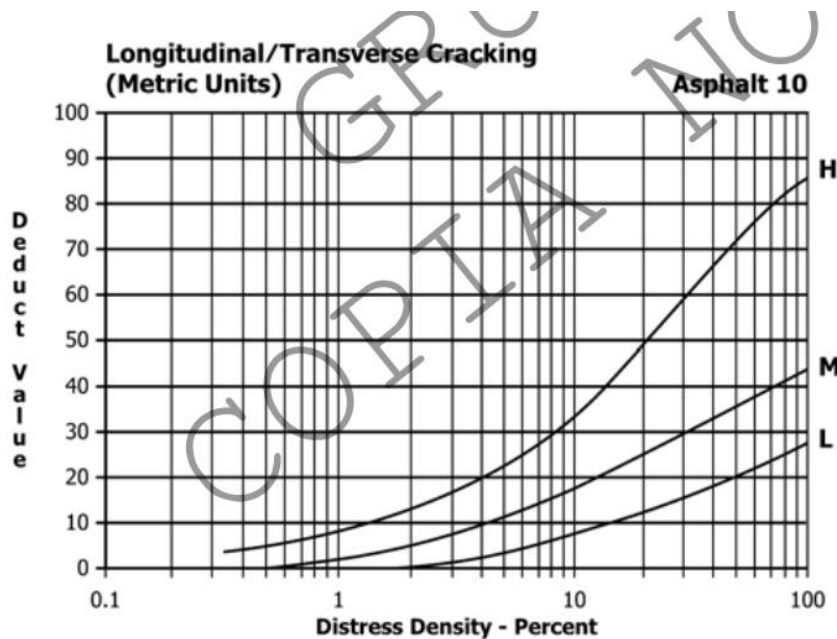


FIG. X3.15 Longitudinal/Transverse Cracking (Metric Units)

Figura AIII 2. Valor de dedução da degradação tipo fendas longitudinais e transversais – Norma ATSM D6433-18.

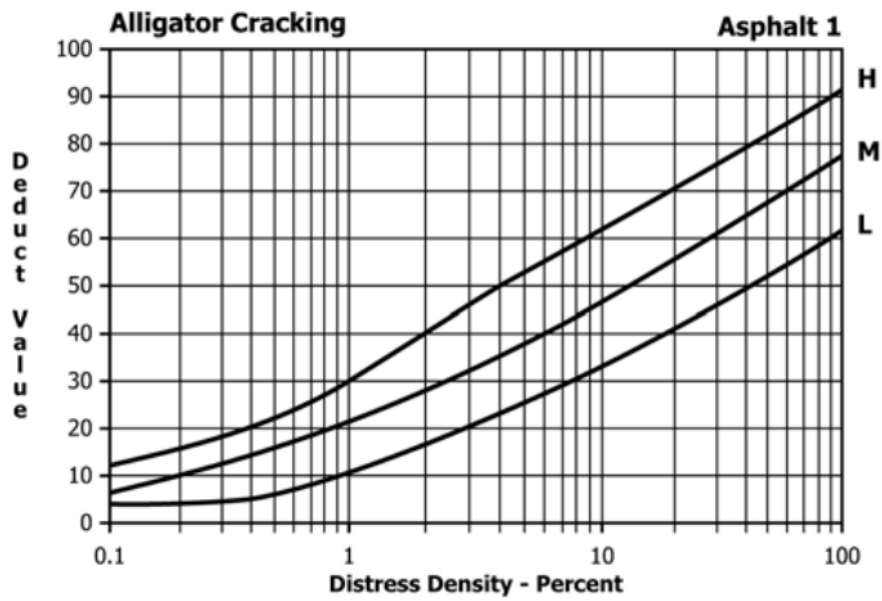


FIG. X3.1 Alligator Cracking

Figura AIII 3. Valor de dedução da degradação tipo peles de crocodilo – Norma ASTM D6433-18.

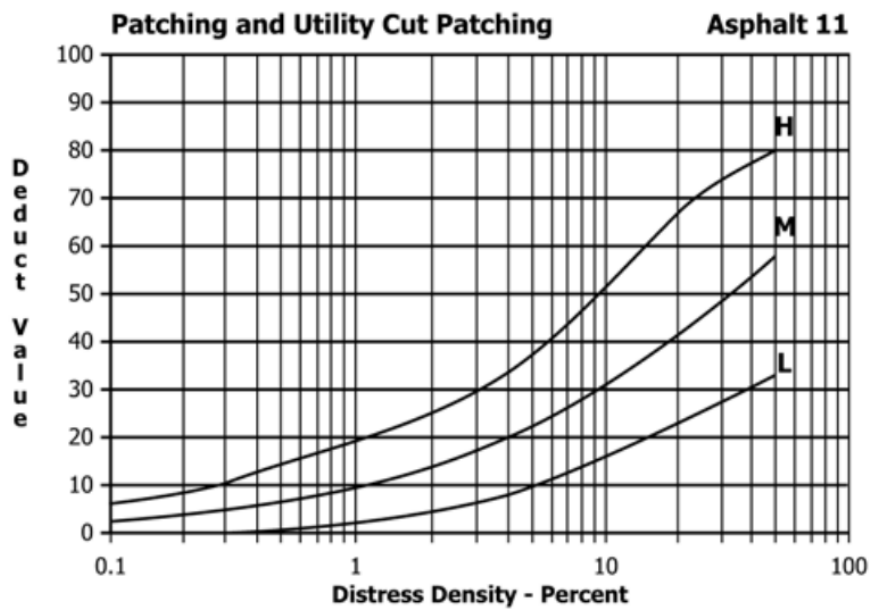


FIG. X3.16 Patching and Utility Cut Patching

Figura AIII 4 Valor de dedução da degradação tipo reparações – Norma ASTM D6433-18

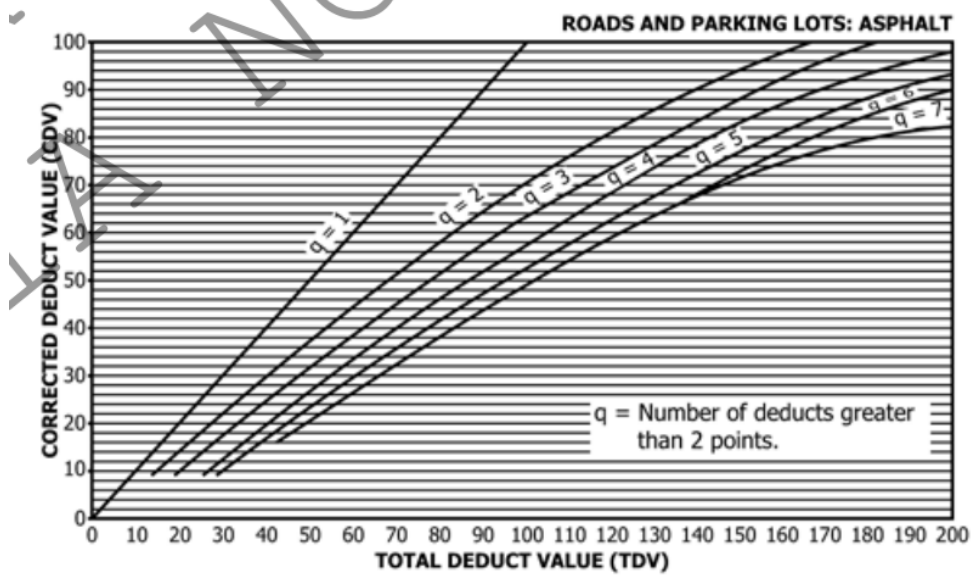


FIG. X3.27 Total Deduct Value

Figura AIII 5. Curva de correção para pavimentos flexíveis - Norma ASTM D6433-18