

**Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados
(VANT) na Inspeção de infraestruturas de
transporte**
Inspeção de pavimentos

José Pedro Roque Tarouca Duarte Gavinhos

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

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

março de 2023

Folha em branco

Declaração de Integridade

Eu, José Pedro Roque Tarouca Duarte Gavinhos, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 44998 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 31/03 /2023



Folha em branco

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento e apreço por todos aqueles que auxiliaram e possibilitaram a realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, agradecer ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior e, em especial, à professora Bertha Santos e ao professor Pedro Almeida, pela orientação dada ao longo de vários meses no decorrer deste trabalho.

Sublinho também o meu agradecimento à Câmara Municipal do Fundão pelo apoio logístico dado ao levantamento de campo e sem o qual não teria sido possível a realização deste estudo.

Resta agradecer à minha mulher e filhos que prescindiram do marido e do pai durante todos os fins-de-semana em que este trabalho foi desenvolvido

Folha em branco

Resumo

A evolução tecnológica tem permitido a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) de forma mais fácil e diversificada criando oportunidades de aplicação em vários campos da engenharia, designadamente, na inspeção de infraestruturas de transporte. Esta tecnologia permite a recolha rápida de dados a baixo custo e suporta os gestores das infraestruturas no desenho dos programas de manutenção e na calendarização de intervenções, contribuindo, assim, para o aumento da durabilidade e dos níveis de segurança dos elementos inspecionados.

O presente estudo parte das principais práticas que recorrem ao uso de VANT para enquadrar a utilização dos mesmos no campo da engenharia, na área dos transportes e mais especificamente na inspeção de pavimentos. O estado da arte permitiu identificar a diversidade de tecnologia disponível, as práticas atuais e algumas das principais vantagens e desvantagens da utilização desta técnica no âmbito pretendido. A revisão dos estudos e outra literatura disponível sobre a utilização específica de VANT na inspeção de pavimentos serviu como ponto de partida para a definição da metodologia e para o desenvolvimento do caso de estudo apresentado.

A metodologia aplicada ao caso de estudo inclui a recolha de imagens de um troço de pavimento flexível rodoviário, com recurso a VANT, e no seu tratamento de forma a criar uma ortoimagem e um modelo 3D a partir da qual foi possível identificar e caracterizar as degradações presentes na superfície do pavimento. O ensaio experimental foi ainda precedido de uma caracterização das condicionantes e da área a inspecionar. Os principais resultados obtidos apontam para desvios planimétricos e altimétricos, em relação à medição direta no local, inferiores a 2 mm para as imagens recolhidas pelo drone Mavic 2 Pro a 3,0 m de altitude.

Nestas condições é possível concluir que a precisão é muito boa e adequada para o fim pretendido. Com os dados recolhidos foi também possível calcular os índices de qualidade global do pavimento PSI e PCI para o troço de pavimento inspecionado. Os índices indicam que o pavimento se encontra em muito mau estado de conservação, apontando para a necessidade de uma intervenção de reabilitação ou mesmo de substituição do pavimento.

Palavras-chave

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

Folha em branco

Abstract

Technological evolution has allowed the use of unmanned aerial vehicles (UAV) in an easier and more diversified way, creating opportunities for application in various fields of engineering, namely, in the inspection of transport infrastructures. This technology allows fast data collection at low cost and supports infrastructure managers in designing maintenance programs and scheduling interventions, thus contributing to increasing the durability and safety levels of the inspected elements.

The present study starts from the main practices that resort to the use of UAVs to frame their use in the field of engineering, in transport and more specifically in the inspection of pavements. The state of the art allowed identifying the diversity of available technology, current practices and some of the main advantages and disadvantages of using this technique in the intended scope. The review of studies and other available literature on the specific use of UAVs in pavement inspection served as a starting point for defining the methodology and for developing the case study presented.

The methodology applied to the case study includes the collection of images of a section of flexible road pavement, using a UAV, and its treatment in order to create an orthoimage and a 3D model from which it was possible to identify and characterize the degradations present on the pavement surface. The experimental test was also preceded by a characterization of the constraints and the area to be inspected. The main results obtained point to planimetric and altimetric deviations, in relation to the direct measurement on site, of less than 2 mm for the images collected by the Mavic 2 Pro drone at 3.0 m altitude.

Under these conditions it is possible to conclude that the accuracy is very good and suitable for the intended purpose. With the data collected, it was also possible to calculate the global quality indexes of the PSI and PCI pavement for the inspected pavement section. The indices indicate that the pavement is in a very poor state of conservation, pointing to the need for a rehabilitation intervention or even replacement of the pavement.

Keywords

Unmanned aerial vehicles (UAV); transport infrastructure; pavement inspection; surface degradation of pavements; 3D model.

Folha em branco

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento, objetivo e estrutura do trabalho.....	1
1.2. Veículos aéreos não tripulados (VANT).....	2
1.2.2. Regulamentação (breve referência).....	3
1.2.3. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) na engenharia civil.....	6
1.2.4. Situação em Portugal.....	12
1.2.5. Vantagens e desvantagens do uso de VANT em inspeções de infraestruturas.....	13
2. Aplicações de veículos aéreos não tripulados (VANT) na área dos transportes.....	15
2.1. Segurança Rodoviária.....	15
2.2. Obtenção de dados e monitorização de tráfego rodoviário.....	16
2.3. Verificação do estado de conservação de infraestruturas rodoviárias.....	19
2.4. Acompanhamento na execução de projetos.....	21
2.5. Monitorização das faixas de domínio rodoviário.....	21
2.6. Logística - Entrega de pequenas encomendas.....	22
3. Inspeção de pavimentos com recurso a veículos aéreos não tripulados (VANT).....	23
4. Caso de estudo.....	35
4.1. Metodologia.....	35
4.2. Caracterização do problema.....	36
4.2.1. Identificação e caracterização do troço de estrada em estudo.....	36
4.2.2. Definição das características a medir.....	37
4.3. Recolha de dados - Inspeção do pavimento.....	39
4.3.1. Condicionantes.....	39
4.3.2. Recursos.....	40
4.3.3. Captura de imagens.....	42
4.4. Tratamento de dados.....	44
4.4.1. Características gerais do troço inspecionado.....	46
4.4.2. Precisão da medição.....	47
4.4.3. Medição das degradações.....	49
4.4.4. Cálculo dos índices globais do estado do pavimento PSI e PCI.....	70
4.5. Discussão de resultados.....	80
5. Conclusões e trabalhos futuros.....	83
Referências.....	85

Folha em branco

Lista de Figuras

Figura 1 - Classificação dos VANT com base na plataforma de comunicação (adaptado de Shakhatreh, et al., 2019).....	2
Figura 2 - Ilustração das regras gerais de distanciamento em categoria aberta (ANAC).....	4
Figura 3 - Previsão do valor das soluções com VANT nas principais indústrias (adaptado de Shakhatreh, et al., 2019).....	7
Figura 4 – Usos de VANT nas inspeções de infraestruturas e construções (adaptado de Shakhatreh, et al., 2019).....	8
Figura 5 - Distribuição de serviços dos membros da ARPAS-UK por atividade em 2017 (<i>Department for business, Energy & Industrial Strategy, Government Office for Science, 2017</i>)	10
Figura 6 - Imagem de alta resolução (esquerda) e orto-retificada (direita) da passagem superior de Merriman Road East (Brooks, et al., 2014)	20
Figura 7 - Imagens térmicas georreferenciadas adquiridas através do sistema de câmaras Tau2 e Thermal Capture montadas num VANT, sobrepostas em ortofotos de alta resolução (esquerda) e nuvem de pontos 3D LiDAR (direita)	20
Figura 8 – Componentes dos sistemas de gestão de pavimentos (adaptado de Millian, 2019).....	23
Figura 9 - Estrutura geral do sistema de gestão de pavimentos da Infraestruturas de Portugal (Picado-Santos, et al., 2006).....	25
Figura 10 - Integração de tecnologias não intrusivas de controlo remoto para avaliação de danos em pavimentos de estradas (adaptado de Themistocleous, et al., 2014).....	27
Figura 11 - Exemplos de modelos 3D ortoimagem (à esquerda) e na forma de nuvem de pontos (à direita) (Tan, et al., 2019).....	30
Figura 12 - Fluxograma geral do estudo (adaptado de Tan, et al., 2019)	31
Figura 13 - Resultados da extração da superfície da estrada (pavimento). À esquerda antes da extração e à direita depois da extração (Tan, et al., 2019).....	31
Figura 14 - Fluxograma do procedimento proposto por Nappo et al. (adaptado de Nappo et al., 2021)	32
Figura 15 - Caracterização das degradações do pavimento com o <i>Global Mapper</i> (Kaamin, et al., 2022)	33
Figura 16 - Metodologia para execução do estudo de inspeção de pavimentos com VANT e determinação de índices de qualidade do pavimento.....	35
Figura 17 - Localização do troço de estrada em estudo (extraído do Google Earth)	36
Figura 18 - Aspeto geral do troço estudado.....	37
Figura 19 - Inspeção com restrição de circulação numa das vias de uma das faixas de rodagem	40
Figura 20 - DJI Mavic 2 Pro	41
Figura 21 - Ilustração do campo de visão (FOV) de uma câmara (Awati, 2022)	43
Figura 22 - Levantamento topográfico de pontos de controlo para calibração do modelo.....	44
Figura 23 – Grau de sobreposição para obtenção do modelo 3D.....	45
Figura 24 - Extrato do menu <i>Layers</i> do Agisoft com identificação das camadas criadas	46

Figura 25 - Extrato do modelo 3D criado a partir das imagens captadas com VANT.....	46
Figura 26 - Determinação da área do troço em estudo no Agisoft Viewer.....	47
Figura 27 - Medição do comprimento do troço em estudo no Agisoft Viewer	47
Figura 28 - Medição de elementos com dimensões conhecidas no modelo 3D.	48
Figura 29 - Mapeamento de fendas longitudinais	49
Figura 30 - Medição de fenda longitudinal nível 1.....	51
Figura 31 - Medição de fenda longitudinal nível 2.....	51
Figura 32 - Medição de fenda longitudinal nível 3	51
Figura 33 - Mapeamento de fendas transversais	52
Figura 34 - Ilustração da medição de fendas transversais no programa Agisfot viewer	54
Figura 35 - Mapeamento de fendilhamento pele de crocodilo	55
Figura 36 - Fendilhamento pele de crocodilo de nível 2.....	55
Figura 37 - Fendilhamento pele de crocodilo de nível 3.....	56
Figura 38 - Distribuição dos perfis transversais no troço inspecionado	57
Figura 39 - Localização perfis longitudinais	64
Figura 40 - Mapeamento de defeitos superficiais.....	67
Figura 41 - Ninho DS 1: medição da área em campo	69
Figura 42 - Ninho DS 1: medição da profundidade em campo.....	69
Figura 43 - Ábacos utilizados na determinação dos valores VD (ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018).....	78
Figura 44 - Ábaco para determinação do valor deduzido total corrigido (VDC) (ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018)	79

Folha em branco

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros de desempenho segundo os tipos de VANT (adaptado de Shakhathreh, et al., 2019).....	3
Tabela 2 - Principais aspetos da legislação portuguesa sobre VANT (adaptado de Falorca, et al., 2019)	6
Tabela 3 - Inspeções de infraestruturas com VANT (adaptado de Shakhathreh, et al., 2019)	9
Tabela 4 - Comparação entre métodos de recolha de dados de tráfego (adaptado de Barmounakis, et al., 2016).....	17
Tabela 5 - Requisitos para a recolha de dados com recurso a VANT para deteção de degradações de pavimentos (adaptado de Shaghilil, et al., 2018)	28
Tabela 6 - Comparação entre as práticas atuais, o MRP da Flórida e o sistema de classificação de manutenção proposto por Shaghilil et al. (adaptado de Shaghilil, et al., 2018)	29
Tabela 7 - Tipos de degradação em pavimentos flexíveis (adaptado de Estradas de Portugal, S.A., 2008)	38
Tabela 8 - Características do drone Mavic 2 Pro (adaptado de DJI, 2022)	41
Tabela 9 - Resolução da câmara Mavic 2 Pro para captação de imagens a 3m de altura	43
Tabela 10 - Características geométricas gerais do troço em estudo	47
Tabela 11 - Comparação de medidas reais com as obtidas no modelo 3D (em planta)	49
Tabela 12 - Comparação de medidas reais com as obtidas no modelo 3D (em profundidade)	49
Tabela 13 - Classificação das fendas longitudinais do troço inspecionado segundo catálogo de degradações da IP, S.A.	50
Tabela 14 - Classificação das fendas transversais do troço inspecionado segundo catálogo de degradações da IP, S.A.	53
Tabela 15 - Classificação do fendilhamento pele de crocodilo do troço inspecionado	56
Tabela 16 - Perfis transversais de 5 em 5m retirados do modelo 3D do troço de estrada em análise	57
Tabela 17 - Deformações medidas nos perfis transversais do modelo 3D.....	64
Tabela 19 - Perfis longitudinais	64
Tabela 19 - Classificação dos defeitos superficiais	67
Tabela 21 - Avaliação do estado do pavimento segundo o valor do índice PSI ...	71
Tabela 21 - Degradações e níveis de gravidade para os pavimentos flexíveis em meio urbano (Santos, et al., 2019)	72
Tabela 22 - Degradações e níveis de gravidade para os pavimentos flexíveis em meio interurbano (Estradas de Portugal, S.A., 2008)	73
Tabela 23 - Determinação dos parâmetros R, C, S e P	74
Tabela 24 - Esquema de quantificação do IRI, na ausência de medição direta (adaptado de Maganinho, 2013 e Estradas de Portugal, S.A., 2008).....	75
Tabela 25 - Índice de qualidade do pavimento (PCI), escala de classificação e cores sugeridas (adaptado de ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018).....	76
Tabela 26 - Cálculo dos valores deduzidos por tipo de degradação e nível de gravidade, segundo a norma ASTM D6433-18	77

Tabela 27 - Valores deduzidos corrigidos para calculo do PCI	79
Tabela 28 - Correção do valor do índice PCI para degradações com mais do que um nível de gravidade.....	80
Tabela 29 - Resumo dos valores das degradações medidas no modelo 3D.....	81
Tabela 30 - Resumo dos valores dos índices de qualidade obtidos	82

Folha em branco

Lista de Siglas e Acrónimos

ANAC	Autoridade Nacional de Aviação Civil
AR	<i>Augmented reality</i>
ARPAS	<i>Association of Remotely Piloted Aircraft Systems</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATM	<i>Air Traffic Managment</i>
CMF	Câmara Municipal do Fundão
CNNs	<i>Convolutional Neural Networks</i>
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
DOT	<i>Department of Transportation</i>
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>
EP	Estradas de Portugal
eVTOL	<i>electrical Vertical Take-Off and Landing</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FOV	<i>Field Of View</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HAP	<i>High Altitude Platform</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical na Electronics Engineers</i>
INESC TEC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência
InIR	Instituto das Infra-Estruturas Rodoviárias
IP	Infraestruturas de Portugal
IRI	<i>international roughness index</i>
LAP	<i>Low Altitude Platform</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MRP	<i>Maintenance Rating Program</i>
MVD	Maior Valor Deduzido
PCI	<i>Pavement Condition Index</i>
PITVANT	Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não Tripulados
PMS	<i>Pavement Management Systems</i>
PSI	<i>Present Serviceability Index</i>
SANT	Sistema Aéreo Não Tripulado
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SGP	Sistema de Gestão de Pavimentos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UA	<i>Unmanned Aircraft</i>
UAM	<i>Urban Air Mobility</i>
UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i>
UBI	Universidade da Beira Interior
VANETs	<i>Vehicular ad hoc networks</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

VD Valores Deduzidos
VTOL *Vertical Take-Off and Landing*

Folha em branco

1. Introdução

1.1. Enquadramento, objetivo e estrutura do trabalho

A diversificação do uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) e a evolução tecnológica têm permitido abrir novas oportunidades ao uso desta tecnologia no âmbito da engenharia. Na área específica dos transportes, a sua utilização em inspeções parece ter um grande potencial de desenvolvimento tendo em conta que permite a recolha de dados de forma rápida, eficiente e a baixo custo.

A recolha e tratamento dos dados provenientes das inspeções é uma parte importante dos Sistemas de Gestão de Pavimentos sobre a qual assentam a definição e o planeamento das intervenções e manutenções a realizar. O uso de VANT apresenta-se como uma alternativa às inspeções convencionais de pavimentos, com vantagens ao nível do custo e tempo de inspeção, podendo, por isso, constituir um importante suporte para os gestores das infraestruturas rodoviárias e aeroportuárias. De referir ainda que a abordagem tradicional através da inspeção direta dos pavimentos apresenta riscos que podem ser minimizados com o uso de VANT.

Pretende-se, portanto, com o presente estudo, verificar a aplicabilidade do uso de VANT na inspeção de pavimentos rodoviários, designadamente na identificação de degradações presentes na superfície do pavimento.

O documento apresenta, inicialmente, o conceito de Veículo Aéreos Não Tripulados, um breve enquadramento da regulamentação aplicável, o seu uso na engenharia civil e a identificação das principais vantagens e desvantagens atribuídas à utilização destes equipamentos para a inspeção de infraestruturas.

De seguida são apresentados vários estudos desenvolvidos sobre a temática da inspeção de pavimentos de infraestruturas de transporte com recurso a VANT e o caso de estudo. No caso de estudo é apresentada a metodologia adotada na inspeção de pavimentos com recurso a VANT e a sua aplicação à inspeção de um troço de estrada com pavimento flexível, de forma a concluir sobre a aplicabilidade da técnica.

Finalmente, é feita uma reflexão sobre os resultados obtidos, designadamente a avaliação da fiabilidade dos dados recolhidos e da aplicabilidade do método utilizado, bem como a indicação de propostas da direção a tomar em trabalhos futuros.

1.2. Veículos aéreos não tripulados (VANT)

1.2.1. Conceito

VANT, também conhecido como drone, que em inglês significa zangão, refere-se, genericamente, a todo e qualquer tipo de aeronave que pode ser controlada e que não necessite de pilotos embarcados para ser guiada.

Atualmente, os órgãos militares referem-se a estes aparelhos como *Unmanned Aircraft* (UA), designando “um veículo aéreo sem piloto humano e que é capaz de voar com ou sem controle humano remoto” (*Department of Defense*, 2021), ou através do termo mais abrangente, *Unmanned Aircraft System* (UAS), que engloba todo o sistema, desde o operador até à aeronave. Esta última definição veio a ser adotada pelos principais órgãos reguladores como a Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO, *International Civil Aviation Organization*, 2011), a Agência Europeia para a Segurança na Aviação (EASA, *European Union Aviation Safety Agency*, 2021) ou a *Federal Aviation Administration* (FAA) (FAA, *Federal Aviation Administration*; DOT, *Department of Transportation*, 2021)

Os VANT podem ser categorizados com base na sua plataforma de operação, que pode ser de Baixa Altitude (*Low Altitude Platform – LAP*) quando trabalha a menos de 10 km de altitude e de Alta Altitude (*High Altitude Platform – HAP*) quando opera acima dos 10 km (Shakhatreh, et al., 2019)

A figura 1 representa a classificação dos VANT segundo a plataforma de comunicação entre o operador e o veículo.

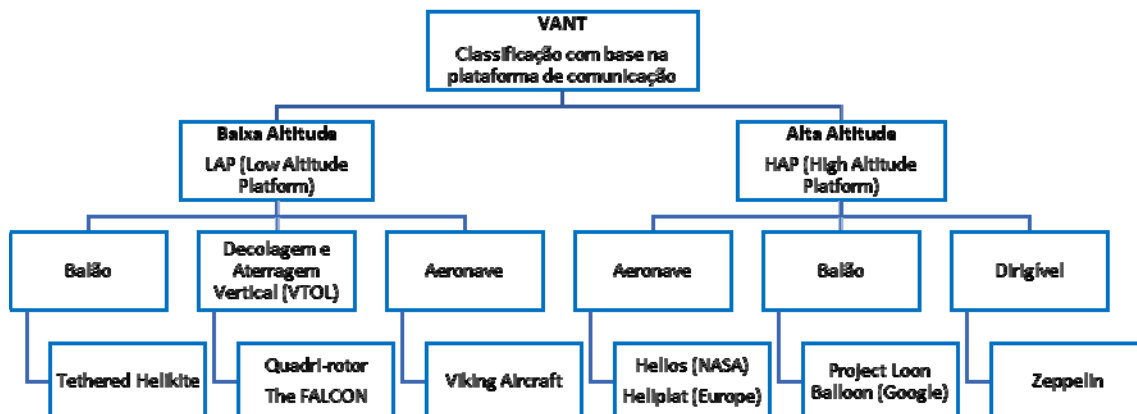


Figura 1 - Classificação dos VANT com base na plataforma de comunicação (adaptado de Shakhatreh, et al., 2019)

Na tabela 1 é apresentada uma comparação entre os VANT de Alta Altitude (HAP) e de Baixa Altitude (LAP). A tabela 1 resume os principais tipos de VANT para cada plataforma de operação

e descreve os principais parâmetros de desempenho, designadamente a autonomia, altitude máxima, peso, carga útil, alcance, tipo de combustível, complexidade operacional, alcance da cobertura, aplicações e exemplos de cada um.

Tabela 1 - Parâmetros de desempenho segundo os tipos de VANT (adaptado de Shakhathreh, et al., 2019)

Modelo	HAP			LAP		
	Dirigível	Aeronave	Balão	VTOL	Aeronave	Balão
Autonomia	Grande autonomia	• 15-30 horas com combustível JP	Grande autonomia	Algumas horas	Algumas horas	Entre 1 dia a poucos dias
		• >7 dias Solar	Até 100 dias			
Máx. Altitude	Até 25 km	15-20 km	17-23 km	Até 4 km	Até 5 km	Até 1.5 km
Carga útil(kg)	Centenas de kg's	Até 1700 kg	Dezenas de kg's	Poucos kg's	Poucos kg's	Dezenas de kg's
Alcance do voo	Centenas de km's	De 1.500 a	Até 17 milhões de km	Dezenas de Km's	Menos de 200 km	Balão amarrado
		25.000km				
Tempo de lançamento	Necessita pista	Necessita pista	Auto-lançador feito à medida	Fácil de lançar	Fácil de lançar por catapulta	Fácil de lançar
					10-30 minutos	
Tipo de combustível	Hélio	Combustível JP8	Hélio	Baterias	Motor com injeção de combustível	Hélio
		Painéis solares	Painéis solares	Painéis solares		
Complexidade Operacional	Complexo	Complexo	Complexo	Simples	Média	Simples
Cobertura de área	Centenas de km's	Centenas de km's	Milhares de km's	Dezenas de km's	Centenas de km's	Várias dezenas de km's
Peso do VANT	Poucas centenas de kg's	Poucos milhares de kg's	Dezenas de kg's	Alguns kg's	Dezenas de kg's	Dezenas de kg's
Segurança pública	Considerado seguro	Considerado seguro	Necessita regulamentação de segurança	Necessita regulamentação de segurança	Seguro	Seguro
Aplicações	Verificação de efeitos ambientais	Mapeamento GIS	Distribuição de sinal de internet	Distribuição de sinal de internet	Agricultura	Estação aérea
Exemplos	HiSentinel80	Global Hawk	Projeto Loon	LIDAR	EMT Luna	Desert Star
			Baloon (Google)		X-2000	34cm Helikite

Nas inspeções de infraestruturas utilizam-se habitualmente os VANT do tipo VTOL (*Vertical Take-Off and Landing* – Decolagem e aterragem vertical).

1.2.2. Regulamentação (breve referência)

Para além da uniformização de conceitos, com a diversificação da utilização destes dispositivos houve necessidade de criar regras e legislar sobre o uso de veículos aéreos não tripulados. Neste

A regulamentação indica que as entidades responsáveis pelos obstáculos artificiais precisam conceder explicitamente aos operadores dos sistemas aéreos não tripulados (SANT) permissão para realizar operações perto de obstáculos altos feitos pelo homem, por exemplo, um edifício ou antena. Nenhum operador de SANT deve, portanto, conduzir uma operação perto de tais obstáculos sem permissão da entidade responsável.

No que diz respeito a Portugal, a entidade responsável pela regulamentação da aviação civil é a Autoridade Nacional de Aviação Civil (ANAC) que, neste âmbito, elaborou o regulamento n.º 1093/2016 que estabelece as regras aplicáveis à utilização de VANT em território nacional (ANAC, 2016).

Importa ainda referir o Decreto Lei DL 58/2018 que regula o registo dos equipamentos, a responsabilidade civil na utilização destes sistemas e o regime contraordenacional (Assembleia da Republica, 2018). A tabela 2 resume os aspetos mais importantes da legislação portuguesa sobre a utilização de VANT (Falorca, et al., 2019)

Tabela 2 - Principais aspetos da legislação portuguesa sobre VANT (adaptado de Falorca, et al., 2019)

Legislação	Aspeto importante
Regulamento 1093/2016	Define aeronave brinquedo: aeronave pilotada remotamente, não equipada com motor de combustão e com peso máximo operacional inferior a 0,250 kg...;
	Operação até 25 kg sem restrições de idade - peso superior requer autorização;
	Aeronaves brinquedo não podem operar a mais de 30 metros de altura (100 pés) e voar sobre pessoas;
	Apenas podem efetuar voos diurnos, em operações VLOS (Visual Line Of Sight), até 120 metros acima da superfície (400 pés);
	Devem manter uma distância segura de pessoas e bens;
	Um VANT não pode voar: <ul style="list-style-type: none"> a) Nas áreas definidas no Anexo ao Regulamento (aerportos); b) Sobre concentrações de pessoas ao ar livre (mais do que 12 pessoas) e em zonas de sinistro...; c) Sem luzes de identificação ligadas, independentemente de se tratar de voos noturnos ou diurnos.
	Carece de autorização expressa da ANAC: <ul style="list-style-type: none"> a) Realização de voos noturnos, b) Operações BVLOS (Beyond Visual Line of Sight), c) Voos acima de 120 metros acima da superfície (400pés).
	O regulamento não faz nenhuma distinção de uso recreativo/comercial;
DL 58/2018	Cumprimento, por parte dos operadores e pilotos de outros regimes jurídicos que sejam aplicáveis;
	Captação de imagens e realização de vídeos deve ser feita de acordo com a Lei de Proteção de Dados Pessoais. Autorizações devem ser requeridas à Autoridade Aeronáutica Nacional.
	Obrigatoriedade de registo dos operadores de VANT que tenham uma massa máxima operacional superior a 250 gramas, criando-se um código de identificação a atribuir; A etiqueta de registo que contém o código de identificação do operador deve ser afixada na estrutura do(s) VANT(s);
	Cada VANT só pode ser operado se o respetivo operador estiver validamente registado junto da ANAC;
	Obrigatoriedade de contratualização de seguros de responsabilidade civil quando a massa máxima operacional da aeronave for superior a 900 gramas;
	Estabelece-se um regime sancionatório a aplicar em caso de incumprimento das regras instituídas pelo decreto-lei.

1.2.3. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) na engenharia civil

Muito embora a utilização de VANT tenha sido idealizada com fins militares, verificando-se o seu uso, neste contexto desde o final do século XIX, mais recentemente têm vindo a ser utilizados para outros fins, sobretudo ligados à recolha e tratamento de dados a partir de imagem fotográfica ou vídeo. Assim, esta tecnologia tem vindo a ser utilizada por fotógrafos, cineastas, televisões, atividades agrícolas, autoridades policiais e, também, na engenharia. É no âmbito desta última utilização, e mais concretamente na área dos transportes, que este trabalho se desenvolve.

Para além da captura de imagem para tratamento de informação, os VANT são também utilizados para o transporte de carga em áreas de difícil acesso ou em situações que se possam justificar por critérios económicos, de segurança ou de prazo de entrega.

Num artigo publicado em 2019 pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* sobre as aplicações dos VANT, pode ler-se sobre a importância que se prevê que estes sistemas venham a ter na engenharia civil (Shakhatreh, et al., 2019).

“O uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) está a crescer rapidamente em muitos domínios de aplicações civis, incluindo a monitorização em tempo real, o fornecimento de cobertura sem fios, o sensoriamento remoto, a busca e resgate, a entrega de mercadorias, a segurança e vigilância, na agricultura de precisão e na inspeção de infraestruturas civis. Os VANT inteligentes são a próxima grande revolução na tecnologia dos VANT, prometendo fornecer novas oportunidades em diferentes aplicações, especialmente na área das infraestruturas civis em termos de redução de riscos e custo” (Shakhatreh, et al., 2019).

Neste artigo faz-se uma previsão do valor das soluções com recurso aos VANT nas principais indústrias, sendo que as inspeções de infraestruturas e as aplicações na área dos transportes têm um papel marcante nesta distribuição (ver figura 3).

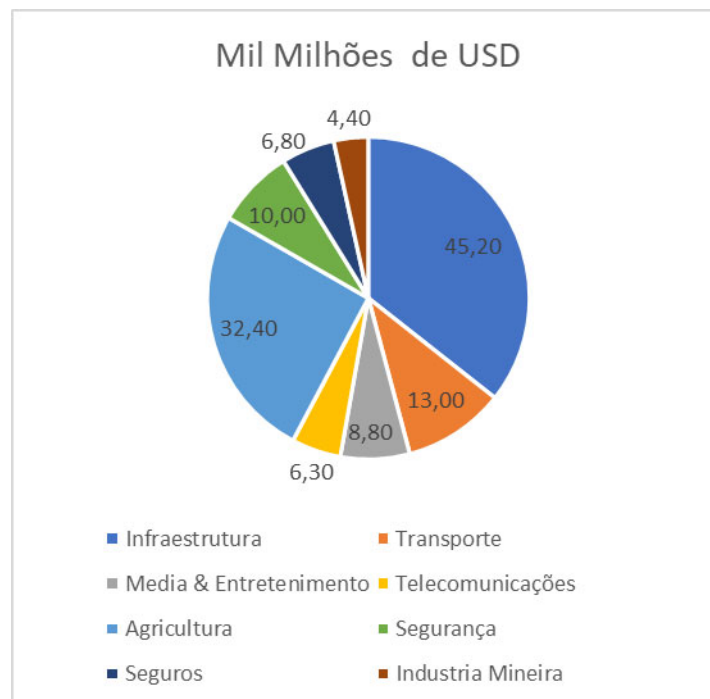


Figura 3 - Previsão do valor das soluções com VANT nas principais indústrias (adaptado de Shakhatreh, et al., 2019)

Na área da construção é já muito habitual a elaboração de registos da evolução dos projetos com recurso a VANT, para além de diversas utilizações na área das inspeções de infraestruturas de transportes, linhas de energia e monitorização de instalações de óleo, gás e água. O fluxograma

da figura 4 ilustra alguns dos principais usos de VANT nas inspeções de construções e infraestruturas.

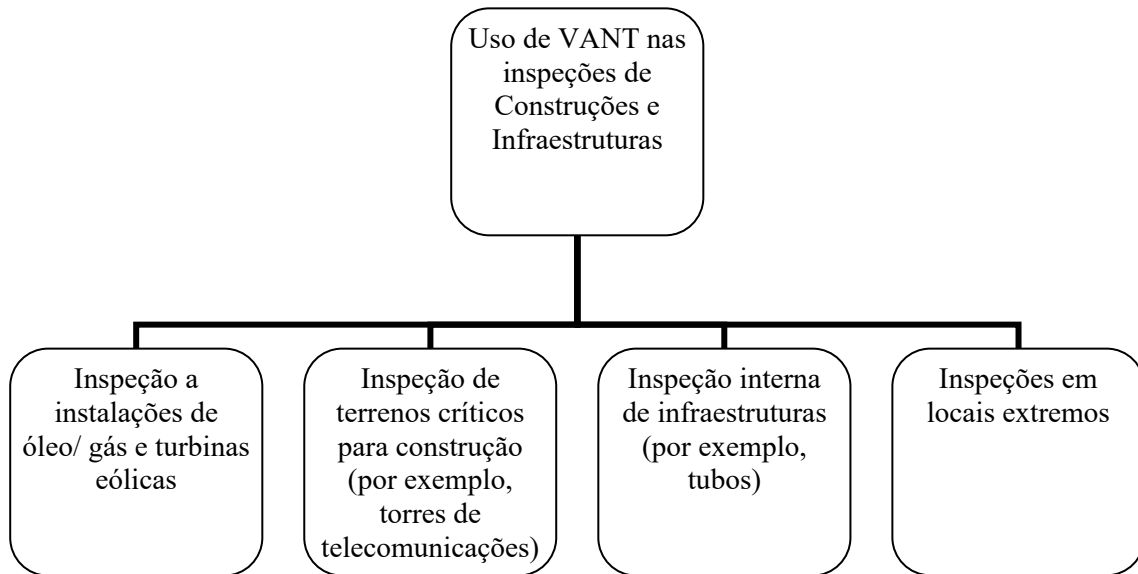


Figura 4 – Usos de VANT nas inspeções de infraestruturas e construções (adaptado de Shakhathreh, et al., 2019)

Na tabela 3 resumem-se algumas das aplicações, por tipo de VANT, nas inspeções de construções e infraestruturas, indicando-se as características principais destes equipamentos.

Tabela 3 - Inspeções de infraestruturas com VANT (adaptado de Shakhatreh, et al., 2019)

Tipo VANT	Aplicações	Capacidade de carga/ Altitude/ Autonomia	Tipo de sensor
AR. Drone French Company Parrot.	Uso de VANTs para aumentar a segurança nos locais de construção, fornecendo uma visão visual em tempo real para esses locais	Não/ 50 m / 12 min.	Câmara HD a bordo, conexão Wi-Fi
VANT Multi Rotor	Uso de VANTs com métodos de processamento de imagem para deteção de rachaduras e avaliação da degradação da superfície.	100 g / LAP / 20 min.	Sensores de imagem a cores
MikroKopter L4-ME Quadcopter	Uso de VANTs para inspeção vertical de infraestruturas altas, como luzes de rua, torres GSM ou arranha-céus.	Até 500 g / Até 247 m / 13-20 m.	Scanner a Laser
Helicóptero Quadrotor	Inspeção de linhas de alta tensão	Menos de 1 kg/ LAP/ Menos de 1 hora	Câmaras a cores, TIR (sensor térmico e infra-vermelhos), GPS e IMU (grava posição do VANT no momento da foto)
Aeronave de Asa Fixa	Inspeção com esboço identificando os defeitos das linhas de transmissão de energia	Menos de 3 kg/ Até 500 m/ Até 50 min (50 km).	Câmara de vídeo HD ultra-grande angular.
Quadrotor	Uso corporativo de VANTs para inspeção e diagnóstico de infraestruturas de linhas de energia	Menos de 6 kg/ Até 200 m/ Até 25 min (10 km).	Câmaras TIR, GPS.
Quadrotor (VTOL)	Inspeção com sensor remoto para detetar vazamentos de gás em gasodutos	NA/ LAP/ 30-50 min.	Unidade de controlo de gás, GPS.

Outros exemplos sobre a aplicação de VANT podem encontrar-se em publicações científicas ou de organismos governamentais (*Department for business, Energy & Industrial Strategy, Government Office for Science, 2017; SESAR, 2021; ARPAS-UK, Association of Remotely Piloted Aircraft Systems, 2021*). Na figura 5, por exemplo, pode-se observar a divisão por tipos de serviços que recorrem aos VANT, oferecidos no Reino Unido em 2017 (*Department for business, Energy & Industrial Strategy, Government Office for Science, 2017*).

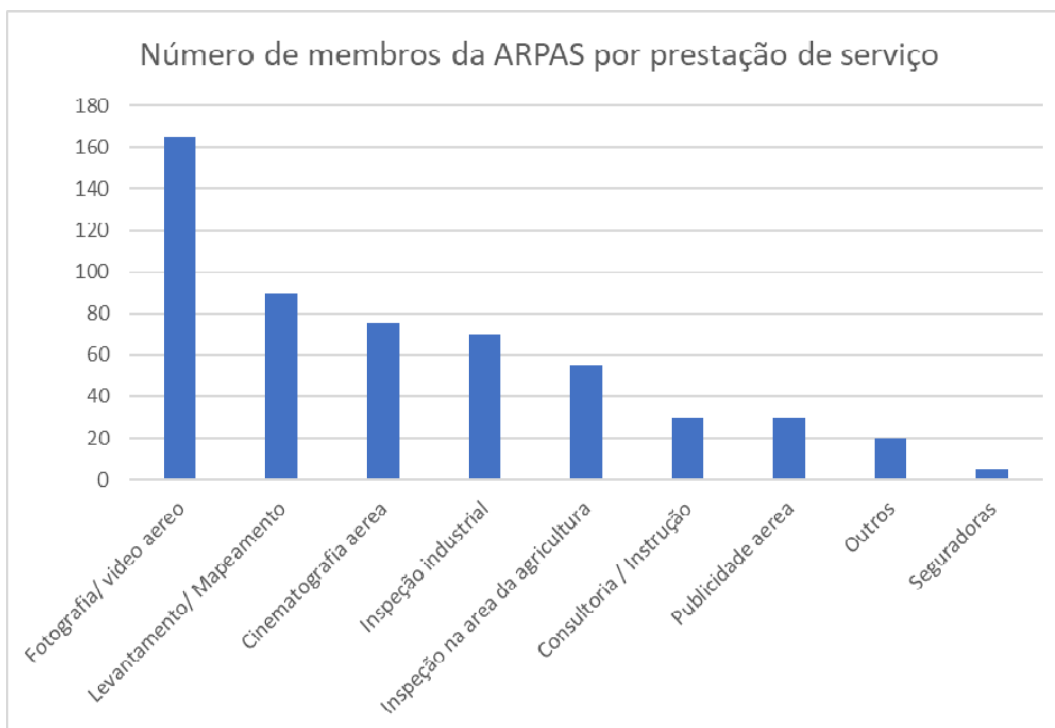


Figura 5 - Distribuição de serviços dos membros da ARPAS-UK por atividade em 2017 (Department for business, Energy & Industrial Strategy, Government Office for Science, 2017)

No mesmo artigo, e no que se refere ao uso de Sistemas Aéreos Não Tripulados (SANT) no âmbito da engenharia, pode ler-se:

“Foram identificadas empresas que usam SANT para inspecionar uma ampla gama de estruturas, designadamente as que se seguem:

- *A Agência Ambiental recorre ao uso de SANT para levantamento de informação sobre os rios e para mapeamento do risco de cheias e monitorização de depósitos de resíduos.*
- *A Network Rail estabeleceu um acordo-quadro para o trabalho de inspeção através de SANT. Uma vantagem particular, neste caso, é o potencial de conduzir o trabalho de inspeção a partir de uma posição de relativa segurança.*
- *Inspeção, com recurso a scanner, de aeronaves grandes para deteção de defeitos causados por granizo e danos causados por raios.*
- *Inspeção de instalações nucleares em ambientes para os quais seria perigoso enviar um indivíduo.*
- *A English Heritage utiliza SANT para monitorizar mais de 400 locais e monumentos históricos na Inglaterra.*
- *Inspeções a instalações de petróleo e gás.”*

Além disso, é ainda indicado que o uso potencial de SANT para monitorizar parques eólicos está a ser explorado ativamente por vários operadores do Reino Unido.

Existem outros exemplos internacionais do uso de VANT em inspeções de infraestruturas como as ferrovias, represas, diques, redes de energia ou o mapeamento da evolução de pedreiras e rios. Entre as potenciais aplicações futuras de SANT identificam-se também as inspeções na área dos Seguros. Isso inclui a ideia de usar VANT para fornecer imagens de alta resolução do exterior das propriedades, usando imagens térmicas para detetar vazamentos de água, combustíveis, gas, etc.; para capturar imagens após catástrofes; para auxiliar os profissionais de sinistros; ou para vigilância na deteção de fraudes e validar sinistros (*Department for business, Energy & Industrial Strategy, Government Office for Science, 2017*).

Pode ainda referir-se que existem atualmente vários projetos em desenvolvimento na Europa associados à mobilidade urbana e que preveem o uso de VANT, nomeadamente (SESAR, 2021):

- AMU-LED - *Air mobility urban large experimental demonstrations*

O projeto pretende demonstrar como os serviços e soluções do *U-Space* (termo que designa o conjunto de serviços associados a um alto nível de digitalização e automação) podem suportar operações de voo de mobilidade aérea urbana integrada (UAM – *Urban Air Mobility*), permitindo que eVTOL (*electrical Vertical Take-Off and Landing*) / UAS (*Unmanned Aerial Systems*) e outros usuários do espaço aéreo (não tripulados e tripulados) operem com segurança, sustentabilidade e eficiência de forma controlada e num espaço aéreo integrado, sem impacto indevido nas operações atualmente geridas pela ATM (*Air Traffic Management*).

- GOF 2.0 - *Integrated urban airspace very large-scale demonstration*

O projeto demonstrará a validade operacional de servir UAS, eVTOL e operações tripuladas combinadas em um espaço aéreo urbano denso e unificado usando os atuais serviços e sistemas de *U-Space* e ATM. Ambas as comunidades ATM e *U-Space* dependem amplamente do fornecimento de informações digitais oportunas, relevantes, precisas e de qualidade garantida para colaborar e tomar decisões informadas.

- Uospace4UAM - *U-space for UAM*

O projeto realizará uma série de demonstrações multinacionais, tanto com drones quanto UAM, cobrindo diferentes casos de uso, incluindo operações mistas, para derivar habilitadores críticos para um amplo conjunto de aplicativos de serviço UAM que podem ser aplicados em toda a Europa.

1.2.4. Situação em Portugal

À semelhança do que acontece no resto do mundo, também em Portugal a utilização dos VANT fora do âmbito militar é relativamente recente, sendo que é difícil encontrar registos desse uso antes de 2010 (Beirão, 2019).

Embora se encontrem alguns trabalhos recentes fora do âmbito militar, são raros os que tratam do uso destes equipamentos ao serviço da engenharia em geral e menos ainda na engenharia civil.

Ainda assim, podem-se destacar os seguintes projetos (Beirão, 2019):

- PITVANT – “Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não Tripulados”, projeto conjunto entre a Academia da Força Aérea (AFA) e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), desenvolvido entre 2009 e 2015, em que se desenvolveram produtos diversos com uso de VANT em áreas como o mapeamento de florestas e zonas agrícolas, controlo de fogos, monitorização de tráfego e vigilância de fronteiras e da orla costeira (*Unmanned Air Vehicles for coastal and environmental research*, 2009).
- Desenvolvimento de drone leve pela Tekever, Instituto Superior Técnico (IST), FEUP e Universidade de Aveiro, em 2014, para uso da Marinha em missões de busca e salvamento, fiscalização de pescas e apoio ao combate à poluição e à segurança marítima (Luz, 2014).
- Projeto Wise, desenvolvido em conjunto pela Tekever e o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC), que consiste na criação de postos móveis de comunicação *wireless*, integrados nos drones, com a capacidade de restabelecer as redes de comunicações em casos de emergência ou alargando a rede em zonas isoladas ou para eventos pontuais.

Atualmente podemos encontrar vários exemplos de usos dos VANT em Portugal para além dos efetuados pelas autoridades policiais e militares nos diversos apoios de vigilância e inspeções. Sublinhando a utilização de VANT no campo da engenharia civil, existem, hoje em dia, empresas em Portugal que prestam serviços de inspeção técnica a edifícios, estruturas e instalações industriais, entre as quais se listam em baixo alguns exemplos:

- A SAMSIC faz inspeções e acompanhamento de obras com recurso a VANT, incluindo análises com infravermelhos e inspeções termográficas (SAMSIC, 2021).
- A APPLUS oferece dentro dos seus serviços a realização de inspeções, levantamentos topográficos e cartografia aérea com recurso a VANT (APPLUS, 2021).

- A EQS tem vindo a desenvolver vários projetos com recurso à utilização de VANT, e oferece serviços de inspeção com esta tecnologia nas áreas das Instalações Industriais, Estruturas Offshore, *Pipelines*, Energia Eólica, Energia Solar, Engenharia Civil e Infraestruturas. Os VANT podem ser equipados com sistemas avançados de visão artificial, câmaras termográficas e *Laser Scanning 3D* (EQS, 2021).
- A PERIPLUS faz serviços de inspeções com recurso a VANT de estruturas de difícil acesso, deteção de infiltrações de água em fachadas e coberturas, deteção de falhas de isolamento, apoio à agricultura, apoio a forças de segurança e resgate (PERIPLUS, 2021).
- A AERISURVEY tem sede em Portugal e atua para lá do território nacional prestando serviços de fotogrametria de alta precisão com recurso a VANT, para além de inspeções e mapeamentos, sendo que muita da sua atividade está associada à indústria mineira (AERISURVEY, 2021).

1.2.5. Vantagens e desvantagens do uso de VANT em inspeções de infraestruturas

Interessa entender as vantagens e desvantagens do uso dos VANT de forma, por um lado, a direcionar o desenvolvimento da técnica onde ela é viável e, por outro, a estudar e desenvolver mecanismos para tentar ultrapassar as limitações do seu uso.

Listam-se, em baixo, as principais vantagens e desvantagens do uso de VANT nas inspeções de infraestruturas, bem como as sugestões da direção que os estudos sobre esta matéria devem tomar para ultrapassar as limitações do uso neste âmbito (Falorca, et al., 2019) (Shakhatreh, et al., 2019) (Beirão, 2019) (Mahdi Hajizamani, et al., 2016).

Vantagens

- Custos reduzidos, minimizando o tempo de inatividade do equipamento/infraestrutura sujeita a inspeção.
- Obtenção rápida e fácil de dados .
- Possibilidade de inspecionar rápida e facilmente áreas inacessíveis.
- Podem ser usados em situações de alto risco sem por em risco a vida de pessoas.
- Interrupções planeadas e com redução de riscos - os operadores têm as informações necessárias para planejar e orçar totalmente as paragens.
- Sem interrupção do equipamento inspecionado - o local permanece operacional durante a inspeção.
- Informações de alta qualidade - voos próximos a ativos físicos permitem localizar e diagnosticar problemas rapidamente.

- Sistemas fixos de obtenção de dados de tráfego são caros e não cobrem a totalidade das situações.
- Em termos ambientais têm um impacto menor quando comparados com outras técnicas de inspeção, designadamente no que diz respeito ao impacto sonoro e ao gasto de materiais, visto que são equipamentos leves e que emitem pouco ruído.

Desvantagens

- Não podem ser utilizados em condições meteorológicas adversas, nomeadamente, com vento, nuvens de poeira ou temperaturas extremas. Alguns VANT também não podem operar com chuva.
- Autonomia limitada pode obrigar a fazer interrupções nas inspeções.
- Necessita de interrupção do tráfego para inspeção de pavimentos.
- Capacidade limitada de carga. As necessidades nas inspeções podem incluir câmaras com características especiais, sensores de vários tipos (gás, por exemplo), sistema GPS, etc.
- Outro desafio que tem que ser ultrapassado é a manobra destes dispositivos sem acesso a sinal de GPS durante inspeções em ambientes fechados,
- Limitações regulamentares no uso destes equipamentos.

Direções futuras

Com base nos artigos consultados sobre as aplicações de VANT na inspeção de construções e infraestruturas, sugerem-se as seguintes possíveis direções para o desenvolvimento da tecnologia destes aparelhos:

- Melhorar o tempo de vida da bateria dos VANT para permitir distâncias mais longas e aumentar o tempo de voo dos VANT.
- São necessários algoritmos de recolha, partilha e processamento de dados mais avançados para cooperação multi-VANT, a fim de alcançar inspeções mais rápidas e eficientes.
- Melhoria da autonomia e segurança dos VANT para manobrar em ambientes congestionados e fechados com nenhum ou fraco sinal de GPS.
- Aumentar a performance dos VANT no que diz respeito ao balanço entre a capacidade de carga e a autonomia.
- Alguns modelos ainda não têm sistemas eficazes anti-colisão e controlo de distâncias.

2. Aplicações de veículos aéreos não tripulados (VANT) na área dos transportes

Os VANT têm vindo a ser usados em várias vertentes da área dos transportes da engenharia civil. Em baixo, listam-se alguns exemplos de usos nesta área:

- Inspeção e avaliação de pavimentos;
- Segurança rodoviária;
- Obtenção de dados e monitorização de tráfego rodoviário;
- Verificação do estado de conservação de infraestruturas rodoviárias (exemplos: pontes, viadutos, taludes, etc.);
- Acompanhamento da execução de projetos;
- Monitorização das faixas de domínio rodoviário;
- Logística - entrega de pequenas encomendas.

No âmbito do presente trabalho, destaca-se o uso na inspeção de pavimentos, pelo que se irá detalhar esta utilização mais à frente no capítulo 3. Ainda assim, e para além desta finalidade, existe uma grande variedade de aplicações nas quais o uso de VANT é utilizado e estudado. A maioria das utilizações é baseada na recolha de dados de tráfego e de comportamentos de condução capturados por meio de câmaras montadas em VANT. Esses dados são depois usados para uma variedade de finalidades, como sejam, a vigilância e monitorização, o reconhecimento de violações de tráfego, como suporte na gestão de congestionamentos de tráfego, na otimização de sinalização e na extração de trajetórias de veículos para responder a questões de pesquisa relacionada com a avaliação do risco de acidentes, entre outros (Outay, et al., 2020).

2.1. Segurança Rodoviária

Recentemente, a indústria de seguros de automóveis e os departamentos de polícia têm explorado o potencial dos VANT na investigação de acidentes de trânsito, nomeadamente através do seu uso para a captura de imagens do local do acidente e o uso de softwares para reconstruir a ocorrência (Outay, et al., 2020).

A disponibilidade de VANT oferece, também, uma oportunidade de recolha de dados de veículos individuais para realizar análises de tráfego ao nível microscópico, possibilitando analisar o risco de acidentes em áreas de convergência de rodovias em função do comportamento de fusão dos condutores (Gu, et al., 2019).

Existem alguns estudos que apontam para a utilização de mecanismos de processamento visual a bordo dos VANT para a deteção de riscos dos quais se podem destacar os seguintes (Outay, et al., 2020):

- Kim e Chervonenkis (2015) estudaram a detecção automática a bordo, de situações de tráfego anormal ou de emergência, através de sistemas de visão artificial instalados em VANT. Neste estudo foi proposto um sistema que deteta veículos estacionários e em movimento com base em dados de vídeo recolhidos pelo VANT e, ao mesmo tempo, deteta situações anormais e classifica-as para auxiliar o operador a tomar decisões informadas. No entanto, os algoritmos desenvolvidos no estudo são limitados e reconhecem apenas algumas situações anormais.
- O estudo de Sharma et al. (2017) propôs uma rede veicular coordenada multi-VANT para analisar o comportamento dos condutores com o objetivo de melhorar a segurança no trânsito. A motivação de trabalho foi baseada nas redes *ad hoc* veiculares (*Vehicular ad hoc networks* - VANETs). Estas redes consistem na comunicação recíproca entre os veículos circulantes e estruturas de transmissão junto das vias, disseminando informação relevante para a segurança rodoviária, como seja, a identificação de luzes de travagem, a existência de obstáculos, a informação de tráfego, avisos de acidentes, etc. A formulação de VANETs usando vários VANT torna o sistema independente de unidades instaladas nas proximidades da estrada, melhorando a comunicação, e por consequência, o rastreamento de veículos é mais preciso.

Segundo Outay et al. (2020), é inevitável que, com o incremento do uso de VANT, os dados estejam disponíveis em abundância e os métodos de avaliação de risco sejam aprimorados no futuro.

2.2. Obtenção de dados e monitorização de tráfego rodoviário

A vigilância e monitorização de tráfego tem sido ao longo dos anos uma das principais ferramentas dos gestores e engenheiros da área dos transportes e uma parte integrante das estratégias de gestão e controle de tráfego. Vários algoritmos ou sistemas surgiram para rastrear objetos em movimento e analisar o tráfego (Barmponakis, et al., 2016).

Os métodos atuais de recolha de dados de tráfego, como os *loop* de indução, detetores de micro-ondas e sistemas de vídeo, são em geral fixos e estão instalados em autoestradas e nas principais artérias e cruzamentos urbanos. Dados os elevados custos de instalação, manutenção e operação destes equipamentos, a sua instalação não é viável em muitas situações, uma vez que acarretam elevados custos em termos materiais e/ou de recursos humanos (Mahdi Hajizamani, et al., 2016).

A tabela 4 faz a comparação entre as camaras estáticas, veículos aéreos tripulados (normalmente helicópteros) e VANT no que concerne ao desempenho das principais características a considerar na obtenção de dados para a gestão e a contagem de tráfego (Barmponakis, et al., 2016).

Tabela 4 - Comparação entre métodos de recolha de dados de tráfego (adaptado de Barmounakis, et al., 2016)

	Câmaras estáticas	Veículos aéreos tripulados	VANT
Cobertura	Baixo	Alto	Alto
Segurança e privacidade	Médio	Médio	Baixo
Custo (aquisição e manutenção)	Baixo	Alto	Baixo
Múltiplos usos	Baixo	Alto	Alto
Eficiência energética	Baixo	Baixo	Alto
Desdobramento, desenvolvimento	Baixo	Alto	Baixo
Tempo operacional	Alto	Alto	Baixo
Operação sob condições climáticas adversas	Médio	Baixo	Baixo
Risco	Baixo	Alto	Médio
Resistência	Alto	Alto	Baixo
Habilidades de pós-processamento de vídeo	Médio	Alto	Alto
Transferência, comunicação e armazenamento de dados	Baixo	Alto	Alto
Habilidades de operação	Baixo	Alto	Médio
Requisito de formação	Baixo	Alto	Médio
Complexidade	Médio	Alto	Médio

Face ao exposto, os VANT surgem como uma alternativa para obter de forma rápida e fácil os dados de caracterização do tráfego, utilizando softwares e técnicas de processamento de imagem vídeo para obter a informação (Mahdi Hajizamani, et al., 2016).

Antes de 2014-2015, a maioria dos estudos de aplicação de VANT nos transportes recorriam a VANT de asa fixa, que apresentam menor capacidade de manobra em comparação com os pequenos drones de asa rotativa. Esses VANT eram pesados, significativamente maiores em tamanho e exigiam formação profissional para a sua operação e controle. Além disso, este tipo de equipamento não permite a descolagem e aterragem vertical (VTOL – *Vertical Take-Off and Landing*) e a sua aplicação em trabalhos de inspeção e outros é dispendiosa. No entanto, esses VANT permitem tempos de voo maiores e uma maior estabilidade de voo. Com a chegada dos drones com asas rotativas a um custo mais acessível, os esforços concentraram-se essencialmente no seu uso para a captura de imagens vídeo (Outay, et al., 2020).

A investigação efetuada nesta área é sobretudo direcionada para o desenvolvimento de um conjunto de algoritmos e métodos que permitam extrair informações significativas dos dados de imagem recolhidos. A deteção de veículos, seu rastreamento e extração de parâmetros de fluxo de tráfego, como velocidade, a densidade, etc., foi o foco principal inicial da utilização da tecnologia de VANT para aplicações civis na área dos transportes (Outay, et al., 2020).

Para extrair os dados de tráfego de cada conjunto de imagens vídeo recolhidas é possível usar programas de deteção automática capazes de detetar objetos em movimento e registar a sua

posição. Para este efeito é necessário definir no programa uma base fixa (background), sendo cada *frame* comparada com a anterior para detetar o que está em movimento (Mahdi Hajizamani, et al., 2016). Com os avanços da tecnologia e dos materiais utilizados nos VANT, diversos outros estudos foram realizados, alguns com foco em dados microscópicos e fenômenos mais específicos, como a extração detalhada de trajetórias e o cálculo microscópico de parâmetros de tráfego (Barmounakis, et al., 2016).

Os métodos de análise de fluxo de tráfego incluem a recolha de dados para avaliar o desempenho de diferentes geometrias de estradas (como rotundas, cruzamentos semaforizados e cruzamentos não sinalizados), diferentes comportamentos de fluxo de tráfego (como a análise de ondas de choque de tráfego, comportamentos de mudança de via, análise de intervalos entre veículos), modelos de acompanhamento de veículos com calibração e validação para uso em pacotes de simulação microscópica (Outay, et al., 2020).

Barmounakis et al. (2019) apresentou ainda os resultados de uma experiência de campo em grande escala em que foi usado um enxame de drones (10 drones) para recolher dados que fornecem detalhes da propagação de congestionamentos em redes urbanas. O trabalho foi o primeiro deste tipo a recolher dados para análise de congestionamentos cobrindo mais de 100 km de vias de uma rede rodoviária, cerca de 100 interseções, muitos pontos de paragem de autocarros e cerca de meio milhão de trajetórias. O estudo analisou várias possibilidades para compreender o mecanismo de formação e propagação de congestionamentos em ambientes multimodais congestionados a partir da obtenção de dados massivos de imagens aéreas. Foi, assim, possível determinar e estudar vários conceitos fundamentais de modelação de tráfego:

- i. Estimativa de matrizes OD (Origem-Destino) dinâmicas em nível de rede por meio de uma forma menos dispendiosa e computacionalmente eficiente.
- ii. Estimativa de distribuições conjuntas de tempos de viagem para ligações sucessivas que fornecem uma medida de confiabilidade de tempo de viagem.
- iii. Identificação do fenómeno de mudança de via que geralmente é modelado com recurso à análise de intervalos entre veículos.
- iv. Impacto das características de paragem e arranque de veículos de serviço (como táxis, autocarros e veículos de entrega) como fator de perturbação local no fluxo de tráfego, na formação e propagação de situações de congestionamento, nos atrasos, etc.
- v. Estudo do efeito de perturbações locais devido à mudança de via e comportamentos de paragem e arranque de veículos.

2.3. Verificação do estado de conservação de infraestruturas rodoviárias

Outra área importante de aplicação da tecnologia de VANT no domínio dos transportes é o seu uso para monitorizar e gerir a infraestrutura física das rodovias. As áreas de inspeção e monitorização de obras de arte e de levantamento de dados de deterioração de pavimentos, contam com uma considerável variedade de testes e ensaios de campo já realizados, que tiveram como objetivo estabelecer o protocolo, os métodos e os algoritmos de inspeção e monitorização a adotar neste tipo de operações (Outay, et al., 2020).

Neste ponto apenas se irá abordar o uso de VANT como ferramenta de monitorização para a inspeção de obras de arte. O uso para inspeção de pavimentos será tratado no capítulo 3.

As pesquisas e estudos baseados em ensaios de campo demonstram os benefícios de utilização de VANT nas inspeções de obras de arte. As vantagens prendem-se essencialmente com a possibilidade de acesso a áreas onde tradicionalmente é necessário instalar estruturas de acesso dispendiosas, como seja a parte inferior dos tabuleiros de pontes e viadutos ou os mastros altos das pontes atirantadas (Outay, et al., 2020).

A deteção de defeitos em obras de arte com recurso de VANT tem sido conseguida através da utilização de câmaras de alta resolução, fotografia com infravermelhos ou câmaras termográficas para identificação de fissuração excessiva.

Najub Metni e Tarek Hamel (2007) desenvolveram um esquema de controlo de navegação que permite limitar a orientação do VANT na obtenção de imagens durante a inspeção de obras de arte e outras estruturas.

Em 2014 o Departamento de Transportes do estado do Michigan, Estados Unidos, fez uma intervenção de reabilitação num troço de cerca de 11 km da via interestadual I-96 que incluía 37 obras de arte e 24 rampas de entrada/saída. Neste âmbito, foram usadas várias técnicas com a finalidade de testar a utilização de VANT na obtenção de dados para identificar as diversas patologias e estados de conservação das infraestruturas (Brooks, et al., 2014). As figuras 6 e 7 ilustram algumas das técnicas usadas neste trabalho.

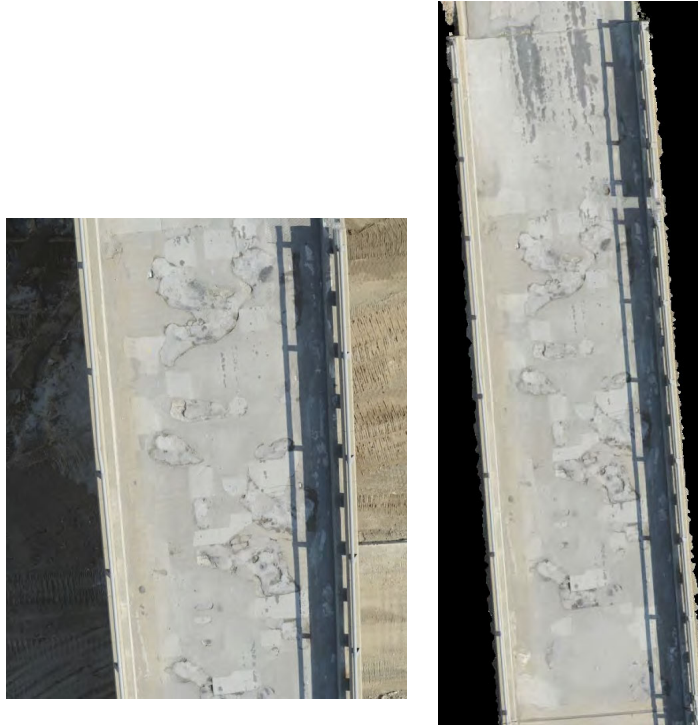


Figura 6 - Imagem de alta resolução (esquerda) e orto-retificada (direita) da passagem superior de Merriman Road East (Brooks, et al., 2014)

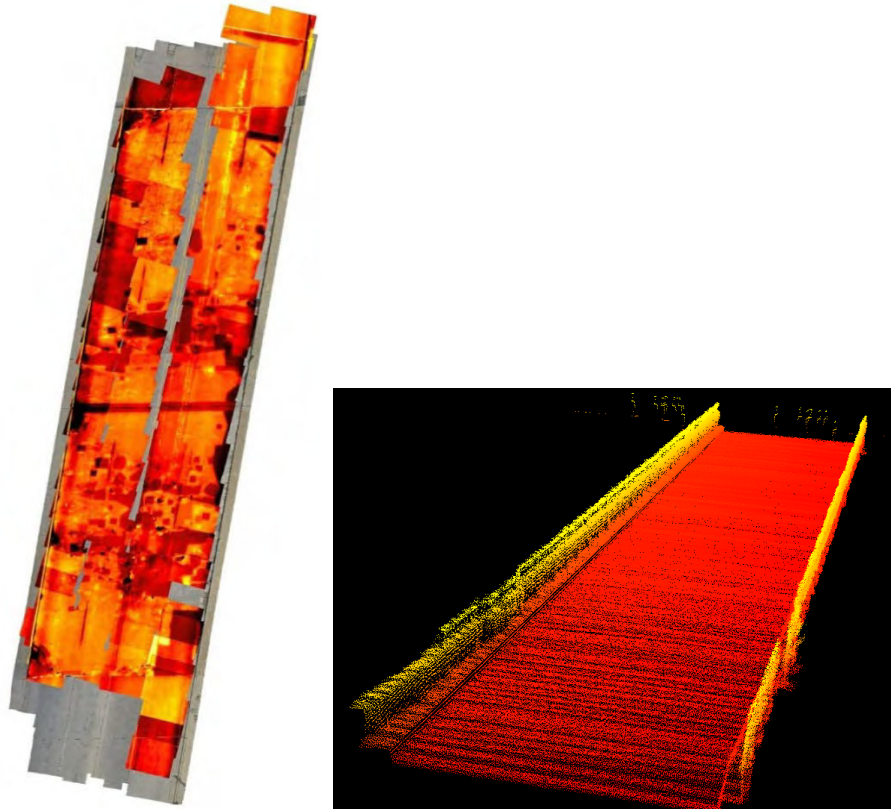


Figura 7 - Imagens térmicas georreferenciadas adquiridas através do sistema de câmaras Tau2 e Thermal Capture montadas num VANT, sobrepostas em ortofotos de alta resolução (esquerda) e nuvem de pontos 3D LiDAR (direita)

2.4. Acompanhamento na execução de projetos

Existem vários estudos e projetos onde podem ser encontradas diversas aplicações de VANT, como em operações de levantamento de aterros, construção de estradas, construção de ferrovias de alta velocidade e projetos de aterros sanitários (Barmounakis, et al., 2016). Em Ma et al. (2013), citado por Barmounakis, et al. (2016), são descritas várias aplicações na área da construção e planejamento urbano, como no desenho do layout da cidade, na orientação de operações de demolição de empreendimentos, no cálculo da porcentagem de cobertura vegetal, entre outros. Díaz Vilariño et al. (2016), citado por Barmounakis, et al. (2016), apresentam um caso de aplicabilidade dos VANT para estudo da drenagem rodoviária, especialmente em estradas de montanha.

O acompanhamento do desenvolvimento de obras documentadas com fotografia e vídeo obtidas a partir de VANT é já habitual e permite ter uma percepção global do andamento dos trabalhos das empreitadas. Pereira de Oliveira (2017) descreve o acompanhamento de uma obra rodoviária com recurso a VANT.

Os VANT são também usados hoje na realização das medições dos movimentos de terras de obras lineares permitindo uma grande economia de recursos que tradicionalmente eram efetuados com a deslocação de equipas de topografia aos diversos locais destas empreitadas.

2.5. Monitorização das faixas de domínio rodoviário

As monitorizações das faixas de domínio rodoviário têm maior importância em países onde tradicionalmente existem ocupações irregulares que dificultam a gestão e a operação rodoviária. É o caso de alguns países da América Latina, designadamente, o Brasil.

Em virtude das grandes extensões territoriais destas faixas de domínio e do carácter dinâmico das pressões decorrentes do uso e ocupação das margens das rodovias, são necessários métodos de monitorização que garantam a eficácia e a eficiência na verificação e no mapeamento dessas áreas, mantendo as informações geográficas atualizadas e com uma periodicidade sistemática. A principal finalidade da obtenção desta informação é prevenir a ocupação das faixas de domínio em tempo útil para evitar ocupações definitivas. Para além desse objetivo, pretende-se ainda desincentivar quaisquer ações de uso destas áreas. O mapeamento com recurso a VANT é um dos mecanismos tecnológicos disponíveis que oferece algumas vantagens para essa finalidade, dentre elas o baixo custo operacional (Barros, et al., 2017).

Em comparação com os métodos de fiscalização tradicionalmente empregues, o uso de VANT possibilita uma maior efetividade na identificação das novas invasões das faixas de domínio e

maior eficácia na identificação e quantificação das ocupações irregulares já estabelecidas. A cobertura da área seguindo um fluxo de trabalho de mapeamento, com apoio de campo para levantamento de pontos de apoio e de controle, permitem garantir o conhecimento da precisão cartográfica proporcionando uma maior produtividade no trabalho de gestão e identificação destas ocupações (Barros, et al., 2017).

2.6. Logística - Entrega de pequenas encomendas

Gigantes da indústria, como a Amazon, anunciaram o uso de VANT para entrega de encomendas. Este tipo de aplicação resultara no aumento do financiamento disponibilizado para esta tecnologia e, como resultado, num aumento significativo da literatura científica com foco em VANT. Esta tendência também se verificou em relação à aplicação desta tecnologia no domínio dos transportes (Outay, et al., 2020).

Assim, prevê-se que nos próximos anos se verifique uma aplicação ampla de VANT na área da logística. Os VANT podem ser uma solução bastante económica para entregas de mercadorias em aplicações civis. No entanto, poucos estudos implementaram aplicações práticas nesta área, uma vez que são vários os desafios a ser enfrentados, sendo os aspetos mais críticos os que se listam de seguida (Barmounakis, et al., 2016):

- Projeto do veículo (materiais e carga útil);
- Localização e navegação (encontrar a rota apropriada);
- Coordenação de veículos (grande número de VANT a circular na entrega de mercadorias).

Algumas ideias sobre logística usando robôs não tripulados, não apenas aéreos, mas drones terrestres e subaquáticos, também são relatadas em vários estudos, nas quais os autores enfatizam igualmente o uso de VANT para coordenação de tráfego (Barmounakis, et al., 2016). Outro estudo sublinhou que a implementação de VANT em vez de veículos terrestres no transporte de vacinas aumentaria a disponibilidade de vacinas e diminuiria os custos (Haidari, et al., 2016).

3. Inspeção de pavimentos com recurso a veículos aéreos não tripulados (VANT)

A abordagem tradicional de manutenção de pavimentos aponta para a substituição do pavimento ou parte deste sempre que se observem danos estruturais significativos (reabilitação), pelo que a obtenção antecipada, periódica e minuciosa de dados sobre o estado dos pavimentos permite antecipar pequenas/médias operações de conservação (conservação corrente e periódica) e evitar intervenções maiores e mais onerosas. De facto, se defeitos como o fendilhamento, as deformações e as covas não forem tratados atempadamente, a sua gravidade aumenta ao longo do tempo e começará a afetar negativamente os utentes das vias (Nermin & Ahmed, 2018 citado por Millian, 2019). Além disso, sem conservação corrente e periódica, os custos administrativos com a manutenção, reabilitação ou substituição de pavimentos, assim como os custos suportados pelos utentes da estrada, podem aumentar significativamente (Santos, et al., 2014).

Atualmente, para gerir a rede de pavimentos de infraestruturas de transporte, a melhor prática é fazer uso de Sistemas de Gestão de Pavimentos (SGP). De facto, o acompanhamento da evolução da degradação dos pavimentos ao longo do tempo permite avaliar e prever a sua qualidade e desenvolver estratégias otimizadas de manutenção e reabilitação (Lima, et al., 2020). Estes sistemas têm em consideração aspetos técnicos e económicos, incorporando procedimentos de recolha, organização, análise, atualização e armazenamento de dados sobre os pavimentos, com o objetivo de definir o investimento rodoviário ao longo do ciclo de vida da infraestrutura, explorando as melhores estratégias para a conservação da rede pelo menor custo, de forma a garantir um determinado nível de qualidade do serviço (Santos, et al., 2019).

A figura 8 mostra genericamente as componentes que constituem os sistemas de gestão de pavimentos (Millian, 2019).

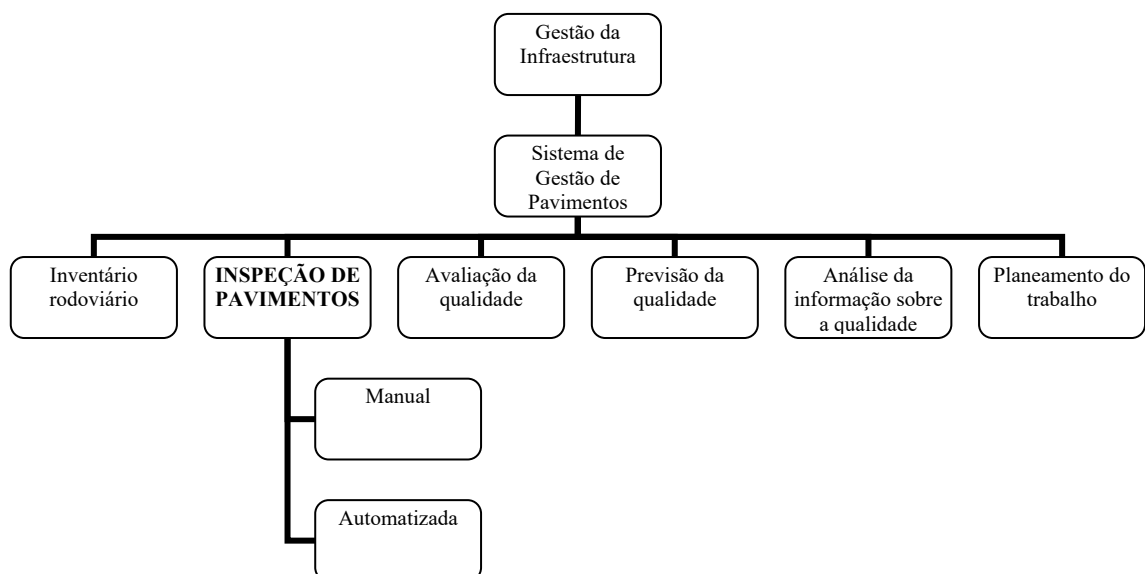


Figura 8 – Componentes dos sistemas de gestão de pavimentos (adaptado de Millian, 2019)

A implementação de um SGP começa, portanto, com a recolha de informação sobre as características da rede e dos pavimentos (inventário rodoviário). Picado-Santos, et al. (2004), no estudo para implementação de um SGP para a rede rodoviária de Lisboa, descreve os dados recolhidos para nesta componente:

- Identificação da classe viária de cada segmento inspecionado (hierarquia viária).
- Geometria da estrada (largura da berma, largura da via, largura do separador central).
- Características da estrutura do pavimento e história do pavimento (características da fundação do solo, tipos de camadas ligadas e não ligadas, espessura das camadas, datas de construção e reabilitação).
- Localização dos nós e segmentos no modelo da rede rodoviária, comprimento e direção de levantamento da informação.
- Degradações do pavimento (desintegração da superfície, fendilhamento, rodeiras, covas, reparações e irregularidade longitudinal).
- Custos médios das ações de manutenção e reabilitação realizadas pela entidade gestora da rodovia.
- Dados complementares (detalhes sobre a degradação das bermas e redes subterrâneas urbanas).

A seguinte fase de inspeção consiste na recolha dos dados que permitirão avaliar o estado atual do pavimento e fazer uma previsão da sua vida útil (Picado-Santos, et al., 2004). Os parâmetros normalmente considerados para avaliar a qualidade dos pavimentos rodoviários na fase de pós-construção são: a capacidade estrutural, o estado da superfície, a regularidade longitudinal e transversal e o atrito dos pavimentos. O cálculo do índice PSI (*Present Serviceability Index*) ou PCI (*Pavement Condition Index*) a partir dos dados recolhidos é habitualmente utilizado para a avaliação global do estado dos pavimentos (Santos, et al., 2019) (ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018).

A qualidade e fiabilidade da informação recolhida nesta fase é, portanto, essencial para as seguintes fases, designadamente, na priorização dos troços da infraestrutura a serem intervencionados, no tipo de intervenção a realizar e, finalmente e mais importante, na otimização dos custos de manutenção e reabilitação com base numa análise de custo-benefício (Millian, 2019).

Como exemplo pode referir-se o modelo estudado para o SGP da rede rodoviária de Lisboa, testado numa parte da rede (161 km) para definir as estratégias de manutenção e reabilitação a longo prazo (20 anos), oferecendo ao decisor uma extensa informação sobre os processos a implementar em cada troço estudado. O estudo concluiu que estratégias com maior investimento em manutenção e reabilitação se traduzem em menores custos totais (Picado-Santos, et al., 2004).

A Infraestruturas de Portugal, S.A. usa uma estrutura de SGP semelhante para gerir a rede rodoviária nacional (ver figura 9).

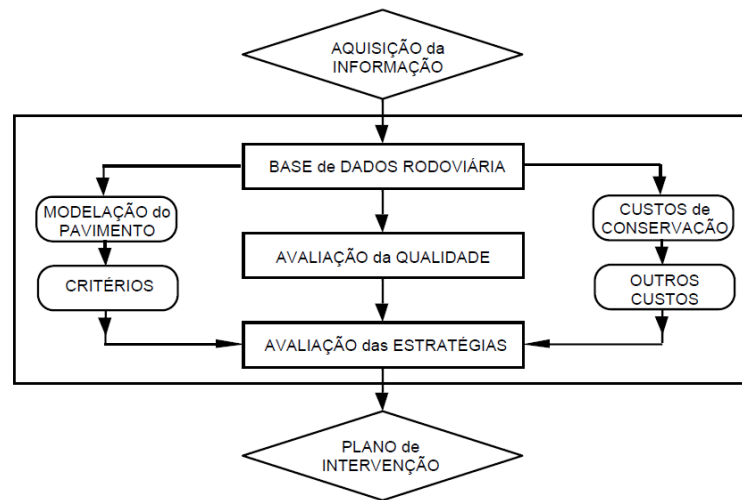


Figura 9 - Estrutura geral do sistema de gestão de pavimentos da Infraestruturas de Portugal (Picado-Santos, et al., 2006)

Habitualmente, a inspeção da superfície dos pavimentos é feita visualmente por observação direta, apresentando a avaliação dos defeitos encontrados por peritos algum grau de subjetividade. Esta é uma abordagem tradicional, que envolve custos elevados de recolha de informação, é demorada e muitas vezes produz resultados com algum grau de inconsistência. Além disso, expõe os técnicos a condições perigosas de trabalho nas vias (Ragnoli, et al., 2018).

No caso específico deste trabalho, interessa avaliar o recurso a VANT como tecnologia recente e inovadora de inspeção e avaliação do estado dos pavimentos. De facto, os VANT permitem a recolha de imagens de alta qualidade (resolução) que podem ser tratadas e transpostas para modelos 3D, permitindo a avaliação das características geométricas das patologias presentes na superfície dos pavimentos, auxiliando desta forma os gestores no seu tratamento.

Muito embora o uso de VANT permita a obtenção rápida de um grande número de dados a baixo custo, constitui uma técnica ainda em desenvolvimento e ainda com pouca aplicação efetiva na inspeção de pavimentos. Existem, neste campo de aplicação, alguns esforços de investigação que procuram encontrar as melhores condições de utilização dos VANT e da informação recolhida pelos mesmos (Outay, et al., 2020).

De entre os estudos que podem ser encontrados na literatura da especialidade inicia-se por dar destaque ao de Zhang, (2008), que desenvolveu um sistema de mapeamento com recurso à fotogrametria baseado em VANT para avaliar o estado da superfície das estradas, especialmente concebido para estradas não pavimentadas. O seu sistema de captação e processamento de imagem inclui a calibração da câmara, um sensor laser para medir distâncias, a criação de

ortoimagens, a geração dum modelo digital 3D da superfície da estrada e a extração automatizada de dados de medição para avaliação do estado da superfície da estrada. No entanto, a precisão do método proposto não é discutida em detalhe, pois apenas foram fornecidas evidências fotográficas que mostram a identificação de degradações do tipo ondulação.

Mais tarde, em outro artigo, Zhang e Elaksher (2011) apresentaram um sistema semelhante com pequenas melhorias e forneceram uma comparação das medições de degradações efetuadas no local com as obtidas a partir de informações 3D derivadas de imagens de VANT processadas. Neste estudo foram encontradas diferenças entre medições de aproximadamente 0,5 cm, consideradas aceitáveis pelos autores para o caso da avaliação do estado da superfície de estradas não pavimentadas (Zhang et al., 2011).

Noutro estudo, Dobson et al. (2013) propuseram um sistema semelhante para gerar um modelo 3D da superfície da estrada usando o algoritmo de processamento de imagem SfM (sigla de *Structure from Motion*), aplicado a estradas não pavimentadas. Numa segunda fase de desenvolvimento deste projeto foram feitas melhorias no sistema de processamento, nomeadamente a inclusão de um filtro de imagem que remove imagens distorcidas antes de serem processadas para construção do modelo 3D.

Para obter mais precisão na avaliação das degradações de pavimentos, Themistocleous et al. (2014) propuseram o uso de uma gama de ferramentas e a sua integração. Os autores estudaram a integração de imagens de VANT com imagens de satélite e o uso de medições *in situ* com radar de penetração no solo (GPR – sigla do inglês *Ground Penetrating Radar*) e espectroscopia de campo, na tentativa de desenvolver uma metodologia sólida e não intrusiva (figura 10).

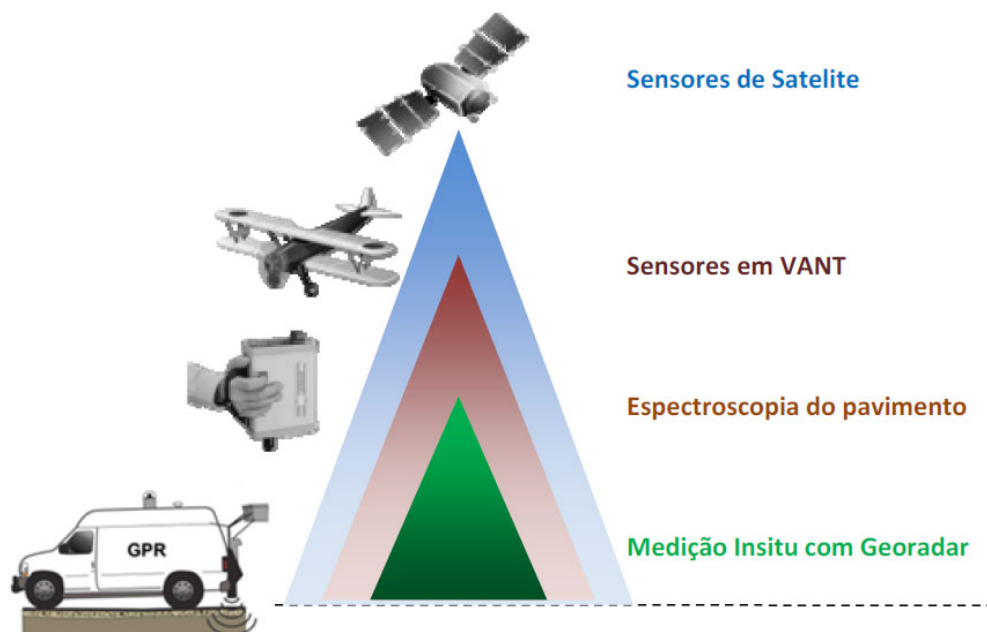


Figura 10 - Integração de tecnologias não intrusivas de controle remoto para avaliação de danos em pavimentos de estradas (adaptado de Themistocleous, et al., 2014)

Noutro estudo, Knyaz et al. (2016) apresentaram duas técnicas fotogramétricas para análise da superfície da estrada (ou seja, de deformações/descontinuidades) usando imagens obtidas com recurso a um VANT (Geoscan 401) equipado com câmara digital Sony-RX1. Foi usado o software de processamento de imagem Agisoft PhotoScan juntamente com vários pontos de referência e controle para a construção de um modelo 3D da superfície do pavimento. Os autores concluíram que a precisão da medição, na ordem dos 10mm, era adequada para definir os macro parâmetros da superfície da estrada.

Shaghlil e Khalafallah (2018) apresentaram um conjunto de requisitos a considerar na captação de imagens por VANT e as ferramentas de processamento de imagem a utilizar para identificar as degradações do tipo fendilhamento (obtidos a partir das indicações recomendadas pelos Departamentos de Transporte dos estados norte-americanos da Virgínia e da Carolina do Norte). Na tabela 5 estão listados os requisitos recomendados pelos autores.

Tabela 5 - Requisitos para a recolha de dados com recurso a VANT para deteção de degradações de pavimentos (adaptado de Shaghlil, et al., 2018)

Atributo	Requisito
Fendilhamento	Identificação de fendas com profundidade superior a 0,00317 m (1/8 polegada) e abertura superior a 0,00635 m (1/4 polegada).
Tamanho da imagem	As imagens devem capturar toda a largura da faixa de rodagem, incluindo as bermas.
Percurso de recolha de dados	As imagens devem ser recolhidas num percurso uniforme que acompanhe o desenvolvimento da via ou faixa de rodagem (sem mudanças de via ou faixa de rodagem).
Condições climáticas	Não devem ser recolhidas imagens quando as condições climáticas são desfavoráveis, isto é, em condições de chuva, neve, calor ou humidade extrema.

Neste estudo, realizado no âmbito do programa de manutenção de pavimentos do estado da Florida, Estados Unidos da América (MRP – *Florida's Maintenance Rating Program*), foi proposto um sistema automatizado para identificação da degradação fendilhamento baseado no processamento de imagens obtidas por VANT e é feita uma comparação com os resultados obtidos em métodos tradicionais. De acordo com os parâmetros comparados apresentados na tabela 6, os autores concluíram que o sistema automatizado proposto é considerado superior às práticas existentes, pois reduz os custos de inspeção, aumenta a segurança dos inspetores e não condiciona o tráfego rodoviário (Shaghlil, et al., 2018).

Tabela 6 - Comparação entre as práticas atuais, o MRP da Flórida e o sistema de classificação de manutenção proposto por Shaghilil et al. (adaptado de Shaghilil, et al., 2018)

Parâmetro	Práticas atuais	Flórida MRP	Sistema proposto
Frequência	Não especificado, com contratos de manutenção de 5 anos	3 vezes por ano	Inspeção efetuada uma vez por ano e realização de operações de manutenção quando necessário
Abrangência	Estradas com contratos de manutenção de 6 meses	30 amostras aleatórias por tipo de estrada	Número de amostras aleatórias definido com base num erro de amostragem aceitável
Elementos	Apenas aos elementos da estrada onde foram detetados defeitos	Todos os elementos da estrada	Todos os elementos da estrada
Comprimento da amostra	Segmentos com 25m de comprimento	Segmentos com 161 m (528 pés) de comprimento	Sem limite se usados VANT
Equipas de inspeção (n.º de elementos)	Mínimo 2	Mínimo 2	Mínimo 1
Equipamento usado	Equipamentos manuais tradicionais, incluindo régua de metal, hodómetros e esquadros	Equipamentos manuais tradicionais e dispositivos automáticos como régua e veículos de inspeção	Dispositivos de captação de dados de imagem e posição incorporados em VANT e sistemas automáticos de deteção de patologias
Propósito	Sistema de classificação de algumas patologias	Folha com lista codificada de patologias	Sistema de classificação abrangente com verificação de todos os tipos de patologias
Resultados	Subjetivo	Objetivo	Objetivo
Registos	Não armazenado em formato digital de uso fácil	Disponível	Deve estar disponível
Tempo de inspeção	Madrugada: quando o tráfego é menor e as estradas podem ser fechadas para inspeção	Durante o dia (diurno)	Durante o dia (diurno)

Muito embora o sistema proposto possa ser limitado pelo tempo de voo do VANT e pelas preocupações de segurança em relação ao tráfego de veículos, o estudo concluiu que os resultados são de interesse para os gestores de ativos de infraestruturas e departamentos de transporte, uma vez que podem acelerar a recolha de dados de manutenção, eliminar erros humanos e melhorar a fiabilidade da avaliação para efeitos de definição de estratégias de manutenção (Shaghilil, et al., 2018).

No mesmo sentido do estudo anterior, Leonardi et al. (2019) propuseram um método automatizado com recurso a VANT para avaliação do estado da superfície das estradas,

concluindo que os dados de mapeamento 3D obtidos para identificar degradações no pavimento têm precisão inferior a 3 cm.

No que diz respeito ao trabalho desenvolvido por Lee et al. (2015), os autores usaram o DJI Mavic 2 Pro com a instalação de uma câmara 4K de alta resolução para obter imagens vídeo que depois seriam processadas para detecção apropriada das características da degradação do tipo covas, desenvolvendo uma base de dados abrangente baseada em SIG (Sistemas de Informação Geográfica). O software Pix4Dmapper foi usado para o processamento das imagens e para o desenvolvimento das etapas usuais seguidas na geração da nuvem de pontos. Para a reconstrução 3D, os dados da nuvem de pontos foram utilizados no CloudCompare, Autodesk Recap Pro e Civil 3D, de forma sequencial, para obter os dados geométricos das covas. A precisão na medição das características geométricas das covas ficou na faixa de +/- 2,0 pol. (~5 cm).

Li, et al. (2019) usaram um sistema VANT de baixa altitude com detecção e medição de luz (VANT LiDAR) para gerar dados de nuvem de pontos e, em seguida, o modelo de classificação de floresta aleatória (*random forest*) para identificar diferentes tipos de degradações de pavimentos (fendilhamento, covas, empolamentos e abatimentos). Foi registrada uma precisão na identificação das degradações de 92,3%, tendo como referência as medições manuais.

Tan e Li (2019) obtiveram imagens da superfície de pavimentos a partir de VANT e processaram-nas para reconstruir modelos 3D derivados da fotogrametria com recurso ao Pix4Dmapper. O estudo desenvolveu um algoritmo que determina os pontos contidos nas regiões degradadas do pavimento, bem como medições das características geométricas das patologias, como o comprimento, a largura, a altura (ou profundidade da cavidade), a área e a localização do ponto mais alto/baixo. Dois exemplos dos modelos 3D obtidos são apresentados na figura 11 (Tan, et al., 2019).



Figura 11 - Exemplos de modelos 3D ortofotomagem (à esquerda) e na forma de nuvem de pontos (à direita) (Tan, et al., 2019)

O estudo para o desenvolvimento deste algoritmo foi realizado de acordo com o fluxograma geral apresentado na figura 12.



Figura 12 - Fluxograma geral do estudo (adaptado de Tan, et al., 2019)

O primeiro passo consistiu em separar a superfície da estrada (pavimento) da sua envolvente, pois a irregularidade da elevação da envolvente dificulta a detecção automática das degradações do pavimento. Neste estudo foram alcançados resultados bastante bons de extração da superfície do pavimento, como demonstrado no exemplo apresentado na figura 13.

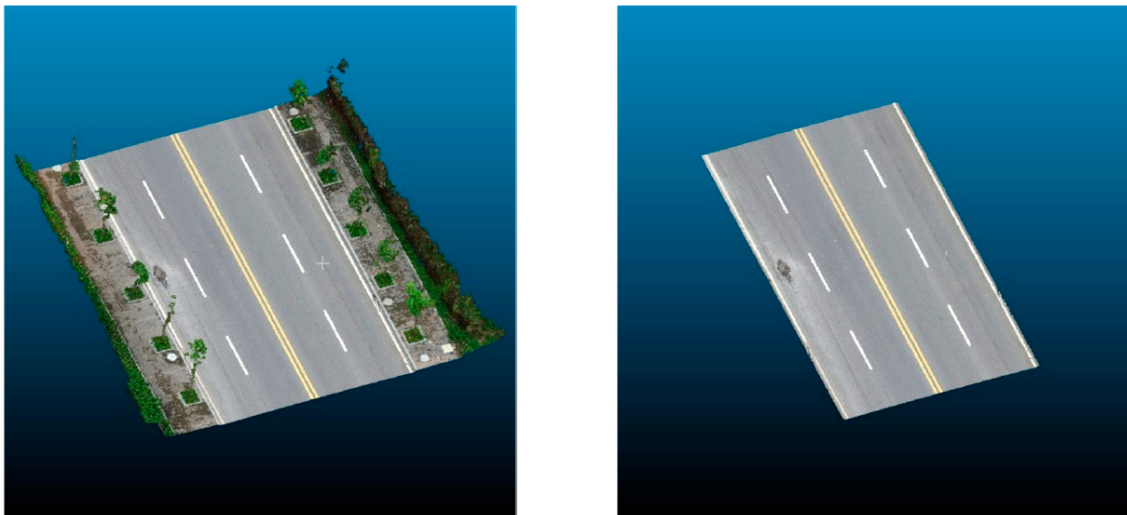


Figura 13 - Resultados da extração da superfície da estrada (pavimento). À esquerda antes da extração e à direita depois da extração (Tan, et al., 2019)

Segundo os autores, o pavimento extraído pode ser considerado localmente plano, e cada ponto na superfície da estrada deve cair em seu plano de ajuste local. Os pontos desviados deste plano são considerados parte da área degradada do pavimento. Depois de detectadas e extraídas todas as áreas degradadas, as características das degradações são obtidas para análise de precisão (Tan, et al., 2019). Com o algoritmo utilizado, foi obtido um erro de cerca de 1 cm nas medições efetuadas, quando comparados os resultados com as medições *in situ* de covas e deformações. A eficiência em relação ao tempo de computação também foi determinada com base no *hardware* utilizado, tendo-se alcançado cerca de 3 a 6 min para detecção de defeitos no pavimento (Tan, et al., 2019).

Com o objetivo de detectar e caracterizar o fendilhamento de pavimentos flexíveis em áreas afetadas por deslizamentos de terras, Nappo et al. (2021) desenvolveram uma ferramenta que utiliza uma combinação de modelos 2D e 3D reconstruídos a partir de imagens recolhidas por VANT. O processo semiautomático proposto e descrito no fluxograma da figura 14 permitiu detectar e classificar rapidamente fendas longitudinais e transversais com abertura superior a 1 cm.

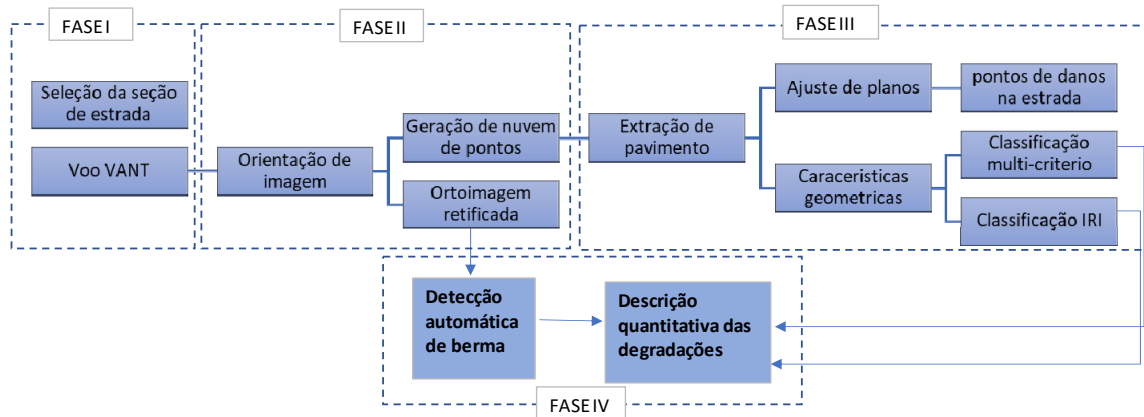


Figura 14 - Fluxograma do procedimento proposto por Nappo et al. (adaptado de Nappo et al., 2021)

O modelo 3D foi usado para obter os seguintes três resultados principais: um mapa para localizar as anomalias do pavimento, um classificador binário multi-critério para detectar rapidamente a presença ou ausência de danos no pavimento e uma metodologia baseada na irregularidade (IRI) para avaliar a qualidade do pavimento e a gravidade de cada degradação. O mapa pode ser usado para ter uma visão geral da distribuição dos danos em larga escala, enquanto os classificadores multi-critério e baseados no IRI podem ser aplicados em escalas médias ou detalhadas para planejar os trabalhos de manutenção. Como produtos fotogramétricos adicionais foi usada uma imagem ortorretificada 2D da seção da estrada estudada para detectar automaticamente fendas longitudinais e transversais com aberturas maiores que 1 cm, provavelmente induzidas pela instabilidade de taludes e/ou da fundação. Este procedimento permitiu localizar com precisão os danos no pavimento e extrair os seus limites que, uma vez sobrepostos ao modelo 3D, podem ser usados para caracterizar quantitativamente os danos do pavimento. No entanto, o estudo concluiu que são necessários mais refinamentos dos classificadores propostos para reduzir o erro e melhorar a capacidade de detectar diferentes tipologias de danos numa ampla gama de infraestruturas (Nappo et al., 2021).

Por outro lado, Zhu et al. (2022) desenvolveram um estudo que propõe a recolha de informações de degradações do pavimento utilizando um VANT com câmara de alta resolução e o uso de três algoritmos de detecção de objetos de última geração - Faster R-CNN, YOLOv3 e YOLOv4 - para testar o conjunto de dados recolhidos. Foram depois comparados os desempenhos de previsão de cada um destes algoritmos que são baseados em redes neurais convolucionais (CNNs – sigla

do inglês “*convolutional neural networks*”) que podem ser usados na classificação, localização e segmentação de imagens para identificação de diferentes tipos de fendilhamento. O estudo concluiu que a abordagem de detecção de degradações de pavimentos a partir de imagens recolhidas com VANT é uma alternativa viável para aplicações práticas e que entre os três algoritmos estudados, o desempenho de previsão do YOLOv3 foi o melhor.

Num outro estudo, Kaamin, et al. (2022) utilizaram um processo de inspeção de pavimentos com recolha de imagens a partir de VANT numa estrada na Malásia. No processo, foi possível produzir ortomosaicos com o software Pix4DMapper, com reprodução em modelo 3D da superfície da estrada em estudo, de forma a identificar e quantificar as degradações do pavimento. A imagem apresentada na figura 15 ilustra o uso do *software Global Mapper* na identificação e caracterização das degradações presentes no pavimento .

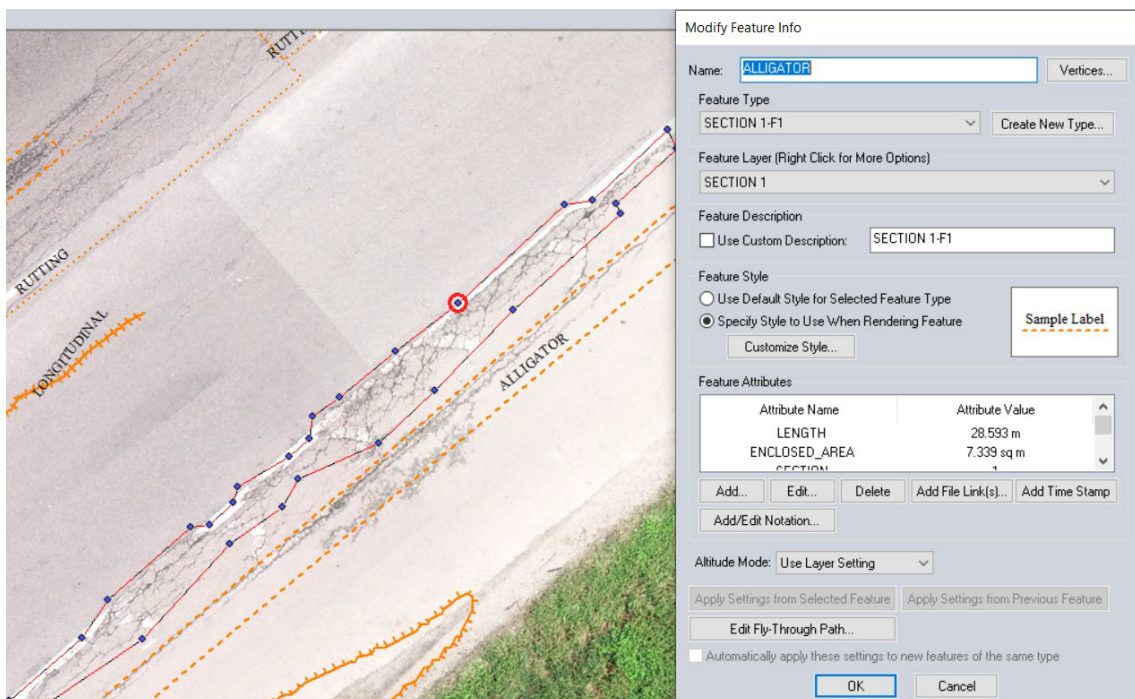


Figura 15 - Caracterização das degradações do pavimento com o *Global Mapper* (Kaamin, et al., 2022)

A partir dos dados recolhidos foi ainda possível determinar um índice de degradação do pavimento usando o método PCI (do inglês *Pavement Condition Index*). Este índice é usado para avaliar o estado do pavimento com base em uma avaliação simultânea dos tipos, densidades e níveis de gravidade das degradações. O índice PCI é um índice numérico que varia de 0 a 100 e que indica o estado geral do pavimento, correspondendo um PCI=0 a pavimentos muito degradados e um PCI=100 a pavimentos em muito bom estado (Kaamin, et al., 2022). Não obstante os resultados satisfatórios, o estudo não compara os resultados da metodologia proposta com os métodos tradicionais.

Os estudos aqui referidos apontam, portanto, para a viabilidade e vantagem do uso de VANT na inspeção de pavimentos de infraestruturas de transporte. Verifica-se ainda a referência a custos de operação mais baixos quando comparados com os métodos tradicionais de observação direta e que a qualidade da informação recolhida permite obter níveis de precisão suficientes para a correta caracterização das degradações presentes na superfície dos pavimentos. A maioria dos dados recolhidos com recurso a VANT são usados para a construção de modelos 3D, verificando-se atualmente uma tendência para o desenvolvimento de aplicações baseadas em inteligência artificial para deteção automática de degradações, em especial para o fendilhamento e covas. Perspectiva-se assim que inspeções com recurso a VANT em grande escala podem ser integradas nos Sistemas de Gestão de Pavimentos antecipando informação fundamental para auxiliar os gestores das infraestruturas na definição dos programas de prevenção e tratamento de degradações.

4. Caso de estudo

Face ao conteúdo dos capítulos anteriores, o presente capítulo tem por objetivo avaliar a possibilidade de utilização dos meios existentes no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI para recolha de dados de degradações de pavimentos com recurso a VANT e posterior processamento da informação para obtenção de um índice da qualidade do pavimento. O capítulo divide-se em 5 partes, iniciando com um primeiro ponto onde se define a metodologia proposta para o estudo, seguida da caracterização do troço a inspecionar e das características a medir. O terceiro item diz respeito à recolha de imagens, propriamente dita, caracterizando as condicionantes e os recursos utilizados. No quarto ponto é apresentado o tratamento de dados com vista à caracterização das patologias segundo o catalogo de degradações da Infraestruturas de Portugal (IP), para no final calcular o índice de qualidade do pavimento do trecho estudado segundo duas metodologias diferentes – PSI (do inglês *Present Serviceability Index*) e PCI (do inglês *Pavement Condition Index*). No último ponto são também analisados e comentados os resultados obtidos com vista à sua validação.

4.1. Metodologia

De forma genérica, a metodologia proposta para este estudo segue os passos descritos no fluxo da figura 16.

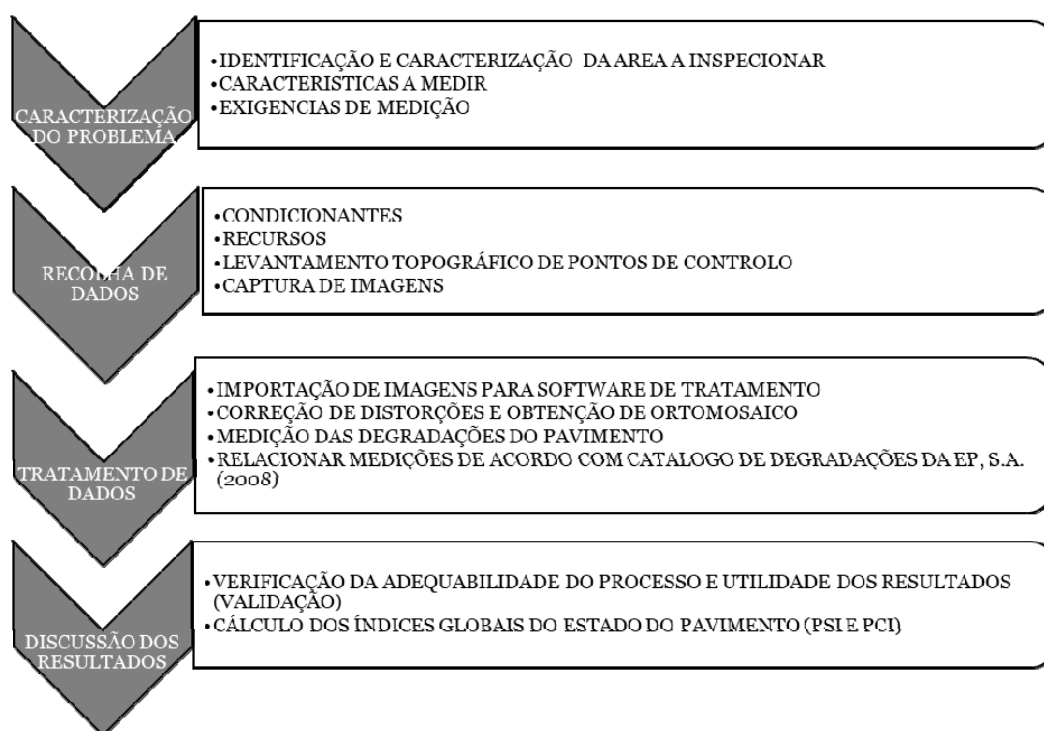


Figura 16 - Metodologia para execução do estudo de inspeção de pavimentos com VANT e determinação de índices de qualidade do pavimento

Tendo em conta o objetivo deste trabalho, que pretende essencialmente verificar a adequabilidade do uso de VANT na inspeção de pavimentos, a proposta de um plano de ação com definição das medidas de reabilitação e de um programa de inspeções e manutenções está fora do âmbito do estudo.

Cada um dos passos descritos no fluxo anterior é apresentado e descrito nos pontos seguintes.

4.2. Caracterização do problema

Tendo em conta o âmbito do estudo, a escolha do trecho de estrada a inspecionar teve em conta a evidencia visual de várias degradações do pavimento de forma a ser possível caracterizar um leque maior de patologias.

4.2.1. Identificação e caracterização do troço de estrada em estudo

O troço objeto deste estudo localiza-se aproximadamente ao km 49,8 da estrada nacional N18, entre as cidades do Fundão e da Covilhã, em ambiente semi rural e a uma altitude de cerca de 405 m. O troço analisado está incluído numa estrada com 2 faixas de rodagem divididas por um separador central de 1,0 m de largura, com 2 vias de 3,2 m de largura em cada sentido de circulação, sem bermas e drenagem com recurso a coletor enterrado alimentado por sumidouros. O estudo incidiu apenas em cerca de 52m da via direita no sentido SE-NO numa área de cerca de 183 m², conforme representado na figura 17.



Figura 17 - Localização do troço de estrada em estudo (extraído do Google Earth)

Segundo fonte da Câmara Municipal do Fundão, este troço foi alvo de beneficiação entre 2005 e 2007, tendo sido aplicada uma camada de base de 20 cm de *tout-venant*, uma camada de ligação (*binder*) de 6 cm de mistura betuminosa densa e uma camada de desgaste de 5 cm em betão betuminoso. Após a beneficiação foram feitas algumas intervenções pontuais essencialmente para reparação de covas de maiores dimensões.

O troço do estudo apresenta várias patologias visíveis, nomeadamente fendas, fendilhamento tipo pele de crocodilo, deformações localizadas, rodeiras, covas e reparações. A figura 18 ilustra o estado geral do pavimento no troço inspecionado.



Figura 18 - Aspeto geral do troço estudado







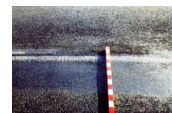






Considerando a data indicada da última intervenção importante, o pavimento está quase a completar 20 anos, que é normalmente o período de dimensionamento adotado para pavimentos flexíveis.

4.2.2. Definição das características a medir

Pretende-se neste estudo obter informação sobre as patologias presentes no pavimento de acordo com o Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários usado pela administração rodoviária Portuguesa, a Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP, SA) (Estradas de Portugal, S.A., 2008). Assim, as características a medir e a precisão de medição necessárias deverão ser aquelas que permitem balizar os vários tipos de degradação dentro dos níveis de gravidade definidos nesse catálogo.

Na tabela 7 estão resumidos os tipos de degradação, os parâmetros a avaliar e as grandezas de medição associadas a cada nível de gravidade segundo o Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários da IP, SA.

Tabela 7 - Tipos de degradação em pavimentos flexíveis (adaptado de Estradas de Portugal, S.A., 2008)

Tipo de degradação	Parametro a avaliar	VALOR			Ilustração
		Nível 1	Nível 2	Nível 3	
Fendas longitudinais	Abertura de fendas em planta (a)	$a < 2\text{mm}$	$2\text{mm} \leq a \leq 4\text{mm}$	$a > 4\text{mm}$	
Fendas Transversais	Abertura de fendas em planta (a)	$a < 2\text{mm}$	$2\text{mm} \leq a \leq 4\text{mm}$	$a > 4\text{mm}$	
Fendilhamento tipo pele de crocodilo	Abertura de fendas em planta (a) e malha (m)	$a < 2\text{mm}$ e $m > 20\text{cm}$	$a < 2\text{mm}$ e $m < 20\text{cm}$ ou $2\text{mm} \leq a \leq 4\text{mm}$ e m qualquer ou $a > 4\text{mm}$ e $m > 40\text{cm}$	$a > 4\text{mm}$ e $m < 40\text{cm}$	
Deformações localizadas	Diferença de nível (h)	$h < 10\text{mm}$	$10\text{mm} \leq h < 30\text{mm}$	$h > 30\text{mm}$	
Rodeiras	Profundidade máxima da rodeira (h)	$h < 10\text{mm}$	$10\text{mm} \leq h < 30\text{mm}$	$h > 30\text{mm}$	
Desagregações superficiais	Largura da desagregação (b)	$b < 30\text{cm}$	$30\text{cm} \leq b \leq 100\text{cm}$	$b > 100\text{cm}$	
Polimento dos agregados	Largura do polimento (b)	$b < 30\text{cm}$	$30\text{cm} \leq b \leq 100\text{cm}$	$b > 100\text{cm}$	
Ninhos	Profundidade da cavidade (h) e comprimento (l)	$h < 2\text{cm}$ ou ninho isolado	$2\text{cm} \leq h \leq 4\text{cm}$ ou $20\text{cm} \leq l \leq 50\text{cm}$	$h > 4\text{cm}$ ou $l > 50\text{cm}$	
Peladas	Largura da pelada (b)	$b < 30\text{cm}$	$30\text{cm} \leq b \leq 100\text{cm}$	$b > 100\text{cm}$	
Exsudação de betume	Largura da exsudação (b)	$b < 30\text{cm}$	$30\text{cm} \leq b \leq 100\text{cm}$	$b > 100\text{cm}$	
Subida de finos	Area de abrangencia dos finos	nos bordos das fendas	zona dos rodados	mais de 75% da largura da via	
Tapagem de covas	Largura da tapagem das covas (b)	$b < 30\text{cm}$	$30\text{cm} \leq b \leq 100\text{cm}$	$b > 100\text{cm}$	
Remendos	Qualidade da execução e nível de degradação de qualquer tipo associada	Boa qualidade e degradação nível 1	Baixa qualidade e/ou degradação nível 2	Má qualidade e/ou degradação nível 3	

Conclui-se, portanto, que a resolução das imagens deve permitir a medição do valor mínimo em planta de 2 mm (fendilhamento nível 1) e de 10 mm em profundidade (deformações nível 1), pelo que devem ser garantidas resoluções de 0,3 a 0,5 mm em planta e 5 mm em profundidade.

4.3. Recolha de dados - Inspeção do pavimento

4.3.1. Condicionantes

No planeamento da inspeção é relevante perceber antecipadamente as condicionantes à operação propriamente dita. Neste caso, foram verificadas as condicionantes próprias do local e enquadrado o plano de voo dentro das restrições legais aplicáveis.

Dentro deste contexto foi verificada a existência de obstáculos como árvores, postes de iluminação ou redes aéreas, concluindo-se que não interferiam com o plano do voo delineado.

Analisadas as condicionantes, considerou-se que os voos de inspeção planeados são realizados em regime “Aberto”, ou seja, com uso de VANT de baixo peso (inferior a 25 kg), operado dentro dos limites visuais, fora de espaços restritos, longe de pessoas e obstáculos. Para este caso, e conforme já referido no ponto 1.2.2, a legislação é menos restritiva. Tratando-se de uma área sem limitações adicionais, importou, essencialmente, planejar o voo para o período diurno, com baixa altitude (até 120 m de altura) e com a preocupação de minimizar riscos para pessoas e bens.

Tratando-se de uma via de tráfego em funcionamento, agendou-se a inspeção para um dia de menor tráfego e com condicionamento de circulação na via sobrevoada. A escolha do dia teve também em conta a previsão de um dia soalheiro e com baixa velocidade do vento, de forma a não condicionar a estabilidade do VANT durante o voo.

A operação foi, assim, feita no sábado de 15/05/2021, no período da manhã e com autorização e apoio do gestor da infraestrutura, a Câmara Municipal do Fundão (CMF). Sendo a secção constituída por duas faixas de rodagem de via dupla, foi possível, com o auxílio dos funcionários da CMF, desviar o trânsito sem o restringir totalmente.

A figura 19 ilustra o momento da inspeção com o condicionamento de trânsito.

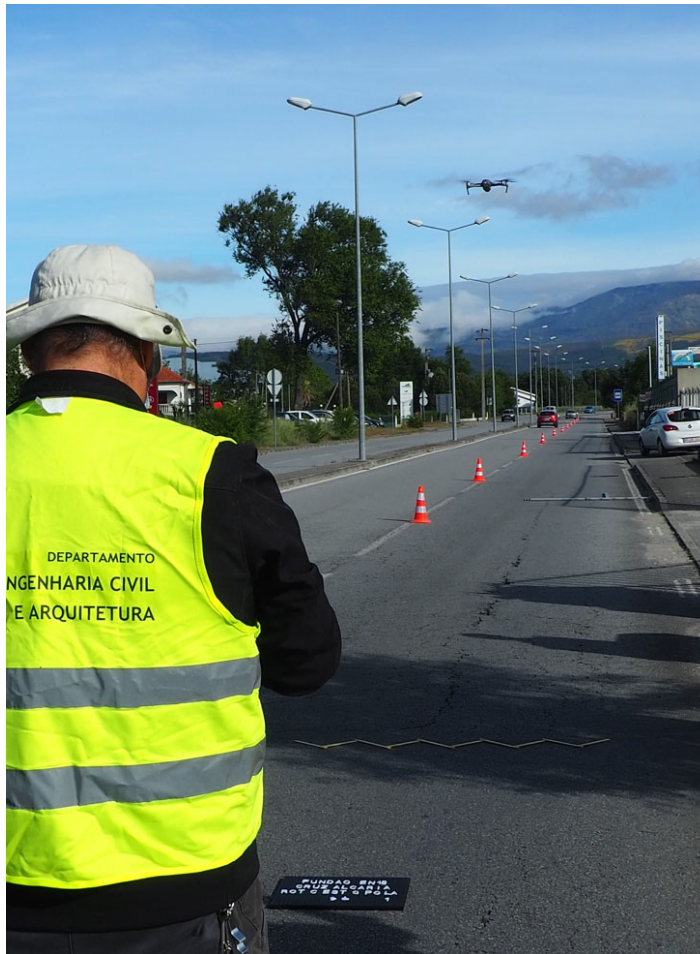


Figura 19 - Inspeção com restrição de circulação numa das vias de uma das faixas de rodagem

4.3.2. Recursos

Para a realização da inspeção foram mobilizados os seguintes recursos:

- Recursos humanos
 - Orientadora, Prof. Bertha Santos
 - Co-orientador e Operador do VANT, Prof. Pedro G. Almeida
 - Mestrando, Pedro Gavinhos
 - Equipa de desvio de trânsito - 3 trabalhadores da CMF
- Equipamento
 - Drone Mavic 2 Pro - equipamento disponível no DECA-UBI (ver figura 20)
 - 2 conjuntos de baterias
 - Régua graduada
 - Fita métrica
 - Câmara fotográfica
 - Miras e alvos topográficos
 - Leica *multistation* Ms50



Figura 20 - DJI Mavic 2 Pro

É importante nesta fase caracterizar de forma mais detalhada o VANT usado. A tabela 8 resume as características do drone utilizado.

Tabela 8 - Características do drone Mavic 2 Pro (adaptado de DJI, 2022)

Descrição/Parâmetro	Valor/Característica
Câmara Mavic 2 Pro	
Lente	FOV: cerca de 77°
Velocidade do obturador	Obturador Eletrônico: 8–1/8000s
Tamanho da imagem	5472×3648
Formato da foto	JPEG/DNG (RAW)
Aeronave	
Peso na decolagem	Mavic 2 Pro: 907g
Dimensões	Armazenado: 214×91×84 mm (comprimento×largura×altura) Desdobrado: 322×242×84 mm (comprimento×largura×altura)
Velocidade máxima (perto do nível do mar, sem vento)	72 km/h (modo S)
Altitude máxima de decolagem	6000 m
Max tempo de voo (sem vento)	31 minutos (a 25 km/h)
Max tempo a pairar (sem vento)	29 minutos
Distância máxima de voo (sem vento)	18 km (a 50 km/h)
Faixa de temperatura operacional	-10°C a 40°C
Frequência de operação	2.400 - 2.483 GHz 5,725 - 5,850 GHz
Precisão do posicionamento no voo	Vertical: ± 0,1 m (quando o posicionamento de visão está ativo) ± 0,5 m (com posicionamento GPS) Horizontal: ± 0,3 m (quando o posicionamento de visão está ativo) ± 1,5 m (com posicionamento GPS)
Sistema de Detecção	
Sistema de Detecção	Detecção de Obstáculos Omnidirecional

4.3.3. Captura de imagens

Muito embora não sejam objeto de análise deste trabalho todas as imagens obtidas, foram realizados os seguintes voos com diferentes formas de recolha de imagens para posterior tratamento:

- Voo manual com captura de fotos a 3 m de altura
- Voo manual com captura de fotos a 10m de altura
- Voo manual com captura de vídeo a 10 m de altura
- Voo manual com captura semi-automática de fotos a 10m de altura (fotos de 5 em 5m)
- Voo com captura automática de fotos com 4 passagens a 20 m de altura

Uma vez que a aplicação utilizada para a execução de voos programados, o PIX4Dcapture, não permite missões a menos de 10m de altura por razões de segurança, as inspeções efetuadas a alturas inferiores foram realizadas com voo e captura de imagens manual.

Das imagens recolhidas, apenas serão analisadas neste trabalho as que foram obtidas no voo manual com captura de imagens a 3m de altura, por se antever que, do conjunto de imagens obtidas, sejam as que apresentam melhor qualidade. Também foi criado um modelo 3D a partir do voo automático a 20m de altura que será objeto de análise numa outra dissertação.

A resolução espacial por pixel depende da altitude de voo e da distância focal da objetiva, o que influencia a quantidade de detalhes que contém uma imagem e constitui o parâmetro crítico que permite a identificação dos defeitos no pavimento..

A figura 21 ilustra a relação entre sensor, objetiva e campo de visão (FOV - sigla do inglês *Field Of View*).

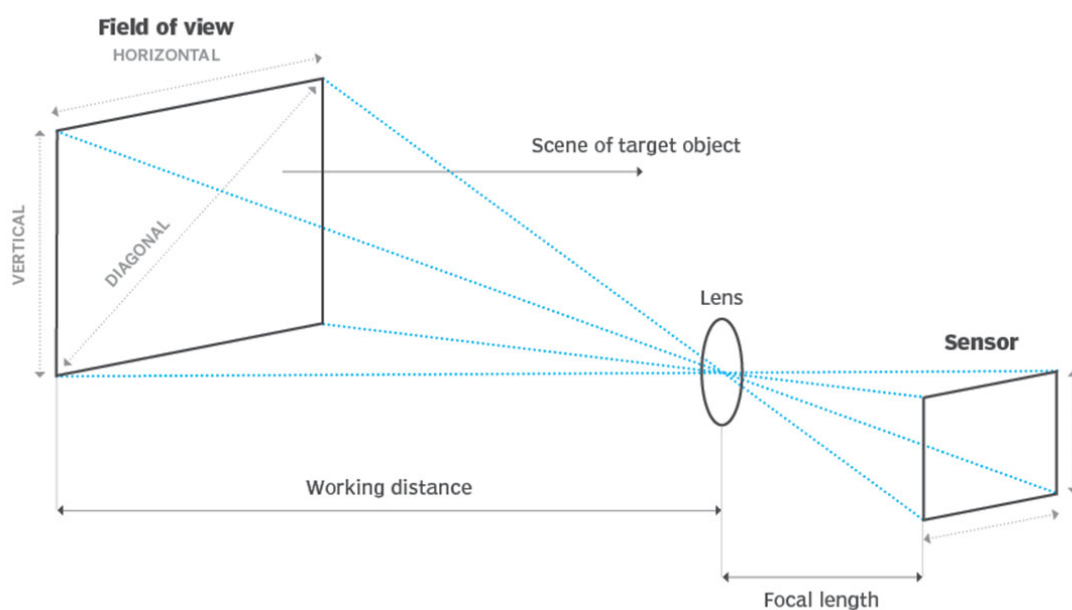


Figura 21 - Ilustração do campo de visão (FOV) de uma câmara (Awati, 2022)

Das características da câmara utilizada, importa sublinhar, dentro deste contexto, o campo de visão e o tamanho da imagem fixa. Do ponto anterior podemos extrair estas duas características da câmara instalada no Mavic 2 Pro:

- FOV: apróx. 77°
- Tamanho da imagem: 5472 x 3648 pixels

Considerando a diagonal do campo de visão, para a altura em análise obtemos as seguintes resoluções e dimensões de cada captura (tabela 9):

Tabela 9 - Resolução espacial das imagens obtidas com a câmara Mavic 2 Pro para captação de imagens a 3m de altura

Altura de voo (m)	PX	PY	FOV (°)	DFOV Dimensão diagonal da imagem (m)	Dimensão lateral do pixel (m)	Dimensão diagonal do pixel (m)	Largura da imagem (m)	Altura da imagem (m)
3	5472,0	3648,0	77	4,773	0,000725705	0,001026301	3,971	2,647

Tendo em conta a exigência de medição indicada no ponto 4.2, concluímos que esta resolução é suficiente para aferir as degradações segundo o catalogo de degradações adotado pela Infraestruturas de Portugal, S.A.

4.4. Tratamento de dados

As imagens, depois de recolhidas, foram importadas para o software de tratamento Agisoft Metashape, onde foi executado o processamento estereoscópico e fotogramétrico e obtidas as nuvens de pontos e os ortomosaicos sobre os quais se farão as análises dimensionais das patologias do pavimento.

Como base de referência para o estudo, foi feito um levantamento topográfico prévio e usados os pontos de controlo ilustrados na figura 22 para calibração do modelo 3D.



Figura 22 - Levantamento topográfico de pontos de controlo para calibração do modelo

Antes deste passo, também é possível descartar fotos que não tenham a qualidade adequada ao processamento pretendido.

A figura 23 ilustra o número de imagens sobrepostas usadas para a criação do modelo 3D (grau de sobreposição).

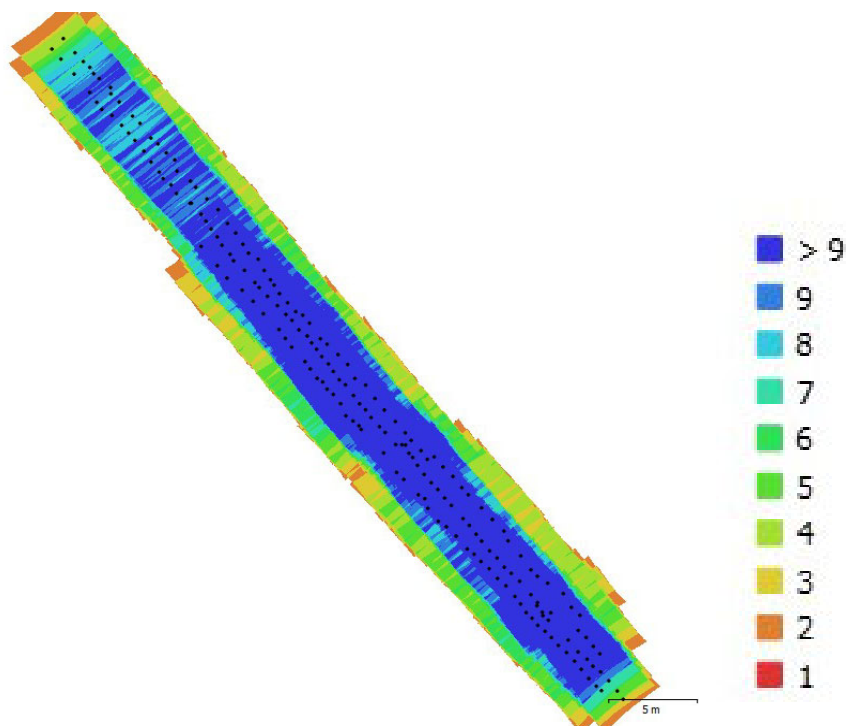


Figura 23 – Grau de sobreposição para obtenção do modelo 3D

Com as imagens tratadas foi criado o modelo 3D e medidas as características geométricas das degradações no visualizador do programa Agisoft, que incorpora funcionalidades de medição. Neste programa foram criadas camadas (*layers*) para cada tipo de degradação identificada e efetuadas as medições necessárias de acordo com o Catálogo de Degradações da IP, S.A. A Figura 24 mostra a listagem das camadas criadas no Agisoft e a figura 25 ilustra um extrato do modelo 3D obtido.

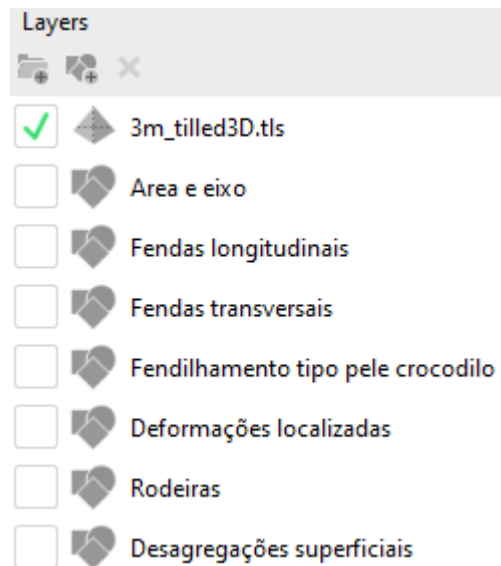


Figura 24 - Extrato do menu *Layers* do Agisoft com identificação das camadas criadas

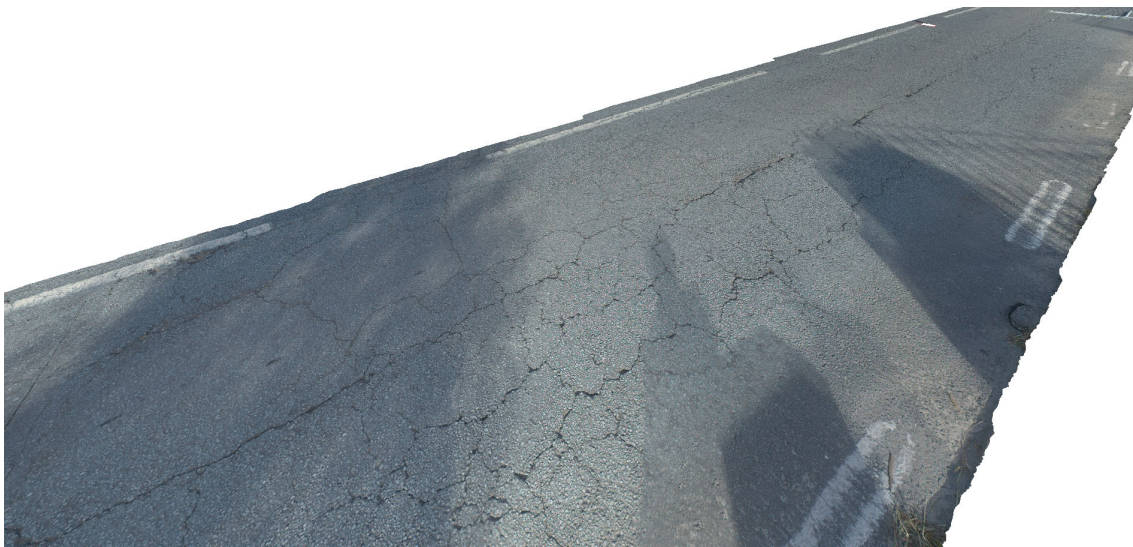


Figura 25 - Extrato do modelo 3D criado a partir das imagens captadas com VANT

4.4.1. Características gerais do trecho inspecionado

Para caracterizar genericamente o trecho em questão foi inicialmente medida a área e o comprimento do trecho conforme se ilustra nas figuras 26 e 27.

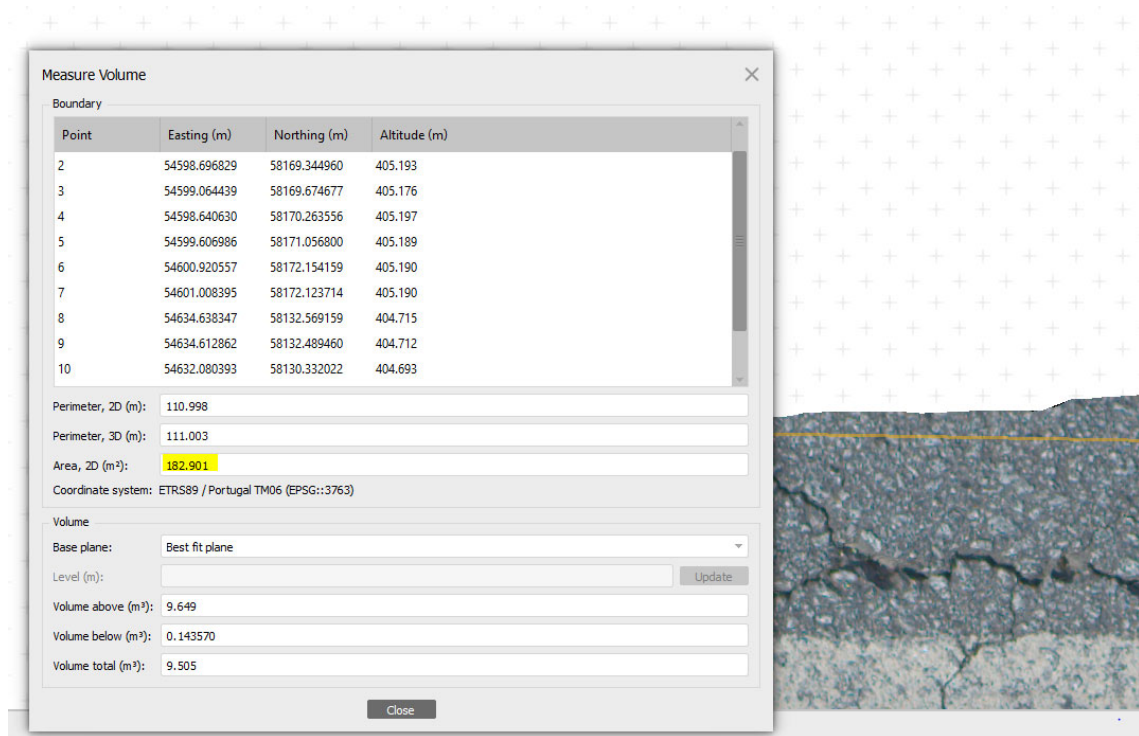


Figura 26 - Determinação da área do trecho em estudo no Agisoft Viewer



Figura 27 - Medição do comprimento do trecho em estudo no Agisoft Viewer

A Tabela 10 apresenta as medições obtidas para o comprimento e área do trecho.

Tabela 10 - Características geométricas gerais do trecho em estudo

Parâmetro	Valor	Un
Área	182,9	m ²
Comprimento	52,0	m

4.4.2. Precisão da medição

Para verificação da precisão das medições em planta e em profundidade, foram efetuadas medições de elementos com dimensões conhecidas no modelo 3D. Na figura 28 ilustram-se essas medições e nas tabelas 11 e 12 comparam-se os valores obtidos com as dimensões reais.

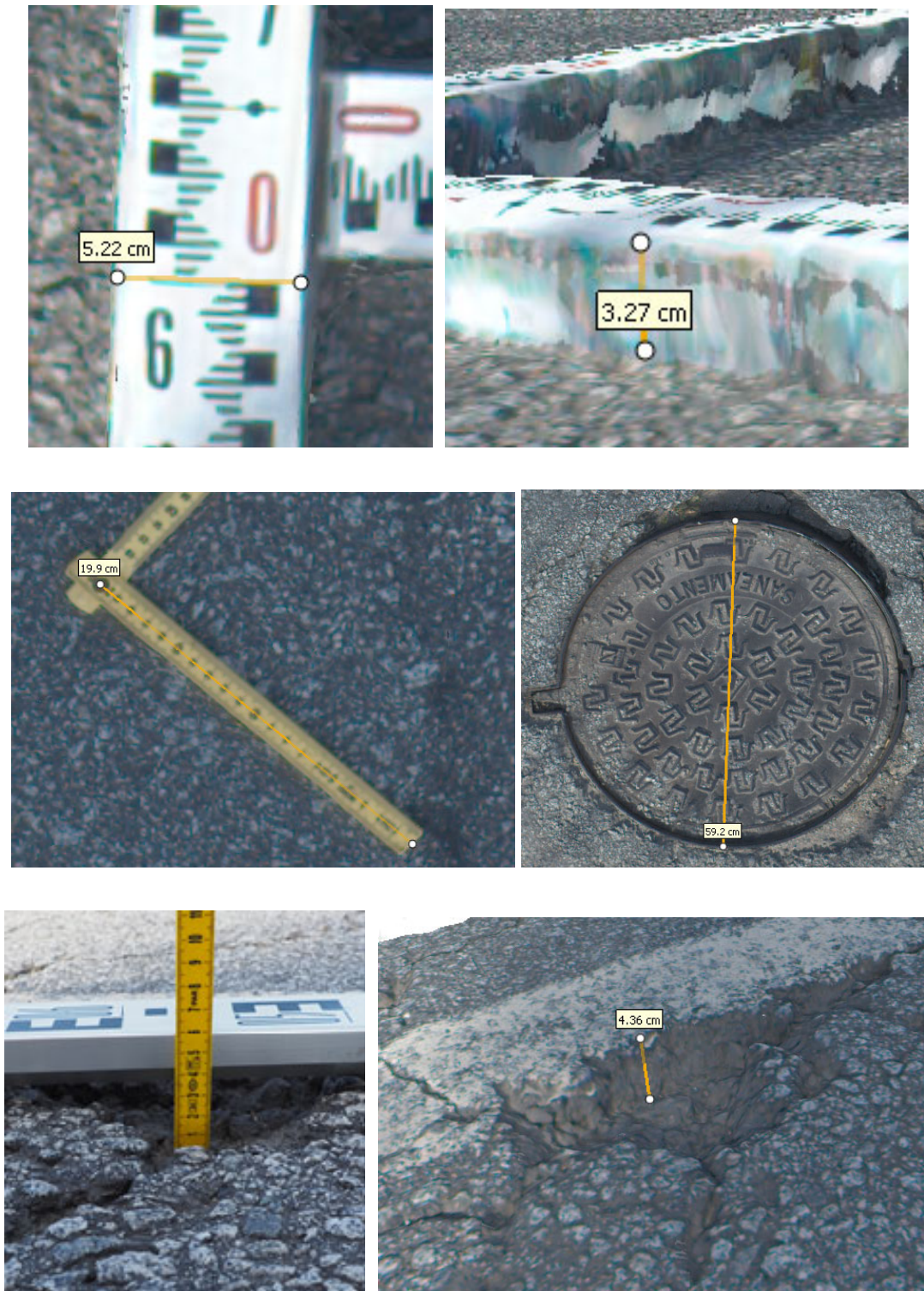


Figura 28 - Medição de elementos com dimensões conhecidas no modelo 3D

Tabela 11 - Comparação de medidas reais com as obtidas no modelo 3D (em planta)

	Real (m)	Medido no modelo 3D (m)	Variação (m)	Variação (%)
Largura da régua	0,0530	0,0522	-0,0008	-1,5%
Comprimento trecho régua articulada	0,2000	0,1990	-0,0010	-0,5%
Diâmetro exterior da tampa de saneamento	0,5940	0,5920	-0,0020	-0,3%

Tabela 12 - Comparação de medidas reais com as obtidas no modelo 3D (em profundidade)

	Real (m)	Medido no modelo 3D (m)	Variação (m)	Variação (%)
Profundidade da régua	0,0320	0,0327	0,0007	2,2%
Altura da cova	0,0450	0,0436	-0,0014	-3,1%

Tendo em conta o rigor necessário para catalogar as patologias (2 mm em planta e 10 mm em profundidade), conforme já descrito no ponto 4.2.2, a precisão das medições no modelo é suficiente e adequada.

4.4.3. Medição das degradações

- **Fendas longitudinais**

Verifica-se que praticamente toda a área apresenta fendas longitudinais. Para efeitos de medição mapearam-se 13 fendas principais de acordo figura 29 em baixo.

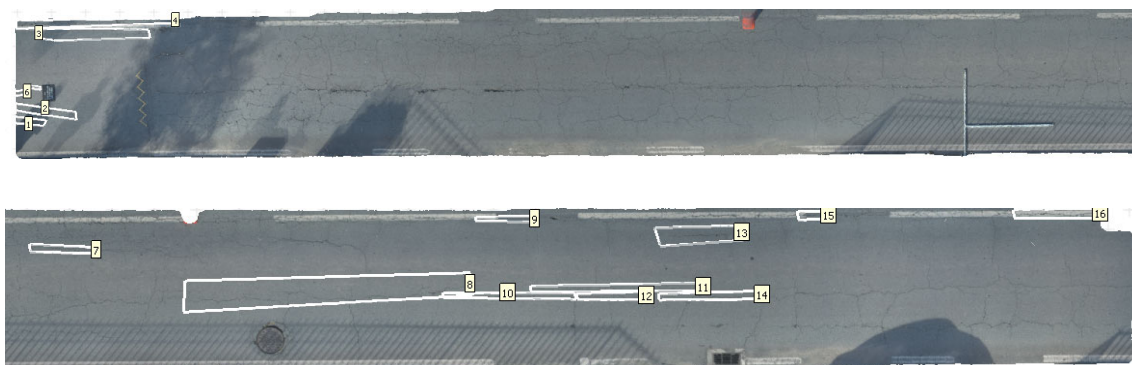


Figura 29 - Mapeamento de fendas longitudinais

De acordo com o Catálogo de Degradações de Pavimentos Rodoviários os níveis de gravidade da das fendas longitudinais são os seguintes (Estradas de Portugal, S.A., 2008):

- **Nível 1** - Fenda isolada e fechada (largura da fenda inferior a 2 mm).
- **Nível 2** - Fenda aberta (abertura da fenda entre 2 a 4 mm).
- **Nível 3** - Fenda grave ramificada, com perda de material e acompanhada de deformações e desagregações.

Após medição no modelo podemos classificar as fendas de acordo com o apresentado na tabela 13.

Tabela 13 - Classificação das fendas longitudinais do troço inspecionado segundo catálogo de degradações da IP, S.A,

Fendas longitudinais	Abertura média (mm)	Comprimento (m)	Isolada/Ramificada	Nível de gravidade
1	2,0	0,6	Isolada	NIVEL 1
2	3,0	1,5	Isolada	NIVEL 2
3	3,8	2,6	Isolada	NIVEL 2
4	8,0	3,8	Ramificada	NIVEL 3
5	1,4	0,3	Isolada	NIVEL 1
6	2,5	0,3	Isolada	NIVEL 2
7	6,4	1,5	Ramificada	NIVEL 3
8	4,7	6,2	Ramificada	NIVEL 3
9	1,9	1,3	Isolada	NIVEL 1
10	7,2	2,9	Ramificada	NIVEL 3
11	5,8	3,8	Ramificada	NIVEL 3
12	4,8	1,5	Ramificada	NIVEL 3
13	7,0	1,9	Ramificada	NIVEL 3
14	5,3	2,2	Ramificada	NIVEL 3
15	7,4	0,7	Ramificada	NIVEL 3
16	16,4	1,9	Ramificada	NIVEL 3

As figuras 30, 31 e 32 ilustram medições diretas no modelo de fendas que apresentam um nível de gravidade 1, 2 e 3, respetivamente.

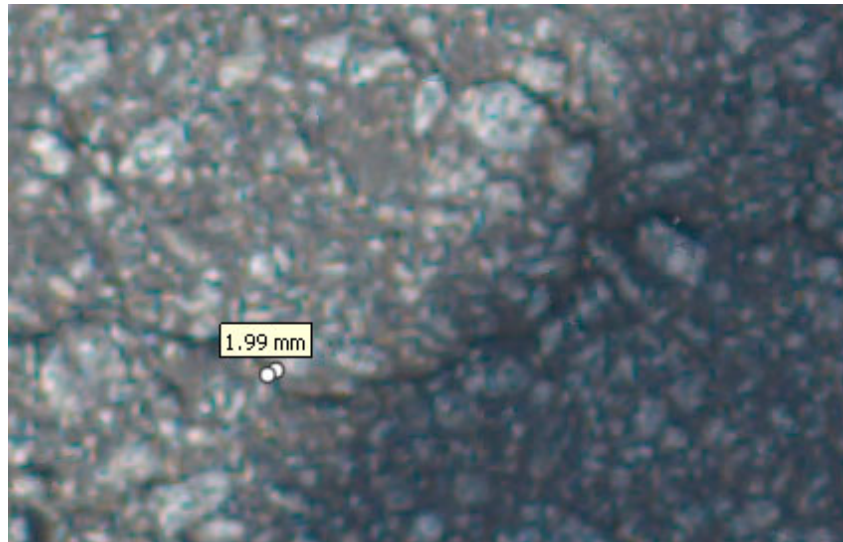


Figura 30 - Medição de fenda longitudinal nível 1

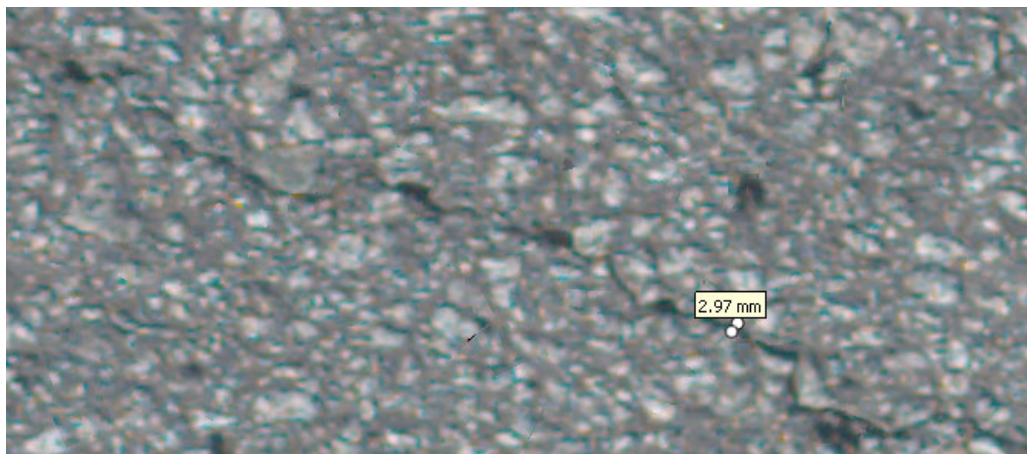


Figura 31 - Medição de fenda longitudinal nível 2

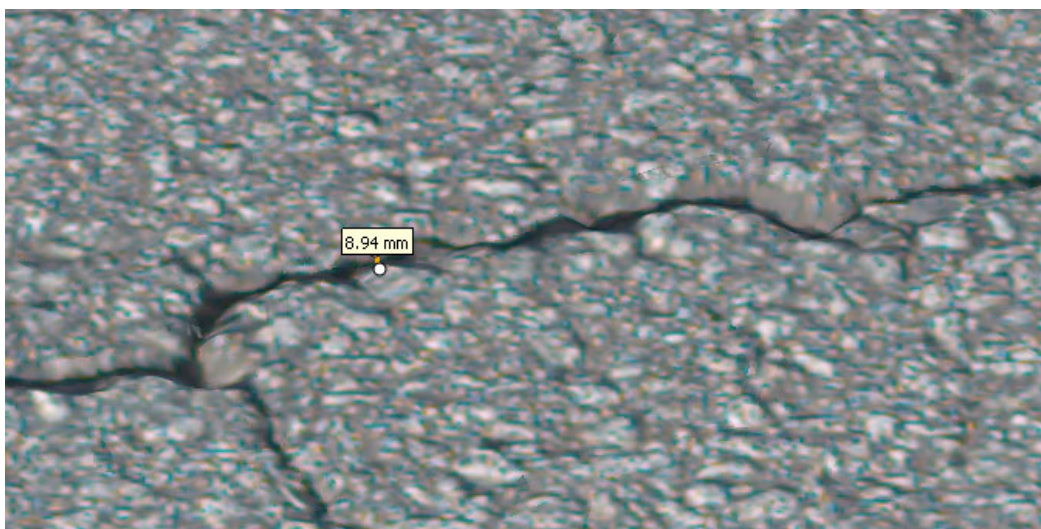


Figura 32 - Medição de fenda longitudinal nível 3

- **Fendas Transversais**

À semelhança do que aconteceu com as fendas longitudinais, verifica-se que também as fendas transversais estão presentes em praticamente toda a área inspecionada. Neste caso foram mapeadas 40 fendas transversais conforme mostrado na figura 33.



Figura 33 - Mapeamento de fendas transversais

De acordo com o Catálogo de Degradações de Pavimentos Rodoviários os níveis de gravidade considerados para as fendas transversais são semelhantes aos das fendas longitudinais (Estradas de Portugal, S.A., 2008):

- **Nível 1** - Fenda isolada e fechada (largura da fenda inferior a 2 mm).
- **Nível 2** - Fenda aberta (abertura da fenda entre 2 a 4 mm).
- **Nível 3** - Fenda grave ramificada, com perda de material e acompanhada de deformações e desagregações.

Após medição no modelo podemos classificar as fendas de acordo com a tabela 14 em baixo

Tabela 14 - Classificação das fendas transversais do troço inspecionado segundo catálogo de degradações da IP, S.A.

Fendas transversais	Abertura média (mm)	Comprimento (m)	Isolada/Ramificada	Nível de gravidade
1	2,5	0,6	Isolada	NIVEL 2
2	6,0	0,8	Isolada	NIVEL 3
3	2,8	0,4	Isolada	NIVEL 2
4	1,9	0,4	Ramificada	NIVEL 1
5	2,1	0,4	Ramificada	NIVEL 2
6	1,5	0,3	Ramificada	NIVEL 1
7	1,3	0,2	Ramificada	NIVEL 1
8	3,5	0,4	Ramificada	NIVEL 2
9	1,6	0,5	Isolada	NIVEL 1
10	1,7	0,3	Ramificada	NIVEL 1
11	2,4	0,2	Ramificada	NIVEL 2
12	0,7	0,7	Ramificada	NIVEL 1
13	7,5	1,4	Ramificada	NIVEL 3
14	4,5	1,5	Ramificada	NIVEL 3
15	3,7	1,0	Ramificada	NIVEL 2
16	4,3	0,7	Ramificada	NIVEL 3
17	6,0	1,5	Ramificada	NIVEL 3
18	3,5	0,4	Ramificada	NIVEL 2
19	4,1	0,9	Ramificada	NIVEL 3
20	4,1	0,7	Ramificada	NIVEL 3
21	4,5	1,3	Ramificada	NIVEL 3
22	3,8	0,8	Ramificada	NIVEL 2
23	2,5	0,4	Isolada	NIVEL 2
24	3,5	0,6	Ramificada	NIVEL 2
25	5,0	1,5	Ramificada	NIVEL 3
26	2,5	0,3	Ramificada	NIVEL 2
27	2,3	0,4	Ramificada	NIVEL 2
28	3,5	0,9	Ramificada	NIVEL 2
29	3,5	0,6	Ramificada	NIVEL 2
30	2,6	0,3	Ramificada	NIVEL 2
31	4,1	0,4	Ramificada	NIVEL 3
32	4,0	1,5	Ramificada	NIVEL 2
33	3,5	1,2	Ramificada	NIVEL 2
34	5,0	0,8	Ramificada	NIVEL 3
35	4,0	0,3	Ramificada	NIVEL 2
36	1,9	0,4	Isolada	NIVEL 1
37	5,0	0,3	Ramificada	NIVEL 3
38	1,7	0,2	Isolada	NIVEL 1
39	2,0	0,1	Ramificada	NIVEL 2
40	3,2	0,3	Ramificada	NIVEL 2

Os exemplos apresentados na figura 34 ilustram as medições diretas de fendas transversais dos 3 níveis efetuadas no modelo.

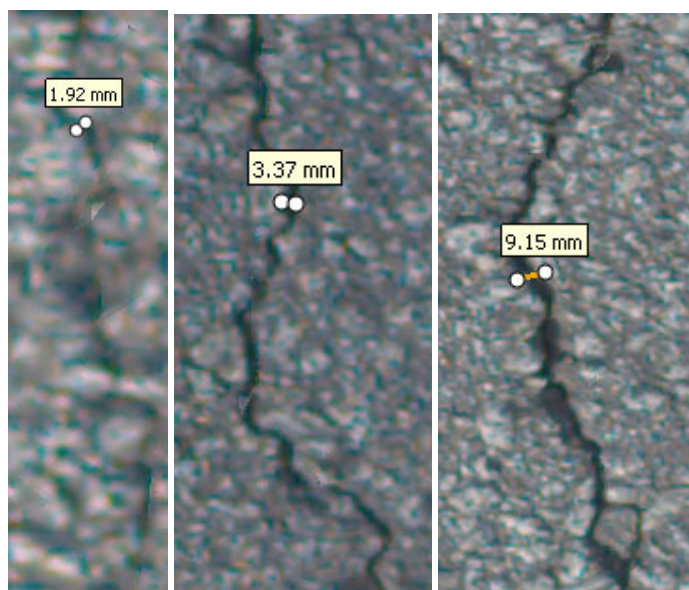


Figura 34 - Ilustração da medição de fendas transversais no programa Agisfot viewer

- **Fendilhamento pele de crocodilo**

Decorrente da evolução das fendas longitudinais e transversais não tratadas, forma-se a pele de crocodilo, podendo apresentar malha e abertura das fendas de dimensão variável.

De acordo com o Catálogo de Degradações de Pavimentos Rodoviários, os níveis de gravidade do fendilhamento do tipo pele de crocodilo são os seguintes (Estradas de Portugal, S.A., 2008):

- **Nível 1** - Malha com fendilhamento de abertura de pequena dimensão e sem ascensão de finos (abertura < 2 mm e malha > 20 cm).
- **Nível 2** - Malha com fendilhamento de abertura de todas as dimensões e com perda de material (fendas com abertura < 2 mm e malha < 20 cm, ou fendas com abertura entre 2 e 4 mm para qualquer tipo de malha, ou fendas com abertura > 4 mm e malha > 40 cm).
- **Nível 3** - Malha com fendilhamento de abertura de grande dimensão com perda de material, ascensão de finos acompanhada de deformações, ninhos e peladas (fendas com abertura > 4 mm e malha < 40 cm).

De acordo com esta classificação, foram mapeadas 2 zonas distintas conforme apresentado na figura 35.



Figura 35 - Mapeamento de fendilhamento pele de crocodilo

A **AREA 1** é caracterizada essencialmente por fendas com abertura entre 2 e 15 mm e malha superior a 40 cm, enquadrando-se assim no nível de gravidade 2. A figura 36 ilustra a um exemplo de medição típico do fendilhamento do tipo pele de crocodilo presente nesta área.

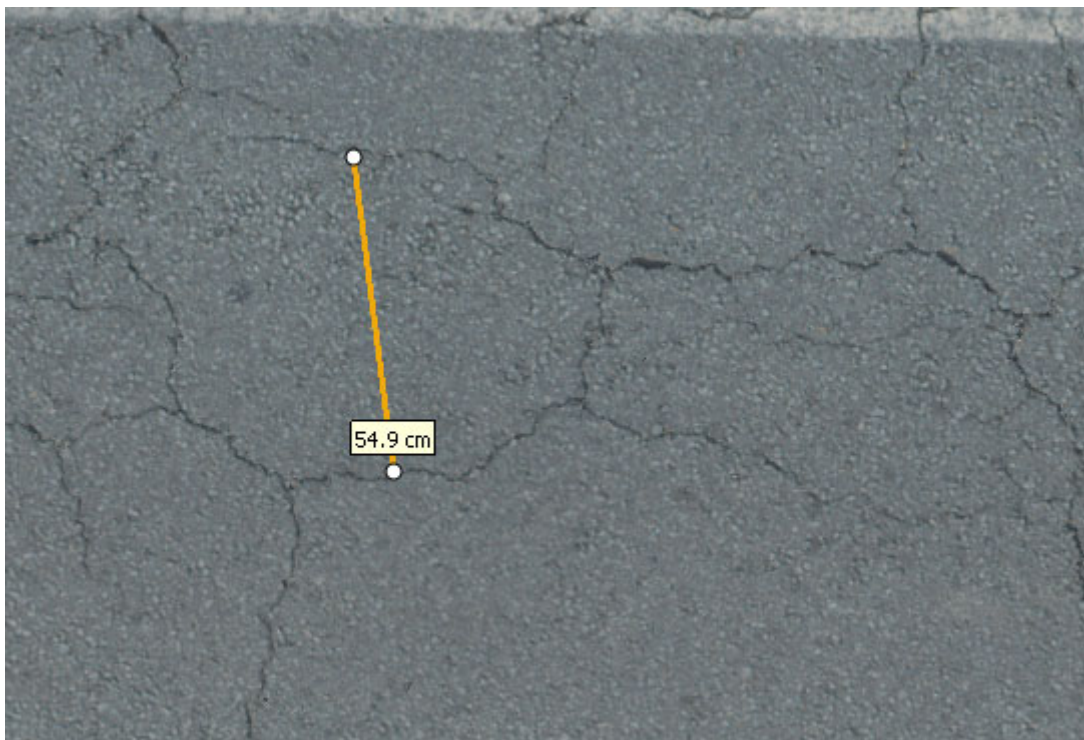


Figura 36 - Fendilhamento pele de crocodilo de nível 2

A **AREA 2** é composta fundamentalmente por fendas com abertura superior a 4 mm e malha inferior a 40 cm, acompanhada de deformações e ninhos, pelo que pode ser classificada com o nível de gravidade 3. A figura 37 ilustra o fendilhamento tipo pele de crocodilo nesta área.



Figura 37 - Fendilhamento pele de crocodilo de nível 3

A soma das duas áreas representa mais de 60% da área total do troço inspecionado. A tabela 15 resume as principais características desta análise.

Tabela 15 - Classificação do fendilhamento pele de crocodilo do troço inspecionado

Fendilhamento Pele de Crocodilo	Abertura média (mm)	Malha (cm)	Malha média (cm)	Área (m ²)	Nível de gravidade	% da área total
ÁREA 1	5,0	40 < m < 120	80	102,5	NÍVEL 2	56,0%
ÁREA 2	9,5	15 < m < 40	28	13,8	NÍVEL 3	7,5%

- **Deformações**

Para investigar a existência de deformações (localizadas e rodeiras) criaram-se perfis transversais de 5 em 5 m com avaliação das alturas dos desníveis. O intervalo de medição é detalhado, respeitando os intervalos mínimos recomendados em várias especificações técnicas de levantamento de dados sobre a profundidade de rodeiras (Nogueira, 2015), como a Disposição Normativa do InIR - Construção e reabilitação de pavimentos: Indicadores de estado de conservação dos pavimentos (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviária IP (InIR), 2009) e o *Austroads test method AG: AM/TO09-16: Pavement rutting measurement with a laser profilometer* (Austroads, 2016).

Ou seja, serão avaliadas as degradações do tipo deformações localizadas (alterações de nível do pavimento, formando depressões ou alteamentos, podendo surgir isoladamente em diferentes pontos do pavimento) e as rodeiras (deformação transversal localizada ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos pesados) (Estradas de Portugal, S.A., 2008).

Para este efeito, traçaram-se 12 perfis transversais de acordo com a distribuição indicada no esquema da figura 38.

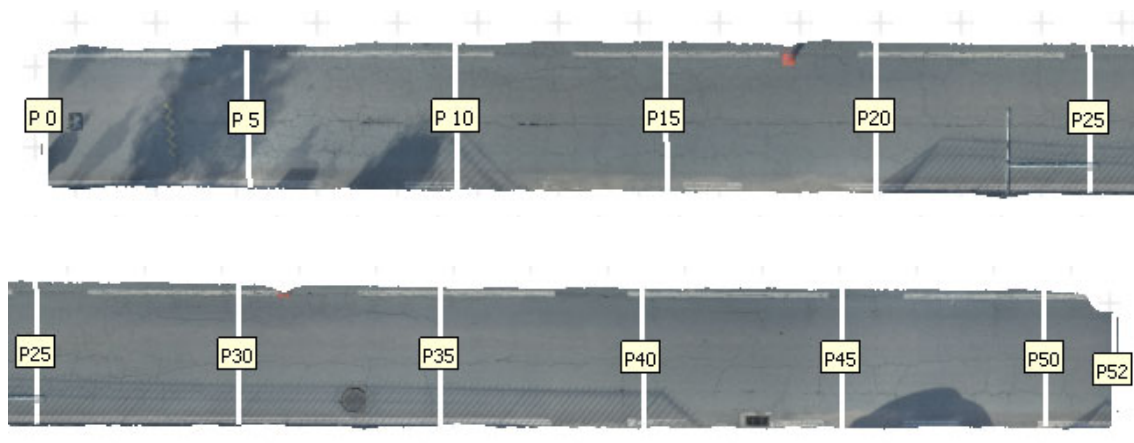
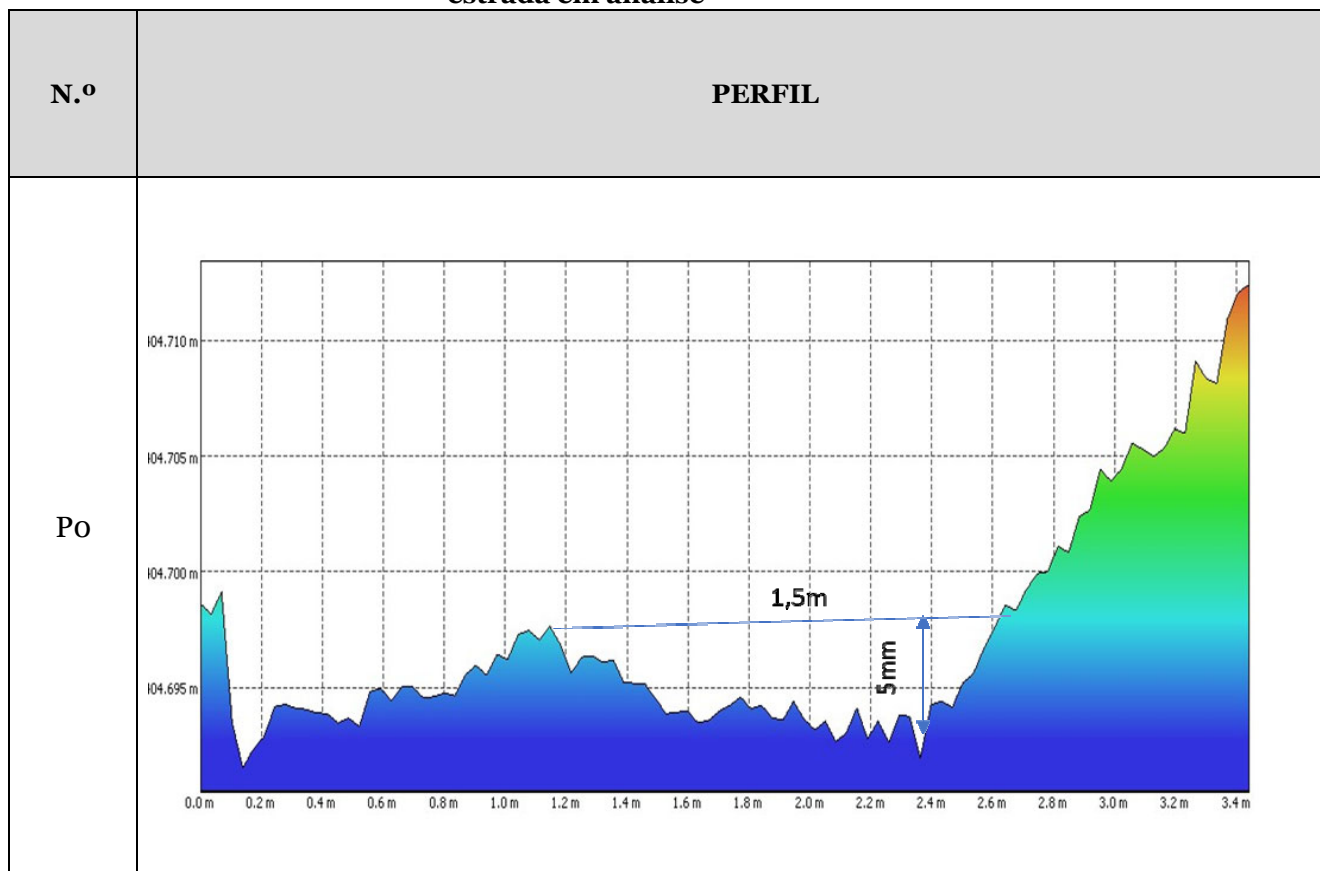


Figura 38 - Distribuição dos perfis transversais no troço inspecionado

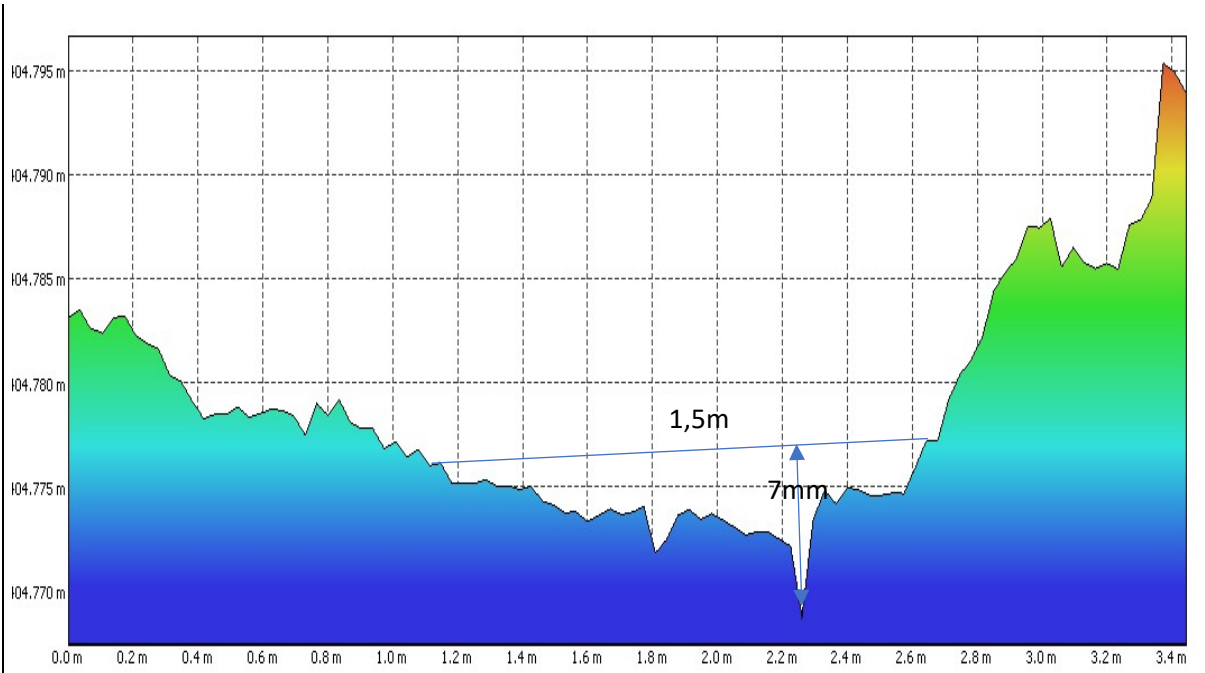
A tabela 16 apresenta os perfis obtidos para cada um dos perfis traçados.

Na representação dos perfis, a distância transversal 0 m corresponde ao lado interior da via.

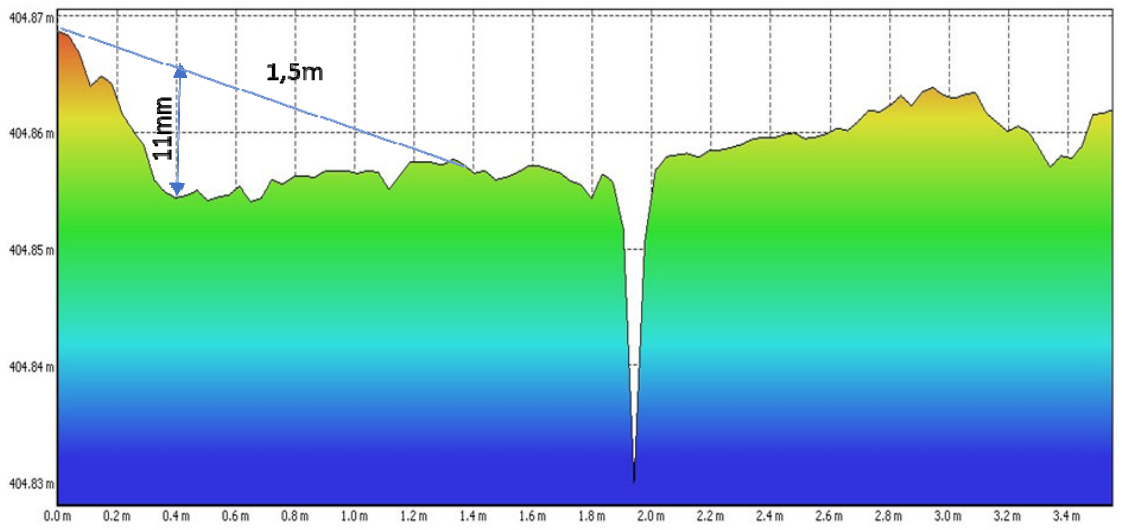
Tabela 16 - Perfis transversais de 5 em 5m retirados do modelo 3D do troço de estrada em análise



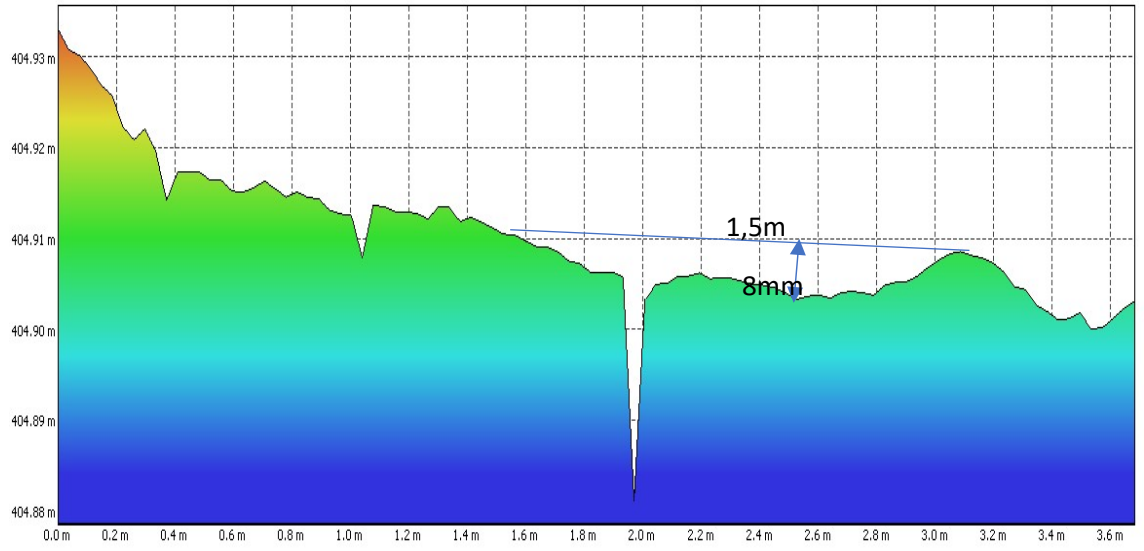
P5



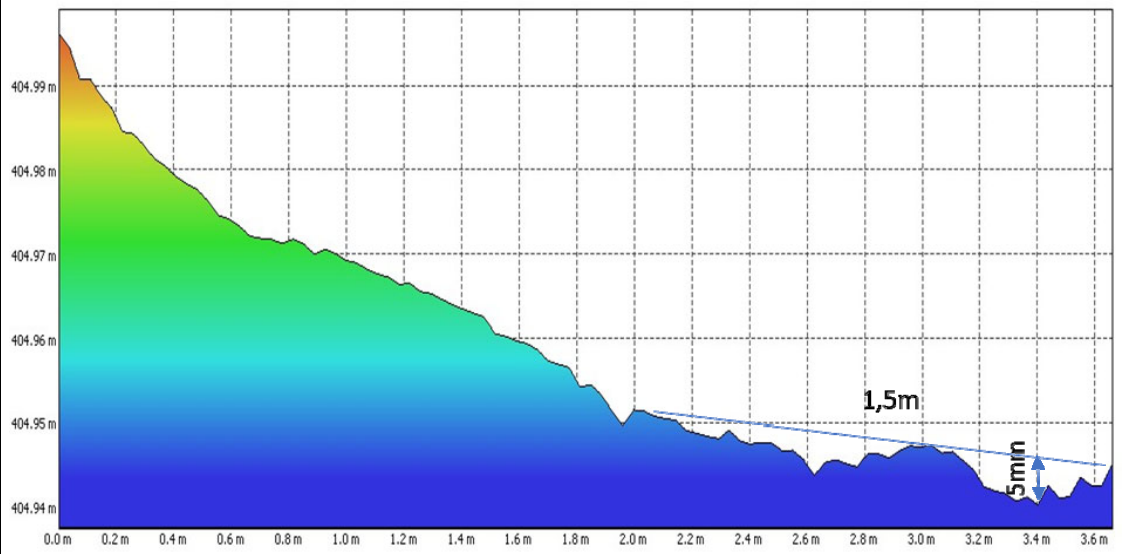
P10



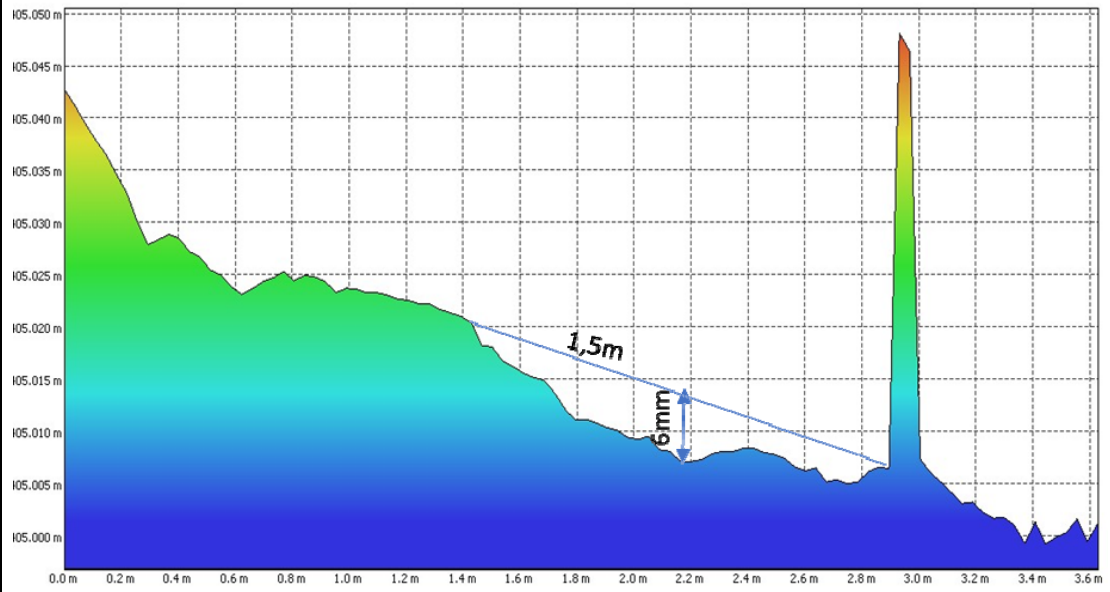
P15



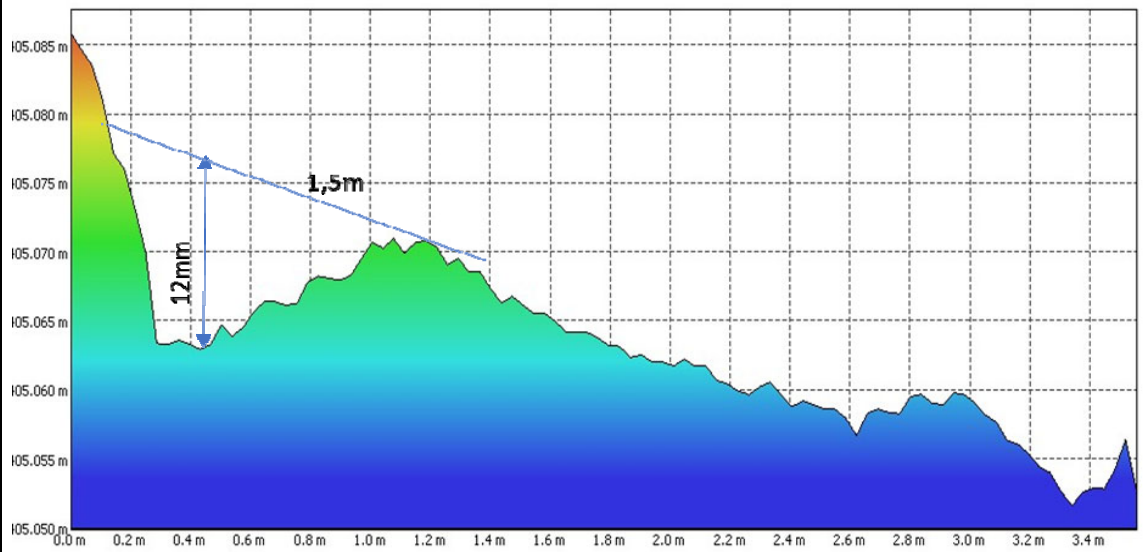
P20



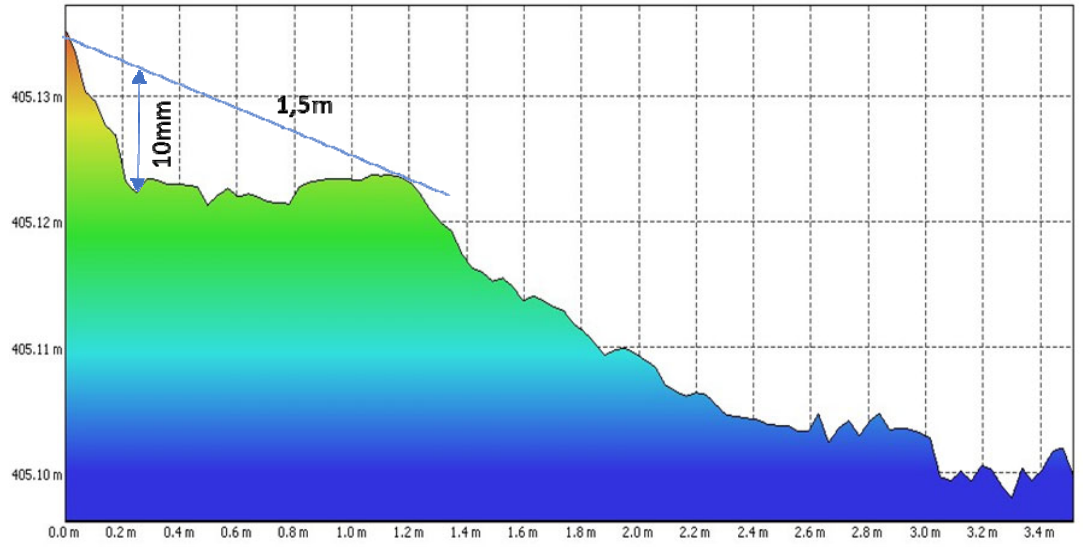
P25



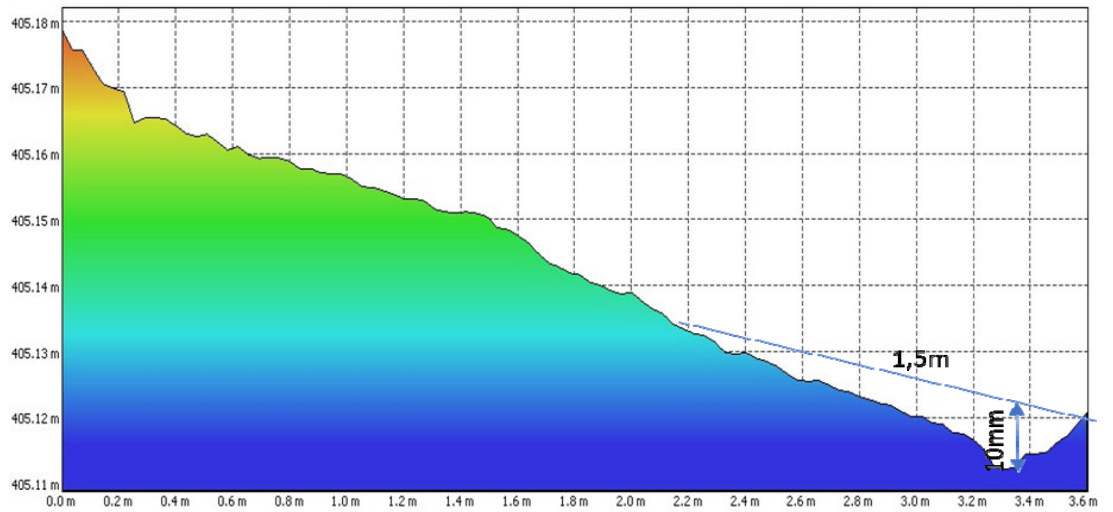
P30



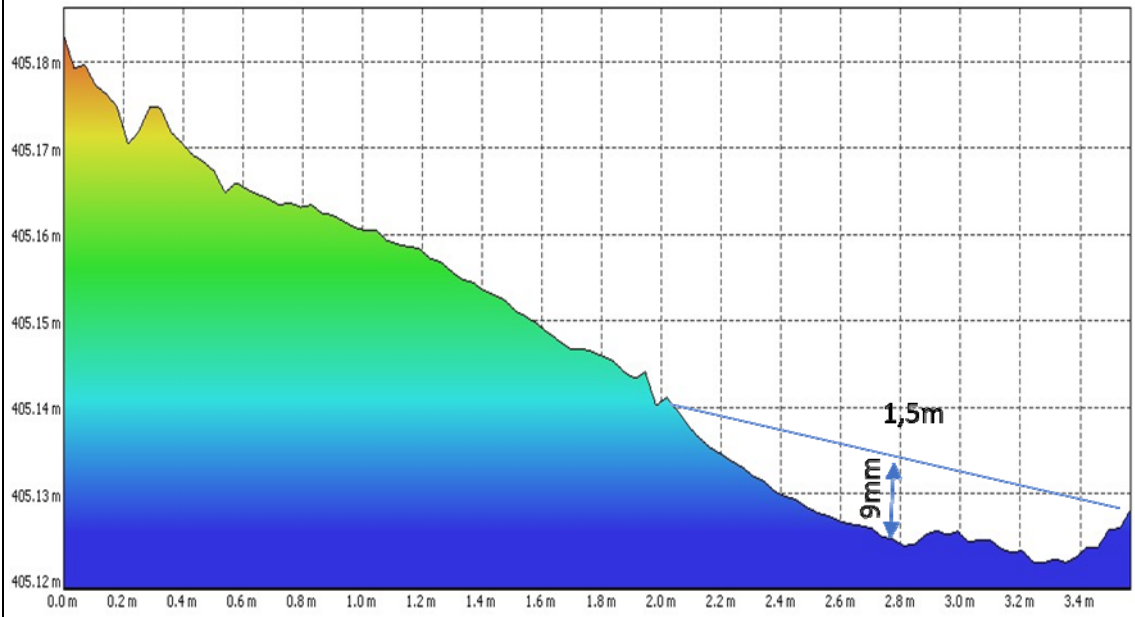
P35



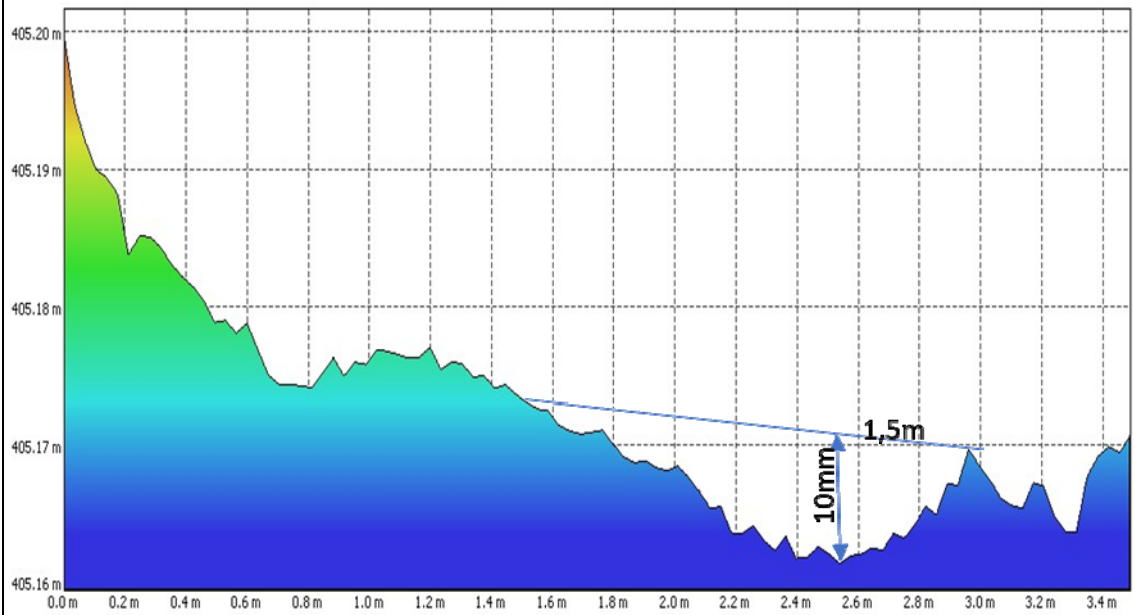
P40

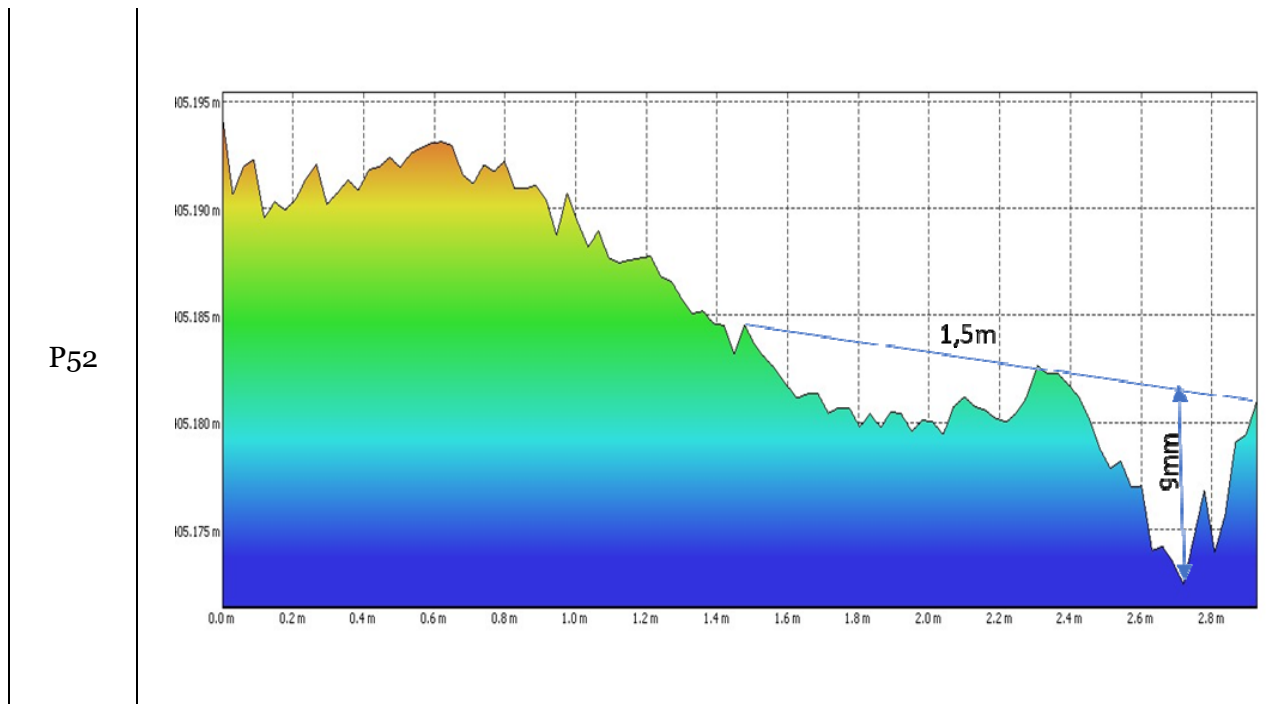


P45



P50





Da análise dos perfis, é perceptível a transição do perfil transversal do PO ao P20 com inclinação inicialmente do extradorso para o centro, correspondente à saída da curva à esquerda (no sentido de circulação da via) e depois com inclinação do centro da faixa de rodagem, correspondente ao troço reto.

É também possível perceber a existência de um abatimento do lado direito da via praticamente em todo o troço a cerca de 2,5 m. Esta deformação pode estar associada à proximidade da berma/passeio. Para efeitos de cálculo será considerada como uma rodeira. De acordo com as medições no modelo, a profundidade é quase sempre inferior a 10 mm enquadrando-se, assim, no nível de gravidade 1 do catalogo de degradações da IP, S.A.. A tabela 17 apresenta a profundidade da maior deformação vertical medida em cada perfil transversal.

Tabela 17 - Deformações medidas nos perfis transversais do modelo 3D

Deformações	Profundidade (mm)	Largura do perfil	Nível
P0	5	3,44	NIVEL 1
P5	7	3,44	NIVEL 1
P10	11	3,57	NIVEL 2
P15	8	3,65	NIVEL 1
P20	5	3,66	NIVEL 1
P25	6	3,66	NIVEL 1
P30	12	3,57	NIVEL 2
P35	10	3,51	NIVEL 2
P40	10	3,60	NIVEL 2
P45	9	3,57	NIVEL 1
P50	10	3,49	NIVEL 2
P52	9	2,93	NIVEL 1

Os perfis indiciam também a existência de uma deformação localizada entre o perfil P40 e P45. Nesse sentido, foram traçados alguns perfis longitudinais de forma a caracterizar melhor esta deformação. Na figura 39 indicam-se a localização e os respectivos perfis.

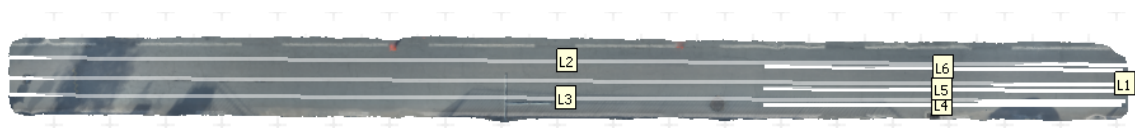
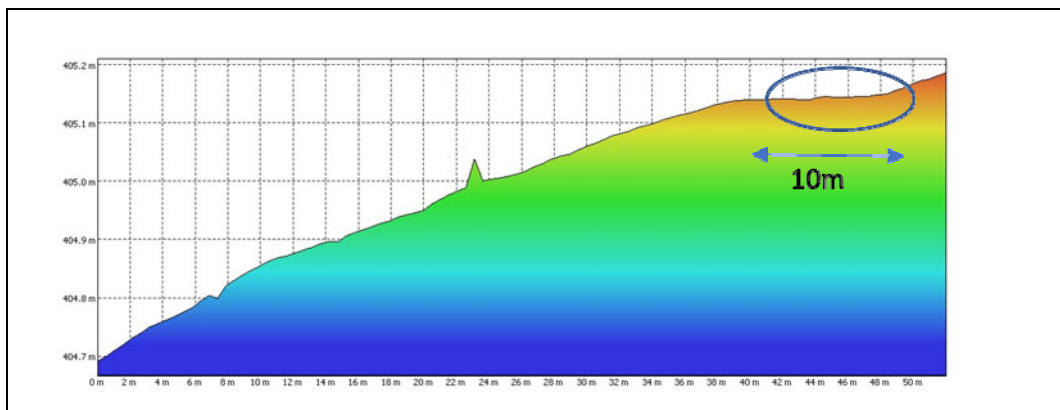
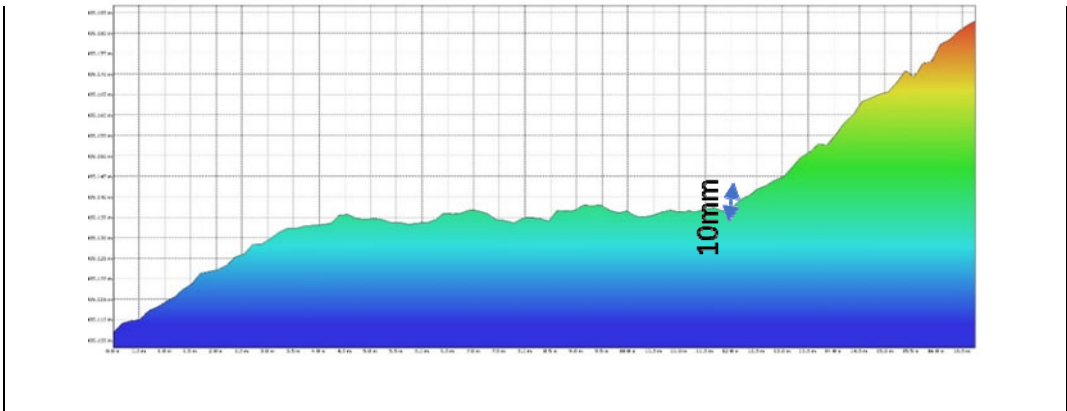
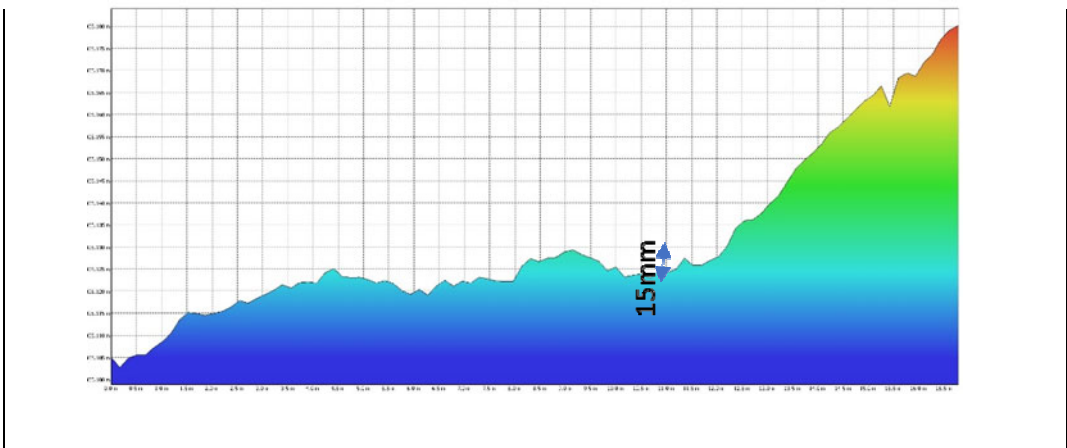
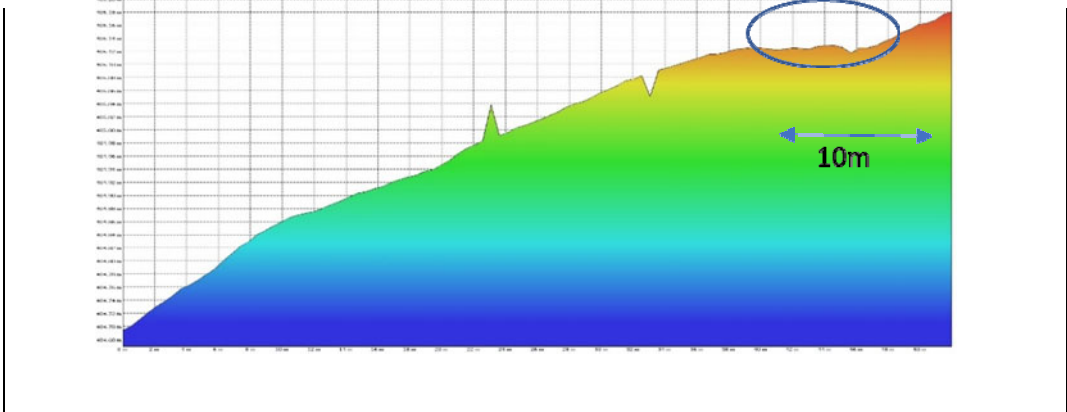
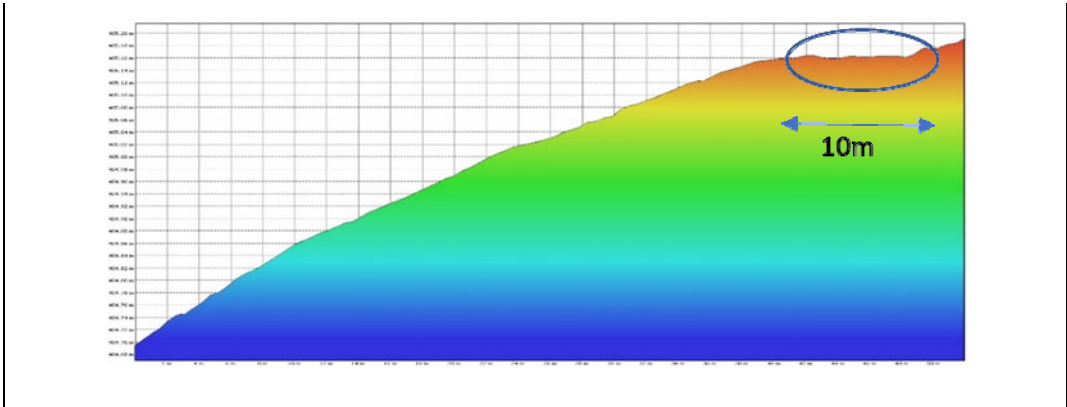
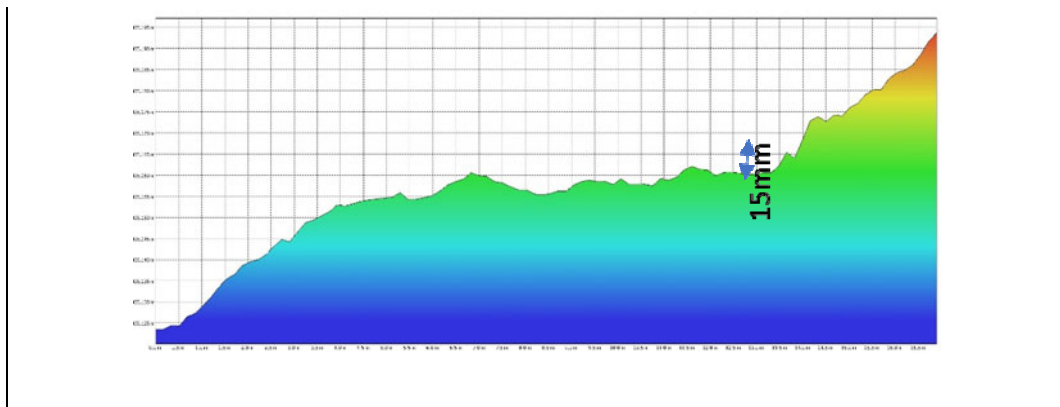


Figura 39 - Localização perfis longitudinais

Tabela 18 - Perfis longitudinais







Verifica-se a existência de uma deformação localizada entre os perfis P40 e P45 com cerca de 15 mm de profundidade, 2 m de largura e desenvolvimento de cerca de 10 m. Trata-se, portanto, de uma deformação localizada de nível 2.

- **Defeitos superficiais**

Os defeitos de superfície podem ser de 4 géneros diferentes de acordo com o catálogo de degradações da IP, S.A. (Estradas de Portugal, S.A., 2008):

- **Desagregações superficiais** - Arranque de uma das frações do agregado, geralmente a mais grossa ou perda do mástique betuminoso (ligante e finos).
- **Polimento dos agregados** - Desgaste por abrasão, geralmente da fração grossa do agregado, conferindo à superfície do pavimento um aspeto polido e brilhante.
- **Ninhos** - Cavidades de forma arredondada localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores, resultantes da evolução de outras degradações do pavimento.
- **Peladas** - Desprendimento em forma de placa, da camada de desgaste, relativamente à camada inferior.

Foram identificados 11 defeitos superficiais indicados no mapeamento em baixo (ver figura 40).

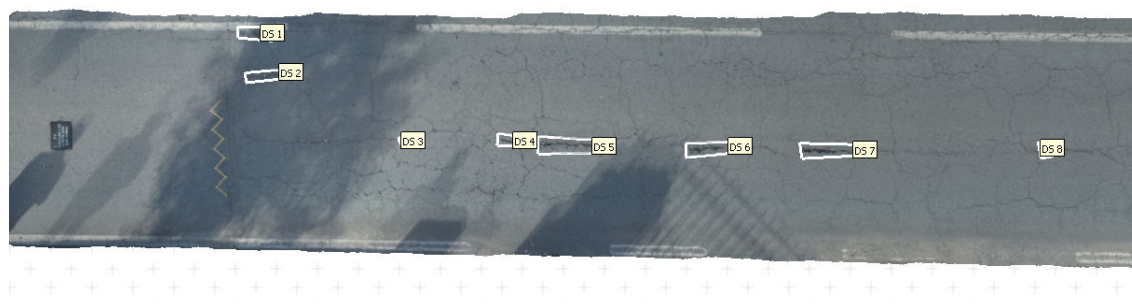


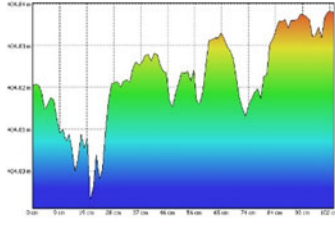
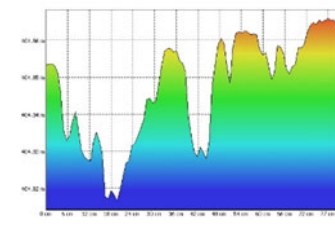
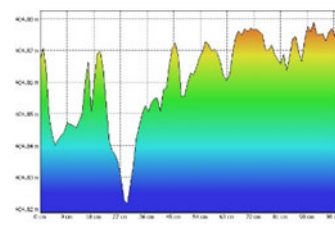
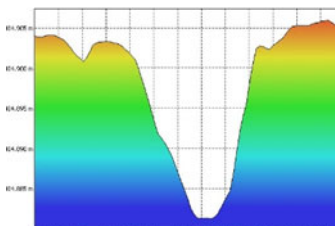
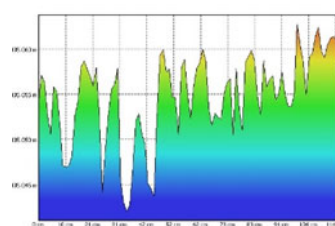
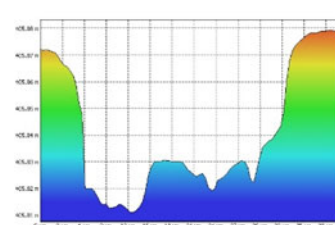
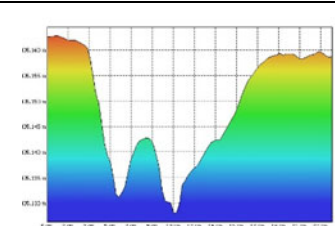


Figura 40 - Mapeamento de defeitos superficiais

A tabela 19 descreve as principais características de cada um dos defeitos superficiais identificados.

Tabela 19 - Classificação dos defeitos superficiais

Defeito superf.	Largura (cm)	Compr. (cm)	Prof. (mm)	Tipo de defeito superficial	Nível de gravidade	Perfil
DS 1	13	33	41	Ninho	NIVEL 3	
DS 2	5	60	21	Ninho	NIVEL 3	
DS 3	4,5	16	8	Ninho	NIVEL 1	
DS 4	3,6	40	17	Ninho	NIVEL 2	

DS 5	12	93	100	Ninho	NIVEL 3	
DS 6	10	77	41	Ninho	NIVEL 3	
DS 7	7,5	92	50	Ninho	NIVEL 3	
DS 8	7	19	22	Ninho	NIVEL 2	
DS 9	6,5	100	20	Ninho	NIVEL 3	
DS 10	12	56	68	Ninho	NIVEL 3	
DS 11	6	18	33	Ninho	NIVEL 2	

No caso do ninho identificado no mapeamento como DS1 foi feita também a medição manual em campo, conforme ilustram as imagens das figuras 41 e 42.



Figura 41 - Ninho DS 1: medição da área em campo



Figura 42 - Ninho DS 1: medição da profundidade em campo

De acordo com a medição em campo, comprovam-se os dados recolhidos a partir do modelo 3D no Agisoft Viewer.

4.4.4. Cálculo dos índices globais do estado do pavimento PSI e PCI

Para a determinação da qualidade global do pavimento no troço inspecionado, são determinados os índices PSI (do inglês *Pavement Serviceability Index*) e PCI (do inglês *Pavement Condition Index*).

Ambos os índices são indicadores numéricos que avaliam o estado do pavimento com base nas degradações observadas. Embora esta abordagem não inclua uma medição da capacidade estrutural, fornece uma base objetiva e racional para determinar as necessidades e prioridades de manutenção e reparação dos pavimentos.

- **PSI**

O cálculo do índice PSI do trecho em estudo pretende aferir a qualidade do pavimento a partir das equações (1) e (2), baseadas na fórmula utilizada no SGP do estado do Nevada, EUA (Santos, et al., 2019). A primeira é indicada para a determinação do estado de pavimentos em meio urbano, tendo sido adotada no SPG de Lisboa (Santos, et al., 2019). A segunda é indicada para a determinação do estado de pavimentos em meio interurbano e foi adotada no Sistema de Gestão de Pavimentos – Manual de Utilização (Estradas de Portugal, S.A., 2008).

$$PSI = 5 \times e^{\frac{-0,0002598 \times IRI}{4}} - \frac{0,002139}{4} \times R^2 - 7 \times 0,03 \times (C + S + P)^{0,5} \quad (1)$$

$$PSI = 5 \times e^{-0,0002598 \times IRI} - 0,002139 \times R^2 - 0,03 \times (C + S + P)^{0,5} \quad (2)$$

Onde:

IRI (do inglês *International Roughness Index*) corresponde à irregularidade longitudinal do pavimento (mm/km);

R corresponde à profundidade média das rodeiras (mm);

C corresponde à área com fendilhamento e pele de crocodilo (m²/100m²);

S corresponde à área de desagregação superficial de materiais (covas e peladas) (m²/100m²);

P corresponde à área com reparações (m²/100m²).

$$C+S+P \leq 100$$

Este índice varia no intervalo entre 0 (pavimento em muito mau estado) e 5 (pavimento em muito bom estado), e geralmente o valor de 2,0 a 2,5 é tomado como o indicador da necessidade de intervenção (Santos, et al., 2019 e Picado-Santos, et al., 2006)

A tabela 21 resume a avaliação qualitativa do estado do pavimento por cada nível de valor do índice PSI.

Tabela 20 - Avaliação do estado do pavimento segundo o valor do índice PSI

PSI	AVALIAÇÃO
5	Muito bom estado
4	Bom estado
3	Razoável
2	Mau estado
1	Muito mau estado

0

Interessa, em primeiro lugar, determinar as áreas afetadas por cada degradação e nível de gravidade. A determinação destas áreas é obtida a partir dos mesmos critérios adotados no SGP de Lisboa para meios urbanos (Santos, et al., 2019) e no SGP: Manual de Utilização da I.P., S.A. (Estradas de Portugal, S.A., 2008). As tabelas 21 e 22 indicam os valores a adotar por tipo de degradação.

Tabela 21 - Degradações e níveis de gravidade para os pavimentos flexíveis em meio urbano (Santos, et al., 2019)

Degradação	Níveis de Gravidade	Área afetada / Valor adotado
Fendilhamento	Nível 1	0,5 m x comprimento afetado
	Nível 2	2,0 m x comprimento afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Pele de crocodilo	Nível 1	Largura da via × Comprimento afetado
	Nível 2	Largura da via × Comprimento afetado
	Nível 3	Largura da via × Comprimento afetado
Peladas, Desagregação superficial, Exsudação de betume, Polimento dos agregados, Deformações localizadas	Nível 1	0,5 m x comprimento afetado
	Nível 2	2,0 m x comprimento afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Covas (Ninhos)	Nível 1	0,5 m x comprimento afetado
	Nível 2	2,0 m x comprimento afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Reparações	Nível 1	¼ Largura da via × Comprimento afetado
	Nível 2	½ da largura do trecho x comprimento afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Rodeiras	Nível 1	10 mm
	Nível 2	30 mm
	Nível 3	50 mm
Irregularidade longitudinal	-	IRI (mm/km)

Tabela 22 - Degradações e níveis de gravidade para os pavimentos flexíveis em meio interurbano (Estradas de Portugal, S.A., 2008)

Degradação	Níveis de Gravidade	Área afetada / Valor adotado
Fendilhamento	Nível 1	0,5 m x comprimento afetado
	Nível 2	2,0 m x comprimento. afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Peladas, Desagregação superficial, Exsudação de betume, Polimento dos agregados, Deformações localizadas	Nível 1	0,5 m x comprimento afetado
	Nível 2	2,0 m x comprimento afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Covas (Ninhos)	Nível 1	0,5 m x comprimento afetado
	Nível 2	2,0 m x comprimento afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Reparações	Nível 1	
	Nível 2	1/2 da largura do trecho x comprimento afetado
	Nível 3	Largura do trecho x comprimento afetado
Rodeiras	Nível 1	5 mm
	Nível 2	20 mm
	Nível 3	30 mm
Irregularidade longitudinal	-	IRI (mm/km)

Na tabela 23 estão determinados os parâmetros R, C, S e P com base nos valores medidos no ponto 4.4.3. e segundo os critérios das tabelas 22 e 23.

Tabela 23 - Determinação dos parâmetros R, C, S e P

Degradação	Níveis de Gravidade	Área afetada / Valor adotado		un	% relativamente ao total		Parâmetro para cálculo do PSI		un
		Urbano	Rural		Urbano	Rural	Urbano	Rural	
Fendilhamento e pele de crocodilo (C)	Nível 1				0%	0%	100	100	m ² /100m ²
	Nível 2				0%	0%			
	Nível 3	182,90	182,90	m ²	100%	100%			
Peladas, Desagregação superficial, Exsudação de betume, Polimento dos agregados, Deformações localizadas (S)	Nível 1				0%	0%	10	10	m ² /100m ²
	Nível 2				0%	0%			
	Nível 3				0%	0%			
Covas (Ninhos) (S)	Nível 1	0,08	0,08	m ²	0%	0%			
	Nível 2	1,54	1,54	m ²	1%	1%			
	Nível 3	16,73	16,73	m ²	9%	9%			
Reparações (P)	Nível 1				0%	0%	0	0	m ² /100m ²
	Nível 2				0%	0%			
	Nível 3				0%	0%			
Rodeiras (R)	Nível 1	10	5	mm	55%	55%	19	12	mm
	Nível 2	30	20	mm	45%	45%			
	Nível 3	50	30	mm					

Para determinação do IRI foi feita uma ponderação do nível de gravidade de cada degradação em função da extensão e adotados os mesmos valores recomendados no manual de utilização do Sistema de Gestão de Pavimentos da I.P, S.A. (Estradas de Portugal, S.A., 2008) para o caso de pavimentos em meio rural e os valores utilizados no SPG de Lisboa para o caso de pavimentos em meio urbano (Maganinho, 2013). A tabela 24 resume os valores a adotar.

Tabela 24 - Esquema de quantificação do IRI, na ausência de medição direta (adaptado de Maganinho, 2013 e Estradas de Portugal, S.A., 2008)

Degradação	Condição	Nível	Urbano	Rural
Fendilhamento	<=	1	Nível 1: IRI = 2000 mm/km	Nível 1: IRI = 1500 mm/km
e				
Peladas, etc.	<=	1		
e				
Rodeiras	<=	1		
Situações não enquadráveis nas definições dos níveis 1 e 3.			Nível 2: IRI = 3500 mm/km	Nível 2: IRI = 2500 mm/km
Fendilhamento	=	3	Nível 3: IRI = 5500 mm/km	Nível 3: IRI = 3500 mm/km
ou				
Peladas, etc.	=	3		
e				
Rodeiras	>=	2		

Considerando o nível de fendilhamento 3, adopta-se o valor IRI = 5.500mm/km e 3.500mm/km para o caso de meio urbano e rural, respetivamente.

Substituindo os valores nas formula (1) e (2) obtemos os seguintes valores para o índice PSI:

Para meio urbano

$$PSI = 5 \times e^{\frac{-0.0002598 \times 5500}{4}} - \frac{0,002139}{4} \times 19^2 - 7 \times 0,03 \times (100)^{0.5}$$

$$\Rightarrow \mathbf{PSI = 1,2}$$

Para meio rural

$$PSI = 5 \times e^{-0.0002598 \times 3500} - 0,002139 \times 12^2 - 0,03 \times (100)^{0.5}$$

$$\Rightarrow \mathbf{PSI = 1,4}$$

Sendo estes valores inferiores a 2,5 (urbano) e 2,0 (rural) que, habitualmente servem de referência para a necessidade de intervenção, pode-se afirmar que, de acordo com esta avaliação, o pavimento se encontra em mau estado de conservação e necessita de reabilitação.

Os dois índices foram calculados, tendo em conta que o troço em estudo está localizado em ambiente semi-rural

- **PCI**

A determinação do índice PCI é outro método que permite quantificar o estado do pavimento. Este método foi desenvolvido pelo *U. S. Army Corps of Engineers Research Laboratory* para sustentar a gestão de pavimentos em estradas e parques de estacionamento. O índice é uma classificação numérica que representa a qualidade do pavimento e que varia de 0 a 100, sendo 0 a pior condição possível e 100 a melhor possível (ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018).

A tabela 25 indica a escala padrão de classificação de acordo com o método de avaliação PCI.

Tabela 25 - Índice de qualidade do pavimento (PCI), escala de classificação e cores sugeridas (adaptado de ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018)

Valor	Escala padrão de classificação PCI
100	Bom
85	Satisfatório
70	Razoável
55	Fraco
40	Muito fraco
25	Grave
10	Crítico
0	

De acordo com a norma ASTM D6433-18, para a determinação do índice PCI devem ser consideradas as seguintes operações:

1. Quantificação das áreas e comprimentos por tipo de degradação e identificação do nível de gravidade de acordo com os critérios da norma;
2. Divisão das quantidades encontradas no ponto anterior pela área total da amostra e multiplicação por 100 de forma a encontrar a densidade percentual de cada tipo de degradação e nível de gravidade;
3. Determinação dos valores deduzidos (VD) por tipo de degradação e nível de gravidade através dos ábacos da norma;
4. Correção do número de valores deduzidos através da fórmula:

$$m = 1 + (9/98) \times (100 - MVD) \quad (2)$$

em que:

m – Número máximo de valores deduzidos a considerar no cálculo, incluindo frações

MVD – Maior valor deduzido individual

5. Determinação dos valores deduzidos corrigidos (VDC) de forma iterativa utilizando os valores deduzidos ordenados e o ábaco da norma;
6. Cálculo do PCI pela subtração do valor deduzido corrigido máximo:

$$\text{PCI} = 100 - \text{max VDC}$$

Em que:

PCI – Índice de qualidade do pavimento

max VDC – Valor máximo dos valores deduzidos corrigidos

7. Correção do valor de PCI se existirem degradações que apresentem vários níveis de gravidade.

O quadro 26 mostra os valores obtidos segundo os 3 primeiros pontos do procedimento e a figura 43 ilustra os ábacos utilizados na obtenção dos valores deduzidos (VD).

Tabela 26 - Cálculo dos valores deduzidos por tipo de degradação e nível de gravidade, segundo a norma ASTM D6433-18

Área da Amostra 182,90 m²

Tipo de Degradação	Nível de Gravidade	Quantidade			Total	Densidade [%]	VD (Ábacos)
Fendas longitudinais e transversais	B	6,63	3,27		10	5,41%	4
	M	26,36	22,32		49	26,62%	28
	A				0	0,00%	
Fendilhamento tipo Pele de crocodilo	B	102,5			103	56,04%	51
	M	13,8			14	7,55%	42
	A				0	0,00%	
Deformações localizadas	B	20			20	10,93%	19
	M				0	0,00%	
	A				0	0,00%	
Rodeiras	B	78			78	42,65%	43
	M				0	0,00%	
	A				0	0,00%	
Ninhos	B	5			5	2,73%	33
	M	4			4	2,19%	45
	A	2			2	1,09%	51

B - Baixo; **M** - Médio; **A** - Alto; **VD** - Valores deduzidos

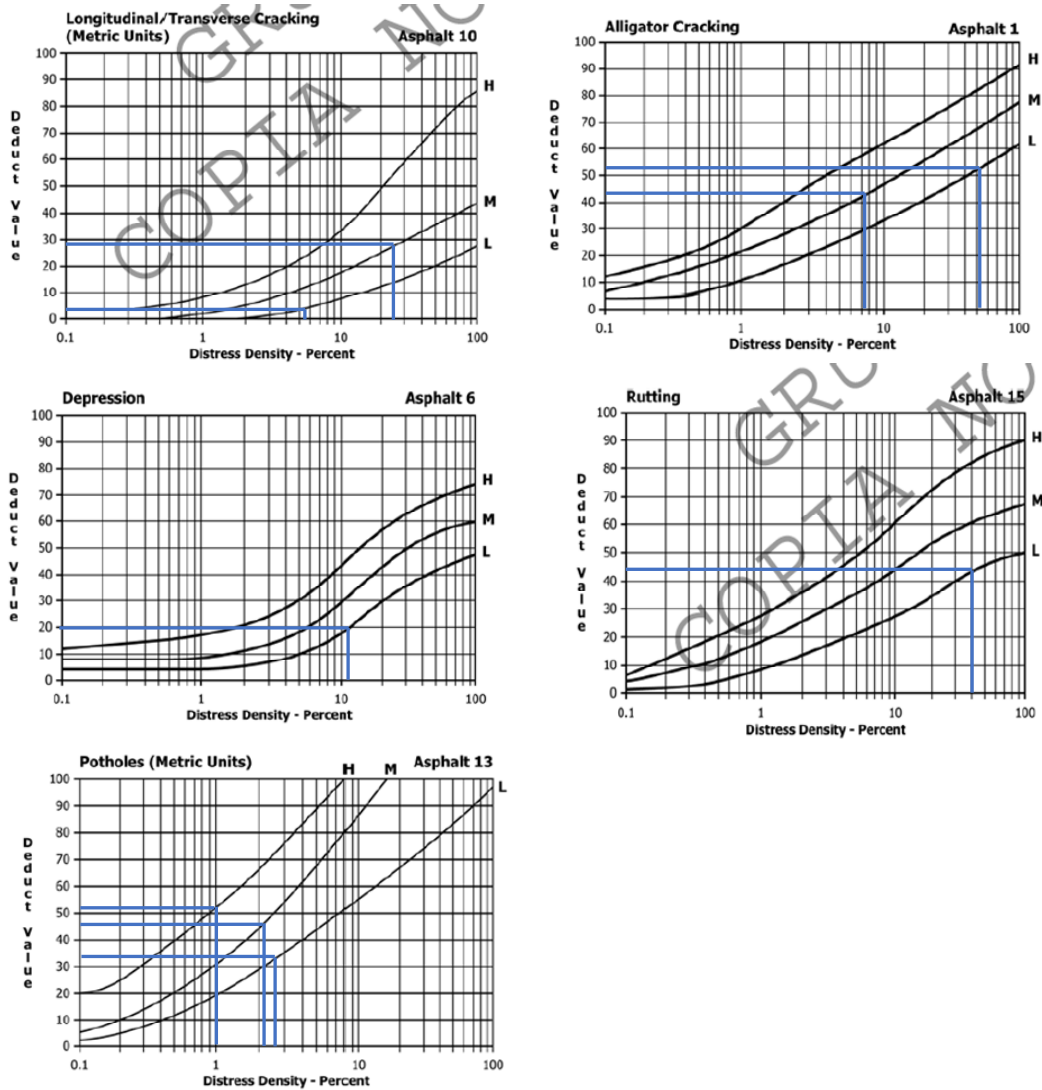


Figura 43 - Ábacos utilizados na determinação dos valores VD (ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018)

Aplicando a formula (2) obtemos o valor de $m= 5,5$. Assim, e de acordo com o previsto na norma, deverão contribuir para o índice os 5 valores deduzidos mais altos e 0,5 (5,5-5) do sexto valor mais alto, conforme indicado na tabela 27 que apresenta o cálculo dos valores deduzidos corrigidos (VDC) de acordo com o ábaco da figura 44.

Tabela 27 - Valores deduzidos corrigidos para calculo do PCI

#	Valores Deduzidos						TOTAL	q	VDC
1	51,0	51,0	45,0	43,0	42,0	16,5	248,50	6	90,0
2	51,0	51,0	45,0	43,0	42,0	2,0	234,00	5	93,0
3	51,0	51,0	45,0	43,0	2,0	2,0	194,00	4	95,0
4	51,0	51,0	45,0	2,0	2,0	2,0	153,00	3	88,0
5	51,0	51,0	2,0	2,0	2,0	2,0	110,00	2	75,0
6	51,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	61,00	1	61,0

VDC - Valor deduzido corrigido

Máx VDC = 95,0

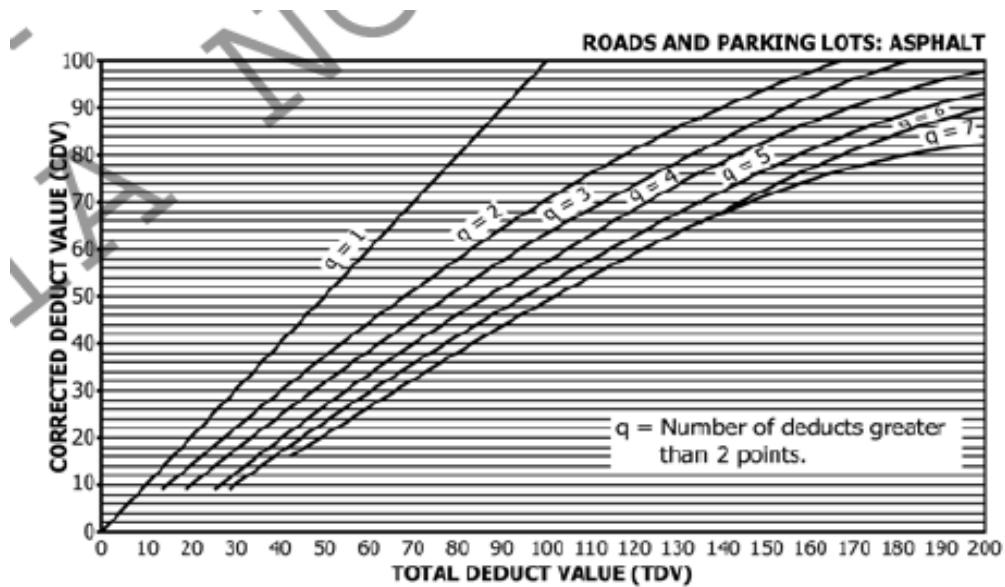


Figura 44 - Ábaco para determinação do valor deduzido total corrigido (VDC) (ASTM, American Society for Testing and Materials, 2018)

Obtemos, assim, o seguinte valor de PCI:

$$PCI = 100 - \text{máxVDC} = 5,0$$

Resta, por fim, verificar a necessidade de correção do valor do índice para as degradações com mais do que um nível de gravidade. Apresentam-se na tabela 28 os valores obtidos de acordo com a metodologia apresentada no ponto 9.6.2 da norma.

Tabela 28 - Correção do valor do índice PCI para degradações com mais do que um nível de gravidade

Tipo de Degradação	Nível de Gravidade	Densidade [%]	Densidade corrigida [%]	VD_{corrigido} (Ábacos)	PCI_{corrigido}
Fendas longitudinais e transversais	B	5,41%			5
	M	26,62%	32,03%	32	
	A				
Fendilhamento tipo Pele de crocodilo	B	56,04%			5
	M	7,55%	63,59%	71	
	A				
Ninhos (o,M,a)	B	2,73%			4
	M	2,19%	4,92%	65	
	A	1,09%	1,09%	51	
Ninhos (b,o,A)	B	2,73%	2,73%	33	2
	M	2,19%			
	A	1,09%	3,28%	77	
Ninhos (o,m,A)	B	2,73%			10
	M	2,19%	2,19%	51	
	A	1,09%	3,83%	85	
Ninhos (o,o,A)	B	2,73%			6
	M	2,19%			
	A	1,09%	6,01%	92	

Assim, e de acordo com a indicação da norma deve ser considerado o menor valor obtido.

$$\text{PCI} = 2$$

De acordo com este índice, o estado do pavimento é crítico, indicando que o trecho analisado deve ser reconstruído.

4.5. Discussão de resultados

A resolução obtida no modelo 3D permitiu garantir a precisão necessária para fazer uma correta avaliação das degradações do pavimento inspecionado, conforme se demonstrou no ponto 4.4.2., com diferenças entre as medições reais e as efetuadas no modelo inferiores a 2 mm quer em planta, quer em profundidade. Para este resultado foi fundamental não só a qualidade das imagens recolhidas como a calibração do modelo a partir dos pontos de controlo levantados topograficamente.

Verifica-se, ainda assim, que as degradações de menor gravidade, que são também as de menor dimensão geométrica, são de mais difícil detecção e medição. A nitidez da imagem perde-se com a aproximação para detecção de valores muito baixos, tornando mais difícil a identificação das

fronteiras da degradação. Este aspeto é mais significativo na avaliação da abertura de fendas de nível de gravidade baixo (2 mm para o nível de gravidade 1), tendo em conta que é o menor valor a detectar para classificação das degradações segundo o catálogo de degradações adotado. Muito embora não tenham sido detetadas degradações do tipo desagregações superficiais e polimento de agregados, a mesma conclusão poderia ser retirada para a identificação dos graus de menor gravidade deste tipo de patologias. As dimensões das restantes degradações são identificadas facilmente e medidas com graus de precisão confortáveis em qualquer nível de gravidade.

A tabela 29 resume os valores obtidos no modelo por tipo de degradação e nível de gravidade.

Tabela 29 - Resumo dos valores das degradações medidas no modelo 3D

Tipo de Degradação	Nível de Gravidade	Quantidade	Un.	Total
Fendas longitudinais	1	2,22	m	32,99
	2	4,41	m	
	3	26,36	m	
Fendas transversais	1	2,94	m	25,59
	2	10,98	m	
	3	11,67	m	
Fendilhamento do tipo pele de crocodilo	1	0,00	m ²	116,30
	2	102,50	m ²	
	3	13,80	m ²	
Deformações localizadas	1	20,00	m ²	20,00
	2	0,00	m ²	
	3	0,00	m ²	
Rodeiras	1	42,75	m ²	78,00
	2	35,25	m ²	
	3	0,00	m ²	
Ninhos	1	0,01	m ²	0,51
	2	0,04	m ²	
	3	0,46	m ²	

Muito embora a recolha de dados seja rápida e apresente custos mais reduzidos quando comparada com as inspeções tradicionais e medições manuais de degradações de pavimentos, o tratamento de dados em gabinete é moroso, havendo necessidade de recorrer a algoritmos de detecção automática das patologias para viabilizar o método como uma verdadeira alternativa. Conforme referido em vários exemplos no capítulo 3, esta é já uma área em desenvolvimento que tem sido objeto de estudos com resultados promissores.

Os resultados permitiram também determinar os índices de qualidade global do pavimento. Os valores obtidos para os índices PSI e PCI demonstraram que o pavimento se encontra em mau estado de conservação, apontando para a necessidade de realização de intervenções de

manutenção que poderão ser de reabilitação ou mesmo de reconstrução. A maior contribuição para os baixos valores dos índices advém da grande área com fendilhamento do tipo pele de crocodilo.

A tabela 30 resume os valores obtidos para os dois índices calculados.

Tabela 30 - Resumo dos valores dos índices de qualidade obtidos

INDICE	VALOR	AVALIAÇÃO
PSI _{rural}	1,4	Mau estado
PSI _{urbano}	1,2	Mau estado
PCI	2,0	Estado crítico

Verifica-se que o cálculo do índice PSI para meio urbano dá mais peso às degradações (C+S+P) e, como a secção está bastante degradada, apresentando extensões consideráveis destas degradações, isso reflete-se no resultado. Em meio rural, o IRI e a rodeira são mais importantes, uma vez que em geral as entidades gestoras não deixam que as restantes degradações evoluam tanto (desfavoravelmente) como em meio urbano, devido às velocidades praticadas nestas estradas. O índice PCI é mais penalizante do que o índice PSI para este caso, sendo que, provavelmente é o que reflete melhor o estado do pavimento, uma vez que o cálculo é mais detalhado e as áreas e comprimentos considerados no cálculo são reais e não aproximados.

5. Conclusões e trabalhos futuros

O uso de VANT ultrapassa já os propósitos militares para os quais foram inicialmente desenvolvidos, tendo aplicabilidade em várias áreas da engenharia, designadamente na recolha de imagens em inspeções várias e mapeamentos. Entre as vantagens mais significativas do uso destes equipamentos em inspeções apontam-se os baixos custos, a rapidez, a alta qualidade da informação recolhida e o acréscimo de segurança da operação quando comparado com as inspeções tradicionais a locais de difícil acesso. Ainda assim, têm como principais inconvenientes o facto de não poderem ser usados com condições meteorológicas adversas e a baixa autonomia dos equipamentos.

Na área dos transportes, e para além da inspeção de pavimentos, os VANT têm vindo a ser utilizados para outros propósitos, dos quais se podem destacar a gestão de tráfego e a verificação do estado de conservação de obras de arte ou outras infraestruturas de difícil acesso.

Muito embora a técnica de inspeção de pavimentos com uso de VANT ainda esteja em desenvolvimento e com pouca aplicação, existem já vários estudos que apontam para a viabilidade desta utilização. Os exemplos disponíveis apontam, genericamente, para a captação de imagens de alta resolução através de câmaras e sensores montados em VANT, usados para a construção de ortoimagens que constituem os modelos 3D onde é possível fazer a avaliação do estado dos pavimentos. As precisões nas medições e a possibilidade de automação da identificação das degradações têm sido aspetos abordados nos estudos recentes sobre esta matéria. A Inteligência artificial tem sido utilizada no desenvolvimento de aplicações para deteção automática de degradações, em especial para fendilhamento e covas. Estes sistemas são habitualmente uma conjugação entre o hardware de controlo automático do voo e de software de deteção das degradações.

No que respeita ao caso de estudo, a metodologia utilizada está alinhada com outros estudos, iniciando pela caracterização da área a inspecionar e das necessidades de precisão, para depois se proceder à recolha das imagens que suportam a construção do modelo 3D. Neste processo foi essencial o levantamento topográfico de pontos de controlo que serviram para corrigir as distorções e calibrar o modelo gerado no software Agisoft Metashape. No modelo foi possível fazer, com níveis de precisão adequados, a medição das diversas patologias presentes na superfície do pavimento inspecionado tendo por base o catálogo de degradações da E.P, S.A. (2008). As medições no modelo 3D foram validadas com medições in situ tendo-se obtido desvios planimétricos e altimétricos inferiores a 2 mm, o que se considera bastante satisfatório. Esta precisão é melhor do que a apresentada em grande parte dos estudos apresentados no capítulo 3 e permite identificar os níveis de gravidade mais baixos das degradações, designadamente do fendilhamento, cuja classificação no nível de gravidade 1 se refere a

aberturas inferiores a 2 mm. De notar que se antevia um nível de precisão elevado, uma vez que foram usadas as imagens obtidas no voo efetuado a 3 m de altura. Com estas medições foi também possível determinar os índices de qualidade do pavimento segundo dois métodos, o PSI (*Pavement Serviceability Index*) e o PCI (*Pavement Condition Index*), concluindo-se pelo mau estado do pavimento para a secção analisada, apontando para a necessidade de intervenção no troço inspecionado.

Como desenvolvimento deste trabalho deve avaliar-se no futuro a possibilidade da recolha de imagens ser efetuada a uma altura mais elevada sem perda significativa de precisão, o que permitiria automatizar o voo e diminuir ainda mais o tempo de inspeção. Sugere-se ainda verificar a possibilidade de recolher imagens obliquas sem sobrevoar e sem necessidade de interromper a circulação nos trechos a inspecionar e a aplicação de técnicas de inteligência artificial para a deteção automática das degradações.

Conclui-se que o processo de inspeção de pavimentos com recurso a VANT é viável, permitindo retirar informação fiável, de forma económica e num curto espaço de tempo, muito embora seja necessário ainda desenvolver algumas limitações, designadamente, no que respeita à automação da deteção do conjunto de patologias necessárias para o cálculo de índices de qualidade do pavimento. Este aspeto parece ser o que de forma mais determinante poderá viabilizar o uso corrente desta técnica que de outra forma exigirá um trabalho de tratamento de dados significativo.

Referências

- AERISURVEY. (11 de Abril de 2021). AERISURVEY. Obtido em 11 de Abril de 2021, de AERISURVEY:
http://mat.uc.pt/~cfonte/Caminhos_seculo_XXI/Apresentacoes/AERISURVEY_Drones%20&%20Engenharia%20-%20omapeamento,%20monitoriza%C3%A7%C3%A3o%20e%20inspe%C3%A7%C3%A3o.pdf
- ANAC. (2022). Aeronaves Não Tripuladas (UAS/Drones); Categoria aberta. Obtido em 12 de Novembro de 2022, de ANAC:
https://www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx
- ANAC, A. (14 de 12 de 2016). Regulamento n.º 1093/2016. Obtido em 4 de Abril de 2021, de Diário da Republica Eletronico:
<https://dre.pt/application/file/a/105366569>
- APPLUS. (11 de Abril de 2021). APPLUS. Obtido em 11 de Abril de 2021, de APPLUS: <https://www.applus.com/pt/pt/what-we-do/solutions/inspe%C3%A7%C3%A3o-com-drones>
- ARPAS-UK, Association of Remotely Piloted Aircraft Systems. (2021). ARPAS-UK, The UK Drone Association. Obtido em 11 de Abril de 2021, de NEWS ARPAS-UK: <http://www.arpas.uk/latest-news/>
- Assembleia da Republica. (23 de July de 2018). Decreto Lei 58/2018. Obtido em 4 de Abril de 2021, de Diário da Republica Eletronico:
<https://dre.pt/application/file/a/115741324>
- ASTM, American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. *ASTM, International D6433-18(D6433)*.
- Austroroads. (maio de 2016). Pavement Rutting Measurement with a Laser Profilometer. *AUSTROADS TEST METHOD AG:AM/Too9*. Obtido de https://austroroads.com.au/publications/asset-management/agam-too9-16/media/AGAM-Too9-16_Pavement_Rutting_Measurement_Laser_Profilometer.pdf
- Awati, R. (maio de 2022). TechTarget. Obtido em 15 de Agosto de 2022, de TechTarget: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/field-of-view-FOV>
- Barmounakis, E. N., Vlahogianni, E. I., & Golias, J. C. (2016). Unmanned Aerial Aircraft Systems for transportation engineering: Current practice and future challenges. *111-122*. Athens: International Journal of Transportation Science and Technology.
- Barmounakis, E., & Geroliminis, N. (2019). On the new era of urban traffic monitoring 1 with massive dronedata: The pNEUMA large-scale field experiment. Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Barros, E., Mafra Filho, F., Andrade, M., & Sato, S. (2017). AS POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO USO DO VANT NO MONITORAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO DE RODOVIAS FEDERAIS. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Rio de Janeiro.
- Beirão, B. M. (2019). Dissertação Mestrado - Panorama dos drones em Portugal. Lisboa.

- Brooks, C., Dobson, R. J., Banach, D. M., Dean, D., Oommen, T., Wolf, R. E., . . . Hart, B. (2014). Michigan Technological University; Michigan Tech Research Institute; MDOT - Michigan Department of Transportation. *Evaluating the Use of Unmanned Aerial Vehicles for Transportation Purposes*. Houghton: MDOT - Michigan Department of Transportation.
- Department for business, Energy & Industrial Strategy, Government Office for Science. (2017). Stream for remotely piloted civil aircraft systems (RPAS).
- Department of Defense, U. (2021). DOD Dictionary of Military and Associated Terms.
- DJI. (2022). DJI. Obtido em 15-08-2022 de Agosto de 2022, de DJI: <https://www.dji.com/pt/mavic-2/info#specs>
- Dobson, R. J., Brooks, C., Roussi, C., & Colling, T. (Maio de 2013). Developing an unpaved road assessment system for practical deployment with high-resolution optical data collection using a helicopter UAV. 235-243. Atlanta, GA, USA. doi:10.1109/ICUAS.2013.6564695
- E. Pereira, R. B. (2009). Unmanned Air Vehicles for coastal and environmental research.
- EASA, European Union Aviation Safety Agency. (2021). Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945).
- EQS. (11 de Abril de 2021). EQS. Obtido em 11 de Abril de 2021, de EQS: <https://www.eqsglobal.com/pt/tecnicas-avancadas-de-inspecao/inspecoes-com-drones>
- Estradas de Portugal, S.A. (2008). Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários. I.
- Estradas de Portugal, S.A. (2008). Sistema de Gestão de Pavimentos: Manual de Utilização. *Sistema de Gestão de Pavimentos: Manual de Utilização (1ª FASE - VERSÃO REVISTA)*. Obtido em 03 de Dezembro de 2022, de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428712638/EP09.pdf>
- FAA, Federal Aviation Administration; DOT, Department of Transportation. (2021). Operation of Small Unmanned Aircraft Systems over People.
- Falorca, J., & Lanzinha, J. C. (2019). Developments towards the use of drones in the building envelope condition assessment - A comprehensive review and experimental rehearsals. Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Gu, X., Abdel-Aty, M., Xiang, Q., Cai, Q., & Yuan, J. (2019). Utilizing UAV video data for in-depth analysis of drivers' crash risk at interchange merging areas. *Accident Analysis & Prevention*, 123. ELSEVIER.
- Haidari, L., Brown, S., Ferguson, M., Bancroft, E., Spiker, M., Wilcox, A., . . . Lee, B. (2016). The economic and operational value of using drones to transport vaccines. Baltimore and Pittsburgh: ELSEVIER.
- ICAO, International Civil Aviation Organization. (2011). Unmanned Aircraft Systems (UAS).
- Instituto de Infra-Estruturas Rodoviária IP (InIR). (2009). Indicadores de Estado de Conservação dos Pavimentos. *Construção e Reabilitação de Pavimentos, Indicadores de estado de conservação dos pavimentos*. Obtido de <https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao%20Tcnica/ConstrucaoReabilitacaoPavimentosIndicadoresEstadoConservacaoPavimentos.pdf>

- Kaamin, M., Tajudin, S. A., Basri, N. A., Rahman, R. A., Nor, A. H., Kadir, M. A., . . . Luo, P. (2022). Unmanned Aerial Vehicle Technology Use in Visual Road Inspection at Ft005, Johor Bahru-Melaka. *15(37-48)*.
- Kim, N. V., & Chervonenkis, M. A. (2015). Situation Control of Unmanned Aerial Vehicles for Road Traffic Monitoring. *Situation Control of Unmanned Aerial Vehicles for Road Traffic Monitoring*. Moscow: Canadian Center of Science and Education .
- Knyaz, V. A., & Chibunichev, A. G. (2016). PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES FOR ROAD SURFACE ANALYSIS. *Volume XLI-B5(515-520), XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic*. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-515-2016
- Knyaz, V., & Chibunichev, A. (Junho de 2016). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. *PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES FOR ROAD SURFACE ANALYSIS, XLI-B5*. Moscow. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-515-2016
- Lee, J., Zhong, Z., Kim, K., Dimitrijevic, B., Du, B., & Gutesa, S. (Janeiro de 2015). EXAMINING THE APPLICABILITY OF SMALL QUADCOPTER DRONE FOR TRAFFIC SURVEILLANCE AND ROADWAY INCIDENT MONITORING. (15-4184). Washington DC, United States.
- Leonardi, G., Barrile, V., Palamara, R., Suraci, F., & Candela, G. (Janeiro de 2019). 3D Mapping of Pavement Distresses Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System. *part of Springer Nature 2019*. Reggio Calabria, Italy. doi:10.1007/978-3-319-92102-0_18
- Li, Z., Cheng, C., Kwan, M.-P., Tong, X., & Tian, S. (2019). Identifying Asphalt Pavement Distress Using UAV LiDAR Point Cloud Data and Random Forest Classification. *8(39)*. doi:10.3390/ijgi8010039
- Lima, D., Santos, B., & Almeida, P. (2020). Proposal of an Airport Pavement Maintenance Management System for Cape Verde. *2020*, 49-60. doi:10.18502/keg.v5i5.6917
- Luz, T. (18 de April de 2014). Público. Obtido em 11 de April de 2021, de Público: <https://www.publico.pt/2014/04/18/tecnologia/noticia/a-nova-sensacao-da-internet-e-um-drone-da-marinha-que-fez-plof-1632799>
- Maganinho, L. G. (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. *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil: Geotecnia e Ambiente*. Covilhã.
- Mahdi Hajizamani, M., & Picado Santos, L. (2016). O uso de um drone comercial para a obtenção de dados destinados à simulação de tráfego em estradas. *8.º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa.
- Metni, N., & Hamel, T. (Novembro de 2007). AUTOMATION IN CONSTRUCTION. *A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits, 17(1)*. (M. Skibniewski, Ed.) AUTOMATION IN CONSTRUCTION - An International Research Journal. doi:10.1016/j.autcon.2006.12.010
- Millian, J. D. (2019). Towards the application of UAS for road maintenance at the Norvik Port. STOCKHOLM: KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

- 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. *294(106363)*. doi:10.1016/J.ENGCEO.2021.106363
- Nogueira, A. S. (Outubro de 2015). Avaliação de rodeiras de pavimentos rodoviários com recurso a varrimento laser. *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil: Estruturas e Construção*. Covilhã. Obtido de <http://hdl.handle.net/10400.6/5132>
- Outay, F., Mengash, H. A., & Adman, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety,. *Transportation Research Part A*. ELSEVIER.
- Pereira de Oliveira, C. D. (2017). Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão Examinadora do Curso Tecnologia da Construção Civil com habilitação em Topografia e Estradas da Universidade Regional do Cariri – URCA. *APLICAÇÃO DE VEICULO ÁEREO NÃO TRIPULADO (VANT) PARA O ACOMPANHAMENTO EXECUTIVO DE UMA OBRA DE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA*. Juazeiro do Norte - CE.
- PERIPLUS. (11 de Abril de 2021). PERIPLUS. Obtido em 11 de Abril de 2021, de PERIPLUS: <https://www.peri-plus.pt/solucoes/servicos-de-inspecoes-com-drone/>
- Picado-Santos, L., Ferreira, A., & Pereira, P. A. (2006). Estruturação de um Sistema de Gestão de Pavimentos para uma Rede Rodoviária de Carácter Nacional.
- Picado-Santos, L., Ferreira, A., Antunes, A., Carvalheira, C., Santos, B., Bicho, M., . . . Silvestre, S. (setembro de 2004). Pavement management system for Lisbon. *157(3)*, 157-165. doi:10.1680/muen.2004.157.3.157
- Ragnoli, A., De Blasiis, M. R., & Di Benedetto, A. (19 de dezembro de 2018). Pavement Distress Detection Methods: A Review. Rome: MDPI. doi:10.3390/infrastructures3040058
- SAMSIC. (11 de Abril de 2021). SAMSIC. Obtido em 11 de Abril de 2021, de SAMSIC: <https://www.samsic.pt/inspecao-tecnica-feita-por-drones>
- Santos, B. M., Picado Santos, L. G., & Cavaleiro, V. M. (Novembro de 2014). Refinement of a simplified road-user cost model. *167*, 364-376. doi:10.1680/tran.12.00057
- Santos, B., Almeida, P. G., & Maganinho, L. (2019). Data Collection Methodology to Assess Road Pavement Condition Using GNSS, Video Image and GIS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *603(4)*. doi:10.1088/1757-899X/603/4/042083
- Santos, B., Almeida, P. G., & Maganinho, L. (2019). Data Collection Methodology to Assess Road Pavement Condition Using GNSS, Video Image and GIS. (*603 042083*). doi:10.1088/1757-899X/603/4/042083
- SESAR. (2021). SESAR. Obtido em 20 de 03 de 2021, de SESARJU: <https://www.sesarju.eu/>
- Shaghlil, N., & Khalafallah, A. (2018). Automating Highway Infrastructure Maintenance Using Unmanned Aerial Vehicles. Kuwait. doi:10.1061/9780784481295.049
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., . . . Guizani, M. (22 de Abril de 2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *63*. Digital:

- IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
doi:10.1109/ACCESS.2019.2909530
- Sharma, V., Chen, H.-C., & Kumar, R. (2017). Driver behaviour detection and vehicle rating using multi-UAV coordinated vehicular networks. *Journal of Computer and System Sciences, Journal of Computer and System Sciences*. Punjab: ELSEVIER.
- Tan, Y., & Li, Y. (2019). UAV Photogrammetry-Based 3D Road Distress Detection. *8(409)*. doi:10.3390/ijgi8090409
- Themistocleous, K., Neocleous, K., Pilakoutas, K., & Hadjimitsis, D. G. (Agosto de 2014). Damage assessment using advanced non-intrusive inspection methods: Integration of Space, UAV, GPR and Field Spectroscopy. doi:10.1117/12.2069507
- Zhang, C. (2008). AN UAV-BASED PHOTOGRAMMETRIC MAPPING SYSTEM FOR ROAD CONDITION ASSESSMENT. *XXXVII(B5)*. Beijing.
- Zhang, C., & Elaksher, A. (2011). An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses. *27(2)*, 118-129. doi:10.1111/j.1467-8667.2011.00727.x
- Zhu, J., Zhong, J., Ma, T., Huang, X., Zhang, W., & Zhou, Y. (2022). Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. *133(103991)*. doi:10.1016/J.AUTCON.2021.103991