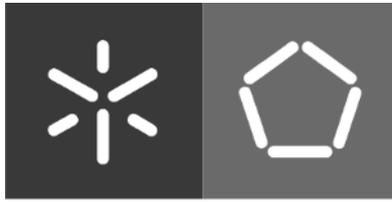


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Edwin das Neves Pires dos Santos

**Sistemas de Observação do Estado
Superficial de Pavimentos: Otimização do
Sistema com Equipamento Fotográfico
(fendilhamentos)**

Outubro de 2018



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Edwin das Neves Pires dos Santos

**Sistemas de Observação do Estado
Superficial de Pavimentos: Otimização do
Sistema com Equipamento Fotográfico
(fendilhamentos)**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

Outubro de 2018

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta Dissertação de Mestrado contou com importantes apoios e incentivos, sem os quais não se teria tornado realidade, aos quais gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

À Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ao Departamento de Engenharia Civil, e em especial ao Professor Doutor José Luís Pinho, Diretor do Curso de Mestrado em Engenharia Urbana, pelo suporte e excelentes conselhos que sempre assegurou durante a concretização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva, orientador deste trabalho, pelos momentos passados na sua companhia, pelo incentivo e encorajamento, pela sua simpatia e companheirismo, pelos ensinamentos transmitidos que só assim tornaram possível a concretização desta dissertação. Um enorme obrigado pela sua participação neste projeto.

Ao Engenheiro Carlos Palha, pela sua participação e acompanhamento sistemático na execução do caso do estudo prático, pelos conhecimentos transmitidos na área laboratorial, bem como na disponibilidade de informações pertinentes durante a investigação.

Aos meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio em todos os todos os momentos da minha vida.

Por fim, dedico esta dissertação às minhas preciosidades, esposa Carla Pires dos Santos e filha Helena Pires dos Santos, por toda a compreensão durante a minha ausência no decorrer desta dissertação, pelo apoio, motivação e amor incondicional que veio a resultar na conclusão desta dissertação, pelo constante incentivo e encorajamento e por estarem presentes em todos os momentos importantes.

Sistemas de Observação do Estado Superficial de Pavimentos: Otimização do Sistema com Equipamento Fotográfico

RESUMO

A rede rodoviária constitui a infraestrutura de transporte mais importante no desenvolvimento global de diversos países. Os pavimentos dessa rede são estruturas que devem permitir a circulação do tráfego em condições adequadas, assegurando uma superfície de rolamento que possibilite a circulação dos veículos com comodidade e segurança durante a sua vida útil. No entanto, a contínua degradação em serviço pode pôr em causa essas condições, o que justifica a necessidade de efetuar uma auscultação do estado superficial do pavimento de forma periódica (além da avaliação da sua qualidade estrutural e funcional). Essa avaliação também é essencial no apoio à definição de estratégias de manutenção com menores custos.

Embora seja evidente a importância de observar de forma frequente o estado superficial dos pavimentos numa rede de estradas extensa, tradicionalmente esse levantamento é realizado por observação visual feita a pé com registo manual das degradações. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar métodos alternativos que permitam acelerar esse processo, em especial com recurso à otimização de um sistema de registo fotográfico acoplado a um veículo. As imagens recolhidas *in situ* são alvo de análise posterior para avaliar o nível de fendilhamento.

No presente trabalho é apresentado um caso de estudo de um pavimento num trecho de estrada do Campus de Gualtar da Universidade do Minho, no qual se avaliou o nível de fendilhamento recorrendo a três métodos diferentes de auscultação do estado superficial do pavimento: i) método tradicional, com observação visual feita a pé; ii) levantamento em veículo com apoio computacional; iii) levantamento com equipamento fotográfico (*webcam*) acoplado a um veículo. Além disso, procurou otimizar-se o último sistema ao estudar a influência que a iluminação, o tipo de câmara e a velocidade têm na qualidade das imagens obtidas.

Neste trabalho concluiu-se que o levantamento visual das patologias a pé continua a ser o método mais preciso (desde que garantida a experiência do operador). Os métodos associados a um veículo são mais rápidos, e em boas condições de luminosidade e baixa velocidade a perda na qualidade do levantamento efetuado não é significativa. O sistema fotográfico ainda permite manter o registo do levantamento para consulta futura, mas esse sistema deve continuar a ser melhorado para ser menos sensível às condições de iluminação e à velocidade do veículo.

Palavras-chave: Pavimentos rodoviários, Observação do estado superficial, Equipamento de Inspeção, Registo fotográfico, Fendilhamento.

**Systems for Evaluation of Pavement Surface Condition:
Optimization of the System with Photographic Equipment**

ABSTRACT

The road network is an essential transport infrastructure in the global development of several countries. The pavements of that network are structures that must allow the traffic to flow under reasonable conditions, ensuring a rolling surface for safe and comfortable circulation of the vehicles to during the pavement life. However, continuous in-service distress may undermine those conditions, which justifies the need to periodically survey the pavement surface condition (in addition to assessing its structural and functional quality). This evaluation is also essential to support the definition of maintenance strategies with lower costs.

Although the importance of frequent observation of the pavements surface condition in an extensive road network is evident, that inspection is traditionally carried out by visual observation on foot with manual records of degradations. Thus, the objective of this work is to study alternative methods to accelerate this process, in particular through the optimization of a photographic recording system coupled to a vehicle. The images collected *in situ* are subject to further analysis to assess the cracking level.

The present work presents a case study of a pavement in a road section of *Campus de Gualtar* at the University of Minho, in which the cracking level was evaluated. Three different methods were used to examine the pavement surface condition: i) traditional one, with visual observation carried out on foot; ii) vehicle survey with computational support; (iii) survey with photographic equipment (webcam) coupled to a vehicle. Besides, the last system has been optimized by studying the influence of lighting, camera type and speed on the quality of the images obtained.

In this study, it was concluded that the visual observation of the pavement distresses on foot continues to be the most accurate inspection method (since the operator's experience is assured). The systems associated with a vehicle can be performed faster without a significant loss in the quality of the survey for good lighting and low speed conditions. The photographing system also allows to keep the survey record for future reference, but this system should continue to be improved to be less sensitive to lighting conditions and vehicle speed.

Keywords: Road pavements, Surface condition evaluation, Inspection equipment, Photographic record, Cracking.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento temático	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Conteúdo da dissertação	3
2. ESTADO DA ARTE SOBRE PAVIMENTOS E OBSERVAÇÃO DO SEU ESTADO SUPERFICIAL	5
2.1. Descrição geral sobre pavimentos rodoviários	5
2.2. Tipos de pavimentos rodoviários	6
2.2.1. Pavimentos rodoviários flexíveis	6
2.2.2. Pavimentos rodoviários rígidos.....	8
2.2.3. Pavimentos rodoviários semirrígidos	8
2.3. Patologias em pavimentos rodoviários flexíveis	10
2.4. Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários	16
2.4.1. Observação visual da degradação superficial de pavimentos.....	16
2.4.2. Observação visual com apoio informático	17
2.4.3. Observação de pavimentos com apoio fotográfico	18
2.5. Avaliação das características estruturais de pavimentos rodoviários	23
2.6. Avaliação das características funcionais de pavimentos rodoviários	27
3. TRECHO DE ESTUDO E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	31
3.1. Introdução.....	31
3.2. Trecho experimental selecionado para o estudo	32
3.3. Caracterização funcional do pavimento do trecho experimental.....	34
3.3.1. Caracterização da regularidade longitudinal	35
3.3.2. Caracterização da macrotextura.....	37
3.4. Caracterização geral das degradações do pavimento do trecho experimental.....	39
3.5. Observação do estado superficial do pavimento através de levantamento visual	43
3.6. Observação do estado superficial do pavimento com apoio computacional	46
3.7. Observação do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico	48
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1. Caracterização funcional do pavimento do trecho experimental.....	53

4.1.1. Localização georreferenciada do trecho em estudo e velocidades de levantamento	53
4.1.2. Caracterização da regularidade longitudinal.....	54
4.1.3. Caracterização da macrotextura.....	57
4.2. Observação do estado superficial do pavimento através de levantamento visual	59
4.2.1. Levantamento visual final do estado superficial do pavimento (método de referência)	59
4.2.2. Levantamento visual inicial do estado superficial do pavimento	61
4.3. Observação do estado superficial do pavimento com apoio computacional	65
4.4. Observação do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico	68
4.4.1. Primeiro levantamento do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico (Julho de 2018).....	69
4.4.2. Segundo levantamento do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico (outubro de 2018).....	75
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1. Conclusões.....	93
5.2. Trabalhos futuros	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Constituição tipo de um pavimento flexível (adaptado de SETRA e LCPC, 1994).	6
Figura 2: Estrutura de um pavimento rígido (adaptado de Bernucci <i>et al.</i> , 2008).	8
Figura 3: Estrutura de um pavimento semirrígido (ECivil, 2018).	9
Figura 4: Equipamento utilizado no método Viziroad (Picado Santos <i>et al.</i> , 2006).	18
Figura 5: Esquema do equipamento Gerpho (Hudson <i>et al.</i> , 1987) e câmara do sistema Gerpho em posição de observação (SACR (2007) <i>apud</i> Alves (2007)).	20
Figura 6: Esquema do equipamento Roadrecon (Benson <i>et al.</i> , 1988) e equipamento utilizado nos levantamentos (Federal Highway Administration, 2015).	21
Figura 7: Equipamento para obtenção de imagens digitais da degradação do pavimento (Wang, 2004).	22
Figura 8: Exemplo de <i>software</i> de análise automática de fendilhamento (Wang, 2004).	22
Figura 9: Ensaio com viga <i>Benkelman</i> (Pavement Interactive, 2018).	23
Figura 10: Defletógrafo <i>Lacroix</i> (Vectra Esteio Rodovias, 2014)	24
Figura 11: Camião que transporta o curviâmetro (Motorpress Ibérica, 2018)	25
Figura 12: Defletómetro de impacto da Universidade do Minho (Amorim, 2013).	26
Figura 13: Representação do defletómetro de impacto e zonas de tensão (Freitas, 2001).	27
Figura 14: Classificação da textura dos pavimentos (PIARC, 2003).	28
Figura 15: Imagem de satélite do Campus de Gualtar da Universidade do Minho, com identificação do trecho experimental e das suas extremidades (pontos A e B).	33
Figura 16: Barra fixa utilizada no veículo de ensaio para a medição da irregularidade (IRI) e da macrotextura (MPD).	35
Figura 17: Modelo conceptual “quarto de veículo” utilizado para o cálculo do IRI (adaptado de Gillespie <i>et al.</i> , 1980).	36
Figura 18: Ilustração dos termos comprimento de base, profundidade do perfil (PD), profundidade média do perfil (MPD) (adaptado de EN ISO 13473-1, 2004)	38
Figura 19: Definição geral das zonas críticas com maior estado de degradação no trecho.	39
Figura 20: Diferentes níveis de fendilhamento longitudinal observados no trecho em estudo	41
Figura 21: Diferentes níveis de fendilhamento transversal observados no trecho em estudo	41

Figura 22: Diferentes níveis de fendilhamento do tipo pele de crocodilo observados no trecho em estudo	42
Figura 23: Exemplo de deformação localizada observada no trecho em estudo	42
Figura 24: Exemplos de tapagens de covas observadas no trecho em estudo.....	43
Figura 25: Exemplos de reparações observadas no trecho em estudo	43
Figura 26: Odómetro eletrónico utilizado para medição das distâncias no trecho em estudo	44
Figura 27: Carrinha da Universidade do Minho utilizada nos levantamentos do estado superficial do pavimento com apoio computacional ou fotográfico.....	45
Figura 28: Computador de bordo utilizado para controlo, aquisição e registo de dados nos levantamentos do estado superficial do pavimento com apoio computacional ou fotográfico.	46
Figura 29: Equipamento do tipo Desy, da Universidade do Minho, para apoio computacional na observação do estado superficial de pavimentos	47
Figura 30: Sistema utilizado neste trabalho para levantamento do estado superficial do pavimento com apoio computacional e respetivo <i>software</i>	47
Figura 31: Posicionamento frontal da câmara fotográfica na parte exterior carrinha.....	49
Figura 32: Câmara fotográfica 1 utilizada neste trabalho	50
Figura 33: Posicionamento da câmara fotográfica na parte exterior traseira da carrinha	51
Figura 34: Sistema de iluminação artificial com holofotes aplicado no veículo	51
Figura 35: Câmara fotográfica 1 utilizada neste trabalho	52
Figura 36: Câmaras fotográficas 1 e 2 utilizada em simultâneo no último levantamento	52
Figura 37: Localização GPS do trecho experimental para ambos os sentidos em estudo	53
Figura 38: Velocidades praticadas durante a caracterização funcional do trecho experimental para ambos os sentidos em estudo	54
Figura 39: Valores de IRI por troços de 100 m no trecho experimental para ambos os sentidos.....	55
Figura 40: Valores de profundidade estimada da textura por troços de 100 m no trecho experimental para ambos os sentidos	58
Figura 41: Levantamento visual do nível de fendilhamento no trecho experimental para ambos os sentidos efetuado em outubro de 2018 (método de referência)	60
Figura 42: Levantamento visual do nível de fendilhamento no trecho experimental para ambos os sentidos efetuado em junho de 2018 vs. levantamento de referência.....	62

Figura 43: Erro associado ao levantamento visual do nível de fendilhamento efetuado em junho de 2018 por comparação com o levantamento de referência em ambos os sentidos	63
Figura 44: Levantamento com apoio computacional do nível de fendilhamento no trecho experimental para ambos os sentidos vs. levantamento de referência	65
Figura 45: Erro associado ao levantamento computacional do nível de fendilhamento por comparação com o levantamento de referência.....	67
Figura 46: Imagens sem qualidade captadas com a câmara 1 no levantamento de julho de 2018 devido ao excesso de luminosidade (luz natural).	69
Figura 47: Imagens sem qualidade captadas com a câmara 1 no levantamento de julho de 2018 devido à reduzida luminosidade (luz natural)	70
Figura 48: Imagens com qualidade captadas com a câmara 1 no levantamento de julho de 2018 e que permitiram a avaliação do nível de fendilhamento.....	70
Figura 49: Levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho em ambos os sentidos.	71
Figura 50: Erro associado aos levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 por comparação com o levantamento de referência.	74
Figura 51: Imagens sem qualidade (desfocadas) captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde) sem iluminação e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).	76
Figura 52: Imagens com qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde) sem iluminação e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).	76
Figura 53: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental.	77
Figura 54: Erro associado aos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h) por comparação com o levantamento de referência.....	79
Figura 55: Imagens sem qualidade (desfocadas) captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde), com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).	81
Figura 56: Imagens com qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde), com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).	81
Figura 57: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental	82
Figura 58: Erro associado aos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h) por comparação com o levantamento de referência.....	83

Figura 59: Imagens sem qualidade (desfocadas/escuras) captadas na observação de outubro de 2018 à noite, com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).....	85
Figura 60: Imagens com alguma qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 à noite, com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).....	85
Figura 61: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (noite, com iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental	86
Figura 62: Imagens com bastante qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 (manhã), sem iluminação e a 15 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).	88
Figura 63: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental	88
Figura 64: Erro associado aos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h) por comparação com o levantamento de referência.....	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Camadas de um pavimento flexível e respectivas características (Branco <i>et al.</i> , 2008)	7
Tabela 2: Camadas de um pavimento rígido e respectivas características (Branco <i>et al.</i> , 2008)	9
Tabela 3: Camadas constituintes de um pavimento semirrígido e respectivas características (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	10
Tabela 4: Tipos de deformações em pavimentos flexíveis e as suas possíveis causas (adaptado de Estradas de Portugal, 2008)	12
Tabela 5: Tipos de fendilhamento em pavimentos flexíveis e as suas possíveis causas (adaptado de Estradas de Portugal, 2008)	13
Tabela 6: Tipos e causas de degradação de camada de desgaste em pavimentos flexíveis (adaptado de Estradas de Portugal, 2008)	14
Tabela 7: Tipos e causas de movimentos de materiais em pavimentos flexíveis (adaptado de Estradas de Portugal, 2008)	15
Tabela 8: Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100 metros, em camadas de desgaste de pavimentos (Estradas de Portugal, 2014).....	37
Tabela 9: Classificação dos valores do IRI em pavimentos (Estradas de Portugal, 2014)	37
Tabela 10: Valores de IRI (m/Km) obtidos no trecho experimental.	55
Tabela 11: Singularidades observadas no trecho experimental.....	56
Tabela 12: Profundidade da textura no trecho experimental em estudo.	57
Tabela 13: Quantificação da extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento no levantamento visual efetuado em dezembro de 2018 para ambos os sentidos.....	61
Tabela 14: Quantificação da extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento no levantamento visual efetuado em junho de 2018 em ambos os sentidos.	63
Tabela 15: Quantificação da extensão do trecho associada a cada erro no levantamento visual efetuado em junho de 2018 vs. levantamento de referência em ambos os sentidos.	64
Tabela 16: Quantificação da extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento no levantamento com apoio computacional em ambos os sentidos.....	66
Tabela 17: Quantificação da extensão do trecho associada a cada erro no levantamento computacional vs. levantamento de referência em ambos os sentidos.	67

Tabela 18: Percentagem de extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018.....	72
Tabela 19: Percentagem da extensão do trecho associada a cada erro nos levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 vs. levantamento de referência.	74
Tabela 20: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h).	78
Tabela 21: Extensão do trecho (%) associada a cada erro nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência.	80
Tabela 22: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h).	83
Tabela 23: Extensão do trecho (%) associada a cada erro nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência.	84
Tabela 24: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (noite, com iluminação, 25 km/h).	87
Tabela 25: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h).	89
Tabela 26: Extensão do trecho (%) associada a cada erro nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h) vs. levantamento de referência.	90

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento temático

O estado superficial do pavimento é um fator determinante na escolha das rotas rodoviárias, pois um pavimento deteriorado aumentará o tempo de viagem, além de comprometer o conforto de rolamento e os consumos. Assim, ter um cadastro atualizado do estado superficial de pavimentos é um fator relevante no planeamento do deslocamento das pessoas e das cadeias de distribuição de mercadorias.

A avaliação funcional e o estado de conservação dos pavimentos também são necessários para estabelecer adequadas condições superficiais de rolamento, em especial no que diz respeito à segurança. Um pavimento em bom estado de conservação é fundamental para aumento da segurança viária, pois apesar de existirem diferentes causas para um acidente, como a variável comportamento do motorista, a maioria está relacionada com a velocidade e a condição do pavimento rodoviário.

Os pavimentos rodoviários, logo após a sua construção, começam a ser submetidos a ações diversas que, continuamente, contribuem para a sua degradação, ou seja, para a redução gradual da sua qualidade inicial. Assim, o planeamento de ações de manutenção e conservação dos pavimentos é essencial para garantir a otimização do funcionamento de uma rede de estradas muito extensa.

Nesse sentido, as entidades responsáveis pela gestão da rede precisam de ferramentas que funcionem de forma rápida e eficaz para avaliação do estado estrutural e funcional dos pavimentos ao longo de muitos quilómetros de estradas nacionais e municipais. Uma das informações mais relevantes para definir os troços de estrada que precisam de uma intervenção de manutenção mais urgente é aquela que resulta da identificação das patologias com base em sistemas de observação do estado superficial dos pavimentos.

No entanto, apesar da importância que o levantamento das patologias nos pavimentos tem para uma adequada gestão de um património de extrema riqueza para o país, que é sua rede de estradas, essa observação continua a ser feita apenas em algumas estradas e recorrendo ao sistema tradicional do levantamento visual realizado a pé, muito lento, subjetivo, desconfortável e inseguro para os operadores que executam esta tarefa.

Assim, é fundamental que se utilizem métodos mais rápidos e eficientes para observação do estado superficial de pavimentos, de entre os quais o método de levantamento com apoio fotográfico pode ser uma solução. Essa foi a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

No entanto, este trabalho também vai ao encontro de algumas solicitações feitas por algumas concessionárias da rede de autoestradas nacionais, as quais ajudaram a salientar a necessidade de desenvolver sistemas mais avançados de observação do estado superficial dos pavimentos rodoviários da rede de estradas nacional.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar e comparar algumas metodologias de avaliação do estado superficial de pavimentos rodoviários flexíveis, com enfoque principal no desenvolvimento de um sistema com apoio fotográfico que consiga garantir uma boa qualidade das imagens recolhidas independentemente das condições de luminosidade existentes.

Assim, procurou-se selecionar um trecho experimental sem grande fluxo de tráfego automóvel, para permitir fazer essa avaliação sem por em causa a segurança dos técnicos e dos automóveis que lá circulam. Ao mesmo tempo, na seleção do trecho procurou-se reunir condições mais desfavoráveis (por exemplo, maior irregularidade e sonas de contraste luz-sombra) para garantir que o método se conseguia adaptar aos piores cenários.

Depois de selecionado o trecho foram testados vários métodos para levantamento do estado superficial do pavimento (neste caso apenas para estudo do nível de fendilhamento), tais como:

- Método de levantamento visual efetuado a pé, utilizando a aparelho odómetro;
- Método de levantamento visual no veículo com apoio computacional;
- Método de levantamento no veículo com apoio fotográfico (*webcam*), com posterior avaliação dos registos fotográficos para classificação das patologias.

Dado a maior relevância que se quis dar ao último dos métodos atrás referidos, fez-se ainda variar as condições em que foram realizados os registos fotográficos, utilizando diferentes câmaras, iluminação artificial, diferentes velocidades de circulação do veículo, registos em diferentes períodos sazonais e diários, para definir quais as condições ideais para realização do levantamento.

O objetivo final é o de comparar todos os métodos utilizados, de modo a encontrar as principais vantagens e desvantagens associadas, e definir as melhores condições para realização do levantamento com apoio fotográfico, pelas vantagens que esse método pode apresentar para levantamento de grandes extensões da rede com possibilidade de pesquisa posterior dos registos para esclarecimento de dúvidas sobre os resultados obtidos.

1.3. Conteúdo da dissertação

Esta dissertação de Mestrado encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo faz o enquadramento do tema abordado e a da sua importância, define os principais objetivos que estão na base do desenvolvimento deste trabalho e faz uma pequena abordagem do conteúdo de cada capítulo desta dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica que serviu de apoio teórico e de inspiração para o trabalho desenvolvido, efetuando uma pesquisa intensiva essencialmente sobre pavimentos rodoviários e suas patologias, métodos de observação do seu estado superficial e avaliação da sua qualidade estrutural e funcional.

No terceiro capítulo será apresentada a área de estudo, ou seja, uma via de circulação automóvel com determinada extensão para execução do trabalho de campo. Em seguida apresenta-se o catálogo de degradações que serviu de base à identificação dos níveis de fendilhamento. Depois apresenta-se o método de caracterização funcional do trecho e os três métodos de avaliação do estado superficial desse pavimento rodoviário, identificando os vários equipamentos utilizados e as condições de aplicação do método com apoio fotográfico.

No quarto capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos neste trabalho, e faz-se uma análise dos mesmos para obter as respostas aos objetivos desta dissertação, que serão orientadoras das principais conclusões.

Finalmente no capítulo cinco serão apresentadas as principais conclusões assim como alguns aspetos que podem ser mais investigados e objeto de estudos futuros.

2. ESTADO DA ARTE SOBRE PAVIMENTOS E OBSERVAÇÃO DO SEU ESTADO SUPERFICIAL

2.1. Descrição geral sobre pavimentos rodoviários

Um pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por um conjunto de camadas de espessura finita, apoiadas num maciço semi-indefinido, o solo de fundação (Pereira e Miranda, 1999).

Nas últimas décadas tem-se verificado o aumento dos volumes de tráfego, quer de ligeiros quer de pesados, e das velocidades de circulação praticadas. Estes aumentos fizeram ressaltar a importância de que o pavimento deve constituir, também, uma adequada superfície para que a circulação dos veículos se processe com qualidade (conforto, segurança, entre outros) para os seus utentes. A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período de vida do pavimento, sob a ação das ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram (Branco *et al.*, 2008).

Na fase de conceção do pavimento são definidas soluções estruturais possíveis para o pavimento, que depois serão analisadas na fase de dimensionamento. A opção por determinada solução de pavimentação deve resultar da ponderação de diversos fatores externos, tais como o tipo e importância da via, o tipo e intensidade do tráfego, as características geomorfológicas e geológicas da região, as características geotécnicas dos materiais disponíveis, as condições de aprovisionamento, as condições climáticas e condições económicas (Neves, 2009).

Uma vez selecionado um dado tipo de pavimento, o dimensionamento do pavimento consiste em calcular as espessuras das camadas e especificar as características dos materiais dessas camadas, de forma a limitar, durante a vida de projeto, a ocorrência de degradações estruturais. Os pavimentos são dimensionados para um determinado período de dimensionamento que é o período de tempo durante o qual o pavimento deve assegurar adequadas condições de circulação do tráfego (segurança, economia e conforto), minimizando a necessidade de obras de grande conservação nesse período. Para os pavimentos flexíveis e semirrígidos consideram-se períodos de dimensionamento da ordem de 20 anos. Para os pavimentos rígidos, o período adotado é em geral superior, ou seja, 30 ou mais anos (Neves, 2009).

Na fase de estudo prévio é possível recorrer a manuais de conceção de pavimentos na forma de catálogo, com o objetivo de apoiar e orientar a conceção das estruturas de pavimentos e

respetivas fundações. O manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (Junta Autónoma de Estradas, 1995) é um desses exemplos que propõe estruturas tipo a considerar para pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos.

A importância que os pavimentos têm na estrada é devida ao investimento que representam em relação à totalidade da obra e à avaliação da qualidade de estrada que é feita pelos utentes, baseada fundamentalmente na regularidade do pavimento e no seu estado de conservação. Assim, a observação do comportamento do pavimento após a sua entrada em serviço, por vezes acompanhada de instrumentação, é importante para permitir não só adotar atempadamente as medidas de conservação necessárias, mas também para calibrar métodos de dimensionamento e modelos de comportamento utilizados no projeto de pavimentos (Neves, 2009).

2.2. Tipos de pavimentos rodoviários

Os pavimentos rodoviários são, geralmente, classificados em três categorias: flexíveis, rígidos e semirrígidos. Esta distinção é baseada na sua estrutura, visto que cada um destes pavimentos apresenta uma constituição diferente, com camadas diferenciadas, relativamente a características geométricas e mecânicas.

2.2.1. Pavimentos rodoviários flexíveis

O pavimento flexível (Figura 1) pode ser definido como uma estrutura em camadas composta por uma parte superior de revestimento betuminoso, que pode ainda conter camadas de base e sub-base granular, cujas espessuras dependem do tráfego e da fundação do pavimento (terreno natural eventualmente com reforço de leito de pavimento) que lhe serve de suporte.

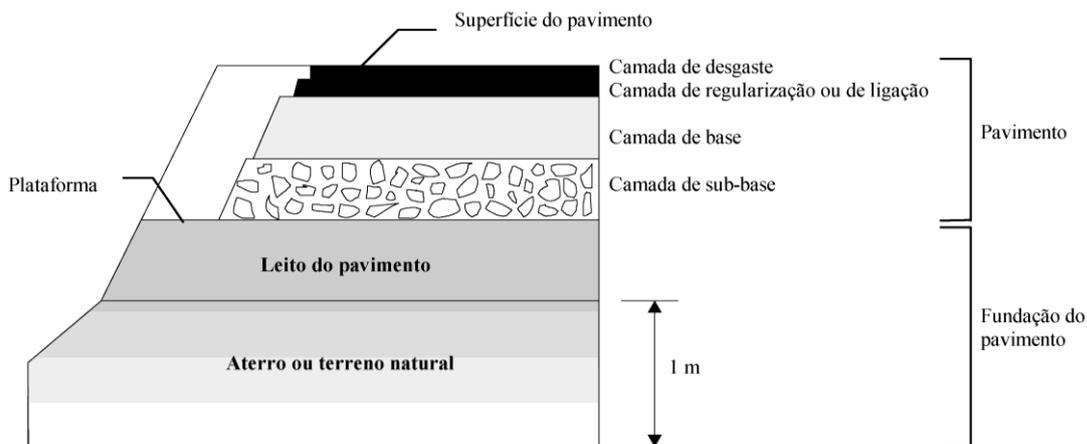


Figura 1: Constituição tipo de um pavimento flexível (adaptado de SETRA e LCPC, 1994).

Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006), um pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. O pavimento flexível é uma estrutura com deformabilidade elevada ao nível das camadas superiores que são formadas por misturas betuminosas, seguidas inferiormente de uma ou duas camadas de material granular. Na Tabela 1 são referidas as principais características das camadas constituintes dos pavimentos flexíveis e os intervalos de espessuras, geralmente, definidos para as mesmas.

Tabela 1: Camadas de um pavimento flexível e respectivas características (Branco *et al.*, 2008)

Camadas	Características	Espessuras
Camada de desgaste ou superfície	Constituída por material betuminoso com agregados de alta resistência (com dimensões geralmente reduzidas – diâmetro médio de 3 a 4 cm). Suporta, redistribui e transfere para as camadas inferiores as tensões induzidas pelos rodados dos veículos. Tem características de impermeabilização, com superfície regular, desempenada e adequada circulação de veículos em condições de conforto, economia e segurança. Deve apresentar uma rugosidade compatível com a mobilização de atrito. Muitas vezes é utilizado um betão betuminoso com “betumes modificados”, em que se recorre a polímeros, o que beneficia as características de adesão e de resistência global.	4-6 cm
Camada de regularização ou ligação	Constituída por mistura betuminosa à semelhança da camada de desgaste, no entanto com materiais mais pobres (quer no betume quer nos agregados). É o suporte da camada de desgaste. Suporta, redistribui e transfere para as camadas inferiores as tensões transmitidas ao nível da camada de desgaste. A superfície deve ser regular e desempenada para garantir a boa execução da camada de desgaste.	5-12 cm
Camada de base	Camada constituída por agregado britado de granulometria extensa (ABGE), produzido artificialmente em pedreira. Pode ser a camada mais importante deste tipo de pavimento – camada estrutural. Suporta, essencialmente, as solicitações induzidas pelo tráfego, assegurando a degradação das tensões compatível com a necessidade de evitar a mobilização excessiva das características resistentes dos solos de fundação.	15-30 cm
Camada de sub-base	Constituída por material granular do tipo ABGE ou com recomposição em central. Suporta, redistribui e transfere para a fundação, as tensões transmitidas ao nível da base. Tem características para drenagem do pavimento, ou seja, permeabilidade adequada para se opor à estagnação da água. Evita que as águas ascensionais ou águas capilares atinjam as camadas nobres do pavimento.	15-20 cm

2.2.2. Pavimentos rodoviários rígidos

Os pavimentos rígidos são realizados com uma camada superficial produzida com cimento *Portland* ou outro ligante hidráulico equivalente. Por serem bastante resistentes, estes pavimentos podem apresentar ou não uma camada de sub-base entre a camada de desgaste e o subleito, o que vai depender da qualidade do material da fundação. Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006), um pavimento rígido (Figura 2) é aquele em que o revestimento tem elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

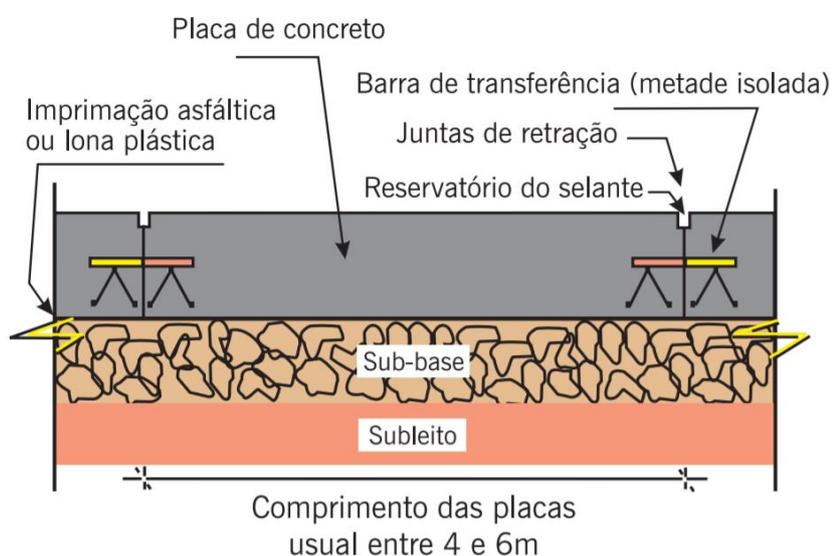


Figura 2: Estrutura de um pavimento rígido (adaptado de Bernucci *et al.*, 2008).

O pavimento rígido tem uma deformabilidade muito reduzida, e a sua constituição típica é apresentada na Tabela 2. Tem uma camada superior de desgaste constituída por betão de cimento (material granular estabilizado com ligantes hidráulicos de elevada resistência, normalmente o cimento *Portland*), seguida de uma ou duas camadas inferiores constituídas também por material granular estabilizado com ligante hidráulico ou apenas constituídas por material granular (Branco *et al.*, 2008).

2.2.3. Pavimentos rodoviários semirrígidos

O pavimento semirrígido é um pavimento que é construído com algumas misturas típicas de pavimentos flexíveis e outras de pavimentos rígidos. As camadas betuminosas superiores (camada de desgaste e regularização) têm a mesma constituição do pavimento flexível, sendo a

camada de base que diferencia este tipo de pavimento, por ser constituído por material granular estabilizado com ligante hidráulico, usualmente betão podre cilindrado. A sua camada de sub-base é em geral constituída por material granular estabilizado mecanicamente e de granulometria extensa (Azevedo, 2012).

Tabela 2: Camadas de um pavimento rígido e respetivas características (Branco *et al.*, 2008)

Camadas	Características	Espessuras
Camada de betão de cimento	Camada estrutural do pavimento com características de impermeabilização constituída por laje de betão de cimento compactado por vibração; apresenta superfície regular, desempenada adequada à circulação de veículos em condições de conforto, economia e segurança; suporta redistribui e transfere para a camada inferior as tensões induzidas pelos rodados dos veículos, representa a camada de desgaste e a camada de base.	20-25 cm
Camada de sub-base	Constituída por material granular (agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento) ou betão pobre ou solo-cimento (material granular estabilizado com ligante hidráulico para o caso de tráfego intenso); suporta, redistribui e transfere para a fundação as tensões transmitidas ao nível da camada superior, camada regular que permita a execução da laje em boas condições e resistente à erosão; assegura a uniformização de assentamento.	15-20 cm

Um pavimento semirrígido é o tipo de pavimento constituído por camadas superiores betuminosas e camadas de base ou sub-base em material estabilizado com cimento. Este tipo de pavimento tem uma deformabilidade maior que o rígido e menor que o flexível. O pavimento semirrígido (Figura 3) pode ser do tipo direto quando a camada betuminosa é executada sobre camada de base cimentada, ou do tipo indireto ou invertido, quando a camada betuminosa é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada (ECivil, 2018).



Figura 3: Estrutura de um pavimento semirrígido (ECivil, 2018).

O pavimento semirrígido tem uma deformabilidade reduzida e relativamente à sua constituição tem características comuns tanto ao pavimento rígido como ao flexível (Tabela 3). Tem uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada de agregado estabilizado com ligante hidráulico (camada de base que possui função determinante na estrutura do pavimento), podendo ainda dispor de uma camada granular na sub-base (Branco *et al.*, 2008).

Tabela 3: Camadas constituintes de um pavimento semirrígido e respetivas características
(Branco *et al.*, 2008)

Camadas	Características	Espessuras
Camada desgaste ou superfície	Constituída por material betuminoso que suporta, redistribui e transfere para as camadas inferiores as tensões induzidas pelos rodados dos veículos. Tem características de impermeabilização, com superfície regular, desempenada e adequada circulação de veículos em condições de conforto, economia e segurança. Deve ter uma rugosidade compatível com a mobilização de atrito.	4-6 cm
Camada de regularização ou ligação	Constituída por mistura betuminosa para suporte da camada de desgaste. Suporta, redistribui e transfere para as camadas inferiores as tensões transmitidas ao nível da camada de desgaste. A superfície deve ser regular e desempenada para garantir a boa execução da camada de desgaste.	5-12 cm
Camada granular (estrutura “inversa”)	Camada de material granular de granulometria extensa, não ligada, entre as camadas betuminosas e a de betão pobre. Utilizada em estruturas “inversas” (e excluída em estruturas “diretas”) com o intuito de contrariar a propagação das fendas da base às camadas betuminosas.	15 cm
Camada de base	Constituída por material granular estabilizado com ligante hidráulico (geralmente betão pobre cilindrado). Camada com grande importância estrutural devido à sua elevada rigidez.	20-30 cm
Camada de sub-base	Constituída por material granular em material britado sem recomposição (ABGE) ou com recomposição em central. Os agregados têm granulometria extensa e dimensão máxima de 50 mm.	15 cm

2.3. Patologias em pavimentos rodoviários flexíveis

As patologias em pavimentos rodoviários flexíveis podem surgir por causa de um projeto deficiente, pela técnica de construção inadequada ou ainda pela falta de manutenção (fundamental para que atinja a vida útil estimada). A melhor forma de prevenir o aparecimento de degradações é observar a qualidade no projeto, uma execução conforme a boa técnica e a constante e periódica manutenção preventiva e corretiva (Mota, 2017).

Os erros de projeto decorrem de diferentes fatores, relacionados com a dificuldade de prever o tráfego real que atuará no período de projeto ou problemas no dimensionamento estrutural, tais como a incompatibilidade estrutural entre as camadas (gerando fadiga precoce das misturas betuminosas), falhas no sistema de drenagem ou até um subdimensionamento estrutural do projeto em relação à capacidade de suporte dos materiais. A execução da pavimentação requer a constante supervisão e orientação do Engenheiro responsável, e mão-de-obra qualificada para uma adequada construção do pavimento. Além disso, é necessária a manutenção, pois quando o limite de vida útil do pavimento se aproxima, surgem degradações que são causadas pela perda de propriedades dos agregados e dos ligantes betuminosos (Mota, 2017).

As degradações podem ser classificadas como estruturais e funcionais. As estruturais estão associadas à diminuição da capacidade do pavimento de suportar cargas, com perda da sua integridade estrutural. As funcionais estão relacionadas com as condições de segurança e traficabilidade do pavimento em termos de rolamento, tal como refere o DNIT (2006).

De facto, as principais funções técnicas da estrutura de pavimento são resistir e distribuir os esforços verticais provenientes do tráfego, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e resistir aos esforços horizontais de desgaste, tornando a superfície de rolamento mais durável (Faleiros, 2005). Nesse sentido, os pavimentos flexíveis são aqueles nos quais a absorção de esforços ocorre entre as camadas de forma mais dividida, em que as tensões verticais se localizam nas camadas inferiores concentradas próximo do ponto de aplicação da carga (Balbo, 2015, Silva, 2008).

As principais causas das degradações dos pavimentos flexíveis estão relacionadas com fatores como a intensidade do tráfego, as ações climáticas, as deficiências dos materiais, deficiências de projeto ou da qualidade de execução. As patologias referentes aos pavimentos flexíveis podem ser agrupadas em quatro grandes grupos (Estradas de Portugal, 2008, Maia, 2012):

- Deformações;
- Fendilhamento;
- Degradação da camada de desgaste;
- Movimento de materiais.

As deformações (Tabela 4) são causas de uma forma geral do comportamento anormal das diferentes camadas do pavimento ou solo de fundação (Estradas de Portugal, 2008). Os principais tipos são rodeiras, deformações localizadas e ondulações.

Tabela 4: Tipos de deformações em pavimentos flexíveis e as suas possíveis causas (adaptado de Estradas de Portugal, 2008)

Tipos de deformação	Descrição	Possíveis causas
<p>Deformação localizada</p> 	<p>São alterações de nível do pavimento, formando depressões ou alteamentos, que surgem isoladamente em pontos localizados do pavimento.</p>	<p>Falta de capacidade do solo de fundação, contaminação localizada das camadas granulares ou algumas capacidades deficientes em zonas pontuais do pavimento, em particular das camadas granulares.</p>
<p>Ondulação</p> 	<p>São deformações transversais que se repetem com uma determinada frequência ao longo do pavimento.</p>	<p>Podem surgir nas camadas de desgaste devido à deficiência de distribuição de ligante. Podem surgir em camadas de betão betuminoso onde ocorra o arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica devido a ação do tráfego, ou também por causa da deformação do solo de fundação.</p>
<p>Rodeiras</p> 	<p>São deformações transversais formadas ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos, podendo ser de grande ou pequeno raio.</p>	<p>Nas rodeiras de grande raio – compactação insuficiente das camadas em geral, insuficiência na capacidade das camadas granulares e da fundação, enquanto nas rodeiras de pequeno raio – misturas betuminosas com reduzida resistência à deformação plástica.</p>

O fendilhamento (Tabela 5) resulta habitualmente da fadiga do pavimento flexível que origina fendas irregulares. Essas fendas podem ser longitudinais (fendas paralelas ao eixo da estrada, localizadas geralmente ao longo da zona da passagem dos veículos) ou transversais (fendas perpendiculares ao eixo da estrada, isoladas ou com espaçamento variável, abrangendo parte ou toda a largura da faixa de rodagem). A evolução das fendas isoladas referidas anteriormente dá origem à pele de crocodilo que são fendas que formam entre si uma malha de dimensão variável, localizada inicialmente na zona de passagem dos rodados dos veículos, abrangendo

progressivamente toda a largura da via do tráfego, resultante da evolução das fendas ramificadas (Estradas de Portugal, 2008). Este tipo de degradação será aquele sobre o qual incidirá de forma especial o estudo experimental realizado neste trabalho de Mestrado.

Tabela 5: Tipos de fendilhamento em pavimentos flexíveis e as suas possíveis causas
(adaptado de Estradas de Portugal, 2008)

Tipos de fendilhamento	Possíveis causas
<p>Fendas longitudinais</p> 	<p>Podem ser originadas pela deficiência da junta longitudinal de construção, drenagem deficiente, ou falta de capacidade estrutural do pavimento que, pelo uso do pavimento ao longo do tempo, irá originar a abertura das fendas.</p>
<p>Fendas transversais</p> 	<p>São resultantes de uma deficiência da junta transversal de construção, da retração térmica da camada de desgaste ou da capacidade diferencial da fundação. Também pode surgir por fadiga do pavimento.</p>
<p>Fendas do tipo pele de crocodilo</p> 	<p>Todas aquelas causas que foram descritas para outras fendas anteriormente faladas, depois de evoluírem para um estado mais avançado em que estão espalhadas de forma generalizada no pavimento.</p>

A degradação de camada de desgaste (Tabela 6) reflete-se essencialmente na perda de qualidade superficial da camada de desgaste, devido a evolução da própria camada, resultante da falta de

estabilidade da ligação entre os materiais constituintes da mistura (Estradas de Portugal, 2008). Os principais tipos de degradações do pavimento deste tipo são a desagregação generalizada da camada de desgaste, as peladas e os ninhos.

Tabela 6: Tipos e causas de degradação de camada de desgaste em pavimentos flexíveis
(adaptado de Estradas de Portugal, 2008)

Tipos	Descrição	Possíveis causas
<p>Desagregação</p> 	<p>Arranque de uma das frações do agregado, geralmente a mais grossa, ou perda da mástique (finos, filer e ligantes betuminoso)</p>	<p>Perda do ligante betuminoso e a consequente desprendimento dos agregados grossos.</p>
<p>Pelada</p> 	<p>Desaparecimento em forma de placa da camada de desgaste, relativamente à camada inferior</p>	<p>Espessura reduzida da camada de desgaste. Deficiente ligação entre a camada de desgaste e a camada betuminosa seguinte. Falta de estabilidade da camada de desgaste.</p>
<p>Ninhos (covas)</p> 	<p>Cavidades de forma arredondada localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores.</p>	<p>Evolução de outras degradações, em particular do fendilhamento. Deficiente qualidade dos materiais da camada de desgaste ou uma zona localizada com deficiente capacidade de suporte.</p>

Por último, o movimento de materiais (Tabela 7) resulta da movimentação de materiais constituintes das camadas (betuminosas ou granulares) da fundação através das camadas do pavimento (Estradas de Portugal, 2008), que originam exsudação ou subida de finos.

Tabela 7: Tipos e causas de movimentos de materiais em pavimentos flexíveis (adaptado de Estradas de Portugal, 2008)

Tipos	Descrição	Possíveis causas
<p data-bbox="236 356 371 389">Exsudação</p> 	<p data-bbox="786 405 1074 707">Migração para a superfície do betume da camada de desgaste, em particular nas zonas de passagem dos rodados dos veículos, conferindo um aspeto negro e brilhante.</p>	<p data-bbox="1090 356 1409 752">Excesso do ligante com envolvimento dos agregados grossos e redução da macrotextura. Contaminação por rega de colagem excessiva, por ligante de reduzida viscosidade ou misturas betuminosas de reduzida estabilidade submetida a tráfego intenso e temperatura elevada</p>
<p data-bbox="236 792 427 826">Subida de finos</p> 	<p data-bbox="786 792 1058 1189">Manchas de cor esbranquiçada devido à presença de finos, provenientes das camadas granulares e do solo de fundação, aparecendo inicialmente junto as fendas, evoluindo posteriormente para toda a superfície da camada de desgaste.</p>	<p data-bbox="1090 775 1425 1200">Drenagem deficiente do pavimento, que promove a subida da água através do solo de fundação, das camadas granulares e das camadas betuminosas fendilhadas, arrastando finos ou circulação da água infiltrada nas camadas granulares através das fendas, que são expulsas dessas devido à passagem dos veículos.</p>

Para controlar o aparecimento destas patologias, procede-se à monitorização dos pavimentos rodoviários para acompanhar a evolução das suas condições funcionais e estruturais quando submetidos ao tráfego. Essa é uma das atividades relacionada com o sistema de gestão de pavimentos rodoviários na fase de construção, exploração e reabilitação. Os objetivos considerados para a monitorização de pavimentos são os seguintes (Branco *et al.*, 2008):

- Averiguar a conformidade das características de um pavimento (quer seja construído ou reabilitado) com as especificações do caderno de encargos;
- Determinar o estado funcional e estrutural do pavimento (desempenho);
- Determinar o estado de evolução do pavimento;
- Programar ações de conservação para controlo de qualidade do pavimento;
- Verificar e aperfeiçoar os métodos de dimensionamento;
- A partir dos dados obtidos dos pavimentos e do seu tratamento, aperfeiçoar técnicas de construção/manutenção e desenvolver modelos de previsão do comportamento.

2.4. Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários

De um modo geral, a auscultação dos pavimentos ao longo da vida útil da infraestrutura rodoviária tem como objetivo principal a verificação objetiva da conformidade das características dos pavimentos com as especificações dos cadernos de encargos (Estradas de Portugal, 2014), permitindo aos utentes a circulação em condições compatíveis com os níveis de qualidade mínimos exigidos em termos de segurança e comodidade, entre outros fatores. Para além da observação visual, atualmente com recurso a modernos equipamentos de imagem digital e informatizados, a avaliação do estado da superfície dos pavimentos passa pelo recurso a equipamentos, mais ou menos sofisticados, para observação e auscultação dos pavimentos, eventualmente apoiados em normas ou especificações de ensaio (Neves, 2009).

De acordo com Bennett *et al.* (2006) existem três grupos de sistemas usados para registrar as degradações de pavimentos. As técnicas de observação visual manuais baseiam-se em operadores que observam visualmente as degradações e depois registram os dados em papel ou usam alguma forma de apoio computadorizado. As técnicas de imagem envolvem tirar fotografias da superfície, de forma discreta ou contínua, para depois analisar as imagens para relatar as degradações da superfície. Os perfilómetros usam técnicas de laser ou acústicas para medir deformações, e são mais utilizados para avaliar esse tipo de degradação.

2.4.1. Observação visual da degradação superficial de pavimentos

A observação visual pode ser realizada através de um operador, que se desloca a pé (fundamentalmente para análise de situações pontuais) ou a bordo de um veículo em marcha lenta devidamente equipado para o efeito. Esta última hipótese é a mais utilizada para avaliação de grandes extensões de pavimento, ou seja, a nível da rede rodoviária. O operador observa a superfície do pavimento, e regista os diferentes tipos de degradações e o seu respetivo nível gravidade (Alves, 2007).

O procedimento associado à observação visual de pavimentos possui uma componente de subjetividade, que pode comprometer a fiabilidade dos resultados obtidos. Com a preocupação de reduzir a subjetividade, e de aumentar a fiabilidade do processo de observação, são, geralmente, efetuadas ações de formação para os operadores, de modo a sistematizar conhecimentos técnicos, nomeadamente, dos diferentes tipos de degradações dos pavimentos, fases do seu desenvolvimento (níveis de gravidade), e definição de critérios de observação e de registo (Estradas de Portugal, 2005).

Segundo Pereira e Miranda (1999), de forma a obter-se uma maior fiabilidade e homogeneidade nos resultados neste tipo de avaliação, existem documentos de referência que devem ser utilizados pelos técnicos responsáveis nesta avaliação. Os catálogos de degradações (Estradas de Portugal, 2008) são parte integrante da maioria dos sistemas de avaliação da qualidade de pavimentos, os quais devem conter a seguinte informação:

- Definição e descrição do tipo de degradação para auxiliar na identificação das mesmas;
- Definição dos níveis e classes de gravidade, de modo a quantificar as degradações;
- Indicação dos procedimentos de medição ou avaliação das degradações;
- Indicação das causas possíveis e respetivas potenciais evoluções;
- Fotografias das degradações.

Com o advento dos PDAs (assistentes pessoais digitais, ou seja, computadores de pequena dimensão e elevado desempenho) de baixo custo, muitas organizações transferiram seus métodos de registo de degradações em papel para métodos eletrónicos. Isso tem grandes vantagens, pois permite uma melhor garantia de qualidade dos dados. Além disso, ao integrar os recetores de GPS no PDA, a referência de localização dos dados é significativamente melhorada (Bennett *et al.*, 2006).

2.4.2. Observação visual com apoio informático

Atualmente, a observação visual com suporte em papel tem vindo a ser substituída pela observação visual com registo em sistema informático. A metodologia de observação visual assistida por computador compreende a utilização de um microcomputador com os programas informáticos de controlo, aquisição e restituição da informação necessários, além de um sistema de medição da distância percorrida (Branco *et al.*, 2008).

O Viziroad é um dos exemplos destes métodos e basicamente é um sistema de aquisição de dados que apoia a observação visual dos pavimentos rodoviários, baseado num *software* específico suportado por um computador portátil. As distâncias são obtidas através de sensores instalados no veículo utilizado para fazer o levantamento e que lidas pelo *software*. As degradações observadas são introduzidas através de dois teclados (Figura 4) acoplados ao computador que são utilizadas por dois operadores, um em cada teclado. Os teclados foram formatados para todas as necessidades de levantamento previamente definidas. O *software* para além do reconhecimento das introduções efetuadas, automáticas ou através dos teclados, trata

da informação numa forma que depois serve a sua colocação em bases de dados rodoviárias (Picado Santos *et al.*, 2006).



Figura 4: Equipamento utilizado no método Viziroad (Picado Santos *et al.*, 2006).

Geralmente, a observação visual do pavimento com este equipamento é efetuada a baixa velocidade, de modo a possibilitar o reconhecimento das patologias pelo operador. A observação efetuada pelo operador consiste em indicar o tipo de patologia, nível de gravidade e a sua extensão, premindo as teclas correspondentes, podendo ainda registar eventuais considerações que considere necessárias (Alves, 2007).

2.4.3. Observação de pavimentos com apoio fotográfico

Imagens analógicas e digitais podem ser usadas para registar e quantificar fendilhamento e degradações de superfície em pavimentos. Os sistemas consistem em uma unidade de captação de imagem que grava imagens estáticas ou contínuas do pavimento (em filme ou digitalmente) e um meio de analisar as imagens (manual ou automático). Uma vantagem dos sistemas automáticos é sua repetibilidade, pois ao eliminar o elemento subjetivo de identificação da degradação, pode-se obter medições mais consistentes e repetíveis. O custo inicial deste equipamento é alto, especialmente ao utilizar iluminação suplementar (Bennett *et al.*, 2006).

A observação de pavimentos com base em imagens fotográficas ou de vídeo tem a grande vantagem das mesmas poderem ser verificadas várias vezes antes de ser tomada qualquer

decisão dentro de um espaço de tempo. As imagens são efetuadas de acordo com as referências geográficas dentro das extensões de cada pavimento em análise. De acordo com o número de imagens tiradas, serão posteriormente analisadas por técnicos no laboratório (Alves, 2007).

Os sistemas analógicos já são usados há algum tempo na observação de pavimentos. Agora a tendência é digitalizar as imagens analógicas. O sistema analógico foi inicialmente preferido ao digital devido à maior resolução das imagens (2 mm). No entanto, a tecnologia digital atual oferece resoluções de menos de 1 mm, e por isso a maioria dos sistemas atuais é baseada em câmaras digitais. Existem dois tipos de câmaras digitais usadas para gravação das degradações: i) varrimento de área, e; ii) varrimento de linha. A maioria dos sistemas usa câmaras de varrimento de área, nas quais uma matriz de *pixels* (de forma retangular) fornece uma visão de um objeto com comprimento e largura. Com uma câmara de varrimento de linha, a matriz a analisar contém apenas uma única linha de *pixels* (dessa forma oferece as imagens mais precisas e elimina potencialmente a necessidade de iluminação suplementar). A resolução da câmara determina o tamanho da degradação que pode ser observada (Bennett *et al.*, 2006).

Wang (2004) refere que não é simples analisar imagens digitais de pavimentos para identificação de fendilhamento. Mesmo inspeções visuais com diferentes operadores podem não gerar resultados consistentes para fendilhamento. Além disso, é fundamental que se faça um exercício de validação ao implementar sistemas automáticos de identificação de degradações em novos pavimentos.

O *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) desenvolveu em França um dos primeiros sistemas de observação de pavimentos com base em imagens analógicas, o sistema Gerpho (Figura 5), com o intuito de conduzir a uma observação mais precisa e objetiva das degradações com um elevado rendimento de levantamento. O Gerpho é um equipamento constituído por um veículo munido de uma câmara fotográfica de 35 mm (0,5 mm de resolução), de saída contínua, apoiada num suporte mecânico de modo a permitir fotografar o pavimento na vertical (Branco *et al.*, 2008). A velocidade de observação ideal deste sistema situa-se entre os 50 a 70 km/h. O avanço do filme é condicionado por um dispositivo de sincronização com a velocidade do veículo (SACR (2007) *apud* Alves (2007)).

O veículo utilizado no Gerpho tem uma fonte luminosa que se ajusta à velocidade do veículo, com projetores inclinados 35° em relação ao pavimento de forma a melhorar a visibilidade das fendas em comparação com uma iluminação vertical. De preferência o levantamento deverá ser

efetuado durante a noite para se obter uma luminosidade constante do pavimento (SACR (2007) *apud* Alves (2007)).

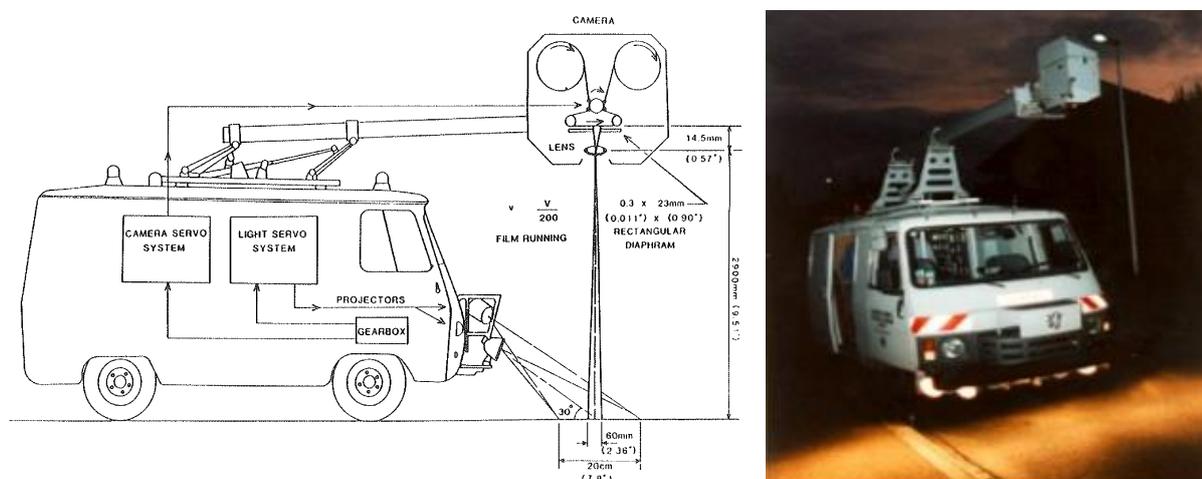


Figura 5: Esquema do equipamento Gerpho (Hudson *et al.*, 1987) e câmara do sistema Gerpho em posição de observação (SACR (2007) *apud* Alves (2007)).

A análise do filme é realizada numa consola com visor de apresentação de dois filmes ao mesmo tempo, aparecendo a imagem do pavimento no ecrã à escala 1:50. O avanço do filme é comandado manualmente, sendo analisada imagem a imagem, correspondendo cada uma à extensão de cinco metros de pavimento (Branco *et al.*, 2008). A identificação das degradações é efetuada recorrendo a um catálogo de degradações (Estradas de Portugal, 2008) à semelhança da observação visual *in situ*. Contudo este método não permite detetar degradações importantes como as rodeiras e o micro fendilhamento (Branco *et al.*, 2008).

A empresa *PASCO Corporation* do Japão também desenvolveu um dispositivo semelhante (Figura 6) para fotografar a superfície dos pavimentos em contínuo (Roadrecon). O primeiro veículo operacional foi produzido em 1970 para registo de fendilhamento e outras degradações. O veículo circula a velocidades entre 5 e 85 km/h. Um registo fotográfico contínuo da superfície do pavimento é feito com uma câmara de 35 mm. O sistema sincroniza a velocidade do filme e a abertura da câmara com a velocidade do veículo para garantir a qualidade da imagem fotográfica. A largura da estrada analisada é de 5 m. Mais tarde, uma câmara foi instalada no veículo para fotografar finas barras óticas projetadas na estrada, de modo que o sistema se tornou capaz de criar um registo fotográfico das rodeiras em intervalos de distância variável. Em seguida, o equipamento permitiu avaliar a rugosidade longitudinal por meio de uma roda de ensaio, um transformador diferencial, e um acelerómetro. Finalmente, instalou-se

um sistema automático para medir o perfil longitudinal e fazer o levantamento de rodeiras a velocidades de até 80 km/h, recorrendo a três sensores a laser montados no para-choque traseiro do veículo (Benson *et al.*, 1988).

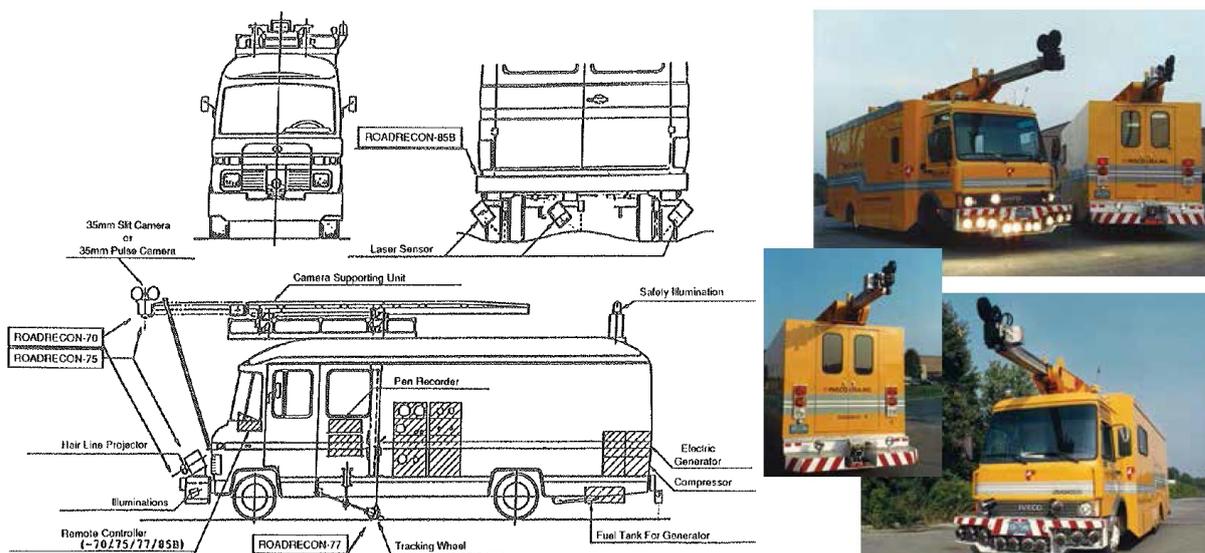


Figura 6: Esquema do equipamento Roadrecon (Benson *et al.*, 1988) e equipamento utilizado nos levantamentos (Federal Highway Administration, 2015).

Atualmente existem vários tipos de equipamentos semelhantes a estes que recorrem ao registo em fotografia ou vídeo da observação da superfície do pavimento. Bennett *et al.* (2006) apresentam exemplos de outros equipamentos para o mesmo fim que recorrem a imagens analógicas (por exemplo, o Roadware), a imagens digitais com varrimento de área (por exemplo, Samsung SDS, PAVUE, Pasco) ou com varrimento linear (por exemplo, Waylink, EVASIVA, International Cybernetics Corp.). Os vários sistemas de registo são semelhantes, pois consistem em uma ou mais câmaras suspensas acima da estrada que são frequentemente montadas em braços longos para dar melhores vistas panorâmicas. São usadas normalmente luzes para iluminar a superfície do pavimento, uma vez que isso melhora a qualidade das imagens e a precisão da deteção automática de fendilhamento. A Figura 7 mostra mais um exemplo de um veículo típico de recolha desses dados. É comum obter dados adicionais junto com as imagens de vídeo, por exemplo, rugosidade e profundidade de rodeira.

McGhee (2004) descreve como as imagens obtidas do pavimento são processadas usando técnicas manuais, semiautomáticas ou totalmente automatizadas. Os métodos manuais e semiautomáticos requerem intervenção humana, mas a intervenção pode variar muito entre os sistemas. Os sistemas totalmente automatizados identificam e quantificam as degradações sem

ou com o mínimo envolvimento humano. O WiseCrax da Roadware é o aplicativo mais usado, mas existem alternativas disponíveis com outros algoritmos e abordagens.



Figura 7: Equipamento para obtenção de imagens digitais da degradação do pavimento (Wang, 2004).

Os sistemas de reconhecimento de imagens mais sofisticados criam mapas de fendilhamento que mostram a localização precisa, a severidade e extensão das fendas. Estes sistemas podem ser usados para fazer o tratamento estatístico do fendilhamento nos pavimentos. A Figura 8 apresenta um exemplo desse tipo de *software*.

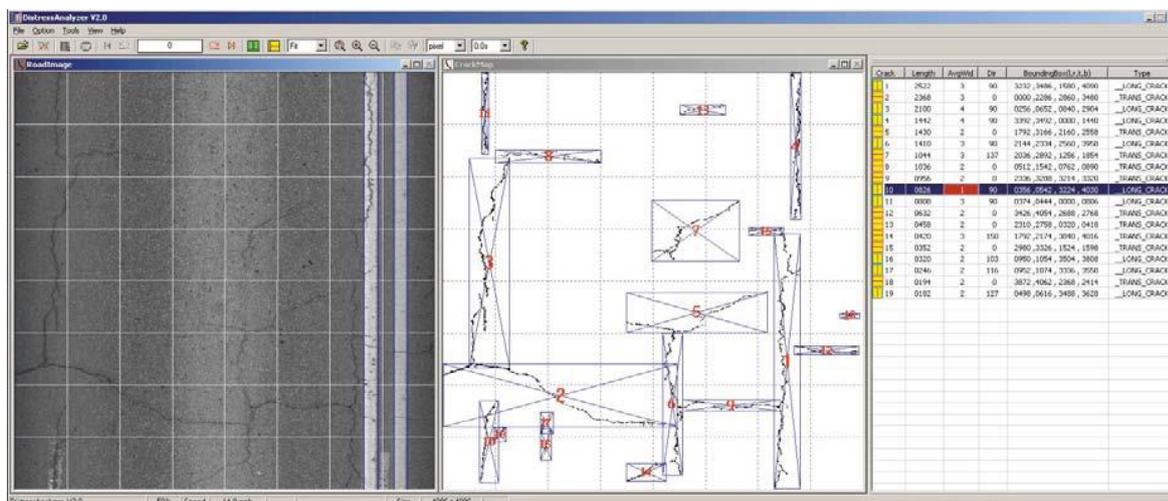


Figura 8: Exemplo de *software* de análise automática de fendilhamento (Wang, 2004).

2.5. Avaliação das características estruturais de pavimentos rodoviários

Para Balbo (2015), a avaliação estrutural consiste na caracterização dos elementos estruturais do pavimento, descrevendo o seu comportamento mediante as cargas nele exercidas, assim como a sua capacidade de suporte para as procuras futuras de cargas. Atualmente, a avaliação estrutural de pavimentos rodoviários é feita com base em métodos analíticos que se baseiam nos ensaios de capacidade de carga (Francisco, 2012).

Os ensaios de deflexão têm sido usados por engenheiros ao longo das últimas décadas para avaliar estruturalmente os pavimentos rodoviários. O princípio básico dos ensaios de deflexão é o de que a deflexão que ocorre num pavimento submetido à ação de uma carga conhecida é um bom indicador da capacidade que o mesmo tem para suportar as cargas do tráfego (Khazanovich *et al.*, 2014).

Para avaliação das deflexões vão descrever-se os seguintes equipamentos: Viga *Benkelman*, Defletógrafo *Lacroix*, Curviâmetro e Defletómetro de Impacto.

A viga *Benkelman* surgiu na década de 50, sendo desenvolvida na *Western Association of State Highway Organizations* (Pavement Interactive, 2018). A Viga *Benkelman* é um equipamento metálico simples utilizado em ensaios não destrutivos capaz de medir as deflexões que ocorrem à superfície de um pavimento, decorrentes da carga aplicada por um veículo pesado real padronizado (Figura 9). Podem ser feitas medições com esta viga em diferentes pontos ao longo de um pavimento (Lopes, 2010).



Figura 9: Ensaio com viga *Benkelman* (Pavement Interactive, 2018)

Nos anos 60, o LNEC desenvolveu um defletógrafo de pavimentos que utiliza uma viga *Benkelman* e permite registrar a linha de influência dos deslocamentos verticais da superfície de um pavimento, num determinado alinhamento, à passagem de um rodado duplo de um camião (Antunes, 1993, Fontul, 2004). O ensaio é realizado com o rodado duplo traseiro do camião, sendo colocada a viga *Benkelman* entre os dois pneus do rodado duplo.

Segundo o Vectra Esteio Rodovias (2014) o defletógrafo *Lacroix* (Figura 10) é um veículo de alto rendimento projetado para medir a deformação vertical (deflexão) em pavimentos flexíveis e semirrígidos de forma contínua e simultânea nas rodeiras interna e externa.



Figura 10: Defletógrafo *Lacroix* (Vectra Esteio Rodovias, 2014)

O defletógrafo *Lacroix* consiste em um camião comum contendo uma viga acoplada na parte inferior do seu chassi, mecanismo este composto por um dispositivo hidráulico sincronizado à velocidade de operação do camião (cerca de 3,6 km/h), fazendo simultaneamente a medição das deflexões nas trilhas externa e interna. A deflexão é medida no meio dos pneus do rodado traseiro, por dois braços munidos de sensores rotativos e articulados instalados na extremidade de uma viga de apoio, e que são os responsáveis pela leitura das deflexões através de impulsos eletromagnéticos. O veículo faz sua progressão com velocidade constante medindo a bacia de deflexão do pavimento (4,05 m) até que o rodado traseiro (8,2 tf) ultrapasse em alguns centímetros a extremidade dos braços. A deflexão máxima é medida quando o rodado traseiro se encontra exatamente na zona da extremidade do braço. O conjunto é então puxado por um sistema de tração até a sua nova posição inicial, perto do eixo dianteiro do veículo e distante (4,36 m) do ciclo anterior, para iniciar outra medição sem que o veículo interrompa o seu

movimento. As informações coletadas pelos sensores são transmitidas à central de computação na cabine do veículo, o que permite o acompanhamento em tempo real das medidas, tais como a deflexão máxima, raio de curvatura da bacia, distância percorrida, temperatura do pavimento e o gráfico da bacia de deformação (Vectra Esteio Rodovias, 2014).

O curviâmetro (Figura 11) é um equipamento que permite o registo das deflexões do pavimento a uma velocidade máxima de 18 Km/h. O equipamento de registo de dados está instalado num camião de dois eixos separados 5 metros entre si, sendo que o eixo traseiro é um eixo simples de rodado duplo com uma carga que pode variar entre 80 e 130 KN (Francisco, 2012).



Figura 11: Camião que transporta o curviâmetro (Motorpress Ibérica, 2018)

A determinação da bacia de deflexão é efetuada por um sistema mecânico formado por uma corrente posicionada entre o rodado duplo traseiro, na qual estão instalados três geofones distanciados 5 metros entre si (ao longo dos 15 metros de comprimento da corrente), que permitem o registo de uma bacia de deflexão de 5 em 5 metros. A sincronização entre a corrente e o camião é tal, que sempre que o camião percorre 15 metros a corrente realiza uma volta completa (Dominguez e Dias, 2011).

O início do registo das deflexões tem origem quando o geofone está um metro à frente do eixo traseiro e o fim de registo dá-se quando o mesmo geofone está três metros para trás do eixo traseiro, deixando o geofone de estar em contacto com o pavimento quando se encontra a uns 3,5 metros do eixo traseiro. Assim, a bacia de deflexão tem um comprimento de 4 metros. O curviâmetro dispõe ainda de registos da temperatura, quer do ar, quer da superfície do

pavimento, para cada ponto medido. Todos os resultados são obtidos em tempo real e posteriormente são processados (Francisco, 2012).

O defletómetro de impacto, *falling weight deflectometer* ou FWD (Figura 12) é um equipamento destinado a avaliar a capacidade estrutural de um pavimento através da medição da sua resposta a uma carga de impacto. A velocidade de aplicação da carga simula a passagem veículos a velocidades de 60 a 80 Km/h (Branco *et al.*, 2008). A força de impacto é transmitida ao pavimento através de uma placa de carga circular, que promove uma distribuição relativamente uniforme das pressões aplicadas à superfície. Através da variação da massa cadente, da respetiva altura de queda e das características dos amortecedores, é possível aplicar cargas com valores de pico variáveis entre 20 e 150 KN (Antunes, 1993).



Figura 12: Defletómetro de impacto da Universidade do Minho (Amorim, 2013)

O registo do assentamento da superfície do pavimento efetua-se por meio de diversos geofones distribuídos ao longo do eixo da aplicação da carga (Figura 13). O sistema que constitui o defletómetro de impacto é suportado por um reboque, que na altura de medição das deflexões é posicionado no ponto de medida. Todo o registo de dados, assim como os comandos necessários à realização do ensaio estão dentro de um veículo rebocador (Freitas, 2001).

Os transdutores utilizados para determinar a deflexão nos ensaios com este equipamento são transdutores de inércia, que medem o deslocamento a partir de uma massa de referência ligada à parte exterior do transdutor. Há três tipos de transdutores: sismómetros (transdutores de deslocamentos absolutos), geofones (transdutores de velocidade) e acelerómetros (Domingos, 2009). Os resultados obtidos com recurso a ensaios efetuados com o defletómetro de impacto são bastante fiáveis, e os próprios ensaios são efetuados rapidamente e com elevado rendimento,

tendo em conta a condição estacionária deste procedimento, embora a carga aplicada seja dinâmica (Antunes, 1993).

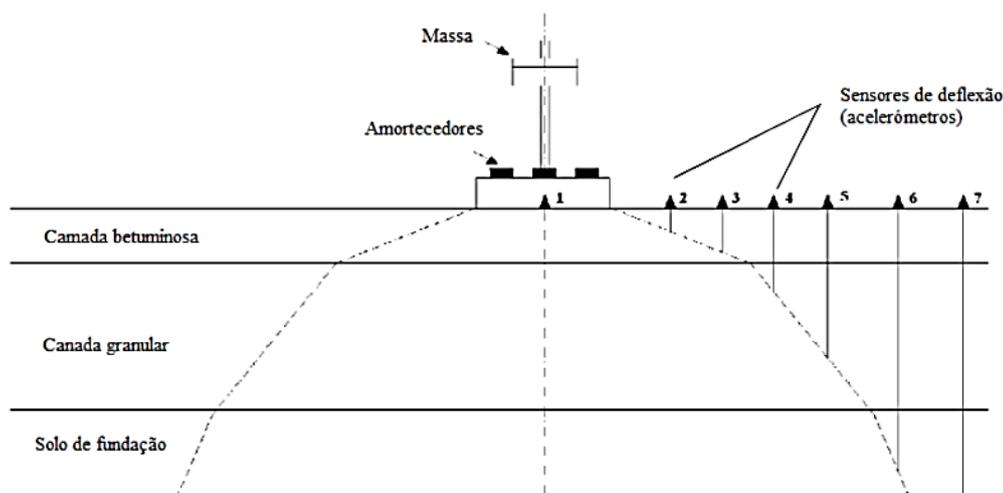


Figura 13: Representação do defletômetro de impacto e zonas de tensão (Freitas, 2001).

2.6. Avaliação das características funcionais de pavimentos rodoviários

Apesar de se tratar de um parâmetro de difícil observação no que à fiabilidade dos resultados diz respeito, a avaliação funcional dos pavimentos é uma componente imprescindível a qualquer sistema de gestão de pavimentos (Pereira e Miranda, 1999).

As camadas de desgaste dos pavimentos rodoviários devem assegurar uma superfície adequada à circulação dos veículos com comodidade, economia e segurança. É esta a principal função que no projeto deve ser atribuída a estas camadas, mais do que a função estrutural que compete às camadas inferiores de base e sub-base e, também, da fundação. Tendo em vista a segurança do tráfego, entre as diversas características correntemente atribuídas à superfície dos pavimentos, destacam-se as seguintes (Neves, 2009):

- características de resistência à derrapagem, isto é, aquelas que permitem ter maior aderência dos pneus dos veículos à superfície dos pavimentos;
- características de drenagem superficial, isto é, aquelas que garantam um rápido escoamento da água superficial, evitando-se assim fenómenos de hidroplanagem por perda de aderência entre os pneus e a superfície do pavimento;
- características geométricas do perfil transversal e da superfície do pavimento relacionadas com a regularidade, o desempenho e a ausência de deformações permanentes.

A avaliação funcional tem o objetivo de definir a qualidade global do pavimento, nomeadamente ao nível do conforto e da segurança que o mesmo transmite aos seus utilizadores. Assim, na caracterização funcional dos pavimentos rodoviários geralmente faz-se uma avaliação dos seguintes parâmetros funcionais (Maia, 2012):

- Irregularidade longitudinal (IRI);
- Regularidade transversal;
- Coeficiente de atrito;
- Textura superficial.

A textura e o atrito da superfície da camada de desgaste as propriedades que têm influência mais direta na segurança de circulação dos veículos, sendo esses os elementos principais a serem alvo de avaliação constante (Neves, 2009).

A textura compreende diferentes categorias consoante a amplitude e o comprimento de onda das irregularidades ou ondulações de um perfil da camada de desgaste (PIARC, 2003). A Figura 14 mostra a classificação das irregularidades do pavimento: microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidades (ondas pequenas, médias e grandes). É no domínio da microtextura e da macrotextura que o desenvolvimento das forças de atrito na interface de contacto pneu-pavimento é maior e, portanto, é ao nível destas duas categorias que deve ser entendida a interação com os veículos na resistência à derrapagem. A textura tem ainda influência noutros fenómenos de interação dos veículos com os pavimentos, como por exemplo o ruído e as vibrações transmitidas ao veículo (Kraemer Heilperno *et al.*, 2004).

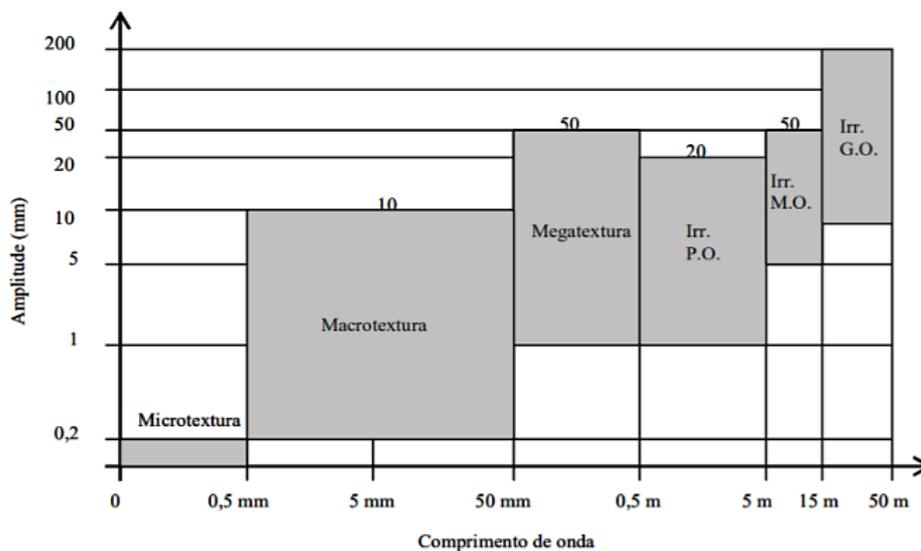


Figura 14: Classificação da textura dos pavimentos (PIARC, 2003).

A profundidade média de textura (MTD, *Mean Texture Depth*) é um parâmetro que assume elevada importância na caracterização da textura de um pavimento e pode ser determinado recorrendo à técnica volumétrica da mancha ou, indiretamente, a ensaios com o perfilómetro laser. O perfil levantado pelos equipamentos perfilómetros proporciona a determinação da profundidade média de perfil (parâmetro MPD, *Mean Profile Depth*), que é relacionável com a profundidade da textura superficial de um pavimento obtida nos métodos volumétricos. O valor de MPD é uma estimativa do valor médio de profundidade, referente à macrotextura, tendo em conta a análise de segmentos. Com base no valor de MPD pode ser estimada a profundidade de textura superficial (ETD, *Estimated Texture Depth*), o que torna possível a comparação com os valores de MTD obtidos pela técnica volumétrica da mancha (Alves, 2007).

O atrito mobilizado pelo contacto entre o pneu e a superfície do pavimento (aderência) é dos parâmetros mais importantes para a segurança dos utentes, já que de acordo com estatísticas feitas em vários países, a falta de aderência é dos principais responsáveis pela alta percentagem de acidentes ocorridos. Torna-se muito importante a avaliação do atrito na monitorização e manutenção de pavimentos de modo a poder proporcionar-se aos utentes um adequado nível de segurança (Pinto, 2003).

A medição do atrito proporcionado pela superfície de uma camada de desgaste realiza-se em geral segundo três métodos (Branco *et al.*, 2008):

- Medição do atrito pontual, sem utilização de pneu;
- Medição do atrito longitudinal em contínuo, com pneu bloqueado;
- Medição do atrito transversal em contínuo, com pneu livre.

Estes métodos de medição baseiam-se na passagem sobre o pavimento de uma roda ou deslizador de borracha, que se move com velocidade variável ou constante. De modo a simular a situação mais desfavorável, a medição do coeficiente de atrito deve ser feita com o piso molhado com uma película de água uniforme sobre a superfície a ensaiar (Pinto, 2003).

O pêndulo britânico é um dos equipamentos mais simples e economicamente viáveis, para avaliar as características pontuais de aderência de um pavimento, sendo extremamente versátil na aplicação em laboratório ou *in situ* (Lee *et al.*, 2005). Este equipamento permite a medição pontual do coeficiente de atrito longitudinal cinemático, através da avaliação da energia absorvida por atrito, quando uma superfície de borracha do pêndulo (fixada na extremidade do braço do pêndulo) desliza sobre o pavimento, ou sobre uma amostra de material a ensaiar,

avaliando-se desse modo o parâmetro PTV (*Pendulum Test Value*) da superfície do pavimento que é especificado no caderno de encargos da Estradas de Portugal (2014).

A medição do atrito em contínuo é feita através de pneus acoplados a veículos de ensaio que se deslocam a determinada velocidade. Na medição do atrito transversal, com maior interesse em pavimentos rodoviários, são utilizados veículos de ensaio com roda que faz um certo ângulo com a direção do deslocamento. O SCRIM (*Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine*) é equipamento mais utilizado e aplica um ângulo de 20°, medindo o atrito de um pneu liso no contacto com a superfície do pavimento molhada na zona de contacto por uma lâmina de água de 0,50 mm. Nesse ensaio mede-se o coeficiente de atrito transversal, ou seja, a razão entre a força medida na horizontal, perpendicular ao plano da roda, e a ação vertical de 200 kg normal ao pavimento (Neves, 2009).

A observação da regularidade longitudinal dos pavimentos recorre a equipamentos que diferem entre si nas técnicas e princípios de medida, que também se aplicam na observação da regularidade transversal: equipamentos de referência geométrica, como as tradicionais réguas; equipamentos baseados na resposta dinâmica dos veículos; e os equipamentos baseados na obtenção de “imagens” do perfil da superfície do pavimento (perfilómetros). Estes últimos equipamentos, de maior rendimento e fiabilidade, são os mais utilizados atualmente, dispondo-se de uma gama diversificada, desde os mais simples até aos mais complexos e com maior fiabilidade, como são os que utilizam técnicas laser (Neves, 2009). A medição da irregularidade longitudinal não passa apenas pelo levantamento do perfil mas fica completa com a posterior determinação de índices de regularidade do perfil medido. O IRI (*International Roughness Index*), desenvolvido pelo Banco Mundial, é atualmente o índice mais utilizado e também é especificado no caderno de encargos da Estradas de Portugal (2014).

3. TRECHO DE ESTUDO E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1.Introdução

Em cumprimento com os objetivos iniciais deste trabalho, no qual se pretende estudar diferentes métodos de observação do estado superficial de um pavimento, com especial enfoque no desenvolvimento e otimização de um sistema com apoio fotográfico, numa fase inicial foi necessário selecionar um trecho experimental de estudo. Nesse sentido, foi selecionado um pequeno trecho rodoviário localizado no interior do Campus de Gualtar da Universidade do Minho, em Braga.

Em seguida procedeu-se à caracterização funcional do pavimento desse trecho experimental, dado que algumas características da superfície do pavimento, tais como a irregularidade, podem ter influência nos resultados posteriores obtidos durante a observação do estado superficial com apoio de equipamento fotográfico.

Dado que a observação do estado superficial de pavimentos se consiste na observação das patologias existentes e seu nível de gravidade, considerou-se importante descrever as patologias encontradas no trecho em estudo, com apresentação de imagens do próprio trecho que permitam compreender, em especial, qual a forma como foram definidos os níveis de fendilhamento em análise no Capítulo 4 desta Dissertação. De facto, foi dada uma maior importância ao fendilhamento por ser esse o principal objeto de estudo neste trabalho (dada a dificuldade em reconhecer outras patologias do tipo deformação com o método fotográfico, e pela ocorrência mais aleatória e esporádica de outros tipos de patologias).

Por último são apresentadas os métodos de observação do estado superficial do pavimento utilizados neste trabalho, bem como as condições em que foram realizados e os equipamentos necessários para realização dos levantamentos. Inicialmente descreve-se o levantamento visual do pavimento efetuado a pé e com registo em papel. Depois descreve-se o levantamento visual efetuado no veículo com apoio computacional. Por último apresentam-se as várias condições em que foi realizado o levantamento com apoio fotográfico, bem como os equipamentos necessários para sua realização (por exemplo, diferentes câmaras utilizadas, sistema artificial de iluminação, entre outros).

3.2. Trecho experimental selecionado para o estudo

O trecho experimental selecionado para o estudo corresponde à zona de circulação automóvel no Campus de Gualtar da Universidade do Minho, e foi selecionado para garantir que os diversos ensaios podiam ser efetuados em condições de fluxo automóvel mais controladas. No entanto, a elevada presença de peões neste Campus Universitário implica a existência de várias passadeiras, quase sempre acompanhadas de lombas utilizadas como medida de acalmia para proteção dos peões. Assim, é expectável que o trecho em estudo seja bastante irregular. Este fator foi ponderado antes da seleção deste trecho de estudo, optando-se por manter esta escolha para realizar os ensaios com registo fotográfico em condições mais exigentes.

O tipo do pavimento existente no trecho é o mais tradicional, ou seja, é um pavimento flexível com camada de desgaste em betão betuminoso. O pavimento deste trecho tem diferentes níveis de degradação ao longo da sua extensão, o que foi outra razão de interesse para seleção do mesmo quando se pretende realizar um estudo do estado superficial.

Após uma observação no local foi possível constatar que algumas razões que estarão na origem dessas degradações são o subdimensionamento da estrutura em alguns locais (há zonas em que as guias dos passeios mostram que aparentemente não foi aplicada a camada de desgaste que estaria prevista) ou a falta de qualidade do pavimento no que diz respeito à execução das camadas e aos materiais aplicados. Além disso, diversas intervenções foram surgindo ao longo do tempo (por exemplo, aberturas da valas para realização das outras obras, com uma inadequada reparação final do pavimento devido à sua má compactação final) e também foram sendo realizadas reparações localizadas com qualidade variável.

De referir ainda que este trecho é o caminho principal para o uso dos transportes ligeiros e pesados de mercadorias dentro da Universidade do Minho, embora não haja uma grande frequência de veículo pesados (que apenas circulam no Campus quando este é o destino inicial ou final da sua viagem, e em especial para fornecimento diário da Cantina).

Na Figura 15 apresenta-se uma imagem de satélite do Campus de Gualtar da Universidade do Minho, onde é identificado o trecho experimental com uma linha contínua. As extremidades do trecho resultaram da existência de barreiras dos parques que impediam a continuação da circulação automóvel (o que limitava a realização de alguns ensaios). A extremidade A do trecho fica na zona Sudoeste do Campus, junto à entrada principal da Universidade, na parte de trás da cabine dos seguranças (imediatamente antes de uma passadeira). A extremidade B do

trecho fica na zona Este do Campus, no alinhamento do trecho com a entrada do parque de estacionamento P1.

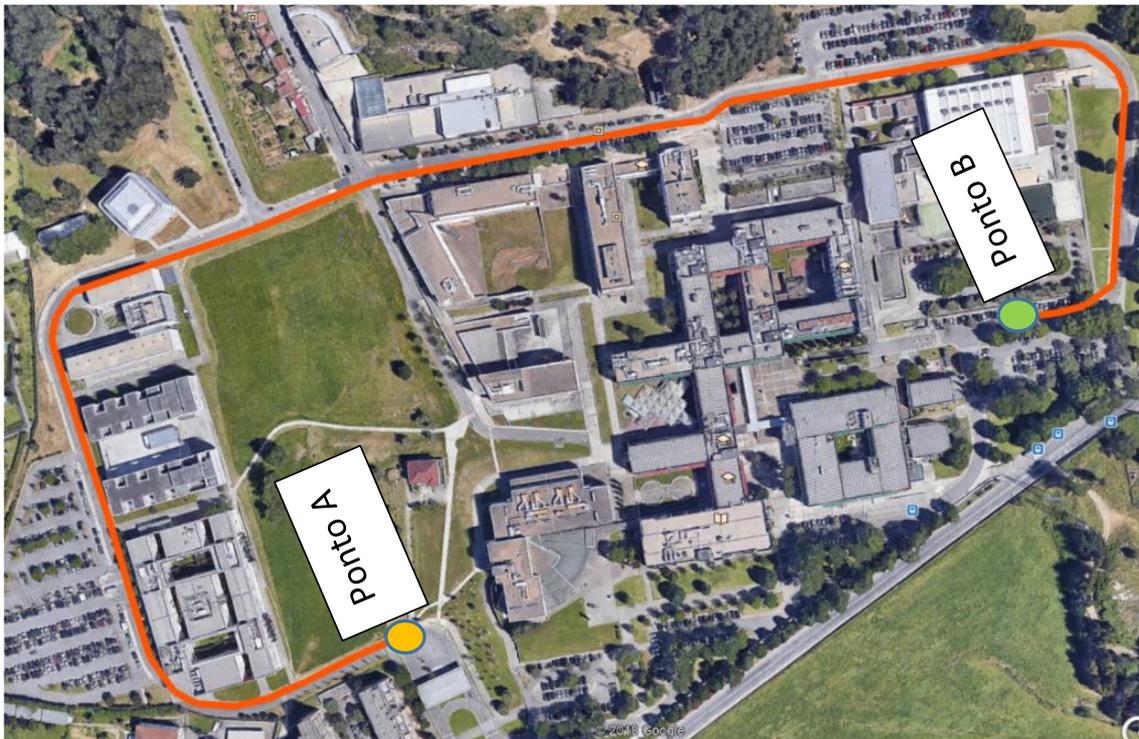


Figura 15: Imagem de satélite do Campus de Gualtar da Universidade do Minho, com identificação do trecho experimental e das suas extremidades (pontos A e B).

Os diversos levantamentos do estado superficial do pavimento deste trecho foram realizados nos dois sentidos de tráfego. Assim, instituiu-se que o sentido 1 de levantamento começava no ponto A e terminava no ponto B, enquanto o sentido 2 de levantamento era realizado na via contrária, iniciando no ponto B e terminando no ponto A.

Em termos médios, verificou-se que o trecho experimental tem uma extensão de aproximadamente 1120 m. No entanto, nos vários levantamentos foram utilizados diferentes equipamentos para medição da distância (a pé com o odómetro, e no veículo com um sistema integrado na roda e calibrado para registo do mesmo no computador). Além disso, os trajetos a pé e de carro são diferentes, bem como as distâncias no sentido 1 ou 2 (todas as curvas são para o mesmo lado, o que aumenta um pouco a distância no sentido 2). Assim, em alguns casos podem ser apresentadas distâncias totais um pouco diferentes da referida anteriormente. Esta situação também pode ter originado ligeiros desajustes ao fazer a comparação dos diferentes métodos de levantamento, aumentando um pouco os erros associados.

Outra razão para seleção deste trecho foi a existência de várias zonas de mudança de luz para sombra e vice-versa (em especial nos locais onde o trecho fica perto dos vários edifícios do Campus, e em alturas do ano com maior luminosidade natural como a Primavera e o Verão), zonas onde o contraste das fendas com o pavimento é menos evidente e zonas mais irregulares do pavimento onde a focagem das fotografias seja mais difícil devido à vibração da câmara instalada no veículo. Estes condicionantes obrigam a realizar o levantamento fotográfico do estado superficial do pavimento em condições mais exigentes, o que é fundamental para compreender as limitações do método para a utilização mais generalizada na rede rodoviária.

3.3. Caracterização funcional do pavimento do trecho experimental

Neste trabalho o objetivo principal consiste em avaliar o estado superficial do pavimento do trecho experimental anteriormente referido, com um enfoque especial na avaliação do nível de fendilhamento visível à superfície.

No entanto, também se considerou importante proceder à caracterização funcional desse pavimento, e em especial da regularidade do perfil longitudinal e da textura. De facto, estas características superficiais do pavimento (em especial a regularidade) podem influenciar a qualidade das imagens recolhidas com suporte fotográfico ou interferir na avaliação posterior dessas imagens. Além disso, a textura da superfície também pode dificultar a observação de algumas fendas, em especial se a mistura de desgaste for muito rugosa.

O equipamento utilizado neste trabalho para caracterização da regularidade longitudinal e da textura é um equipamento do tipo “Multifunções”, da Universidade do Minho e da Universidade de Coimbra, e que foi desenvolvido pela *Dynatest* (Dinamarca). A nível internacional este equipamento é denominado de *Road Surface Profiler* (RSP) pela capacidade que tem de avaliar o perfil da superfície do pavimento em análise.

Este equipamento é composto por uma barra rígida que se encontra fixada no para-choques dianteiro de um veículo (Figura 16), por um sistema de medição da velocidade fixado numa das rodas e por um sistema de aquisição, controlo e tratamento de dados. A barra rígida é dotada de 5 lasers, 2 acelerómetros e de um sensor inercial de movimento os quais permitiram medir:

- o perfil longitudinal ao longo das roldanas esquerda e direita e entre estas duas, bem como a irregularidade longitudinal, definida pelo índice internacional de irregularidade

que na terminologia anglo-saxónica é designado por *International Roughness Index* (IRI), ao longo das rodeiras esquerda e direita e entre estas duas;

- a macrotextura do pavimento, definida pela profundidade média do perfil (MPD), ao longo das rodeiras esquerda e direita.



Figura 16: Barra fixa utilizada no veículo de ensaio para a medição da irregularidade (IRI) e da macrotextura (MPD).

O sistema de aquisição, controlo e tratamento de dados garante a fiabilidade dos resultados para velocidades de ensaio superiores a 20 km/h e inferiores as 120 km/h. Todavia, não devem ser realizadas medições com a superfície do pavimento molhada devido à interferência da água nas medições realizadas pelos lasers.

3.3.1. Caracterização da regularidade longitudinal

O índice internacional de irregularidade (IRI) foi definido pela primeira vez no fim dos anos 1970 nos Estados Unidos, tendo sido depois simplificado e normalizado pelo Banco Mundial na norma ASTM E1364-95 (2017).

A definição matemática deste índice é fundamentada no modelo do “quarto de veículo”, tal como descrito por Gillespie *et al.* (1980) e apresentado na Figura 17. O IRI é um indicador que descreve os movimentos da suspensão de um quarto do veículo, submetido às solicitações devidas aos defeitos de regularidade de um pavimento, quando o quarto de veículo se desloca a uma determinada velocidade.

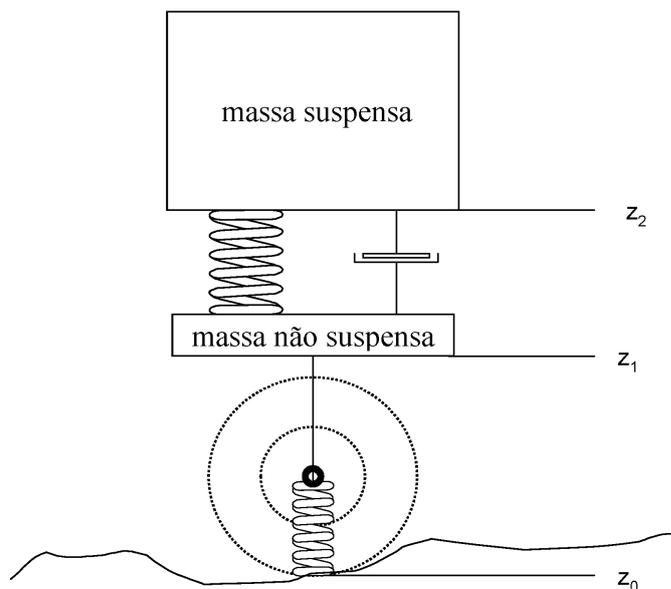


Figura 17: Modelo conceitual “quarto de veículo” utilizado para o cálculo do IRI (adaptado de Gillespie *et al.*, 1980).

Os dados considerados pelo modelo são um conjunto de informações que descrevem as constantes das molas e amortecedores, assim como da massa suspensa (corpo do veículo) e não suspensa (pneu), que atuam sobre o pavimento. A definição do índice IRI é dada pela Equação 1, sendo B é a base de cálculo (comprimento em metros), x a abscissa sobre o perfil e z a diferença de cotas.

$$IRI = \frac{1}{B} \times \int_1^B |z_2(x) - z_1(x)| dx \quad (1)$$

O IRI é medido a partir do perfil longitudinal e tem por unidade m/km, pois este representa os deslocamentos acumulados da suspensão de um veículo tipo, simulados pelo modelo de “quarto de veículo”, os quais são divididos pela distância percorrida durante o ensaio.

O Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (2014) adotou o IRI para a classificação dos pavimentos quanto à regularidade longitudinal. Na Tabela 8 apresentam-se os limites de IRI admissíveis, para uma base de cálculo de 100 metros, e a correspondente percentagem mínima da extensão para camadas de desgaste betuminosas.

Entretanto, na Tabela 9 apresentam-se os cinco níveis de classificação e a correspondente descrição dos limites a cumprir, que servirão de base para classificar a regularidade do trecho experimental em estudo.

Tabela 8: Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100 metros, em camadas de desgaste de pavimentos (Estradas de Portugal, 2014)

Valor de IRI (m/km)	Percentagem da extensão da obra
$\leq 1,5$	50%
$\leq 2,5$	80%
$\leq 3,0$	100%

Tabela 9: Classificação dos valores do IRI em pavimentos (Estradas de Portugal, 2014)

Classificação	Condições a cumprir
Muito Bom	Excede largamente os parâmetros exigidos
Bom	Cumprer os parâmetros exigidos exceção feita à percentagem da extensão do traçado com valores inferiores a 3,0, que deverá ser superior ou igual a 95%
Razoável	Cumprer os parâmetros exigidos, exceção feita à extensão do traçado com valores inferiores a 1,5 e 3,0, onde se admitem respetivamente percentagens de 40 e 90%
Medíocre	Não cumprir as exigências anteriores, mas apresentar valores de IRI de 1,5, 2,5 e 3,0, respetivamente, em mais do que 15, 60 e 85% do traçado
Mau	Não cumprir os parâmetros exigidos nas classificações anteriores

3.3.2. Caracterização da macrotextura

A textura da superfície de um pavimento é determinante para fatores tais como a produção de ruído resultante da interação pneu/pavimento, o atrito entre os pneus e a estrada, a resistência de rolamento e o desgaste dos pneus. Neste trabalho, avaliou-se a textura para posteriormente se poder compreender a sua eventual influência na observação superficial do pavimento, tendo em consideração que uma macrotextura muito elevada poderá dificultar a observação de algumas fendas mais fechadas (em especial no método fotográfico) que existam no pavimento.

O método da “mancha volumétrica”, também designado por “mancha de areia”, tem sido utilizado como o valor representativo da textura da superfície (EN 13036-1, 2001). Este método baseia-se no espalhamento sobre uma superfície de um determinado volume de areia ou de esferas de vidro, de modo a formar uma mancha circular, medindo-se o respetivo diâmetro. Através da divisão do volume do material espalhado pela área da superfície resultante obtém-se um valor que representa a profundidade média da camada de areia ou de esferas de vidro, isto é a profundidade média da textura (*Mean Texture Depth*, MTD).

A partir dos desenvolvimentos das técnicas de medição sem contacto do perfil de uma superfície, passou a ser possível substituir as medições de mancha volumétrica pelas medições resultantes do registo de perfis (EN ISO 13473-1, 2004). Um perfil de uma superfície é uma representação bidimensional, gerada por um sensor laser que atinge continuamente a superfície do pavimento, à medida que é movido ao longo do mesmo. Este método é adequado para determinar a profundidade média do perfil (*Mean Profile Depth*, MPD) da superfície do pavimento. A profundidade média de um perfil com um determinado comprimento de cálculo corresponde à média dos valores obtidos em perfis individuais nele contidos cuja linha de base deve ter 100 ± 10 mm de comprimento (Figura 18).

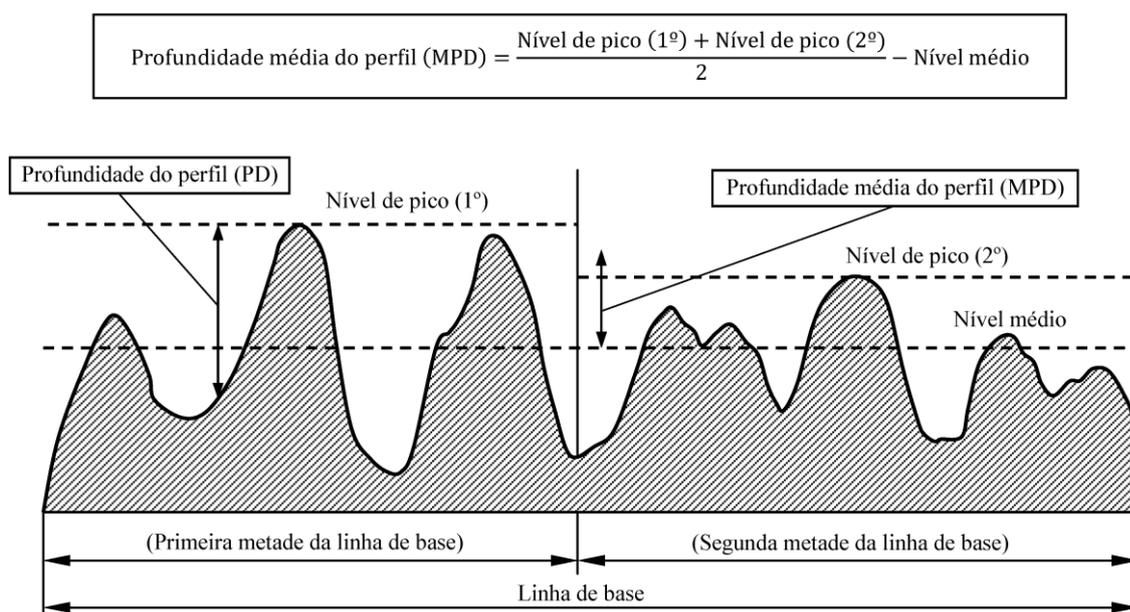


Figura 18: Ilustração dos termos comprimento de base, profundidade do perfil (PD), profundidade média do perfil (MPD) (adaptado de EN ISO 13473-1, 2004)

Em cada perfil individual, o nível de pico mais elevado sobre cada metade da linha de base deverá ser identificado. De seguida faz-se a média aritmética dos níveis dos dois picos à qual se subtrai o nível médio (do perfil).

A Profundidade Média do Perfil (MPD) pode ser convertida numa quantidade que estima a profundidade da macrotextura de acordo com o método volumétrico da mancha. Quando a Profundidade Média do Perfil é usada para calcular a Profundidade Média da Textura (MTD) denomina-se Profundidade Estimada da Textura (*Estimated Texture Depth*, ETD). O valor de MPD (em milímetros) pode ser transformado em ETD (em milímetros) aplicando a Equação 2.

$$ETD(\text{mm}) = 0,2 \text{ mm} + 0,8 \times MPD(\text{mm}) \quad (2)$$

O Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (2014) preconiza limites mínimos para a profundidade média da textura (MTD). Dado que neste trabalho apenas se determinou a textura com o equipamento “Multifunções”, que só permite determinar o valor de ETD, vai-se considerar estes mesmos limites para essa propriedade. Dado que o trecho em estudo tem betão betuminoso na superfície do pavimento, o limite mínimo especificado é 0,6 mm para este estudo. Abaixo deste limite a mistura da camada de desgaste é considerada de textura muito lisa, sendo muito rugosa quando o valor de ETD é muito superior a 1,0 mm.

Para a caracterização da textura superficial da camada de desgaste, o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (2014) preconiza a sua medição em contínuo e pontual, recorrendo a equipamentos tipo laser e através do método da “mancha de areia”, respetivamente. Neste trabalho apenas foi possível realizar a medição em contínuo. Para a medição da textura em contínuo foi utilizado o equipamento do tipo Multifunções descrito anteriormente. A profundidade média do perfil foi calculada em perfis com 10 m de comprimento ao longo das rodeiras direita e esquerda das vias do trecho em estudo.

3.4. Caracterização geral das degradações do pavimento do trecho experimental

Numa fase inicial fez-se uma avaliação geral das zonas mais críticas do trecho em que existe maior estado de degradação (Figura 20), embora a avaliação mais pormenorizada do tipo e nível de degradação (em especial o fendilhamento) seja feita apenas na fase seguinte do trabalho.



Figura 19: Definição geral das zonas críticas com maior estado de degradação no trecho.

Tal como se referiu no Capítulo 2, a observação do estado superficial dos pavimentos está sujeita a um determinado grau de subjetividade, sendo importante utilizar um padrão para identificação do tipo e nível de cada patologia observada pelo operador que faz o levantamento. Nesse sentido, no desenvolvimento deste trabalho recorreu-se ao catálogo de degradações de pavimentos rodoviários da Estradas de Portugal (2008) como documento de referência para a identificação das diferentes degradações, e respetivo nível de severidade.

Neste projeto foram feitas avaliações pormenorizadas das degradações existentes na superfície do pavimento do trecho experimental e o seu nível de severidade. Dessa forma, foi possível identificar vários tipos e níveis de degradações com correspondência com o catálogo utilizado como referência. Assim, em seguida são apresentados exemplos dos principais tipos de patologias efetivamente observados no trecho e do seu nível de severidade, para uma compreensão mais correta dos resultados apresentados no Capítulo 4.

Para realização dos levantamentos foi feito um registo do nível de degradação a cada 2 metros. Os registos foram depois agrupados em cada 10 metros, arredondando-se por excesso a média dos valores registados nessa distância para considerar uma situação mais desfavorável.

Na observação do estado superficial do pavimento em estudo verificou-se que não existem algumas patologias (por exemplo, movimento de materiais). De facto, por ser o tipo de degradação com maior incidência neste trecho, e também porque a sua identificação com o método de levantamento fotográfico é mais simples e adequada, este trabalho focou-se apenas no estudo do fendilhamento (longitudinal, transversal e do tipo pele de crocodilo). Apesar disso, também se identificou, mas apenas de forma pontual, a existência de deformações localizadas, tapagem de covas e outras reparações.

Apenas no âmbito deste trabalho, e para se conseguir fazer uma leitura mais fácil da evolução do fendilhamento ao longo do trecho experimental (nomeadamente para comparação dos diferentes métodos de observação aplicados), considerou-se uma escala de zero a seis de níveis de severidade do fendilhamento. Assim, onde não havia qualquer tipo de fendilhamento considerou-se o nível zero. Nos locais onde havia fendas isoladas, longitudinais ou transversais, considerou-se níveis de fendilhamento de um a três em correspondência com graus crescentes de severidade indicados no catálogo de degradações. O fendilhamento do tipo pele de crocodilo resulta da evolução de fendas isoladas, e por isso corresponde a um grau superior de severidade das patologias do tipo fendilhamento. Assim, aos graus crescentes de gravidade (um a três) de

pele de crocodilo indicados no catálogo de degradações, foi feita uma associação neste trabalho a níveis de fendilhamento de maior severidade, respectivamente de níveis quatro a seis.

Assim, inicialmente verificou-se existir vários locais com fendilhamento longitudinal paralelo ao eixo da estrada, localizado ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos. Na Figura 20 apresentam-se exemplos dos três níveis de fendilhamento longitudinal observados no trecho experimental.



Figura 20: Diferentes níveis de fendilhamento longitudinal observados no trecho em estudo

Embora com menor frequência, também existem vários locais com fendilhamento transversal, com fendas sensivelmente perpendiculares ao eixo da estrada, isoladas ou com um espaçamento variável, abrangendo parte ou toda a largura da faixa de rodagem. Na Figura 21 apresentam-se exemplos dos três níveis de fendilhamento transversal observados no trecho experimental.



Figura 21: Diferentes níveis de fendilhamento transversal observados no trecho em estudo

Nos locais com maior nível de degradação existem vários exemplos de fendilhamento do tipo pele de crocodilo, que corresponde a fendas que formam entre si uma malha de dimensão e abertura variável, localizadas inicialmente na zona de passagem dos rodados dos veículos abrangendo progressivamente toda a largura da via de tráfego. Quanto menor a largura da malha e maior a abertura das fendas, mais severo é o nível de fendilhamento em análise. Na Figura 22 apresentam-se exemplos dos três níveis de fendilhamento do tipo pele de crocodilo observados no trecho experimental, bem como a correspondência com os níveis globais de fendilhamento considerados neste trabalho.



Pele de crocolido nível 1
(Fendilhamento nível 4)

Pele de crocolido nível 2
(Fendilhamento nível 5)

Pele de crocolido nível 3
(Fendilhamento nível 6)

Figura 22: Diferentes níveis de fendilhamento do tipo pele de crocodilo observados no trecho em estudo

No trecho em estudo também se verificou existir outros tipos de degradações em zonas mais pontuais, mas essas patologias não serão alvo de estudo de pormenor no Capítulo 4. No entanto, foram observadas deformações localizadas (Figura 23), bem como vários locais com tapagem de covas (Figura 24) e reparações (Figura 25) que aumentaram a irregularidade do trecho.



Figura 23: Exemplo de deformação localizada observada no trecho em estudo



Figura 24: Exemplos de tapagens de covas observadas no trecho em estudo



Figura 25: Exemplos de reparações observadas no trecho em estudo

Depois de realizada a identificação geral das degradações existentes no trecho experimental em estudo, apresentando exemplos dos vários níveis de fendilhamento observados, em seguida procedeu-se ao levantamento do estado superficial (neste caso, apenas o fendilhamento) do pavimento ao longo do trecho, em ambos os sentidos. Para esse fim, foram utilizados os diferentes métodos de observação apresentados em seguida.

3.5. Observação do estado superficial do pavimento através de levantamento visual

O método tradicional e que continua a ser o mais utilizado para observação do estado superficial de pavimentos consiste no levantamento visual das patologias, e é normalmente efetuado a pé para garantir uma correta e mais rigorosa identificação no próprio local.

Apesar das desvantagens associadas a este método, que é bastante lento e cansativo (pois obriga a percorrer todo o percurso a pé, ao mesmo tempo que se faz o registo das patologias em função da distância percorrida), o mesmo consegue ser bastante rigoroso desde que o operador tenha uma boa experiência na identificação das degradações (com base no catálogo de degradações que serve de referência).

Neste trabalho houve um levantamento inicial realizado pelo aluno, numa fase em que não tinha a experiência que acumulou ao longo de todo o trabalho, e um segundo levantamento realizado no final do período de Mestrado.

Dado que o segundo levantamento visual, realizado em dezembro de 2018, é o procedimento que atualmente é utilizado por grande parte das entidades que gerem a rede rodoviária nacional, e foi realizado após o aluno ter ganho a experiência necessária para esse fim, esse método servirá de referência para comparação com os restantes levantamentos efetuados neste trabalho.

No início do trabalho de Mestrado também foi efetuado um levantamento do estado superficial do pavimento do trecho experimental, em junho de 2018, numa fase em que a experiência na identificação das diversas patologias ainda era reduzida. A comparação do levantamento efetuado nas duas fases permite ter uma noção dos erros associados a essa falta de experiência do operador, que eventualmente podem ser relevantes devido à subjetividade inerente à identificação de cada patologia.

Outro aspeto a reter diz respeito à medição das distâncias, dado que cada patologia vai estar sempre associada a uma distância à origem. No levantamento visual feito a pé utilizou-se um odómetro eletrónico (Figura 26) para medição das distâncias, e esse equipamento foi utilizado ao longo do passeio ou berma mais próximos de cada via em análise. Devido à existência de algumas curvas ao longo do trecho, as distâncias medidas em cada sentido podem ser ligeiramente diferentes. Assim, também pode haver diferenças em comparação com a medição da distância efetuada pelo veículo nos levantamentos com apoio computacional ou fotográfico.



Figura 26: Odómetro eletrónico utilizado para medição das distâncias no trecho em estudo

Neste primeiro método de observação do estado superficial é possível observar o estado superficial do pavimento com mais rigor, dependendo da sensibilidade do operador, visto que se pode observar todas as patologias de perto e no próprio local sem grandes hipóteses de erro na identificação. Além disso, o método tem menores custos (ou pelo menos um menor investimento inicial) e permite tirar fotografia no local com mais qualidade para confirmação futura. No entanto, o método depende muito da sensibilidade do observador e por isso pode tornar-se pouco fiável, é um processo de levantamento e avaliação mais lento (podendo desse modo aumentar o custo do pessoal), é mais desconfortável para o operador que está sujeito as exposições ambientais e ao tráfego, o que também o torna menos seguro para o operador.

Assim, os dois métodos de levantamento apresentados em seguida (com apoio computacional ou fotográfico) são ambos efetuados numa carrinha da Universidade do Minho (Figura 27) que utiliza um computador de bordo (Figura 28) para aquisição e registo de dados dos diversos equipamentos utilizados neste estudo (por exemplo, as câmaras fotográficas, o sistema de medição da distância situado na roda de trás do lado do condutor, os diversos sensores do perfilómetro, entre outros). Esse computador permite ainda controlar os equipamentos através do operador ou de forma automática, o que permitiu garantir a aquisição de registos fotográficos automáticos a cada 2 metros em função da distância que ia sendo medida no veículo.



Figura 27: Carrinha da Universidade do Minho utilizada nos levantamentos do estado superficial do pavimento com apoio computacional ou fotográfico.



Figura 28: Computador de bordo utilizado para controlo, aquisição e registo de dados nos levantamentos do estado superficial do pavimento com apoio computacional ou fotográfico.

3.6. Observação do estado superficial do pavimento com apoio computacional

Tal como referido no Capítulo 2, é possível utilizar um sistema informático que pode ser adaptado a um veículo para simplificar e acelerar a realização do levantamento do estado superficial do pavimento assistido por computador. Esse sistema tem como objetivo fazer aquisição de dados, e é um apoio à observação visual das degradações que continua a ser feita pelo operador dentro do veículo. O sistema dispõe de dois teclados complementares onde cada tecla, através da configuração informática especificada, pode ser associada a cada tipo e/ou nível de degradação específica.

O Viziroad é o exemplo mais conhecido deste sistema, mas para o mesmo fim há outros exemplos tais como o equipamento Desy, que é apresentado na Figura 29. Na referida imagem é possível ver que o Desy tem uma zona central para colocar um portátil com monitor ao qual este sistema deve ser conectado, enquanto as zonas laterais têm teclados com correspondência às patologias que estão a ser observadas e respetivos níveis de severidade.

Como houve dificuldade em adaptar o aparelho Desy (dado que esse sistema é mais antigo) à carrinha da Universidade do Minho, o que se torna necessário para registo das distâncias associadas a cada patologia, optou-se por utilizar um *software* com um princípio semelhante desenvolvido na Universidade do Minho em ambiente *Labview* e que foi instalado no computador de bordo da carrinha, tal como se pode ver na Figura 30.



Figura 29: Equipamento do tipo Desy, da Universidade do Minho, para apoio computacional na observação do estado superficial de pavimentos



Figura 30: Sistema utilizado neste trabalho para levantamento do estado superficial do pavimento com apoio computacional e respetivo *software*

Este sistema tem a vantagem que poder ser instalado em qualquer computador portátil atual, o que permitiu associar com facilidade os resultados ao sistema de medição de distância existente na carrinha. A principal desvantagem é a inexistência dos teclados laterais (que poderão ser adaptados futuramente), o que dificulta a introdução das patologias que estão a ser observadas no pavimento de forma expedita. De facto, o operador tem de olhar para o ecrã e para o

pavimento em simultâneo para ir indicando as degradações que está a identificar, ao mesmo tempo que o veículo continua a sua marcha. Assim, a introdução do início e fim de cada patologia podem ter alguns desfasamentos em relação aos locais em que estão a ser observados, ou em alternativa tem de se fazer um levantamento com uma marcha muito lenta.

Nesse sentido, ao realizar o levantamento superficial com apoio computacional, a observação é habitualmente efetuada a uma velocidade considerada baixa (15 a 25 km/h) da maneira que o operador tenha uma observação correspondente ao tipo de patologias existentes. Além disso, o operador tem que conhecer muito bem os tipos de patologias existentes, nível de gravidade e a sua extensão, de forma que possa premir de forma expedita as teclas que correspondem a cada patologia que está a observar. No caso específico deste trabalho utilizou-se uma velocidade de levantamento de 15 km/h.

No sistema utilizado neste trabalho, embora o operador só tivesse de alterar o tipo e/ou nível de degradação quando houvesse alterações efetivas da patologia que estava a ser observada no pavimento, independentemente da distância percorrida, o sistema foi programado para guardar um registo das degradações a cada 2 metros (para poder manter o procedimento posterior de cálculo do nível de degradação em todos os métodos). Além disso, como já se referiu antes, neste trabalho apenas se fez a identificação de patologias do tipo fendilhamento.

Com base neste novo sistema de observação é possível aumentar a velocidade e o conforto com que se faz o levantamento, embora possa ser perdido algum rigor ao efetuar o levantamento devido a essa aceleração do processo. De referir ainda que este método precisa de dois operadores, o que torna o método mais dispendioso. Apesar disso, neste trabalho houve uma vantagem associada à necessidade do segundo operador, dado que o condutor do veículo tem uma elevada experiência na identificação de patologias, sendo um apoio adicional ao aluno durante o levantamento (o que em parte pode justificar alguns resultados obtidos).

3.7. Observação do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico

Este trabalho de Mestrado teve como objetivo principal a otimização do sistema fotográfico para observação do estado superficial de pavimentos, materializado neste caso apenas pela avaliação do nível de fendilhamento.

Por esse motivo, foram obtidos registos fotográficos da superfície do pavimento do trecho experimental em diferentes condições, para se avaliar quais as limitações deste método devido

às condições de luminosidade, velocidade de levantamento ou tipo de câmara utilizada. Tal como no levantamento visual, foram obtidos registos fotográficos de 2 em 2 metros, a partir dos quais se determinou o valor médio por excesso do nível de fendilhamento a cada 10 metros.

Além disso, e para cada intervalo de 10 metros, foram identificados os locais onde as fotografias não tinham qualidade suficiente (por exemplo, fotografias muito escuras, fotografias com excesso de luz, fotografias desfocadas) para permitir a identificação do fendilhamento eram a moda, ou seja, com pelo menos 3 ocorrências em cada 10 metros. Nos resultados do Capítulo 4 esses pontos são indicados como tendo “más imagens”.

O levantamento com apoio fotográfico também foi realizado na carrinha da Universidade do Minho, à qual foi acoplada uma *webcam* que obtém um registo fotográfico a cada dois metros. A câmara foi posicionada no exterior da carrinha, habitualmente na sua parte frontal (Figura 31), sendo ligada ao computador de bordo da carrinha por cabo USB e programada pelo técnico para guardar os registos das fotografias do pavimento. O posicionamento da câmara fotográfica, com um ângulo de 35°, foi otimizado para se captar imagens a uma distância de 5 metros. O equipamento de medição de distâncias do veículo está associado ao programa que controla a câmara, o que permite ter o rigor necessário na associação de cada imagem à distância já percorrida no trecho.



Figura 31: Posicionamento frontal da câmara fotográfica na parte exterior carrinha

Este sistema pode ser ainda mais cómodo e rápido do que o sistema com apoio computacional, dado que não é imprescindível a presença de dois operadores (o sistema pode ter autonomia para definição do início e final da zona em análise apenas com o condutor do veículo). Além disso, a avaliação do nível de fendilhamento não tem de ser feito no momento, o que permite

ter mais rigor na avaliação de cada zona do pavimento, embora obrigue a um consumo adicional de tempo em gabinete para análise das fotografias. Outra vantagem deste sistema é a manutenção dos registos fotográficos para consulta futura.

Para se compreender a influência da luminosidade, velocidade do veículo e tipo de câmara utilizada, foram efetuados levantamentos em duas fases, tal como se descreve em seguida.

O primeiro levantamento foi efetuado em junho de 2018, durante a parte da manhã, em condições de elevada luminosidade, mas com grandes contrastes entre os locais à sombra e ao sol. Neste levantamento utilizou-se sempre a câmara 1, e duas velocidades médias de circulação (lenta, de 15 km/h, e rápida, de 25 km/h). Embora seja desejável que se atinjam velocidades superiores no futuro (por exemplo, para utilização deste sistema em autoestradas), convém lembrar a grande irregularidade deste trecho, bem como o elevado número de lombas e passadeiras existentes, o que justifica as velocidades selecionadas.

A câmara 1 utilizada neste trabalho é uma *webcam* de alta definição (HD 720p) da *Microsoft*, com capacidade para fotografar e fazer vídeo (Figura 32). O mesmo equipamento tem lentes de alta precisão para melhorar a imagem mesmo em condições de pouca luz, o que foi considerado à partida uma vantagem para esse tipo de trabalho.



Figura 32: Câmara fotográfica 1 utilizada neste trabalho

Além disso, também se experimentou colocar a câmara na parte de trás do veículo (Figura 33) em oposição à posição frontal habitual, mas apenas com registos no sentido 2 devido a um problema de conexão quando se fez o ensaio no sentido 1. A ideia foi avaliar qual a melhor localização da câmara para este tipo de levantamentos.



Figura 33: Posicionamento da câmara fotográfica na parte exterior traseira da carrinha

O segundo levantamento foi efetuado em outubro de 2018, com ensaios rápidos (25 km/h) realizados ao final do dia e à noite, e ensaios lentos (15 km/h) realizados de manhã. Nessa altura do ano há muito menor luminosidade, em especial ao final da tarde e, como é óbvio, à noite. Essas condições foram escolhidas para poder avaliar a possibilidade de introdução de um conjunto de holofotes no veículo (Figura 34) que procuraram criar uma iluminação artificial mais constante, e que eventualmente permitisse efetuar levantamentos em períodos noturnos.



Figura 34: Sistema de iluminação artificial com holofotes aplicado no veículo

De referir ainda que neste levantamento efetuado em outubro de 2018 foram utilizadas duas câmaras para se compreender qual a sua influência nas imagens recolhidas. Além da câmara identificada anteriormente, foi utilizada uma nova câmara 2 (Figura 35) que é outra *webcam* de alta definição da *Microsoft (Lifecam Studio)* com sensor HD 1080p de 4 polegadas. Esta câmara faz fotografia de grande precisão, e também contém lentes de elementos de vidro de precisão LifeCam que apresenta tecnologia TrueColor, o que significa o seu vídeo permanece brilhante e colorido em praticamente todas as condições de iluminação.



Figura 35: Câmara fotográfica 1 utilizada neste trabalho

O levantamento efetuado em outubro de 2018 durante a parte da manhã, a menor velocidade, procurou avaliar condições mais favoráveis, até porque nesse dia não estava sol e as condições de luz eram muito boas devido à inexistência de locais de contraste luz-sombra. Nesse último ensaio foi possível fazer o levantamento em simultâneo com as câmaras 1 e 2 (Figura 36), o que deu origem a imagens mais facilmente comparáveis e a levantamentos idênticos.



Figura 36: Câmaras fotográficas 1 e 2 utilizada em simultâneo no último levantamento

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização funcional do pavimento do trecho experimental

4.1.1. Localização georreferenciada do trecho em estudo e velocidades de levantamento

O veículo utilizado para realizar a caracterização funcional do pavimento do trecho experimental, no qual está instalado o sistema multifunções, está equipado com um sistema GPS para georreferenciação dos pontos estudados. A localização do trecho experimental em estudo, obtida com GPS, é a apresentada na Figura 37.

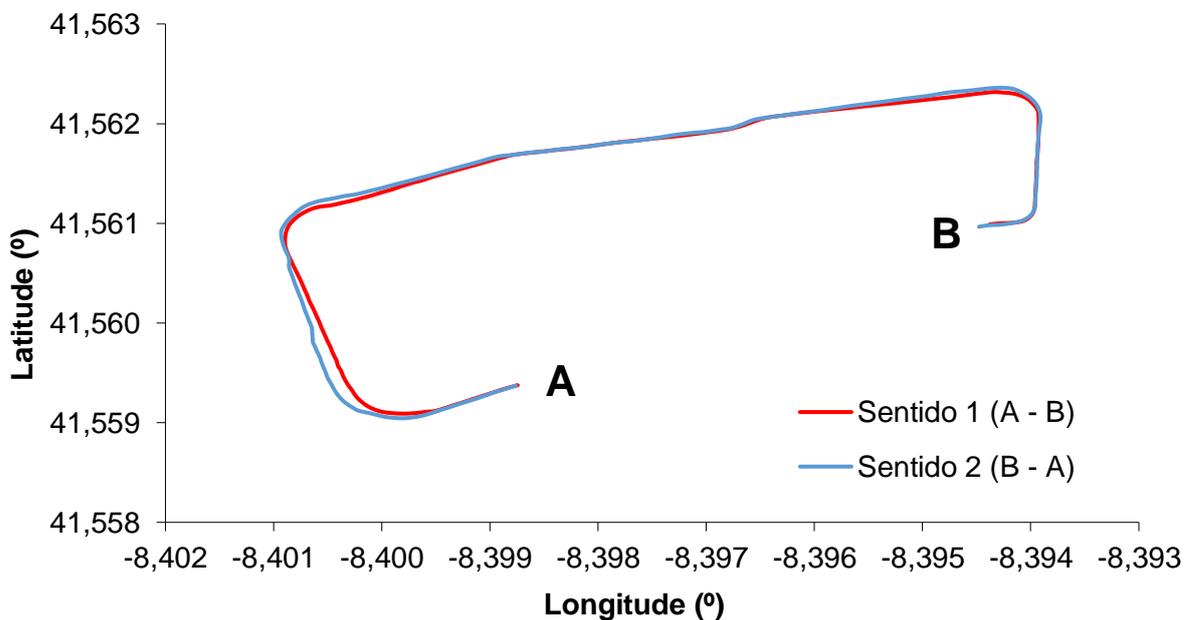


Figura 37: Localização GPS do trecho experimental para ambos os sentidos em estudo

Este levantamento permitiu confirmar a sobreposição dos pontos estudados com o mapa de localização apresentado no Capítulo 3, bem como a sobreposição do levantamento realizado em ambos os sentidos (sentido 1, do ponto A para B, e sentido 2, do ponto B para A) dentro do trecho experimental.

O sistema “multifunções” também permite registrar as velocidades praticadas pelo veículo durante o levantamento (Figura 38), em ambos os sentidos, que idealmente devem ser superiores a 20 Km/h para garantir um adequado funcionamento do sistema. Esta análise é relevante devido à dificuldade de praticar velocidades elevadas dentro deste trecho, pela elevada quantidade de lombas existentes para proteção dos peões nas passareiras.

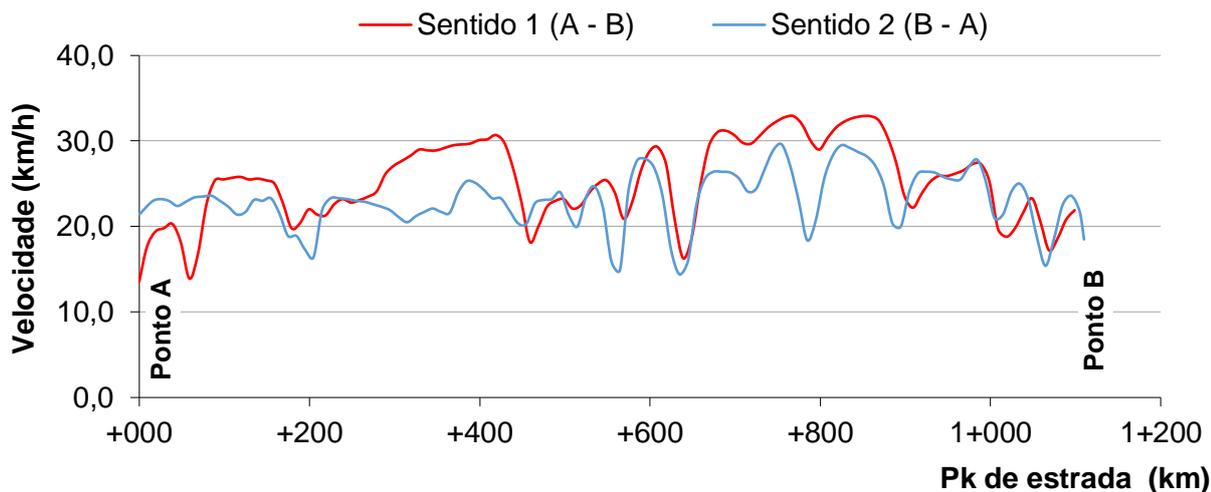


Figura 38: Velocidades praticadas durante a caracterização funcional do trecho experimental para ambos os sentidos em estudo

Com base no registo de velocidades verifica-se que em grande parte do trecho foi possível garantir uma velocidade ligeiramente superior à desejável, com velocidades médias de 25,2 e 23,1 km/h, respetivamente nos sentidos 1 (A-B) e 2 (B-A). Assim, pode considerar-se que o levantamento foi realizado em condições adequadas. No entanto, nas zonas de arranque e em alguns locais específicos que coincidem em ambos os sentidos (lombas), não foi possível atingir a velocidade pretendida.

4.1.2. Caracterização da regularidade longitudinal

Na Tabela 10 apresentam-se os valores de IRI, para uma base de cálculo de 100 m, obtidos nas rodeiras esquerda (Rod. Esq.) e direita (Rod. Dir.), em ambos os sentidos do trecho experimental em estudo. A localização corresponde a cada segmento de 100 m para medição do IRI é a sua posição média.

A comparação entre os resultados de IRI nos rodados esquerdo e direito, em ambos os sentidos, demonstra em geral uma reduzida variabilidade dos valores a nível transversal. Assim, para facilitar a análise e comparação dos resultados optou-se por determinar a média dos valores das rodeiras esquerda e direita, indicados anteriormente. Esses valores são apresentados na Figura 39 de forma a facilitar a análise visual das diferenças de irregularidade entre os dois sentidos em estudo. Ao mesmo tempo, também será possível verificar quais os locais mais irregulares ao longo do trecho experimental em que ocorreram maiores valores de IRI.

Tabela 10: Valores de IRI (m/Km) obtidos no trecho experimental.

Sentido 1 (A – B)			Sentido 2 (B – A)		
Localização	Rod. Esq.	Rod. Dir.	Localização	Rod. Esq.	Rod. Dir.
+045	5,4	6,0	1+065	4,6	5,3
+134	6,2	4,2	+965	6,0	5,7
+234	8,2	7,1	+865	5,7	5,7
+334	4,7	4,2	+765	4,1	5,1
+434	7,3	7,5	+665	3,4	4,4
+534	7,6	9,3	+565	5,8	5,6
+634	4,4	4,9	+465	6,8	8,7
+734	3,5	3,8	+365	7,6	7,5
+834	3,4	4,0	+265	6,6	9,8
+934	5,4	6,0	+165	5,8	5,5
1+034	6,1	5,5	+065	5,3	6,1

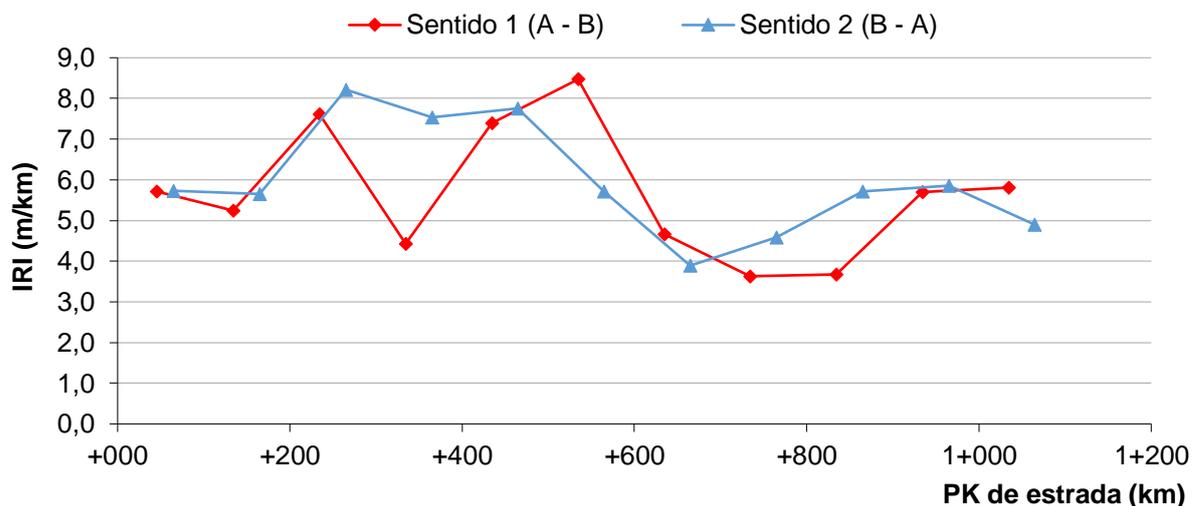


Figura 39: Valores de IRI por treços de 100 m no trecho experimental para ambos os sentidos

Ao analisar os resultados do IRI verifica-se que a regularidade é influenciada principalmente pelas singularidades existentes, embora também possa existir uma relação com o traçado da estrada ou com a própria estrutura do pavimento em diferentes locais do trecho. De uma forma geral, verifica-se que a primeira metade do trecho (mais próxima do ponto A) tem uma maior irregularidade. O maior número de singularidades (por exemplo, lombas, tampas de saneamento) existentes neste local deverão ser a principal razão que justifica este resultado. No entanto, também se verifica a existência dum maior nível de degradação nesta parte do trecho, com várias deformações localizadas e algumas reparações que tornam o pavimento mais irregular. O maior declive da estrada neste local é uma possível razão para o seu maior dano,

mas é mais provável que a degradação seja resultante de uma inadequada capacidade de carga do pavimento neste local devido à existência de solos de fundação com pior qualidade, à reduzida espessura do pavimento ou à existência de um tráfego mais agressivo.

Ao comparar os valores de IRI obtidos nos dois sentidos, verifica-se que ambos seguem a mesma tendência de evolução da irregularidade, o que demonstra que este parâmetro está a ser influenciado principalmente por fatores que se fazem sentir em ambos os sentidos de tráfego. Em princípio, as lombas existentes a toda a largura do pavimento, antes e após cada passadeira, devem ser um dos elementos que têm maior preponderância nos valores de IRI obtidos.

Ao comparar os valores de IRI obtidos neste trecho experimental com os limites legais apresentados no Capítulo 3, rapidamente se conclui que o limite máximo de 3 m/Km é ultrapassado ao longo de toda extensão, o que demonstra a sua elevada irregularidade. Como consequência, com base nos resultados do IRI este pavimento é classificado como “mau” dado que 100% da extensão tem valores de IRI superiores a 3 m/Km.

Este resultado seria inaceitável em estradas cuja principal função é a de circulação, mas pode ser compreendido no trecho em análise que se situa dentro dum Campus Universitário onde a função de acesso é preponderante, e onde se procura priorizar modos de transporte mais sustentáveis (em especial o modo pedonal). De facto, a elevada irregularidade do trecho experimental é justificada pelo elevado número de singularidades existentes em ambos os sentidos (Tabela 11), entre os quais se destacam onze lombas e passadeiras utilizadas como medida de acalmia de tráfego (praticamente coincidentes nos dois sentidos, como é lógico).

Tabela 11: Singularidades observadas no trecho experimental.

Singularidade observada	Sentido 1 (A – B)		Sentido 2 (B – A)	
	Eventos	Localização	Eventos	Localização
Lomba	11	61; 185; 216; 462; 571; 641; 651; 805; 902; 1013; 1071	11	1073; 1017; 899; 800; 651; 636; 570; 461; 209; 183; 57
Passadeira	11	7; 66; 197; 470; 566; 643; 710; 794; 894; 1021; 1063	11	1067; 1026; 882; 791; 711; 644; 561; 467; 196; 63; 2
Tampa saneamento	14	73; 116; 131; 158; 190; 224; 254; 275; 372; 398; 451; 470; 491; 718	22	1032; 987; 971; 925; 871; 824; 768; 750; 704; 445; 421; 395; 369; 344; 318; 291; 274; 220; 185; 130; 69; 44
Reparação	3	208; 252; 1030	2	728; 518
Deformação localizada	10	33; 258; 278; 419; 454; 498; 516; 527; 975; 1036	12	685; 588; 543; 532; 491; 486; 412; 327; 315; 271; 248; 114

A elevada irregularidade do trecho em estudo poderá dificultar a posterior obtenção de imagens fotográficas nítidas aquando da observação do estado superficial através do levantamento fotográfico com equipamentos acoplados ao veículo. No entanto, essa foi uma das razões para a seleção deste trecho experimental, pois pretende-se que a metodologia fotográfica em avaliação neste trabalho seja testada em condições mais desfavoráveis, para compreender melhor as suas virtudes e limitações.

4.1.3. Caracterização da macrotextura

Na Tabela 12 apresentam-se os valores médios, por troços de 100 m, da profundidade média do perfil (MPD) e da correspondente profundidade estimada da textura (ETD) determinada para verificação do limite mínimo de 0,6 mm especificado (tal como apresentado no Capítulo 3). Estes valores são apresentados separadamente para o rodado esquerdo e direito, e para cada sentido de tráfego em análise no trecho experimental. A localização corresponde a cada segmento de 100 m para medição do IRI é a sua posição média.

Tabela 12: Profundidade da textura no trecho experimental em estudo.

Sentido 1 (A – B)					Sentido 2 (B – A)				
Posição média (Pk)	MPD (mm)		ETD (mm)		Posição média (Pk)	MPD (mm)		ETD (mm)	
	Rod, Esq,	Rod, Dir,	Rod, Esq,	Rod, Dir,		Rod, Esq,	Rod, Dir,	Rod, Esq,	Rod, Dir,
+050	1,0	1,1	1,0	1,0	1+075	0,9	1,0	0,9	1,0
+149	1,1	1,1	1,1	1,1	+975	1,0	1,0	1,0	1,0
+249	1,1	1,2	1,1	1,2	+875	0,9	0,9	0,9	1,0
+349	1,1	1,0	1,1	1,0	+775	1,0	0,9	1,0	0,9
+449	1,2	1,2	1,2	1,2	+675	1,0	1,0	1,0	1,0
+549	0,9	0,9	0,9	0,9	+575	0,9	0,9	0,9	1,0
+649	0,8	0,7	0,8	0,8	+475	1,4	1,5	1,3	1,4
+749	0,9	0,9	0,9	0,9	+375	1,3	1,4	1,3	1,3
+849	0,9	1,0	0,9	1,0	+275	1,3	1,3	1,2	1,2
+949	0,9	1,0	0,9	1,0	+175	1,0	1,0	1,0	1,0
1+049	0,9	0,9	0,9	0,9	+075	1,1	1,2	1,1	1,2
1+149	0,9	0,9	0,9	0,9	+012	0,9	1,0	0,9	1,0

A comparação entre os resultados de MPD e ETD nos rodados esquerdo e direito, em ambos os sentidos, demonstra em geral uma reduzida variabilidade dos valores a nível transversal. Assim,

para facilitar a análise e comparação dos resultados optou-se por determinar a média dos valores de ETD (por ser este o parâmetro aquele que tem um limite especificado) das rodeiras esquerda e direita, indicados anteriormente. Esses valores são apresentados na Figura 40 de forma a facilitar a análise visual das diferenças de textura ao longo do trecho e entre os dois sentidos de tráfego em estudo.

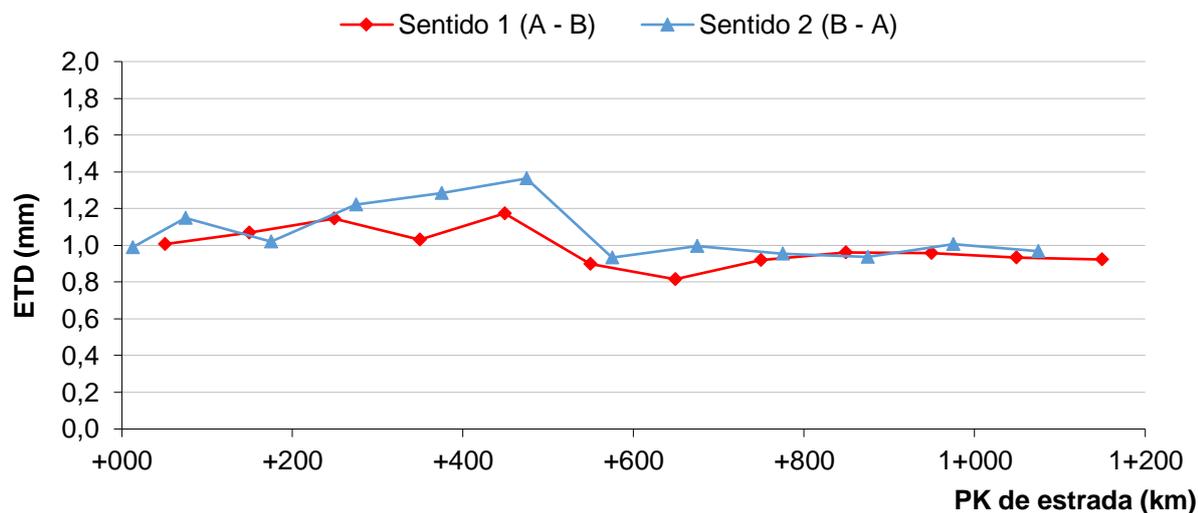


Figura 40: Valores de profundidade estimada da textura por troços de 100 m no trecho experimental para ambos os sentidos

Ao comparar os valores de ETD obtidos neste trecho experimental com o limite legal mínimo de 0,6 mm apresentado no Capítulo 3 para uma camada de desgaste em betão betuminoso, rapidamente se conclui que esse limite é cumprido ao longo de toda extensão. Esta exigência está relacionada com questões de segurança de circulação, dado que pavimentos com textura muito lisa (menores valores de ETD) podem reduzir a capacidade de travagem em condições molhadas, aumentando o risco de acidente. Esse problema pode acontecer em pavimentos muito novos (onde não se removeu a película de betume à superfície), com misturas densas mais “finas” do que seria expectável para um betão betuminoso de desgaste, ou em pavimentos com elevada utilização que tenha causado uma redução da textura. Assim, nenhum destes casos se enquadra no trecho experimental em análise.

Ao longo do trecho, e de uma forma geral, verifica-se que a primeira metade (mais próxima do ponto A) tem uma maior textura. Esta tendência é semelhante à observada quando se avaliou a irregularidade. O maior estado de degradação nessa zona do trecho poderá estar a influenciar o valor da textura, mas é mais provável que essa diferença resulte da utilização de diferentes

misturas em camada de desgaste (dado que as várias partes do trecho foram executadas em fases diferentes de crescimento do Campus). Embora não tenha sido feita uma recolha e caracterização de material para confirmação, a primeira metade do trecho aparenta não ter uma camada de desgaste final, existindo apenas uma mistura de regularização com uma textura mais rugosa que é a camada de superfície.

A textura mais elevada na primeira metade do trecho poderá dificultar ligeiramente a observação do estado superficial do pavimento com recurso a fotografias, mas a diferença de textura obtida (com um valor máximo de ETD inferior a 1,4 mm) não permite antever grandes dificuldades como consequência desta propriedade.

4.2.Observação do estado superficial do pavimento através de levantamento visual

Houve um levantamento inicial realizado pelo aluno, numa fase em que não tinha a experiência que acumulou ao longo de todo o trabalho, e um segundo levantamento realizado no final do período de Mestrado. Dado que o segundo levantamento visual realizado é aquele que mais se aproxima do procedimento atualmente utilizado pelas entidades que gerem a rede rodoviária nacional, após o aluno ter ganho a experiência necessária para esse fim, esse método servirá de referência para comparação com todos os restantes levantamentos efetuados neste trabalho.

No entanto, o levantamento inicial também é apresentado para se identificar qual a influência que o operador pode ter na identificação das patologias, em especial quando tem pouca experiência na sua avaliação. Convém lembrar que este trabalho se focou essencialmente na identificação de diferentes níveis de fendilhamento.

Em seguida, apresenta-se primeiro o levantamento final do estado superficial do pavimento do trecho experimental, por ser o método de referência, e só depois se apresenta o levantamento inicial do estado superficial do mesmo pavimento.

4.2.1. Levantamento visual final do estado superficial do pavimento (método de referência)

O levantamento do estado superficial do pavimento do trecho experimental efetuado no final do trabalho de Mestrado, em Outubro de 2018, será o método de referência para comparação com todos os outros utilizados neste trabalho. Os resultados obtidos nesse levantamento, relativos ao nível de fendilhamento observado no trecho em ambos os sentidos de tráfego, são apresentados na Figura 41.

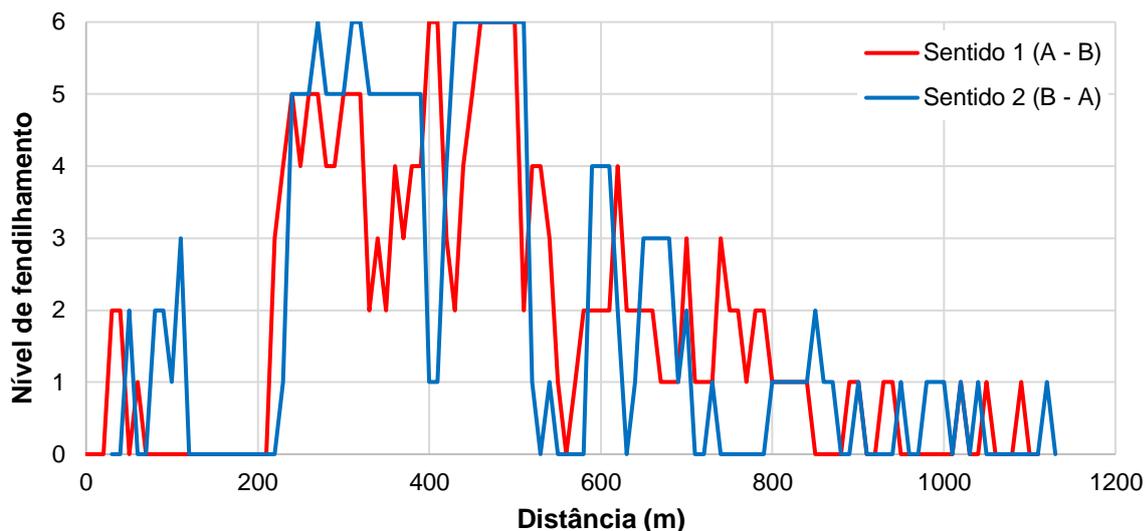


Figura 41: Levantamento visual do nível de fendilhamento no trecho experimental para ambos os sentidos efetuado em Outubro de 2018 (método de referência)

Convém recordar que para realização deste levantamento foi feito um registo do nível de fendilhamento a cada 2 metros. Onde não havia fendilhamento considerou-se o nível zero, para fendas isoladas (longitudinais ou transversais) com graus crescentes de gravidade considerou-se os níveis de fendilhamento um a três, enquanto a pele de crocodilo com graus crescentes de gravidade foi associada a níveis de fendilhamento quatro a seis. Os registos foram depois agrupados em cada 10 metros, arredondando-se por excesso a média dos valores registados nessa distância para considerar uma situação mais desfavorável. Este procedimento foi repetido em todos os sistemas de observação do estado superficial apresentados ao longo desta Dissertação de Mestrado.

Ao avaliar os resultados deste levantamento, verifica-se que há uma zona entre os 200 e os 600 metros que se encontra muito degradada, com fendilhamento do tipo pele de crocodilo em grande parte da sua extensão. Além disso, ainda se nota um nível de fendilhamento intermédio entre os 600 e os 800 metros. Na restante extensão do trecho não existe fendilhamento, ou o seu nível de severidade é ainda muito reduzido.

Os resultados do levantamento do estado superficial demonstram ainda haver uma boa correspondência no nível de fendilhamento entre os dois sentidos de tráfego. Além disso, verifica-se que os locais com um nível de degradação mais elevado coincidem ainda com as zonas onde se verificou haver maior irregularidade e uma textura mais rugosa. A conjugação destes resultados reforça a hipótese da camada de desgaste não existir no trecho entre os 200 e

os 600 metros, o que reduz a capacidade de carga do pavimento e acelera a sua degradação, justificando o elevado nível de fendilhamento observado neste trecho em ambos os sentidos.

Em seguida quantificou-se a extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento, em cada sentido (Tabela 13), o que permite comparar com mais exatidão qual o nível de degradação existente em cada sentido.

Tabela 13: Quantificação da extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento no levantamento visual efetuado em Outubro de 2018 para ambos os sentidos.

Nível de fendilhamento	Sentido 1 (A – B)		Sentido 2 (B – A)	
	Distância (m)	Extensão (%)	Distância (m)	Extensão (%)
0	400	35,7%	490	43,4%
1	220	19,6%	240	21,2%
2	180	16,1%	60	5,3%
3	70	6,3%	50	4,4%
4	110	9,8%	40	3,5%
5	70	6,3%	130	11,5%
6	70	6,3%	120	10,6%
Total	1120	100,0%	1130	100,0%

No sentido 1, o trecho tem 36% da sua extensão sem fendilhamento, 42% com fendas isoladas e 22% com pele de crocodilo. No sentido 2, a extensão sem fendilhamento é de 43%, enquanto 31% tem fendas isoladas e 26% pele de crocodilo. Estes resultados confirmam que o nível de degradação é muito semelhante em ambos os sentidos, embora a extensão com um nível mais elevado de fendilhamento (pele de crocodilo) seja ligeiramente superior no sentido 2. Verifica-se ainda que mais do que 75% do trecho não apresente um nível de fendilhamento muito elevado, em princípio devido ao reduzido volume de tráfego pesado existente no Campus.

4.2.2. Levantamento visual inicial do estado superficial do pavimento

No início do trabalho de Mestrado também foi efetuado um levantamento do estado superficial do pavimento do trecho experimental, em junho de 2018, numa fase em que a experiência na identificação das diversas patologias ainda era reduzida. A comparação do levantamento efetuado nas duas fases permite ter uma noção dos erros associados a essa falta de experiência, que eventualmente podem ser relevantes devido à subjetividade inerente à identificação de cada patologia. Assim, os níveis de fendilhamento observados no trecho experimental, nesse

levantamento inicial, e em ambos os sentidos de tráfego, são apresentados na Figura 42, por comparação com o levantamento final de referência.

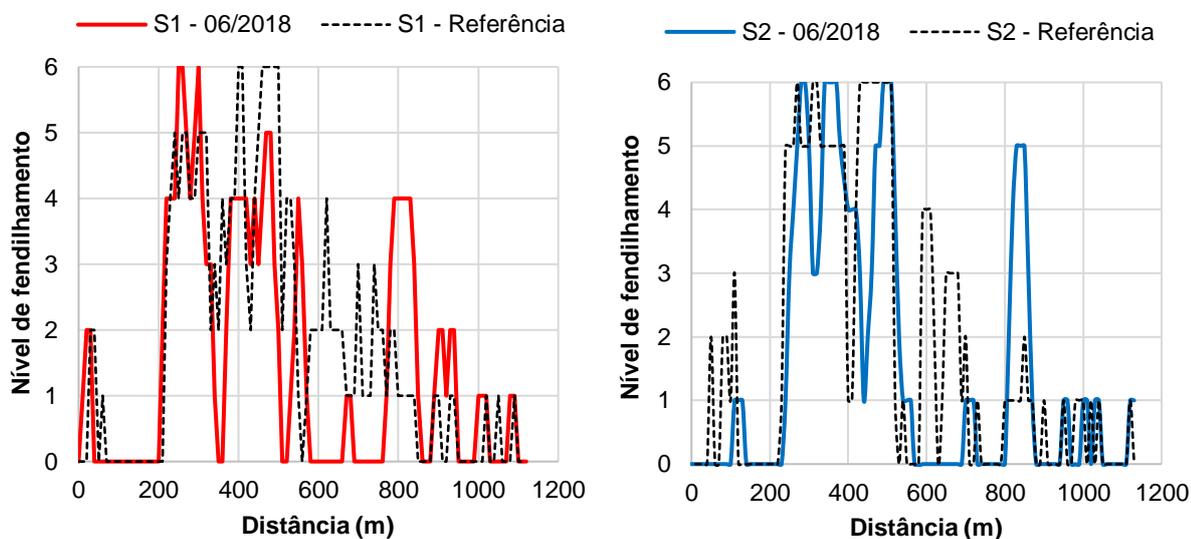


Figura 42: Levantamento visual do nível de fendilhamento no trecho experimental para ambos os sentidos efetuado em junho de 2018 vs. levantamento de referência

Ao avaliar de forma comparativa os resultados obtidos nos levantamentos inicial (traço contínuo) e final (referência, a traço interrompido), é possível observar algumas diferenças entre essas duas fases, com alguma tendência para identificar o fendilhamento com um nível mais baixo de gravidade na fase inicial do trabalho (quando havia menos experiência). Apesar disso, os locais com maior nível de degradação coincidem em ambos os levantamentos, tal como seria de esperar.

Em seguida quantificou-se a extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento, para o levantamento inicial efetuado em cada sentido (Tabela 14), cujos resultados também podem ser comparados com o levantamento de referência realizado no final do Mestrado.

Em comparação com o levantamento de referência, houve um aumento significativo da extensão na qual não se identificou fendilhamento (49 e 53%, nos sentidos 1 e 2, contra os 36 e 42% no levantamento de referência). No entanto, obtiveram-se valores muito próximos nas duas fases relativamente à extensão na qual se identificou pele de crocodilo (22 e 21%, nos sentidos 1 e 2, contra os 22 e 26% no levantamento de referência). Assim, as principais diferenças encontradas ao nível das duas fases resultaram dificuldade em identificar fendas isoladas quando não se tem experiência neste tipo de avaliação.

Tabela 14: Quantificação da extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento no levantamento visual efetuado em junho de 2018 em ambos os sentidos.

Nível de fendilhamento	Sentido 1 (A – B)		Sentido 2 (B – A)	
	Distância (m)	Extensão (%)	Distância (m)	Extensão (%)
0	550	48,7%	590	52,7%
1	150	13,3%	200	17,9%
2	100	8,8%	30	2,7%
3	80	7,1%	60	5,4%
4	180	15,9%	70	6,3%
5	40	3,5%	80	7,1%
6	30	2,7%	90	8,0%
Total	1130	100,0%	1120	100,0%

Para compreender melhor se houve uma diferença significativa entre os dois levantamentos, determinou-se o erro (Equação 3) cometido no levantamento inicial por comparação com o levantamento final (referência), ao longo de todo o trecho e em ambos os sentidos (Figura 43).

$$|Erro| = |Nível\ fendilhamento_{Levantamento\ i} - Nível\ fendilhamento_{Referência}| \quad (3)$$

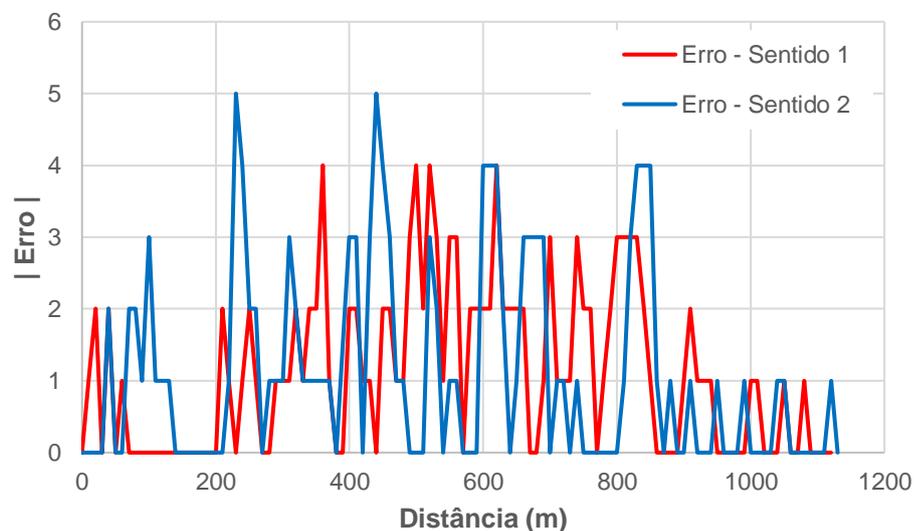


Figura 43: Erro associado ao levantamento visual do nível de fendilhamento efetuado em junho de 2018 por comparação com o levantamento de referência em ambos os sentidos

Verifica-se que os erros que ocorreram entre ambas as fases tiveram maior incidência nos locais com maior nível de degradação (entre os 200 e os 800 metros), embora não haja um número muito significativo de erros superiores a 2.

De referir que em alguns casos podem ocorrer erros devido à falta de coincidência espacial entre os dois levantamentos, ou seja, por falta de coincidência nas distâncias (e não apenas por identificação incorreta das patologias). No entanto, não será feita uma distinção entre estas duas causas de erro neste trabalho pela dificuldade em conseguir separar ambos efeitos.

Para compreender melhor o erro cometido entre as duas fases, procedeu-se à quantificação da extensão do trecho associada a cada erro entre os dois levantamentos visuais efetuados, para ambos os sentidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 15. Além disso, procedeu-se à determinação do erro médio existente entre os dois levantamentos (Equação 4), que permite ter um valor global para avaliação do grau de coincidência entre os dois levantamentos. De referir que o erro pode variar entre 0 e 6, sendo desejável que o erro se aproxime o mais possível de zero no caso de uma coincidência total entre os dois levantamentos. Apesar disso, devido ao grau de subjetividade associado a esta metodologia, bem como aos erros associados à falta de coincidência espacial, neste trabalho considera-se aceitável um valor de erro inferior a 1. Por outro lado, erros iguais ou superiores a 3 alteram completamente a análise que se pretende fazer, não sendo desejável que haja uma extensão significativa com erros dessa ordem de grandeza.

$$Erro\ médio = \frac{\sum_{i=1}^n |Error|}{n} \quad (4)$$

Tabela 15: Quantificação da extensão do trecho associada a cada erro no levantamento visual efetuado em junho de 2018 vs. levantamento de referência em ambos os sentidos.

Erro	Sentido 1 (A – B)		Sentido 2 (B – A)	
	Distância (m)	Extensão (%)	Distância (m)	Extensão (%)
0	450	39,8%	520	46,4%
1	290	25,7%	300	26,8%
2	250	22,1%	80	7,1%
3	100	8,8%	120	10,7%
4	40	3,5%	80	7,1%
5	0	0,0%	20	1,8%
6	0	0,0%	0	0,0%
Total	1130	100,0%	1120	100,0%

O erro é inferior a 1 em 65 e 73% do trecho, havendo coincidência total em 40 e 46% da extensão, respetivamente nos sentidos 1 e 2. Por outro lado, o erro é muito elevado (igual ou superior a 3) em 12 e 20% do trecho, respetivamente nos sentidos 1 e 2. Assim, há uma extensão

considerável do trecho com reduzido erro, mas ainda há vários locais onde o erro foi significativo. De referir que o sentido 2 foi aquele onde houve maior extensão com erro inferior a 1, e simultaneamente com erro igual ou superior a 3.

O erro médio obtido em ambos os sentidos foi exatamente o mesmo, sendo igual a 1,1. Este valor não é muito elevado, mas é desejável que se aproxime de zero. Assim, verifica-se que a falta de experiência pode ter algum significado nos resultados obtidos durante a observação do estado superficial de pavimentos. Em seguida, vamos observar se o erro médio de outros métodos (com apoio computacional e fotográfico) é da mesma ordem de grandeza.

4.3. Observação do estado superficial do pavimento com apoio computacional

Um dos métodos que pode ser utilizado para observação do estado superficial do pavimento baseia-se no levantamento das patologias a partir de um veículo, com recurso a apoio computacional. O computador tem um programa que está conectado com um sistema de medição de distâncias no veículo em tempo real, e tem um *software* que permite ir selecionando o nível de gravidade da patologia que se está a observar em cada momento (neste caso foi utilizado apenas para registo dos níveis de fendilhamento).

Os níveis de fendilhamento observados no trecho experimental no levantamento das patologias com apoio computacional, em ambos os sentidos de tráfego, são apresentados na Figura 44, por comparação com o levantamento visual utilizado como referência.

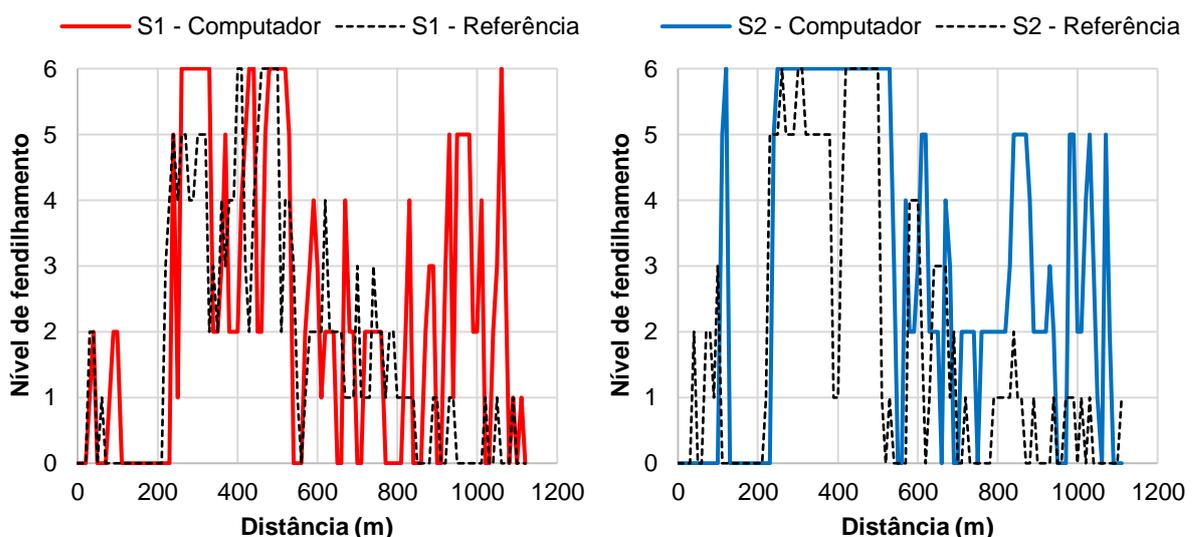


Figura 44: Levantamento com apoio computacional do nível de fendilhamento no trecho experimental para ambos os sentidos vs. levantamento de referência

Ao comparar os resultados deste novo sistema (linhas contínuas coloridas) com o levantamento visual de referência (traço interrompido a preto) verifica-se alguma correspondência na parte inicial, embora com menos precisão na identificação (em princípio devido à maior velocidade do levantamento). No entanto, na parte final do trecho (a partir dos 800 metros) há diferenças significativas entre os dois métodos, com níveis de gravidade mais elevadas neste levantamento com apoio computacional. Esta diferença na identificação das degradações terá sido parcialmente influenciada, neste caso, pelo apoio do técnico que acompanhou a realização deste ensaio. Também é provável que algumas diferenças sejam resultantes dos diferentes métodos utilizados para medir as distâncias.

Em seguida quantificou-se a extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento, no levantamento com apoio computacional efetuado em cada sentido (Tabela 16), cujos resultados também podem ser comparados com o levantamento visual de referência.

Tabela 16: Quantificação da extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento no levantamento com apoio computacional em ambos os sentidos.

Nível de fendilhamento	Sentido 1 (A – B)		Sentido 2 (B – A)	
	Distância (m)	Extensão (%)	Distância (m)	Extensão (%)
0	410	36,3%	350	31,3%
1	70	6,2%	10	0,9%
2	260	23,0%	240	21,4%
3	80	7,1%	60	5,4%
4	50	4,4%	40	3,6%
5	100	8,8%	120	10,7%
6	160	14,2%	300	26,8%
Total	1130	100,0%	1120	100,0%

Em comparação com o levantamento de referência, houve apenas uma ligeira redução da extensão na qual não se identificou fendilhamento (36 e 31%, nos sentidos 1 e 2, contra os 36 e 42% no levantamento de referência). No entanto, obtiveram-se valores relativamente diferentes com apoio computacional quanto à extensão na qual se identificou pele de crocodilo (27 e 41%, nos sentidos 1 e 2, contra os 22 e 26% no levantamento de referência). Assim, as principais diferenças encontradas ao utilizar o método computacional resultaram no aumento da identificação de zonas com pele de crocodilo, devido à experiência que o técnico que apoiou o trabalho tem neste tipo de avaliação, mas também pela menor precisão devido à velocidade.

Em seguida determinou-se o erro cometido no levantamento com apoio computacional por comparação com o levantamento visual de referência (Figura 45).

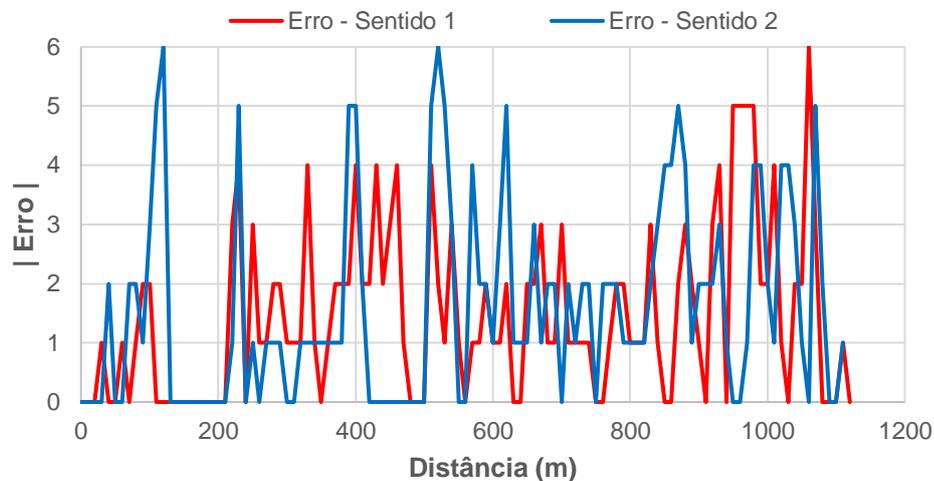


Figura 45: Erro associado ao levantamento computacional do nível de fendilhamento por comparação com o levantamento de referência

É visível que ocorreram vários erros, alguns deles com o valor máximo possível (seis) ao longo de todo o trecho, embora tenham maior incidência nos locais com maior nível de degradação (entre os 200 e os 700 metros) e na zona final do trecho (depois dos 800 metros). Além disso, há um número significativo de erros superiores a 2.

Por fim procedeu-se à quantificação da extensão do trecho associada a cada erro entre os levantamentos com apoio computacional e visual de referência, para ambos os sentidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 17, e determinou-se o erro médio correspondente.

Tabela 17: Quantificação da extensão do trecho associada a cada erro no levantamento computacional vs. levantamento de referência em ambos os sentidos.

Erro	Sentido 1 (A – B)		Sentido 2 (B – A)	
	Distância (m)	Extensão (%)	Distância (m)	Extensão (%)
0	360	31,9%	370	33,0%
1	310	27,4%	290	25,9%
2	230	20,4%	200	17,9%
3	100	8,8%	70	6,3%
4	80	7,1%	80	7,1%
5	40	3,5%	90	8,0%
6	10	0,9%	20	1,8%
Total	1130	100,0%	1120	100,0%

O erro é inferior a 1 em 59% do trecho em ambos os sentidos, havendo coincidência total em apenas 32 e 33% da extensão, respectivamente nos sentidos 1 e 2. Por outro lado, o erro é muito elevado (igual ou superior a 3) em 20 e 23% do trecho, respectivamente nos sentidos 1 e 2. Assim, há uma extensão considerável do trecho com um erro significativo.

O erro médio obtido em ambos os sentidos foi 1,5 e 1,6, respectivamente nos sentidos 1 e 2, que são valores elevados. Assim, verifica-se que o levantamento com apoio computacional permite acelerar a avaliação do estado superficial de pavimentos, o que é muito relevante para observação de trechos muito extensos, mas há uma redução do rigor com que se faz o registo das patologias. Apesar disso, o erro elevado em comparação com o levantamento de referência também pode estar a ser influenciado (não necessariamente de forma negativa) pelo apoio de um segundo operador mais experiente, que acabou por influenciar a identificação das patologias que em todos os outros métodos foi sempre feita apenas pelo aluno.

Por último, vamos proceder em seguida à análise do método de observação com apoio fotográfico, desenvolvido de forma especial para este trabalho.

4.4.Observação do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico

Este trabalho de Mestrado teve como objetivo principal a otimização do sistema fotográfico para observação do estado superficial de pavimentos, materializado neste caso apenas pela avaliação do nível de fendilhamento. Assim, e tal como descrito no Capítulo 3, foram obtidos registos fotográficos da superfície do pavimento do trecho experimental em diferentes condições, para se avaliar quais as limitações deste método devido às condições de luminosidade, velocidade de levantamento ou tipo de câmara utilizada.

A metodologia utilizada para análise dos resultados do levantamento fotográfico é semelhante á utilizada nos levantamentos visual e com apoio computacional, diferindo apenas pela necessidade de identificar a percentagem do trecho na qual se obteve imagens fotográficas sem qualidade suficiente para permitir a correta identificação do nível de fendilhamento (nos resultados esses pontos são indicados como “más imagens”). De resto, a análise é feita de forma semelhante aos métodos anteriores, continuando a ser feita a comparação com o levantamento visual de referência efetuado em outubro de 2018 para identificação do erro médio.

Para se compreender a influência da luminosidade, velocidade do veículo e tipo de câmara utilizada, foram efetuados levantamentos em duas fases, tal como se descreve em seguida.

4.4.1. Primeiro levantamento do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico (julho de 2018)

O primeiro levantamento foi efetuado em julho de 2018, durante a parte da manhã, em condições de elevada luminosidade, mas com grandes contrastes entre os locais à sombra e ao sol. Neste levantamento utilizou-se sempre a câmara 1, e duas velocidades médias de circulação (lenta, de 15 km/h, e rápida, de 25 km/h). Além disso, também se experimentou colocar a câmara na parte de trás do veículo, mas apenas com registos no sentido 2 devido a um problema de conexão quando se fez o ensaio no sentido 1.

As imagens captadas através da câmara localizada no veículo nem sempre conseguiram garantir a qualidade desejável para avaliação posterior (nesses locais não será apresentado o nível de fendilhamento). De facto, esse foi o principal fator que levou ao estudo das melhores condições em que o levantamento fotográfico deve ser realizado. Neste levantamento efetuado em julho de 2018 o principal problema na obtenção de imagens resultou de zonas de elevado contraste luz-sombra, nas quais a câmara não conseguia ajustar suficientemente rápido a focagem. Assim, verificou-se existir imagens com excesso de luz (Figura 46) ou muito sombrias (Figura 47).



Figura 46: Imagens sem qualidade captadas com a câmara 1 no levantamento de julho de 2018 devido ao excesso de luminosidade (luz natural).

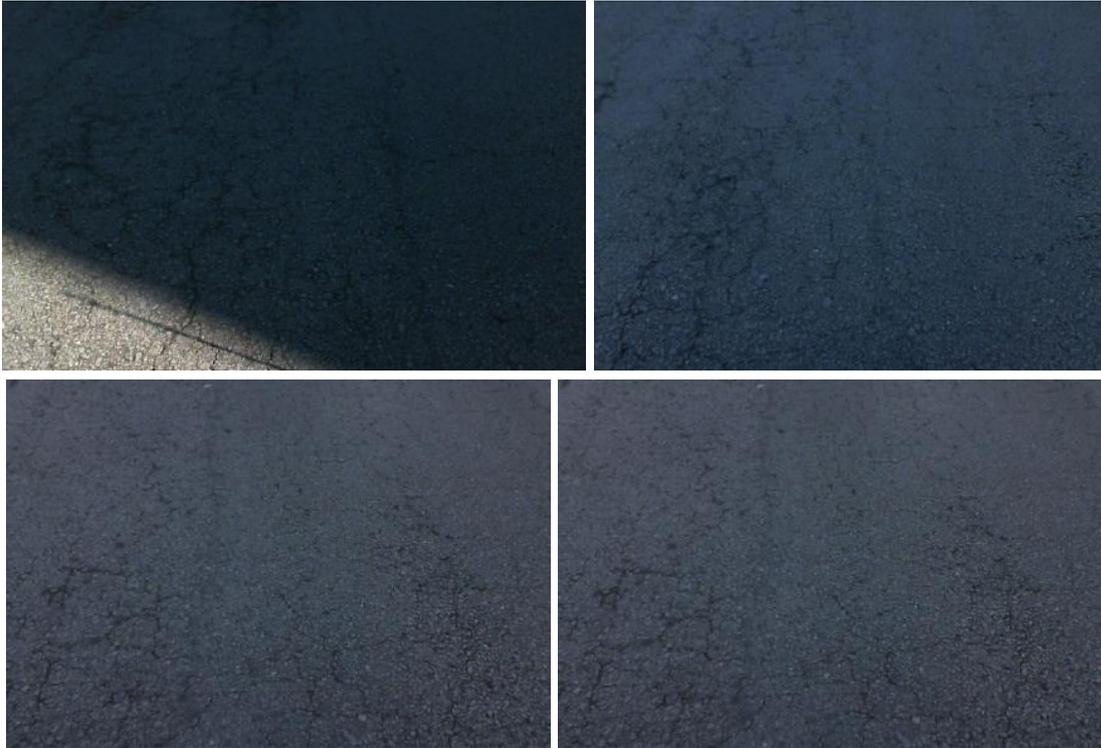


Figura 47: Imagens sem qualidade captadas com a câmara 1 no levantamento de julho de 2018 devido à reduzida luminosidade (luz natural)

As imagens sem qualidade contrastavam com a maioria das imagens obtidas nesse levantamento que apresentavam muito boa qualidade (Figura 48) para avaliação do estado superficial do pavimento (neste caso, o nível de fendilhamento).



Figura 48: Imagens com qualidade captadas com a câmara 1 no levantamento de julho de 2018 e que permitiram a avaliação do nível de fendilhamento

Os níveis de fendilhamento observados no trecho experimental nos vários levantamentos com apoio fotográfico efetuados em julho de 2018, nos dois sentidos de tráfego, são apresentados na Figura 49, por comparação com o levantamento visual utilizado como referência.

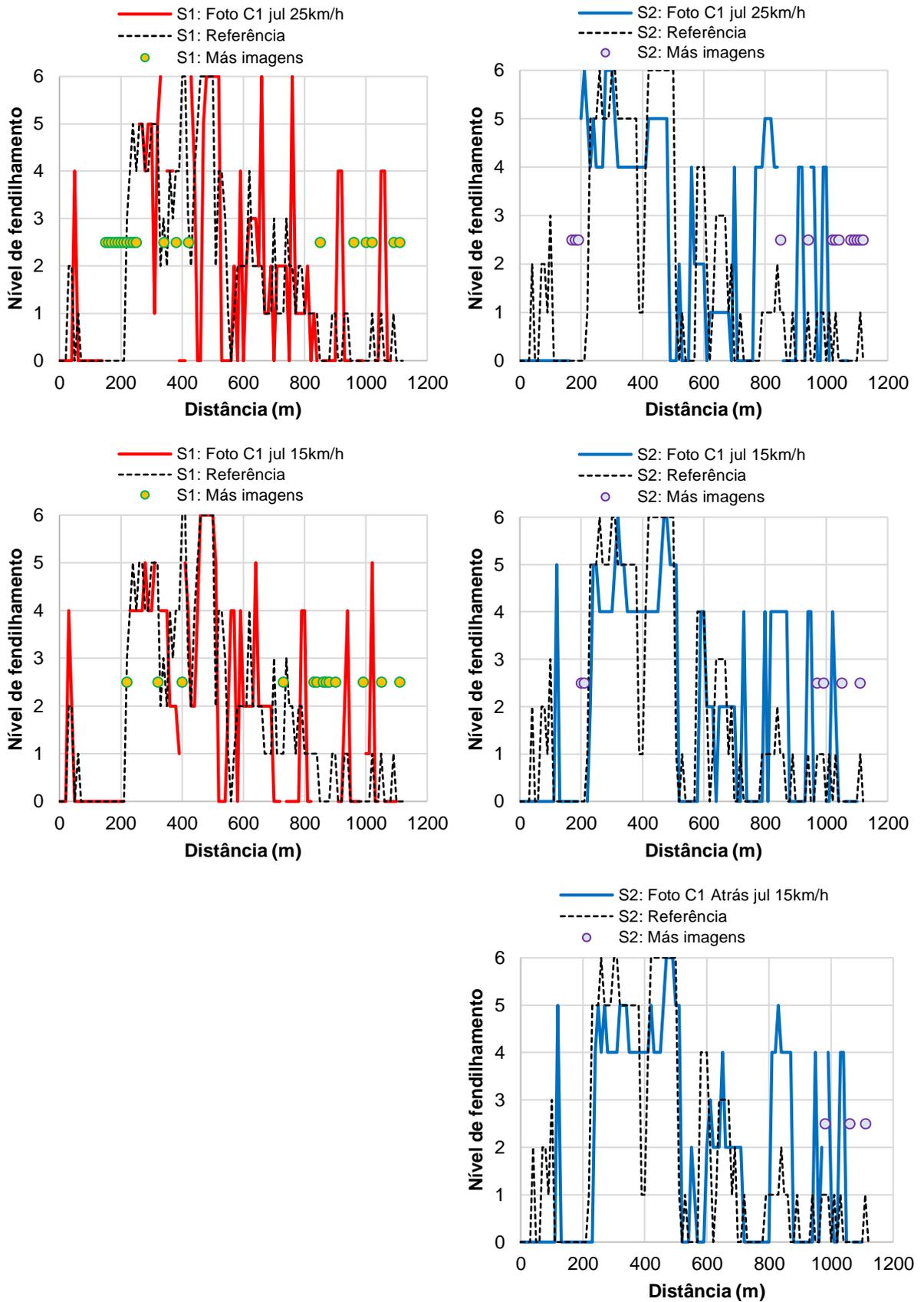


Figura 49: Levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho em ambos os sentidos.

Ao comparar os resultados do sistema fotográfico (linhas contínuas coloridas) com o levantamento visual de referência (traço interrompido a preto) verifica-se alguma correspondência em especial no sentido 2 (azul) até aos 800 metros do trecho. No entanto, na parte final do trecho (a partir dos 800 metros) há diferenças significativas entre os dois métodos, com níveis de gravidade mais elevadas no levantamento fotográfico. Há ainda um conjunto significativo de pontos com imagens de pouca qualidade (más imagens) onde não se conseguiu identificar o nível de fendilhamento. Verifica-se ainda que há uma redução desses pontos com “más imagens” ao reduzir a velocidade de levantamento (segunda linha de gráficos), ao mesmo tempo que se consegue uma maior correspondência com o levantamento visual de referência. O levantamento feito com a câmara na parte de trás do veículo (última linha de gráficos) também obteve bons resultados, que foram semelhantes ao levantamento frontal realizado à mesma velocidade. No entanto houve problemas de conexão entre a câmara e o portátil, o que levou a escolher a posição frontal para os restantes ensaios.

Em seguida quantificou-se a extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento, nos vários levantamentos com apoio fotográfico efetuados em julho de 2018 em cada sentido de tráfego (Tabela 18), bem como a extensão do trecho com imagens de reduzida qualidade. Esses resultados podem ser comparados entre si e com o levantamento visual de referência.

Tabela 18: Percentagem de extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018.

Nível de fendilhamento	Câmara 1 25 km/h		Câmara 1 15 km/h		Câmara 1 atrás 15 km/h
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 2
0	39,8%	38,1%	43,4%	46,9%	47,8%
1	8,0%	6,2%	2,7%	0,0%	1,8%
2	8,0%	4,4%	15,0%	9,7%	10,6%
3	2,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%
4	9,7%	23,9%	16,8%	26,5%	23,9%
5	6,2%	12,4%	6,2%	8,8%	9,7%
6	8,0%	3,5%	4,4%	2,7%	2,7%
Más imagens	17,7%	11,5%	11,5%	5,3%	2,7%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

A extensão onde não se identificou fendilhamento é semelhante nos vários levantamentos fotográficos realizados (38-40% a 25 km/h, 43-47% ou 48% a 15 km/h em função da câmara

estar na frente ou atrás do veículo), sendo igualmente próxima do levantamento visual de referência (42%). A extensão na qual se identificou pele de crocodilo é superior no sentido 2 em todos os levantamentos, notando-se um aumento significativo dessa extensão no sentido 2 nos vários levantamentos fotográficos (40, 38 e 36%) por comparação com o levantamento visual de referência (26%). No sentido 1 os valores encontrados (24 e 27%) são próximos do de referência (22%). O aumento das zonas com pele de crocodilo no levantamento fotográfico ocorre em especial devido a diferença na avaliação das patologias na parte final do trecho.

Um aspeto muito importante neste novo sistema de levantamento do estado do pavimento com apoio fotográfico diz respeito à extensão do trecho na qual não se conseguiu obter imagens com qualidade suficiente para conseguir identificar o nível de fendilhamento (más imagens). A existência duma grande extensão desse tipo inviabiliza a aplicação deste método, razão pela qual se vai dar relevância especial a este resultado. Ao avaliar os vários levantamentos fotográficos efetuados verifica-se que o aumento da velocidade de levantamento tem um efeito negativo, com um aumento de 6% na extensão com imagens sem qualidade quando a velocidade subiu de 15 para 25 km/h (o que certamente é reforçado pela grande irregularidade deste trecho). Houve mais pontos com imagens sem qualidade no sentido 1 devido à existência de mais zonas de contraste luz-sombra pela proximidade a vários edifícios. Embora o melhor resultado tenha sido obtido com a câmara na parte traseira do veículo, abandonou-se esta alternativa por dificuldades técnicas na ligação entre a câmara e o portátil.

Em seguida determinou-se o erro cometido nos vários levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 por comparação com o levantamento visual de referência (Figura 50). De referir que o erro só pode ser determinado para os pontos onde houve imagens com qualidade.

Os erros têm uma distribuição por todo o trecho nos vários levantamentos, alguns deles com o valor máximo possível (seis) para a velocidade de 25 km/h. Estes têm maior incidência nos locais com maior nível de degradação (entre os 200 e os 700 metros). Aparentemente há maiores erros no levantamento a maior velocidade e, em geral, no sentido 2. Além disso, há um número significativo de erros superiores a 2 que, de preferência, não deveriam ocorrer.

Por fim procedeu-se à quantificação da extensão do trecho associada a cada erro entre os levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 e o levantamento visual de referência, para ambos os sentidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 19, e determinou-se o erro médio correspondente.

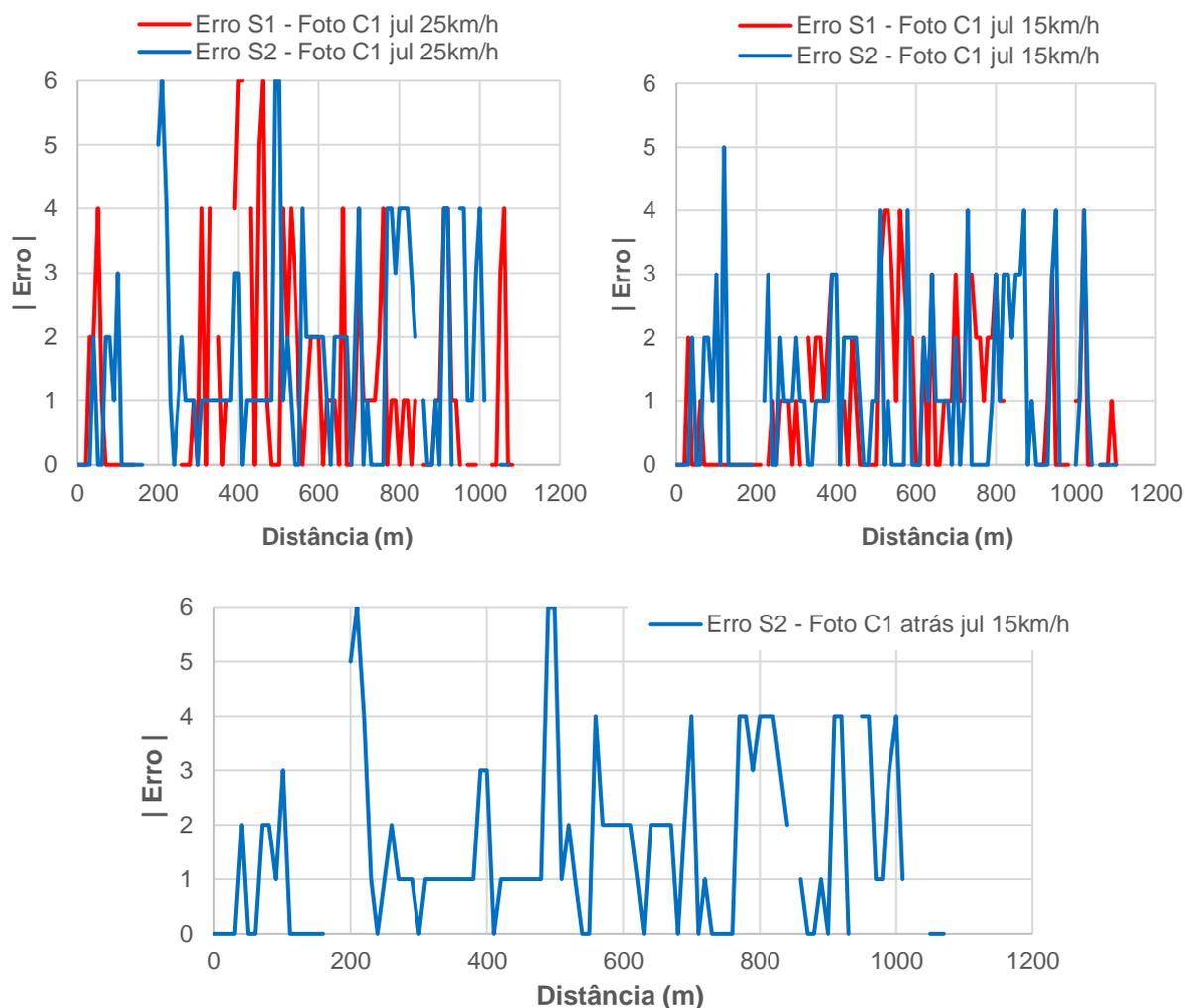


Figura 50: Erro associado aos levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 por comparação com o levantamento de referência.

Tabela 19: Percentagem da extensão do trecho associada a cada erro nos levantamentos com apoio fotográfico de julho de 2018 vs. levantamento de referência.

Erro	Câmara 1 25 km/h		Câmara 1 15 km/h		Câmara 1 atrás 15 km/h
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 2
0	44,1%	31,0%	49,0%	46,7%	43,6%
1	25,8%	30,0%	24,0%	24,3%	26,4%
2	8,6%	16,0%	13,0%	11,2%	13,6%
3	3,2%	6,0%	9,0%	11,2%	8,2%
4	12,9%	13,0%	5,0%	5,6%	6,4%
5	2,2%	1,0%	0,0%	0,9%	1,8%
6	3,2%	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Erro médio	1,3	1,6	1,0	1,1	1,1

O erro é inferior a 1 em 70-73% do trecho em quase todos os levantamentos, exceto no levantamento a 25 km/h no sentido 2 que apresentou maior erro (61% do trecho) de uma forma geral. Além disso, há uma coincidência total em 44-49% da extensão, embora esse valor seja apenas 31% no pior caso já referido. Por outro lado, o erro é muito elevado (igual ou superior a três) em 22-23% do trecho nos levantamentos efetuados a 25 km/h em ambos os sentidos, o que acentua a dificuldade em obter um bom levantamento a essa velocidade. No entanto, nos levantamentos a 15 km/h os erros mais elevados ocorreram em apenas 14-18% do trecho.

Como consequência, os erros médios obtidos no levantamento a 25 km/h foram de 1,3 e 1,6, que são valores elevados. Para a velocidade de 15 km/h foi possível obter erros médios inferiores, que variaram entre 1,0 e 1,1 (valores mais aceitáveis). Assim, verifica-se que o levantamento com apoio fotográfico permite acelerar a avaliação do estado superficial de pavimentos, o que é muito relevante para observação de trechos muito extensos, mas existem limitações na velocidade a que se consegue circular com veículo. Essas limitações são de 15 km/h neste trecho muito irregular, para minimizar o erro médio e o número de fotografias sem qualidade, mas será possível utilizar maiores velocidades em estradas mais regulares.

4.4.2. Segundo levantamento do estado superficial do pavimento com apoio fotográfico (outubro de 2018)

O segundo levantamento foi efetuado em outubro de 2018, com ensaios rápidos (25 km/h) realizados ao final do dia e à noite, e ensaios lentos (15 km/h) realizados de manhã. Nessa altura do ano há muito menor luminosidade, em especial ao final da tarde e, como é óbvio, à noite. Essas condições foram escolhidas para poder avaliar a possibilidade de introdução de um conjunto de holofotes no veículo que procuraram criar uma iluminação artificial mais constante, e que eventualmente permitisse efetuar levantamentos em períodos noturnos. O levantamento efetuado durante a parte da manhã, a menor velocidade, procurou avaliar condições mais favoráveis, até porque nesse dia não estava sol e as condições de luz eram muito boas devido à inexistência de locais de contraste luz-sombra.

De referir ainda que neste levantamento efetuado em outubro de 2018 foram utilizadas duas câmaras, sempre na parte frontal do veículo, para se compreender qual a sua influência nas imagens recolhidas. Dado que na maioria dos casos não houve diferenças significativas entre ambas as câmaras utilizadas neste trabalho, como se poderá ver posteriormente, optou-se por agregar esses levantamentos para cada uma das restantes condições em análise.

Condição A – Levantamento fotográfico de dia (final de tarde), sem iluminação, a 25 km/h

Neste levantamento efetuado em outubro de 2018, ao final da tarde e sem iluminação, o principal problema na obtenção de imagens com qualidade resultou da reduzida luminosidade existente e da maior velocidade (25 km/h), o que originou várias imagens desfocadas. Isso aconteceu em especial na câmara 1, pelo menor contraste das imagens que esta obtém e à pior adaptação a um ambiente com ainda menos luz (o levantamento foi feito um pouco mais tarde do que com a câmara 2). Assim, houve várias imagens desfocadas (Figura 51), em particular na câmara 1, em contraste com a maioria das imagens obtidas nesse levantamento que apresentavam qualidade suficiente (Figura 52) para avaliação do estado superficial do pavimento (nível de fendilhamento).



Figura 51: Imagens sem qualidade (desfocadas) captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde) sem iluminação e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).



Figura 52: Imagens com qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde) sem iluminação e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).

Os níveis de fendilhamento observados no trecho experimental no levantamento fotográfico efetuado com as duas câmaras em outubro de 2018 (final da tarde, sem iluminação, 25 km/h) são apresentados na Figura 53, nos dois sentidos de tráfego, por comparação com o levantamento visual de referência.

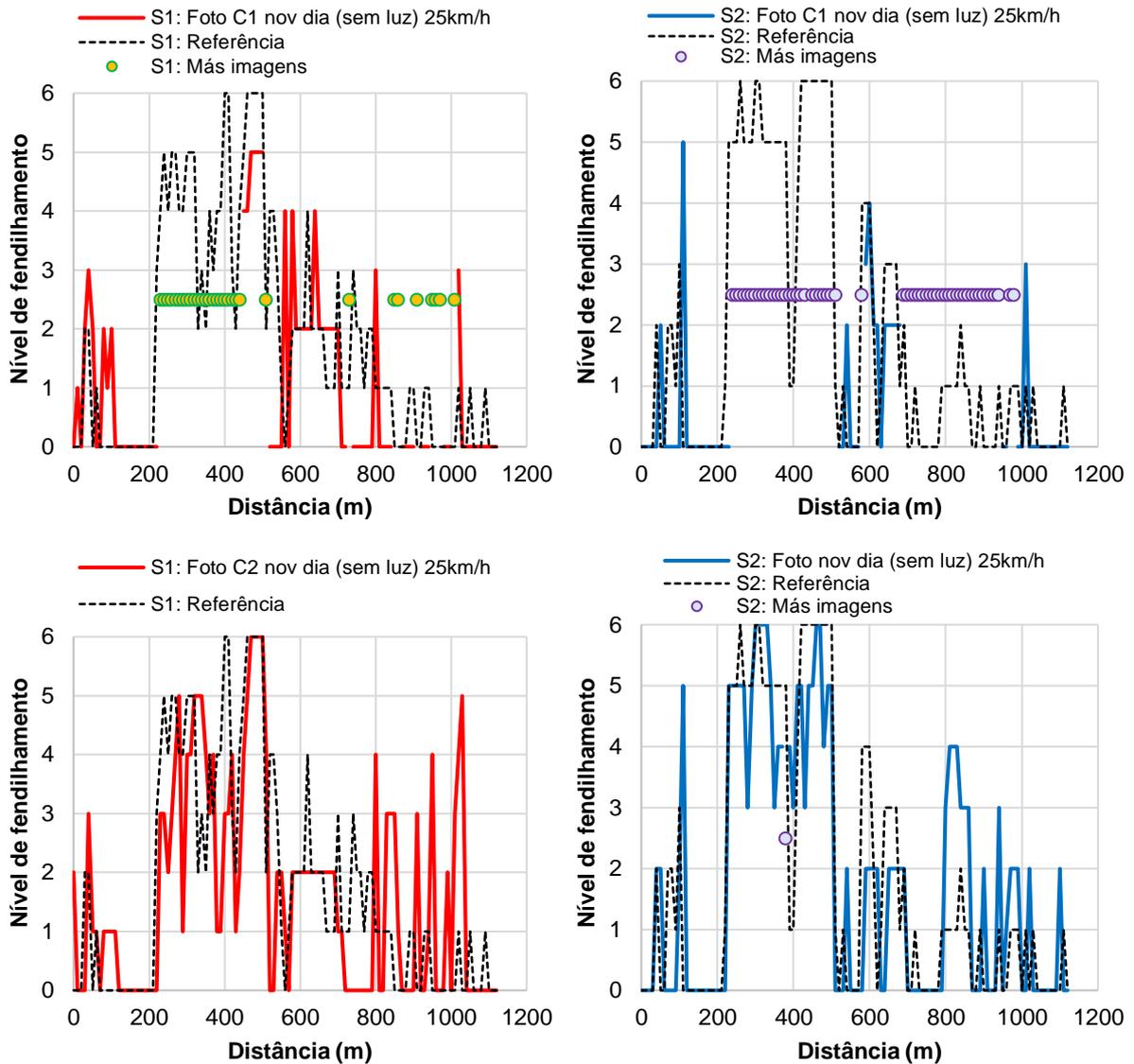


Figura 53: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental.

Ao comparar os resultados do sistema fotográfico (linhas contínuas coloridas) com o levantamento visual de referência (traço interrompido) verifica-se uma boa correspondência em ambos os sentidos. No entanto, na parte final do trecho (depois dos 800 metros) há diferenças significativas entre os dois métodos, em especial no sentido 1 (vermelho), com níveis de gravidade mais elevadas no levantamento fotográfico.

Na câmara 1 há ainda um conjunto muito significativo de pontos com imagens de pouca qualidade (más imagens) onde não se conseguiu identificar o nível de fendilhamento, o que já não aconteceu com a câmara 2 que obteve melhores registos fotográficos pelos motivos já indicados (maior contraste e levantamento feito um pouco mais cedo).

Em seguida quantificou-se a extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento, no levantamento fotográfico efetuado com as duas câmaras em outubro de 2018 (final da tarde, sem iluminação, 25 km/h) em cada sentido de tráfego (Tabela 20), bem como a extensão do trecho com imagens de reduzida qualidade.

Tabela 20: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h).

Nível de fendilhamento	Câmara 1		Câmara 2	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
0	46,9%	38,1%	41,6%	49,6%
1	1,8%	0,0%	13,3%	0,9%
2	13,3%	8,0%	15,9%	16,8%
3	2,7%	2,7%	10,6%	8,0%
4	4,4%	0,9%	9,7%	6,2%
5	3,5%	0,9%	5,3%	12,4%
6	0,0%	0,0%	3,5%	5,3%
Más imagens	27,4%	49,6%	0,0%	0,9%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

A extensão onde não se identificou fendilhamento é semelhante nos levantamentos fotográficos realizados (38-47% e 41-50%, respectivamente com a câmara 1 e 2), que são valores próximos do levantamento visual de referência (42%). A extensão na qual se identificou pele de crocodilo com a câmara 2 (19 e 24%, nos sentidos 1 e 2) também é próxima dos valores do levantamento visual de referência (22 e 26%). Isso não aconteceu com a câmara 1 (8 e 2%) devido ao elevado número de pontos com imagens sem qualidade. Assim, houve uma boa correspondência na quantificação das zonas com cada nível de fendilhamento, em especial com a câmara 2.

Ao avaliar os levantamentos fotográficos efetuados verifica-se que houve muitos pontos com imagens sem qualidade ao utilizar a câmara 1 (27 e 50%), em especial no sentido 2, o que já não aconteceu com a câmara 2 (0 e 1%). O melhor contraste da segunda câmara teve influência, mas a menor luminosidade ao entardecer (câmara 1) também influenciou este resultado.

Em seguida determinou-se o erro cometido no levantamento fotográfico efetuado com as duas câmaras em outubro de 2018 (final da tarde, sem iluminação, 25 km/h), em cada sentido de tráfego, por comparação com o levantamento visual de referência (Figura 54).

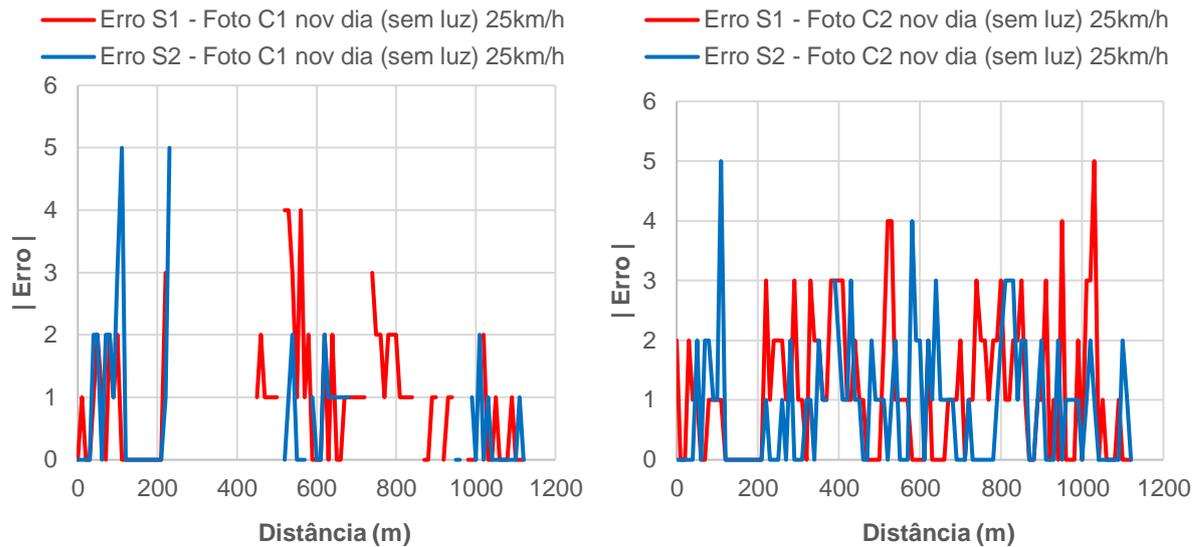


Figura 54: Erro associado aos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h) por comparação com o levantamento de referência

Os erros têm uma distribuição por todo o trecho no levantamento com a câmara 2, mas não há erros com o valor máximo (seis). O cálculo do erro foi muito limitado ao usar a câmara 1 devido ao elevado número de pontos sem imagens de qualidade, o que diminui o seu significado. Aparentemente há maiores erros no levantamento com a câmara 2 e no sentido 1. Nessa câmara surge ainda um número elevado de erros superiores a dois, que não são desejáveis.

Por fim procedeu-se à quantificação da extensão do trecho associada a cada erro entre o levantamento fotográfico efetuado com as duas câmaras em outubro de 2018 (final da tarde, sem iluminação, 25 km/h) e o levantamento visual de referência, para ambos os sentidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 21, e determinou-se o erro médio correspondente.

O erro é inferior a 1 em 77-81% do trecho nos vários levantamentos, exceto no levantamento com a câmara 2 no sentido 1 que em geral teve um maior erro (69% do trecho). Além disso, há uma coincidência total em 38-43% da extensão no sentido 1, e 48-58% no sentido 2. Por outro lado, o erro é muito elevado (igual ou superior a três) em apenas 7% do trecho (ou 15% com a câmara 2 no sentido 1), o que demonstra a boa qualidade do levantamento efetuado nestas condições, em especial quando se utilizou uma velocidade de 25 km/h.

Como consequência, os erros médios obtidos nestes levantamentos foram reduzidos, em geral inferiores a um (0,8 e 0,9), com exceção da câmara 2 no sentido 1 com um erro médio de 1,1. Verifica-se ainda que os erros médios foram menores no sentido 2.

Tabela 21: Extensão do trecho (%) associada a cada erro nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência.

Erro	Câmara 1		Câmara 2	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
0	42,7%	57,9%	38,1%	48,2%
1	34,1%	22,8%	31,0%	28,6%
2	15,9%	12,3%	15,9%	16,1%
3	3,7%	3,5%	11,5%	5,4%
4	3,7%	0,0%	2,7%	0,9%
5	0,0%	3,5%	0,9%	0,9%
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Erro médio	0,9	0,8	1,1	0,8

Assim, verifica-se que é possível reduzir o erro médio e o número de fotografias sem qualidade no levantamento com apoio fotográfico, ao utilizar melhores condições de luminosidade e câmaras fotográficas com maior contraste, mesmo mantendo a velocidade de 25 km/h.

Condição B – Levantamento fotográfico de dia (final de tarde), com iluminação, a 25 km/h

Na continuação do levantamento efetuado em outubro de 2018, ao final da tarde, foi colocado um sistema de iluminação artificial (com holofotes, já referidos no Capítulo 3) para tentar solucionar o problema que a reduzida luminosidade estava a ter na obtenção de imagens com qualidade. No entanto, como se irá verificar em seguida, este sistema não conseguiu resolver o problema, em grande parte devido à sua reduzida capacidade de iluminar toda a área em análise de forma uniforme e com intensidade suficiente para permitir uma melhor focagem das imagens. Além disso, a utilização numa velocidade mais alta (25 km/h), e a redução da iluminação natural ao utilizar a câmara 1 (ensaio feito quase ao anoitecer) também foram fatores que levaram à obtenção de várias imagens desfocadas com essa câmara. Por outro lado, o maior contraste das imagens da câmara 2, e a realização dos ensaios num ambiente com mais alguma luz (os levantamentos com a câmara 2 foram os primeiros a ser executados) permitiram obter quase todas as imagens com boa qualidade. Assim, houve várias imagens desfocadas, em especial na câmara 1 (Figura 55), em contraste com as imagens com qualidade suficiente obtidas de forma mais recorrente com a câmara 2 (Figura 56) que permitiram avaliar o nível de fendilhamento do pavimento. Nessas imagens é notório (em especial na câmara 1) que os holofotes apenas conseguem iluminar menos de metade da distância em análise.



Figura 55: Imagens sem qualidade (desfocadas) captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde), com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).

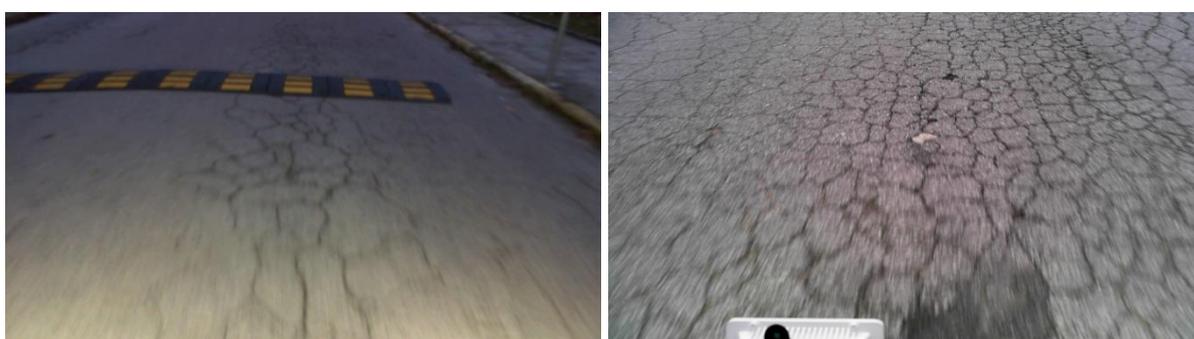


Figura 56: Imagens com qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 (fim da tarde), com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).

Os níveis de fendilhamento observados no trecho experimental no levantamento fotográfico efetuado com as duas câmaras em outubro de 2018 (final da tarde, com holofotes, a 25 km/h) são apresentados na Figura 57, nos dois sentidos de tráfego, por comparação com o levantamento visual de referência.

Ao comparar os resultados do sistema fotográfico da câmara 2 (linhas contínuas coloridas) com o levantamento visual de referência (traço interrompido) verifica-se uma boa correspondência em ambos os sentidos. No entanto, na parte final do trecho (depois dos 800 metros) continua a haver diferenças significativas entre os dois métodos, em ambos os sentidos, com níveis de gravidade mais elevadas no levantamento fotográfico. Na câmara 1 há um conjunto muito significativo de pontos com imagens de pouca qualidade onde não se conseguiu identificar o nível de fendilhamento, o que praticamente impede a comparação deste levantamento com o utilizado como referência. O aumento das imagens sem qualidade ao utilizar holofotes, por comparação com o levantamento sem iluminação, parece ser contraditório, mas isso resultou na redução da iluminação natural (pois este levantamento foi feito ao anoitecer).

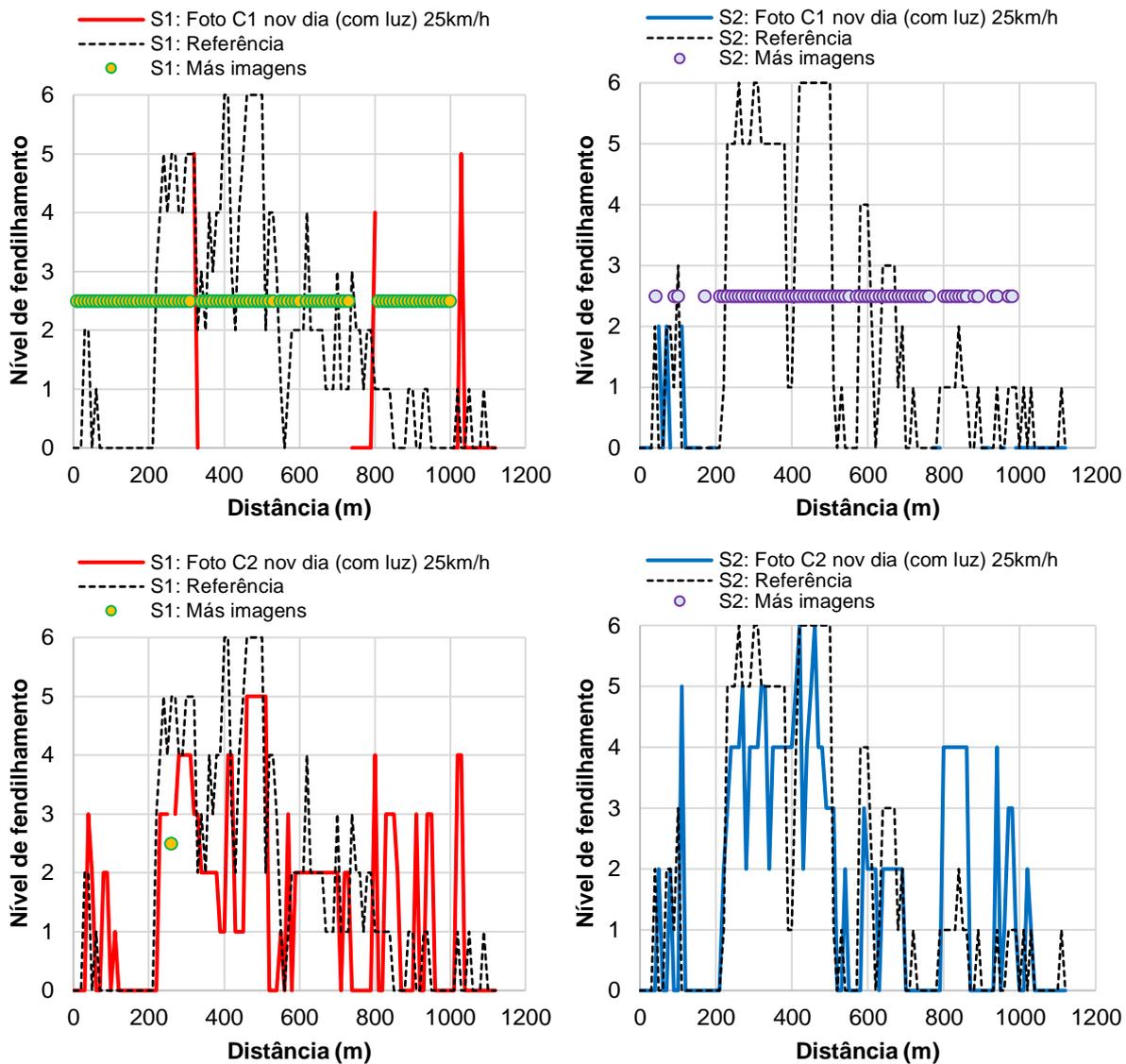


Figura 57: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental

Em seguida calculou-se a extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento ou com imagens de reduzida qualidade, no levantamento fotográfico de outubro de 2018, com as duas câmaras (fim da tarde, com holofotes, 25 km/h) e em cada sentido de tráfego (Tabela 22).

A extensão onde não se identificou fendilhamento nos levantamentos fotográficos realizados com a câmara 2 (47-49%) é ligeiramente superior ao levantamento visual de referência (42%). A extensão na qual se identificou pele de crocodilo com a câmara 2 (13 e 28% nos sentidos 1 e 2) também é próxima dos valores do levantamento visual de referência no sentido 2 (26%), mas inferior no sentido 1 (22%) devido ao menor nível de fendilhamento observado nas fotografias entre os 200 e os 500 metros do trecho.

Tabela 22: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h).

Nível de fendilhamento	Câmara 1		Câmara 2	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
0	17,7%	33,6%	46,9%	48,7%
1	0,0%	0,0%	6,2%	2,7%
2	0,9%	2,7%	20,4%	15,0%
3	0,0%	0,0%	12,4%	6,2%
4	0,9%	0,0%	8,0%	20,4%
5	1,8%	0,0%	5,3%	5,3%
6	0,0%	0,0%	0,0%	1,8%
Más imagens	78,8%	63,7%	0,9%	0,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

As extensões associadas a cada nível de fendilhamento com a câmara 1 são sempre muito baixas devido ao elevado número de pontos com imagens sem qualidade. De facto, ao avaliar os levantamentos fotográficos efetuados verifica-se que uma grande extensão do trecho (64 a 79%) tem imagens sem qualidade ao utilizar a câmara 1, em ambos os sentidos, o que já não aconteceu com a câmara 2 (0 a 1%). De novo, o melhor contraste da segunda câmara teve influência, mas a menor luminosidade ao anoitecer foi a principal razão do resultado obtido com a câmara 1.

Em seguida determinou-se o erro cometido no levantamento fotográfico efetuado com as duas câmaras em outubro de 2018 (final da tarde, com holofotes, 25 km/h), em cada sentido de tráfego, por comparação com o levantamento visual de referência (Figura 58).

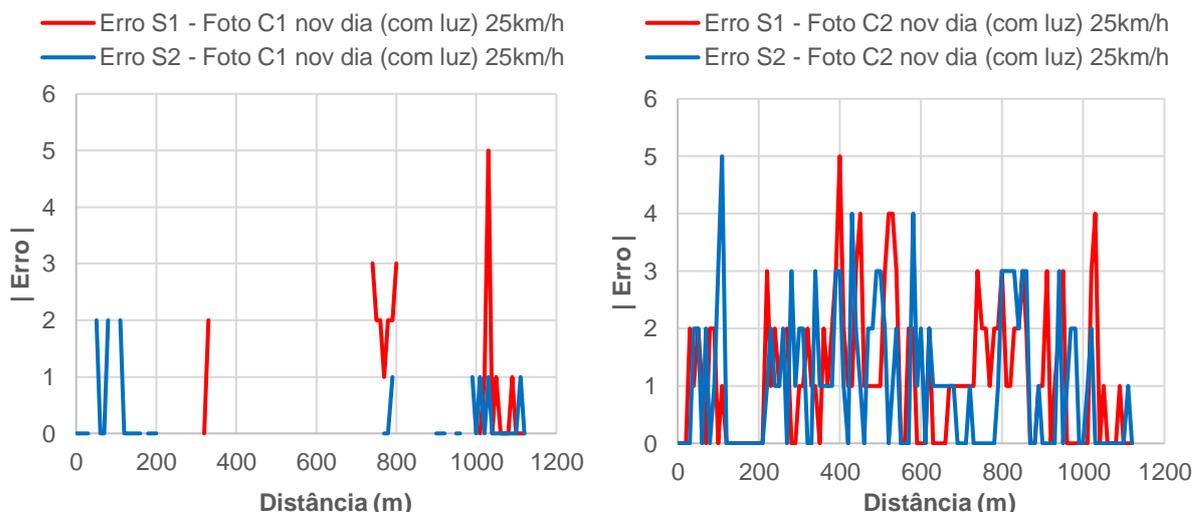


Figura 58: Erro associado aos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h) por comparação com o levantamento de referência

Os erros têm uma distribuição por todo o trecho no levantamento com a câmara 2, mas não há erros com o valor máximo (seis). O cálculo do erro foi muito limitado ao usar a câmara 1 devido ao elevado número de pontos sem imagens de qualidade, o que diminui o seu significado. Na câmara 2 surge ainda um número elevado de erros superiores a dois, que não são desejáveis.

Por fim procedeu-se à quantificação da extensão do trecho associada a cada erro entre o levantamento fotográfico efetuado com as duas câmaras em outubro de 2018 (final da tarde, com holofotes, 25 km/h) e o levantamento visual de referência, para ambos os sentidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 23, e determinou-se o erro médio correspondente.

Tabela 23: Extensão do trecho (%) associada a cada erro nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, com iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência.

Erro	Câmara 1		Câmara 2	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
0	45,8%	80,5%	38,4%	46,9%
1	16,7%	12,2%	28,6%	22,1%
2	20,8%	7,3%	18,8%	15,9%
3	12,5%	0,0%	9,8%	12,4%
4	0,0%	0,0%	3,6%	1,8%
5	4,2%	0,0%	0,9%	0,9%
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Erro médio	1,2	0,3	1,1	1,0

O erro é inferior a 1 em 68-69% do trecho nos levantamentos efetuados com a câmara 2, e há uma coincidência total em 38-47% da extensão. Por outro lado, o erro é muito elevado (igual ou superior a três) em apenas 14-15% do trecho, o que demonstra a elevada qualidade do levantamento efetuado com a câmara 2 nestas condições, em especial à velocidade de 25 km/h. Como consequência, os erros médios obtidos no levantamento com a câmara 2 foram reduzidos (1,0 e 1,1). Os erros obtidos com a câmara 1 têm pouco significado devido ao reduzido número de pontos em análise. Verifica-se ainda que os erros médios foram menores no sentido 2.

A utilização de iluminação artificial (holofotes) não permitiu reduzir o erro médio e o número de fotografias sem qualidade no levantamento com apoio fotográfico. No entanto, a influência das condições de luminosidade é evidente, razão pela qual se acredita que é possível otimizar o sistema de iluminação artificial (maior intensidade, projeção de luz mais na perpendicular sobre

a estrada, maior coincidência entre a área iluminada e fotografada) para conseguir os resultados desejados independentemente da iluminação natural, incluindo à noite.

Condição C – Levantamento fotográfico de noite, com iluminação, a 25 km/h

Apesar de se ter verificado que neste trabalho os holofotes não conseguiram ter o efeito desejado, também se realizaram levantamentos noturnos com esses holofotes. Em termos práticos era importante verificar se a câmara 2 continuava a garantir melhores resultados, e também se queria observar a qualidade das fotos sem iluminação natural.

A capacidade dos holofotes para iluminar toda a área em análise de forma uniforme e com intensidade suficiente para permitir uma melhor focagem das imagens continuou a ser reduzida, em parte por se ter mantido a velocidade de 25 km/h. Assim, o número de imagens ainda mais desfocadas aumentou significativamente em ambas as câmaras (Figura 59), e apenas algumas imagens (quando a velocidade era menor) tiveram qualidade suficiente (Figura 60) para avaliar o nível de fendilhamento do pavimento. Continua a ser evidente que os holofotes só conseguem iluminar menos de metade da distância em análise, agora para ambas as câmaras.



Figura 59: Imagens sem qualidade (desfocadas/escuras) captadas na observação de outubro de 2018 à noite, com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).



Figura 60: Imagens com alguma qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 à noite, com holofotes e a 25 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).

Os níveis de fendilhamento do trecho experimental observados no levantamento fotográfico noturno de outubro de 2018 (com duas câmaras, holofotes, a 25 km/h) são apresentados na Figura 61, nos dois sentidos de tráfego, em comparação com o levantamento visual de referência.

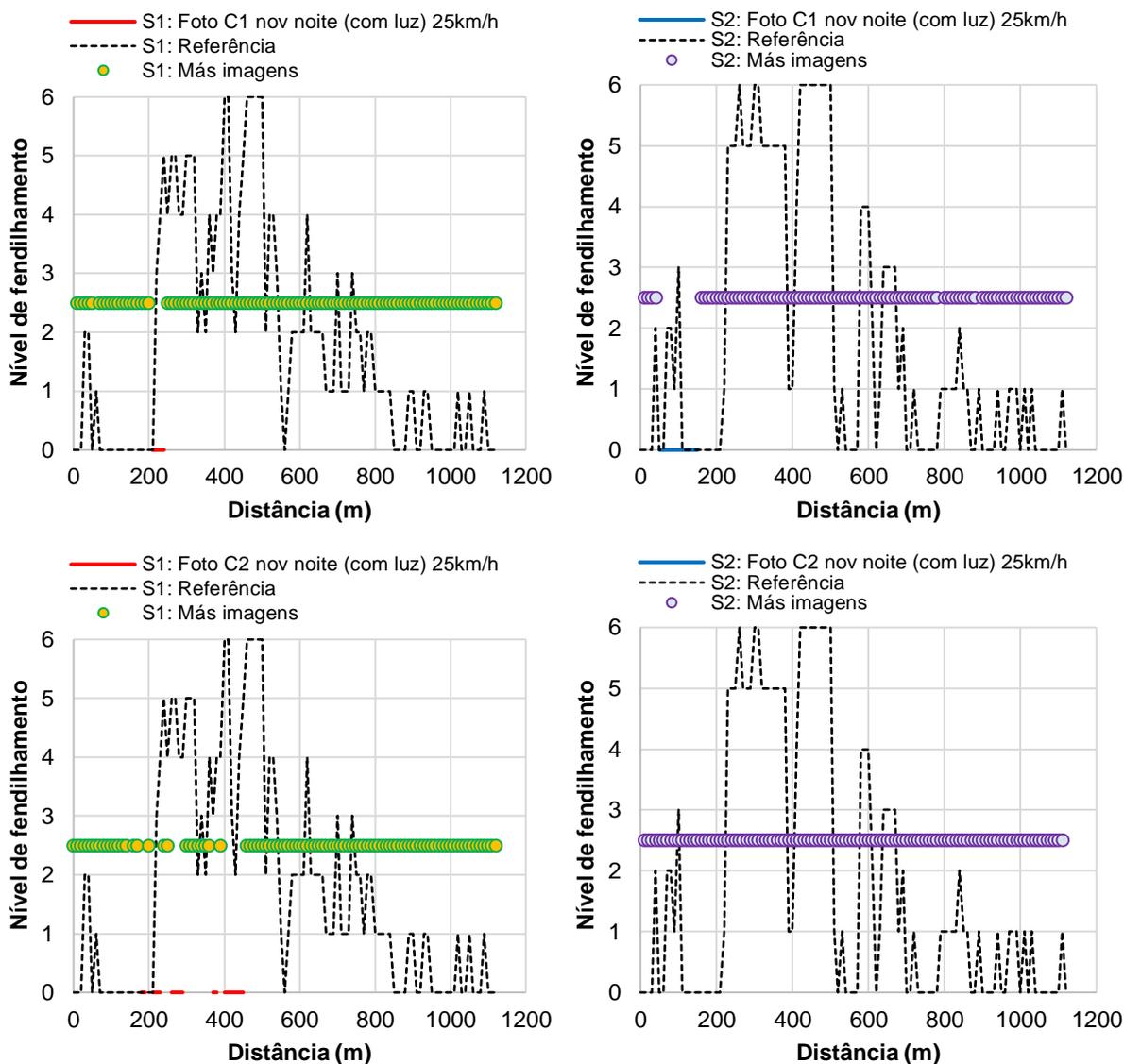


Figura 61: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (noite, com iluminação, 25 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental

Nas duas câmaras há um conjunto significativo de pontos (quase a totalidade) com imagens de pouca qualidade onde não se conseguiu identificar o nível de fendilhamento, o que praticamente impede a comparação deste levantamento com o utilizado como referência. De facto, ao avaliar os levantamentos fotográficos efetuados à noite verifica-se que uma grande extensão do trecho (84 a 98%) tem imagens sem qualidade (Tabela 24), em ambas as câmaras e em ambos os sentidos. Além disso, os únicos pontos identificados não apresentam fendilhamento.

Tabela 24: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (noite, com iluminação, 25 km/h).

Nível de fendilhamento	Câmara 1		Câmara 2	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
0	5,3%	12,4%	15,9%	1,8%
1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Más imagens	94,7%	87,6%	84,1%	98,2%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Nestes levantamentos efetuados à noite, não se procedeu ao cálculo do erro (para ambas as câmaras) devido ao elevado número de pontos sem imagens de qualidade, o que retira todo o significado a esse parâmetro.

A utilização de iluminação artificial (holofotes) não permitiu realizar um levantamento com apoio fotográfico à noite, o que seria muito vantajoso para garantir a utilização deste sistema na rede de estradas quando há menores volumes de tráfego. No entanto, verificou-se que as poucas imagens com qualidade ocorreram ao reduzir a velocidade do veículo, ou em zonas com outras fontes de iluminação artificial (postes de iluminação). Assim, será possível redesenhar o sistema de iluminação para conseguir realizar este tipo de levantamentos à noite.

Condição D – Levantamento fotográfico de dia (manhã), sem iluminação, a 15 km/h

O levantamento efetuado durante a parte da manhã, a menor velocidade, procurou avaliar condições mais favoráveis, até porque nesse dia não estava sol e as condições de luz eram muito boas devido à inexistência de locais de contraste luz-sombra. Estas condições foram definidas para tentar confirmar se os problemas detetados nos levantamentos ao final da tarde e à noite (várias imagens sem qualidade) eram essencialmente uma consequência das más condições de luminosidade e da velocidade mais elevada utilizada. Nesse sentido, essas conclusões foram confirmadas porque todas as imagens obtidas neste levantamento com as duas câmaras tiveram bastante qualidade e permitiram determinar o nível de fendilhamento ao longo do trecho (Figura 62). Além disso, voltou a confirmar-se a vantagem do maior contraste da câmara 2.



Figura 62: Imagens com bastante qualidade captadas no levantamento de outubro de 2018 (manhã), sem iluminação e a 15 km/h (câmara 1 à esquerda e 2 à direita).

Os níveis de fendilhamento observados no trecho experimental no levantamento fotográfico efetuado em outubro de 2018 (manhã, sem iluminação, 15 km/h) são apresentados na Figura 63, nos dois sentidos de tráfego, por comparação com o levantamento visual de referência. As duas câmaras funcionaram em simultâneo, originando resultados exatamente iguais, razão pela qual não se apresentam gráficos diferentes para cada câmara.

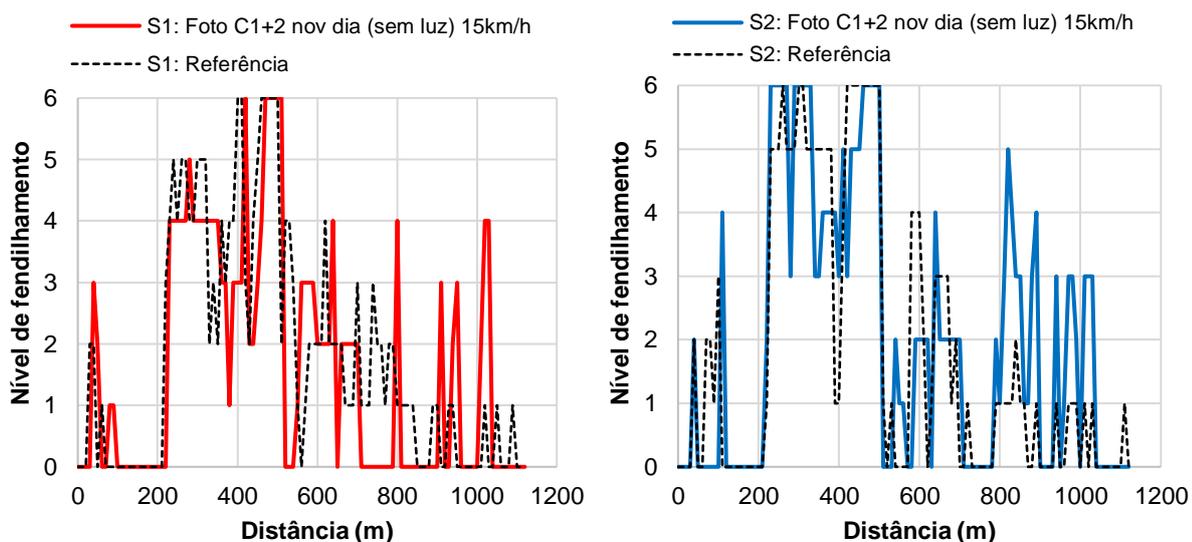


Figura 63: Levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h) vs. levantamento de referência do nível de fendilhamento no trecho experimental

Ao comparar os resultados do sistema fotográfico (linhas contínuas coloridas) com o levantamento visual de referência (traço interrompido) verifica-se uma boa correspondência em ambos os sentidos. No entanto, volta a verificar-se que há diferenças entre os dois métodos na parte final do trecho (depois dos 800 metros), nos dois sentidos, com níveis de gravidade mais elevadas no levantamento fotográfico. Também se verifica que há pequenos desajustes das distâncias, em especial no sentido 1, sem os quais os resultados ainda seriam mais próximos. Neste caso, como se referiu, não houve nenhuma imagem de pouca qualidade (más imagens).

Em seguida quantificou-se a extensão do trecho associada a cada nível de fendilhamento, no levantamento fotográfico efetuado em outubro de 2018 (manhã, sem iluminação, 15 km/h) em cada sentido de tráfego (Tabela 25). Não houve imagens de reduzida qualidade.

Tabela 25: Extensão do trecho (%) para cada nível de fendilhamento ou com más imagens nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h).

Nível de fendilhamento	Câmara 1 e 2	
	Sentido 1	Sentido 2
0	51,3%	43,4%
1	3,5%	5,3%
2	12,4%	13,3%
3	11,5%	13,3%
4	15,0%	7,1%
5	0,9%	4,4%
6	5,3%	13,3%
Total	100,0%	100,0%

A extensão onde não se identificou fendilhamento é ligeiramente superior nos levantamentos fotográficos realizados (43-51%) aos valores do levantamento visual de referência (42%). A extensão na qual se identificou pele de crocodilo (21 e 25%, nos sentidos 1 e 2) é muito próxima dos valores do levantamento visual de referência (22 e 26%). Assim, confirma-se que houve uma boa correspondência na quantificação das zonas com cada nível de fendilhamento ao utilizar condições de levantamento mais favoráveis no método fotográfico.

Em seguida determinou-se o erro cometido no levantamento fotográfico efetuado em outubro de 2018 (manhã, sem iluminação, 15 km/h), em cada sentido de tráfego, por comparação com o levantamento visual de referência (Figura 64).

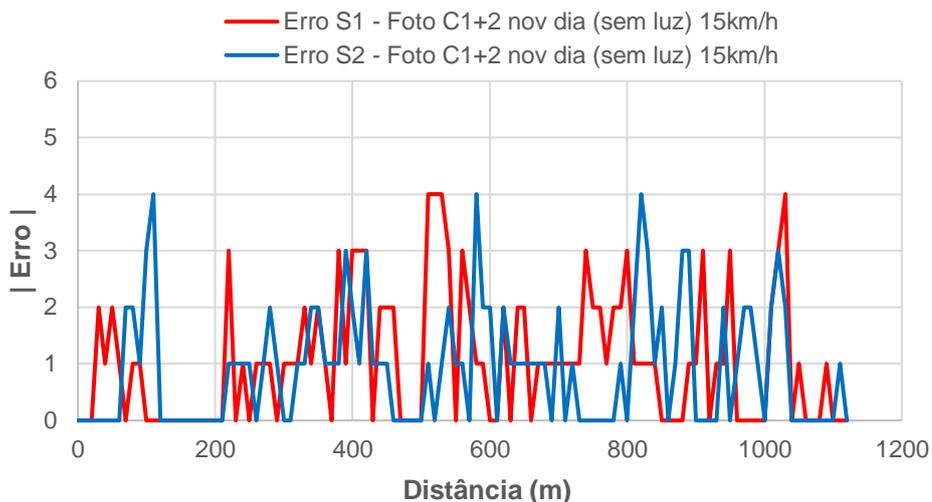


Figura 64: Erro associado aos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h) por comparação com o levantamento de referência

Os erros neste levantamento também têm uma distribuição por todo o trecho, embora os seus valores não sejam muito elevados (o valor máximo de erro é quatro). De facto, verifica-se que há um número reduzido de erros superiores a dois, o que é um bom sinal de convergência entre este levantamento fotográfico e o visual de referência.

Por fim procedeu-se à quantificação da extensão do trecho associada a cada erro entre o levantamento fotográfico efetuado em outubro de 2018 (manhã, sem iluminação, 15 km/h) e o levantamento visual de referência, para ambos os sentidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 26, e determinou-se o erro médio correspondente.

Tabela 26: Extensão do trecho (%) associada a cada erro nos levantamentos fotográficos de outubro de 2018 (dia, sem iluminação, 15 km/h) vs. levantamento de referência.

Erro	Câmara 1 e 2	
	Sentido 1	Sentido 2
0	41,6%	46,0%
1	30,1%	29,2%
2	14,2%	15,9%
3	10,6%	6,2%
4	3,5%	2,7%
5	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%
Total	100,0%	100,0%
Erro médio	1,0	0,9

O erro é inferior a 1 em 72-75% do trecho neste levantamento, e há uma coincidência total em 42-46% da extensão do trecho. Por outro lado, o erro é muito elevado (igual ou superior a três) em apenas 9-14% do trecho, não havendo erros de iguais ou superiores a cinco, o que demonstra a excelente qualidade do levantamento efetuado nestas condições. Como consequência, os erros médios obtidos nestes levantamentos foram reduzidos (1,0 e 0,9). Mais uma vez, verifica-se que os erros médios foram menores no sentido 2.

Em resumo, a observação do estado superficial do pavimento (neste caso o nível de fendilhamento) com apoio fotográfico é um método que consegue obter resultados bastante precisos, ao mesmo tempo que se garante maior velocidade e conforto do operador no levantamento. Além disso, a manutenção dos registos fotográficos para consulta futura é uma vantagem que nenhum dos restantes métodos em análise neste estudo apresenta. Apesar disso, as condições de luminosidade (natural ou artificial) em que o levantamento é realizado têm uma influência significativa na qualidade das imagens recolhidas, bem como a velocidade de circulação do veículo. A seleção de um trecho experimental bastante irregular acentuou a importância de continuar a otimizar este sistema, que poderá funcionar em qualquer condição (inclusive de noite e a maiores velocidades) quando se conseguir definir o equilíbrio ideal entre o método de iluminação artificial e o método de recolha de imagens. Também é de referir a importância de conseguir corrigir as diferenças na medição das distâncias entre os vários métodos, visto que alguns erros resultam dessa circunstância (o que foi notório neste último levantamento).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Neste trabalho de Mestrado avaliaram-se três métodos para observação do estado superficial de pavimentos, que por simplificação foram apenas utilizados para avaliação do nível de fendilhamento. Esses métodos foram i) o levantamento visual a pé, ii) o levantamento visual no veículo com apoio computacional, e iii) o levantamento com apoio fotográfico no veículo, com posterior avaliação das imagens registradas. No entanto, o enfoque principal deste trabalho foi o desenvolvimento e otimização do último dos três sistemas apresentados.

Durante a execução deste trabalho foi possível retirar diversas conclusões dos resultados que foram obtidos, que serão apresentadas em seguida.

Numa fase inicial procedeu-se à caracterização do estado superficial do pavimento do trecho em estudo. A elevada irregularidade verificada no trecho em estudo dificultou a posterior obtenção de imagens fotográficas nítidas aquando da observação do estado superficial através do levantamento fotográfico com equipamentos acoplados ao veículo. No entanto, essa foi uma das razões para a seleção deste trecho experimental, para testar a metodologia fotográfica em condições mais desfavoráveis. Ao longo do trecho, e de uma forma geral, verifica-se que a primeira metade (mais próxima do ponto A) tem uma maior textura e irregularidade. O maior estado de degradação nessa zona do trecho poderá estar a influenciar o valor da textura, mas é mais provável que essa diferença resulte da utilização de diferentes misturas em camada de desgaste. Apesar disso, a textura mais elevada na primeira metade do trecho não dificultou a observação do estado superficial do pavimento com recurso a fotografias.

Em seguida procedeu-se ao levantamento do nível de fendilhamento no trecho em estudo. O método tradicional e que continua a ser o mais utilizado para observação do estado superficial de pavimentos consiste no levantamento visual das patologias, que é efetuado a pé. Apesar das desvantagens associadas a este método, que é bastante lento e cansativo, o mesmo consegue ser bastante rigoroso se o operador tiver uma boa experiência na identificação das degradações. Assim, esse método foi utilizado como referência neste trabalho para comparação com todos os outros métodos, mas apenas quando o operador (aluno) já tinha experiência, ou seja, no final de todo o trabalho. Também se fez um levantamento inicial para comparação, para verificar a influência que o operador (falta de experiência) pode ter nos resultados.

Os resultados do levantamento do estado superficial de referência demonstram haver uma boa correspondência no nível de fendilhamento entre os dois sentidos de tráfego. Além disso, verifica-se que os locais com um nível de degradação mais elevado coincidem ainda com as zonas onde se verificou haver maior irregularidade e uma textura mais rugosa. Estes resultados reforçam a hipótese de não existir uma camada de desgaste no trecho dos 200 aos 600 metros, o que reduz a capacidade de carga do pavimento e acelera a sua degradação.

O erro médio obtido no levantamento visual inicial (sem experiência) foi igual a 1,1. Este valor não é muito elevado, mas é desejável que se aproxime de zero. Assim, verifica-se que a falta de experiência pode ter algum significado nos resultados obtidos durante a observação do estado superficial de pavimentos.

Em seguida procedeu-se ao levantamento visual do nível de fendilhamento do pavimento no veículo com apoio computacional, recorrendo a um programa desenvolvido na Universidade do Minho em programação *Labview*. O erro médio obtido neste método, por comparação com o método de referência, foi relativamente elevado (1,5-1,6). Assim, verifica-se que o levantamento com apoio computacional permite acelerar a avaliação do estado superficial de pavimentos, o que é muito relevante para observação de trechos muito extensos, mas há uma redução do rigor com que se faz o registo das patologias. Além disso, neste levantamento não se deve circular a uma velocidade superior a 25 km/h para que se consiga perceber bem as patologias da superfície do pavimento. De referir ainda que este método exige o apoio de um segundo operador para conduzir o veículo, aumentando o seu custo.

Por último, fez-se o levantamento do nível de fendilhamento do pavimento com apoio fotográfico no veículo, com posterior avaliação das imagens registadas, cujo desenvolvimento e otimização era o enfoque principal deste trabalho. O levantamento com apoio fotográfico também é realizado num veículo que tem acoplada uma *webcam* que obtém um registo fotográfico a cada dois metros. O equipamento de medição de distâncias do veículo está associado ao programa que controla a câmara, o que permite associar cada imagem à distância já percorrida no trecho. Este sistema é cómodo e rápido, e não é imprescindível a presença de dois operadores. A avaliação do nível de fendilhamento não tem de ser feito no momento, o que permite ter mais rigor, embora obrigue a um consumo adicional de tempo em gabinete para análise das fotografias. Outra vantagem deste sistema é a manutenção dos registos fotográficos para consulta futura.

Depois de se definirem todas as variáveis a estudar, procedeu-se à realização de levantamentos em duas fases distintas. O primeiro levantamento foi efetuado em julho de 2018, durante a parte da manhã, em condições de elevada luminosidade, mas com grandes contrastes luz-sombra. Neste levantamento utilizou-se apenas a câmara 1, e duas velocidades de circulação (lenta, de 15 km/h, e rápida, de 25 km/h). Também se experimentou colocar a câmara na parte de trás do veículo, em oposição à posição frontal utilizada em todos os outros levantamentos. Algumas imagens captadas através da câmara localizada no veículo não conseguiram garantir a qualidade desejável para avaliação posterior, o que levou à otimização do sistema.

Ao avaliar os vários levantamentos fotográficos efetuados verifica-se que o aumento da velocidade de levantamento tem um efeito negativo, com um aumento de 6% na extensão com imagens sem qualidade quando a velocidade subiu de 15 para 25 km/h. Os erros médios obtidos no levantamento a 25 km/h foram superiores (1,3-1,6) aos obtidos a 15 km/h (1,0 e 1,1). Assim, o levantamento com apoio fotográfico permite acelerar a avaliação do estado superficial de pavimentos, mas existem limitações na velocidade a utilizar (15 km/h neste trecho muito irregular) de modo a minimizar o erro médio e o número de fotografias sem qualidade. A colocação da câmara na parte traseira do veículo teve bons resultados, mas abandonou-se esta alternativa por dificuldades técnicas na ligação entre a câmara e o portátil.

O segundo levantamento foi efetuado em outubro de 2018, com ensaios rápidos (25 km/h) realizados ao final do dia e à noite, e ensaios lentos (15 km/h) realizados de manhã. Essas condições foram escolhidas para avaliar a possibilidade de introdução de um conjunto de holofotes no veículo que procuraram criar uma iluminação artificial mais constante. Ainda foram utilizadas duas câmaras para se compreender a sua influência nas imagens recolhidas.

Inicialmente verificou-se que é possível reduzir o erro médio e o número de fotografias sem qualidade neste segundo levantamento com apoio fotográfico, ao utilizar melhores condições de luminosidade e câmaras fotográficas com maior contraste (câmara 2), mesmo mantendo a velocidade de 25 km/h. Em seguida observou-se que a utilização de iluminação artificial (holofotes) não permitiu reduzir o erro médio e o número de fotografias sem qualidade no levantamento com apoio fotográfico, quer de dia, quer de noite. No entanto, a influência das condições de luminosidade é evidente, razão pela qual se acredita que é possível otimizar o sistema de iluminação artificial (maior intensidade, projeção de luz mais na perpendicular sobre a estrada, maior coincidência entre a área iluminada e fotografada).

O último levantamento efetuado durante a parte da manhã, a menor velocidade, procurou avaliar condições mais favoráveis, até porque nesse dia não estava sol e as condições de luz eram muito boas devido à inexistência de locais de contraste luz-sombra. Nessas condições todas as imagens obtidas com as duas câmaras tiveram bastante qualidade e permitiram determinar o nível de fendilhamento ao longo do trecho. Além disso, houve uma boa correspondência na quantificação das zonas com cada nível de fendilhamento ao utilizar condições de levantamento mais favoráveis no método fotográfico, e os erros médios obtidos neste levantamento foram reduzidos (1,0 e 0,9).

Em resumo, a observação do estado superficial do pavimento (neste caso o nível de fendilhamento) com apoio fotográfico é um método que consegue obter resultados bastante precisos, ao mesmo tempo que se garante maior velocidade e conforto do operador no levantamento. Apesar disso, as condições de luminosidade (natural ou artificial) em que o levantamento é realizado têm uma influência significativa na qualidade das imagens recolhidas, bem como a velocidade de circulação do veículo. De referir ainda a importância de conseguir corrigir as diferenças na medição das distâncias entre os vários métodos, visto que alguns erros resultam dessa circunstância.

5.2.Trabalhos futuros

Neste trabalho não se conseguiu otimizar totalmente o sistema fotográfico de levantamento do estado superficial de pavimentos. Assim, de futuro deve continuar a apostar-se na otimização deste sistema para a sua utilização num conjunto de situações mais generalizada. A aposta principal deve acontecer na melhoria do sistema de iluminação artificial, mas também se deve corrigir alguns desajustes na medição das distâncias. O sistema de apoio das câmaras, bem como o ângulo de incidência das fotografias deve ser estudado em função da iluminação artificial utilizada. Tudo isso deve permitir utilizar o sistema a maior velocidade, com boa qualidade de imagens.

Deve ainda apostar-se na realização de ensaios em outras estradas da rede rodoviária, e na identificação de outras patologias (além do fendilhamento). Por último, deve desenvolver-se um *software* de reconhecimento posterior das imagens recolhidas, em gabinete, que consiga identificar o nível das patologias de forma mais automática, para acelerar o processo e garantir menos subjetividade neste sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, T.S.F. (2007). *Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários: Aplicação prática do radar de prospecção e do defletómetro de impacto*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Amorim, S.I.R. (2013). *Correção das deflexões obtidas com defletómetro de impacto devido às variações de temperatura*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Antunes, M.L. (1993). *Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- ASTM E1364-95 (2017). *Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Azevedo, M.C. (2012). *Directivas para a concepção de pavimentos – Critérios de dimensionamento*, INIR - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, Lisboa.
- Balbo, J.T. (2015). *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração*, Oficina de Textos, São Paulo.
- Bennett, C.R., De Solminihac, H., Chamorro, A. (2006). Data collection technologies for road management.
- Benson, K., Elkins, G., Uddin, W., Hudson, W. (1988). Comparison of methods and equipment to conduct pavement distress surveys, *Transportation Research Record* (1196).
- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G., Ceratti, J.A., Soares, J.B. (2008). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*, Petrobras, Rio de Janeiro.
- Branco, F., Pereira, P., Picado Santos, L. (2008). *Pavimentos rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra.
- DNIT (2006). *Manual de Pavimentação*, Publicação IPR-719, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.
- Domingos, P. (2009). *Reforço de Pavimentos Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Dominguez, F.S., Dias, C.H.S. (2011). Auscultación de las características estructurales de una red de carreteras con equipo de alto rendimiento: Curviámetro MT, *CONINFRA 2011 – 5º Congresso de Infraestrutura de Transportes*, São Paulo.
- ECivil (2018). *Pavimento semi-rígido*, Ecivilnet.com; <https://www.ecivilnet.com/diccionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>.

- EN 13036-1 (2001). *Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- EN ISO 13473-1 (2004). *Characterization of pavement texture by use of surface profiles. Determination of mean profile depth*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- Estradas de Portugal (2005). *Sistema de gestão de pavimentos. Manual de utilização*, Estradas de Portugal, Lisboa.
- Estradas de Portugal (2008). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários*, Estradas de Portugal, Almada.
- Estradas de Portugal (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra. Pavimentação - 15.03. Métodos construtivos.*, Estradas de Portugal, S.A., Almada.
- Faleiros, L.M. (2005). *Engenharia Civil. Estradas - Pavimento. Notas de aula*, Universidade de Franca, Franca, São Paulo.
- Federal Highway Administration (2015). *The Long-Term Pavement Performance Program*, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Fontul, S. (2004). *Structural Evaluation of Flexible Pavements using Non Destructive Tests*, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra.
- Francisco, A.P.S. (2012). *Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis*, Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança.
- Freitas, E.F. (2001). *Estudo da evolução do desempenho dos pavimentos rodoviários flexíveis*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Gillespie, T.D., Sayers, M.W., Segel, L. (1980). *Calibration and correlation of response-type road roughness measuring systems*, UM-HSRI-80-30, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- Hudson, W., Elkins, G., Uddin, W., Reilley, K. (1987). *Improved methods and equipment to conduct pavement distress surveys. Final report*, FHWA-TS-87-213, Federal Highway Administration, Austin, Texas.
- Junta Autónoma de Estradas (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas, Almada.
- Khazanovich, L., Lukanen, E., Tompkins, D. (2014). Evaluation of Bearing Capacity of Low-Volume Roads in Minnesota, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2433), pp. 79-86.

- Kraemer Heilperno, C., Pardillo Mayora, J., Rocci Boccaleri, S., Romana García, M., Sánchez Blanco, V., Del Val Melús, M. (2004). *Ingeniería de carreteras, vol II*, Mc Graw–Hill, Madrid.
- Lee, Y.P.K., Fwa, T.F., Choo, Y.S. (2005). Effect of pavement surface texture on British pendulum test, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 1247-1257.
- Lopes, J.E.R. (2010). *Contributo para o estudo da utilização do deflectómetro de impacto ligeiro*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Maia, I.M.C. (2012). *Caracterização de patologias em pavimentos rodoviários*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- McGhee, K.H. (2004). *Automated pavement distress collection techniques*, Transportation Research Board.
- Mota, G.L.P. (2017). *Técnicas de recuperação de patologias em pavimentos de asfalto*; <https://pt.linkedin.com/pulse/t%C3%A9cnicas-de-recupera%C3%A7%C3%A3o-patologias-em-pavimentos-paix%C3%A3o-mota>; Acedido em 12/9/2018.
- Motorpress Ibérica (2018). *Los vehículos que conservan nuestras carreteras*, Motorpress Ibérica; <https://www.autopista.es/galerias/vehiculos-conservacion-carreteras-asfalto-40210#foto-1>; Acedido em 10/11/2018.
- Neves, J. (2009). *Construção e manutenção de infra-estruturas de transportes. Módulo B – Pavimentação*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Pavement Interactive (2018). *Pavement Management - Pavement Evaluation - Deflection*, Pavement Tools Consortium; <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/deflection/>; Acedido em 20/6/2018.
- Pereira, P., Miranda, V. (1999). *Gestão da conservação dos pavimentos rodoviários*, Universidade do Minho, Braga.
- PIARC (2003). *Surface characteristics*, World Road Association - PIARC, Paris.
- Picado Santos, L., Ferreira, A., Pereira, P.A.A. (2006). Estruturação de um Sistema de Gestão de Pavimentos para uma Rede Rodoviária de Carácter Nacional, *Engenharia Civil* (26), pp. 45-59.
- Pinto, J.I.B.R. (2003). *Caracterização superficial de pavimentos rodoviários*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.
- SACR (2007). *Relevés Visuels à Grand Rendement avec le Systeme GERPHO (Film 35 mm)*.

- SETRA, LCPC (1994). *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée: Guide Technique*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme., Paris.
- Silva, P.F.A. (2008). *Manual de patologia e manutenção de pavimentos*, Pini, São Paulo.
- Vectra Esteio Rodovias (2014). *Deflectógrafo Lacroix*, Vectra Esteio Rodovias; <http://www.vectra-esteio.com.br/lacroix.html>; Acedido em 5/7/2018.
- Wang, K.C. (2004). Challenges and feasibility for comprehensive automated survey of pavement conditions, *Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering (2004)*, p. 531-536.