



Avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso a novos métodos de inspeção

Wesley Mar Rodrigues Eusébio

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

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

Janeiro de 2025

Folha em branco

Declaração de Integridade

Eu, Wesley Mar Rodrigues Eusébio, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 41576 de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

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

Universidade da Beira Interior, Covilhã 31 /01/2025



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

Folha em branco

Dedicatória

**Dedico esta dissertação à minha mãe Crisólita Rodrigues e ao meu irmão
Wilmar Spinola.**

À minha mãe, uma mulher batalhadora, cuja força, determinação e sacrifício sempre foram a base do meu caminho. Para me proporcionar um futuro melhor, enfrentaste desafios imensuráveis, inclusive a difícil decisão de emigrar, afastando-te de casa e dos que mais amas. Tudo o que sou hoje é reflexo do teu amor incondicional, do teu esforço incansável e da tua coragem inigualável. Esta conquista é tão tua quanto minha. “Hoj graças a bo, bo fidje ka da um bandid”.

Ao meu irmão, que, desde tão novo, teve de lidar com a distância e a saudade. Dedico-te esta dissertação como símbolo da esperança e da certeza de que cada esforço tem um propósito. Que este momento sirva de inspiração para que também sigas os teus sonhos, sabendo que, independentemente da distância, estarei sempre aqui por ti.

Com todo o meu amor e gratidão!

Folha em branco

Agradecimento

Este trabalho só foi possível graças ao apoio e à colaboração, direta ou indireta, de diversas pessoas e instituições, às quais expresso o meu profundo agradecimento.

Aos meus orientadores, Professora Doutora Bertha Maria Batista dos Santos e Professor Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida, cujo conhecimento, experiência e dedicação foram indispensáveis para a realização deste trabalho, agradeço pela generosidade com que compartilharam o seu saber, pela paciência e prontidão em esclarecer as minhas dúvidas, e pela orientação constante ao longo de todas as etapas deste percurso.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura e à Universidade da Beira Interior por disponibilizarem os recursos indispensáveis à conclusão deste curso.

À Câmara Municipal do Fundão pela permissão para a realização do levantamento dos dados, que foi essencial para a concretização deste estudo.

Aos meus colegas de curso, agradeço pelo companheirismo e pelas trocas de conhecimento ao longo desta jornada, bem como a todos os professores que dedicaram o seu tempo e partilharam o seu conhecimento para a minha formação ao longo deste curso.

À minha tia Núria Rodrigues e o seu marido Marco Lopes expresso a minha mais profunda gratidão pelo apoio incondicional que me deram desde o início desta caminhada. Foram vocês os pioneiros, aqueles que acreditaram em mim e me ajudaram em cada etapa deste percurso. Sem vocês, este momento não seria possível. Obrigado.

À minha prima Cladmara Timas, por me ter recebido de braços abertos aqui na Covilhã, proporcionando-me um ambiente acolhedor. Desde o primeiro momento, foste mais do que um familiar, foste um verdadeiro pilar de apoio, ajudando-me na integração, orientando-me nos desafios escolares e tornando esta experiência mais leve e especial.

Aos meus melhores amigos, Carlos, Elton e Max, não há palavras suficientes para expressar o quanto sou grato por vocês. Somos o “Quarteto Fantástico”, mas juntos somos muito mais do que isso: somos apoio, cumplicidade, risos intermináveis e força nos momentos difíceis. Levo comigo não só as memórias dos momentos incríveis que vivemos, mas também a certeza de que a nossa amizade é para a vida toda. Obrigado por

serem parte de mim, por tornarem esta caminhada especial e por estarem sempre ao meu lado.

A ti, meu amigo e companheiro, Elvis Baroni incansável nesta jornada, o meu mais sincero agradecimento. Foram horas intermináveis de estudo, desafios partilhados. A tua motivação, apoio e determinação foram fundamentais para que eu me mantivesse firme até ao fim. Obrigado por cada incentivo, por cada debate, por cada palavra de força e, acima de tudo, por nunca me deixares desistir.

À minha melhor amiga, Priscila Montrond que esteve sempre ao meu lado nos momentos bons e nos mais desafiadores, expresso a minha mais profunda gratidão. A tua amizade é um porto seguro, um laço que me trouxe força, risos e incontáveis momentos inesquecíveis. Obrigado por cada palavra de apoio, por cada gesto de carinho.

À minha namorada, Helga Mendes, que foi um pilar essencial nesta jornada, o meu mais sincero agradecimento. O teu amor, paciência e apoio incondicional deram-me forças para continuar, mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigado por acreditares em mim, por me incentivares a ser sempre melhor e por estares ao meu lado em cada passo desta caminhada. Esta conquista também é tua.

À minha querida avó, Maria Lina Gonçalves, que com o seu amor inigualável e sabedoria me ensinou valores que levarei para a vida toda, o meu mais profundo reconhecimento. O teu carinho, as tuas palavras de encorajamento e a tua força inspiram-me todos os dias. Obrigado por seres um exemplo de determinação e por, de longe ou de perto, estares sempre presente no meu coração.

Aos que a vida me trouxe como família, Samuel, Ruth, Bryan, Sá, Nhanha, Cyara, Joel, Aniria, Rafaela, vocês foram mais do que amigos, foram um apoio essencial nesta caminhada. Nos momentos de alegria e nos desafios, senti sempre o vosso carinho, incentivo e presença incondicional. Obrigado por me acolherem, por me acompanharem e por serem parte fundamental desta jornada. Sem vocês, tudo teria sido muito mais difícil.

A todos aqueles que não mencionei os seus nomes, mas que de certa forma fizeram parte desta caminhada, um grande obrigado.

À minha família Gonçalves Rodrigues, a base de tudo o que sou, o meu mais profundo agradecimento. Foram vocês que me deram as raízes para crescer e as asas para voar. Cada palavra de incentivo, cada sacrifício feito por mim e cada demonstração de amor

foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Esta conquista não é só minha, é nossa. Obrigado por acreditarem em mim sempre.

Por fim e não menos importante agradeço a Deus, que sempre guiou os meus passos, deu-me força nos momentos difíceis e iluminou o meu caminho quando tudo parecia incerto. Sem a Sua graça, proteção e sabedoria, esta jornada teria sido muito mais desafiadora. A Ele entrego esta conquista, fruto da fé, da perseverança e das bênçãos que nunca me faltaram ao longo do caminho.

Folha em branco

Resumo

A avaliação da qualidade dos pavimentos rodoviários é fundamental para garantir a segurança e a eficiência das infraestruturas de transporte. Tradicionalmente, esta avaliação é realizada por meio de métodos convencionais, como a inspeção visual realizada a pé, que podem ser subjetivos e demorados. Nos últimos anos, novos métodos de inspeção da superfície dos pavimentos, como os baseados em veículos terrestres instrumentados e veículos aéreos não tripulados (VANT), têm sido explorados para aumentar a precisão e eficiência da recolha de dados.

Esta dissertação estuda a aplicação de um método inovador para a recolha de dados de degradação da superfície de pavimentos rodoviários, com vista à determinação do respetivo estado de conservação, utilizando um veículo terrestre equipado com dispositivos de captação de dados de imagem e de posicionamento. A abordagem adotada permite uma recolha sistemática de dados de imagem e de georreferenciação, facilitando a análise das degradações do pavimento em gabinete com recurso a um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os dados processados são usados na avaliação do estado do pavimento segundo a metodologia de determinação do *Pavement Condition Index* (PCI) da norma ASTM D6433-23. A interpretação deste índice permite identificar o tipo de estratégia de manutenção ou reabilitação (M&R) a adotar, bem como os principais trabalhos de manutenção e reabilitação a considerar nos planos de intervenção no pavimento.

Os resultados obtidos no caso de estudo desenvolvido demonstram que o método implementado apresenta vantagens significativas em termos de reprodutibilidade e precisão na avaliação do estado dos pavimentos, reduzindo a subjetividade das inspeções. Conclui-se assim que a utilização do veículo terrestre equipado, empregue neste estudo para a inspeção da superfície de pavimentos rodoviários, pode contribuir para a otimização do processo de gestão da manutenção dos pavimentos, permitindo intervenções mais eficazes, rápidas e económicas.

Palavras-chave

Pavimentos rodoviários; Avaliação da qualidade dos pavimentos; Inspeção com veículo terrestre equipado; Degradações; PCI (*Pavement Condition Index*).

Folha em branco

Abstract

The assessment of road pavement quality is essential to ensure the safety and efficiency of transport infrastructure. Traditionally, this evaluation is conducted through conventional methods such as visual inspection on foot, which can be subjective and time consuming. In recent years, new methods of pavement surface inspection methods, such as instrumented ground vehicles and unmanned aerial vehicles (UAVs), have been explored to enhance the accuracy and efficiency of data collection.

This master's thesis examines the application of an innovative pavement distress data collection method to determine pavement condition using a ground vehicle equipped with imaging and positioning devices. The adopted approach enables the systematic collection of georeferenced and image data, facilitating the analysis of pavement distress in an office environment using a Geographic Information System (GIS). The processed data is used to assess pavement condition according to the Pavement Condition Index (PCI) method described in ASTM D6433-23. The interpretation of this index allows for the identification of the most appropriate maintenance and rehabilitation (M&R) strategies, as well as key maintenance and rehabilitation actions to be considered in pavement intervention planning.

The results obtained in the developed case study show that the implemented method offers significant advantages in terms of reproducibility and accuracy of pavement condition assessment, thus reducing the subjectivity of inspections. It is concluded that the use of the instrumented ground vehicle employed in this study for pavement surface inspection can contribute to the optimization of pavement maintenance management, enabling more effective, faster, and cost-efficient interventions.

Keywords

Road pavements; Pavement quality evaluation; Inspection with an instrumented ground vehicle; Distresses; PCI (Pavement Condition Index).

Folha em branco

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento e justificação do Tema	1
1.2.	Objetivo.....	1
1.3.	Estrutura da dissertação	2
2.	Pavimentos rodoviários	3
2.1.	Introdução.....	3
2.2.	Ações às quais estão sujeitos os pavimentos rodoviários	4
2.3.	Tipos de Pavimentos Rodoviários.....	5
2.4.	Pavimentos flexíveis.....	6
2.5.	Degradações superficiais em pavimentos rodoviários flexíveis	8
3.	Métodos de inspeção da superfície de pavimentos rodoviários	31
3.1.	Introdução.....	31
3.2.	Inspeção visual a pé	32
3.3.	Inspeção com veículo terrestre equipado.....	34
3.4.	Inspeção com veículo aéreo não tripulado	40
4.	Avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso ao <i>Pavement Condition Index</i> (PCI).....	43
4.1.	Identificação e seccionamento da rede de pavimentos rodoviários a analisar 44	
4.2.	Determinação e seleção do número de unidades de amostra a inspecionar ..44	
4.3.	Inspeção das unidades de amostra	46
4.4.	Cálculo do PCI para cada unidade de amostra	46
4.4.1.	Densidade (<i>D</i>).....	46
4.4.2.	Valores de Dedução (<i>DV</i>), Valor Máximo de Dedução Corrigido (<i>Max CDV</i>) e Número Máximo de Degradações Admissíveis (<i>m</i>).....	46
4.4.3.	Cálculo do PCI.....	48
4.5.	Cálculo do PCI para cada secção.....	50
4.6.	Definição da estratégia de intervenção em função do valor de PCI	51
5.	Caso de estudo	59
5.1.	Enquadramento.....	59
5.2.	Método de inspeção adotado	60
5.3.	Pré-tratamento dos dados obtidos no levantamento com veículo terrestre equipado.....	62
5.4.	Segmentação da rede	63
5.5.	Tratamento e visualização dos dados em SIG	64
5.6.	Resultados e discussão.....	69
5.6.1.	Pavement Condition Index - PCI.....	69
5.6.2.	Análise das degradações superficiais do pavimento.....	75
5.6.3.	Estratégia de intervenção de M&R em função do PCI.....	79

5.6.4. Estratégia de intervenção por tipo de degradação.....	80
6. Conclusão.....	81
7. Referências Bibliográficas.....	85

Folha em branco

Lista de Figuras

Figura 2.1: Pavimento Rodoviário: Constituição e Ações.....	3
Figura 2.2: (a) Estrutura típica de um pavimento flexível; (b) Distribuição da carga do tráfego em pavimentos flexíveis.....	6
Figura 3.1: Folha de registo de dados do estado de pavimentos flexíveis para uma unidade de amostra.....	33
Figura 3.2: Folha de registo de dados do estado de pavimentos rígidos para uma unidade de amostra.....	34
Figura 3.3: Equipamento VIZIROAD (Igm, 2022)	36
Figura 3.4: Laser Crack Measurement System – LCMS.....	36
Figura 3.5: Representação do sistema PASCO Roadrecon	37
Figura 3.6: Veículo Gerpho e pormenor do equipamento fotográfico.....	37
Figura 3.7: Automated Road Analyzer – ARAN.....	38
Figura 3.8: Road Assessment Vehicle – RAV	38
Figura 3.9: Sistema ROMDAS.....	39
Figura 3.10: Hawkeye Veículo.....	40
Figura 3.11: Esquema de um veículo aéreo não tripulado	41
Figura 3.12: Tecnologia LiDAR em VANT	42
Figura 4.1: Exemplo da determinação de DV para uma degradação do tipo Pele de Crocodilo	47
Figura 4.2: Exemplo da determinação de CDV para valor total das deduções igual a 100 e $q=3$	48
Figura 4.3: Fluxograma do processo para a avaliação e definição de estratégias de M&R	52
Figura 4.4: Degradação do estado de um pavimento ao longo do seu ciclo de vida em função do PCI e M&R.....	53
Figura 4.5: - Escala de classificação do estado do pavimento em função do PCI.....	54
Figura 5.1: Localização do trecho da estrada estudado (Ramo 1).....	60
Figura 5.2: Equipamentos usados no levantamento de dados do pavimento e a sua disposição no veículo terrestre utilizado.....	61
Figura 5.3: - Verificação da amplitude de captação de imagem na posição paralelo e perpendicular ao sentido de movimento do veículo	62

Figura 5.4: Segmentação do trecho em secções.....	64
Figura 5.5: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas da secção 1	65
Figura 5.6: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas da secção 2	65
Figura 5.7: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas da secção 3	66
Figura 5.8: Exemplo da tabela de atributos da <i>shapefile</i> Fendas cruzadas.....	67
Figura 5.9: Verificação in situ da identificação e nível de gravidade das degradações desagregação superficial do mástique e reparações, com recurso a inspeção visual a pé	68
Figura 5.10: Exemplo da folha de cálculo de registo de informação de quantidades de degradação para determinação do PCI.....	68
Figura 5.11: Exemplo do cálculo do PCI da unidade de amostra 73 na secção 3.....	69
Figura 5.12: Valores do PCI para as unidades de amostra seleccionadas na secção 1	69
Figura 5.13: Histograma de distribuição do PCI das unidades de amostra seleccionadas na secção 1, por categoria do PCI	70
Figura 5.14: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas representadas pelas cores do PCI da secção 1	70
Figura 5.15: Valores do PCI para as unidades de amostra seleccionadas na secção 2	71
Figura 5.16: Histograma de distribuição do PCI das unidades de amostra seleccionadas na secção 2, por categoria do PCI	71
Figura 5.17: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas representadas pelas cores do PCI da secção 2	72
Figura 5.18: Valores do PCI para as unidades de amostra seleccionadas na secção 3	73
Figura 5.19: Histograma de distribuição do PCI das unidades de amostra seleccionadas na secção 3, por categoria de PCI	73
Figura 5.20: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas representadas pelas cores do PCI da secção 3.....	74
Figura 5.21: Representação do trecho estudado e respetivos valores de PCI para cada secção.....	75
Figura 5.22: Densidade da degradação fendilhamento transversal e longitudinal, por unidades de amostra inspecionadas e para o total da área inspecionada	76

Figura 5.23: Densidade da degradação pele de crocodilo, por unidades de amostra inspecionadas e para o total da área inspecionada.....	76
Figura 5.24: Densidade da degradação fendas cruzadas, por unidades de amostra inspecionadas e para o total da área inspecionada.....	77
Figura 5.25: Densidade da degradação fendas de canto, por unidades de amostra inspecionadas e para o total da área inspecionada.....	77
Figura 5.26: Densidade da degradação reparações e cortes técnicos, por unidades de amostra inspecionadas e para o total da área inspecionada.....	78
Figura 5.27: Densidade da degradação desagregação superficial do mástique, por unidades de amostra inspecionadas e para o total da área inspecionada	78

Folha em branco

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Ficha de caracterização da degradação Pele de Crocodilo	10
Tabela 2.2: Ficha de caracterização da degradação Exsudação.....	11
Tabela 2.3: Ficha de caracterização da degradação Fendas Cruzadas.....	12
Tabela 2.4: Ficha de caracterização da degradação Alteamentos e Abatimentos.....	13
Tabela 2.5: Ficha de caracterização da degradação Ondulação.....	14
Tabela 2.6: Ficha de caracterização da degradação Depressões	15
Tabela 2.7: Ficha de caracterização da degradação Fendas de Canto	16
Tabela 2.8: Ficha de caracterização da degradação Fendas de reflexão no local das juntas de lajes rígidas em pavimentos semirrígidos longitudinais e transversais.....	17
Tabela 2.9: Ficha de caracterização da degradação Desnível via/berma	18
Tabela 2.10: Ficha de caracterização da degradação Fendilhamento longitudinal e transversal.....	19
Tabela 2.11: Ficha de caracterização da degradação Reparações e cortes técnicos	20
Tabela 2.12: Ficha de caracterização da degradação Polimento dos agregados	21
Tabela 2.13: Ficha de caracterização da degradação Covas.....	22
Tabela 2.14: Tabela dos níveis de gravidade para covas com menos de 750 mm de diâmetro, baseados tanto no diâmetro quanto na profundidade das covas	22
Tabela 2.15: Ficha de caracterização da degradação Passagem de linha de caminho de ferro.....	23
Tabela 2.16: Ficha de caracterização da degradação Rodeiras	24
Tabela 2.17: Ficha de caracterização da degradação Escorregamento	25
Tabela 2.18: Ficha de caracterização da degradação Fendas em forma de “meia-lua” ..	26
Tabela 2.19: Ficha de caracterização da degradação Empolamento.....	27
Tabela 2.20: Ficha de caracterização da degradação Desagregação superficial do agregado em misturas betuminosas densas.....	28
Tabela 2.21: Ficha de caracterização da degradação Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	29
Tabela 4.1: Combinações das quantidades em cada nível de gravidade a considerar quando existem três níveis de gravidade de uma dada degradação na mesma unidade de amostra.....	49

Tabela 4.2: Tabela comparativo entre os valores de PCI, e as intervenções de M&R a se realizar	56
Tabela 4.3: Intervenções de M&R a serem realizadas em função da degradação existente e o seu nível de gravidade.....	57
Tabela 5.1: Número de unidades de amostra por secção, número mínimo de unidades de amostra a inspecionar por secção e espaçamento entre as unidades de amostra	64
Tabela 5.2: Resultados do valor do PCI por secção e total para o trecho estudado	74
Tabela 5.3- Estratégia de intervenção de M&R em função do valor do PCI para cada secção e total do trecho.....	79
Tabela 5.4: Tipos de intervenções M&R por degradação e nível de gravidade identificados.....	80

Folha em branco

Lista de Acrónimos

APWA	<i>American Public Works Association</i>
ARAN	<i>Automated Road Analyzer</i>
ARRB	<i>Australian Road Research Board</i>
DOD	<i>Department of Defense</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GERPHO	<i>Groupe d'Examen Routier par PHOtographie</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IMT	<i>Instituto da Mobilidade e dos Transportes</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
LCMS	<i>Laser Crack Measurement System</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LCPC	<i>Laboratório Central Des Ponts et Chaussées</i>
LNEC	<i>Laboratório Nacional De Engenharia Civil</i>
PCI	<i>Pavement Condition Index</i>
RAV	<i>Road Assessment Vehicle</i>
ROMDAS	<i>Road Measurement and Data Acquisition System</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SIG	<i>Sistema de Informação Geográfica</i>
UA	<i>Unidade de amostra</i>
US-LTPP	<i>United States Long-Term Pavement Performance</i>
VANT	<i>Veículo Aéreo Não Tripulado</i>
DCL	<i>Data Collection Ltd.</i>

Folha em branco

1. Introdução

1.1. Enquadramento e justificação do Tema

O transporte rodoviário é um dos modos de transporte mais importantes a nível mundial. É responsável por movimentar a maior parte da carga e pessoas em todo o mundo, contribuindo significativamente para o desenvolvimento económico e social.

O aumento da mobilidade de pessoas e bens resulta num aumento da procura e do uso de infraestruturas de transporte rodoviário, nomeadamente da exposição dos pavimentos ao tráfego de veículos, resultando na degradação progressiva dos pavimentos. Por outro lado, as condições ambientais de temperatura e de água também são ações as quais estão sujeitos os pavimentos, levando a sua degradação.

A qualidade dos pavimentos rodoviários é um fator crucial para a segurança, o conforto dos utilizadores e a durabilidade das infraestruturas de transporte. Manter os pavimentos em bom estado é fundamental para evitar acidentes e garantir uma circulação eficiente. Neste contexto a avaliação sistemática da qualidade dos pavimentos torna-se fundamental para a gestão de estradas e autoestradas. Para apoiar essa avaliação, são coletados dados com o objetivo de verificar as condições do pavimento e identificar a necessidade de reparações ou até mesmo a sua completa substituição.

As técnicas de inspeção de pavimentos, a inspeção visual a pé, a inspeção visual com recurso a veículos terrestres multifuncionais e a inspeção com veículo aéreo não tripulado são as mais utilizadas atualmente. A inspeção visual a pé tem como principais desvantagens o tempo elevado de recolha e tratamento de dados, e a necessidade de se fechar a estrada ou parte dela, afetando o tráfego local. Devido a esses fatores, opta-se pela inspeção visual com recurso a veículos terrestres multifuncionais, ou pela inspeção com veículo aéreo não tripulado, pois estes veículos são equipados com tecnologia de recolha e extração de informação que melhoram os níveis de eficiência.

1.2. Objetivo

O estudo proposto tem como objetivo ultrapassar as várias limitações apresentadas métodos atuais de aquisição e processamento de dados sobre o estado dos pavimentos, utilizando novas tecnologias de inspeção da superfície de pavimentos para avaliar a qualidade dos mesmos. Para atingir este objetivo serão realizadas operações de inspeção da superfície de uma secção de pavimento com recurso a uma solução inovadora e de

baixo custo de veículo terrestre equipado com dispositivos de captação de imagem e de dados de localização por satélite.

No desenvolvimento do caso prático pretende-se, com os dados recolhidos através dessa solução inovadora, obter a avaliação do estado do pavimento, através da determinação do *Pavement Condition Index* (PCI), e apresentar propostas de intervenção de manutenção e/ou reabilitação para o pavimento do trecho estudado.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, o primeiro capítulo apresenta uma introdução e justificação ao tema, e descreve os objetivos propostos para esta dissertação, bem como a estruturação do documento.

O segundo capítulo aborda a temática dos pavimentos rodoviários, iniciando com uma breve introdução ao tema e detalhando as diferentes ações a que esses pavimentos estão sujeitos. Nesse contexto, são apresentados os principais tipos de pavimentos, com destaque para os pavimentos flexíveis, bem como as degradações superficiais associadas a este tipo de pavimento.

O terceiro capítulo apresenta os métodos de inspeção da superfície dos pavimentos rodoviários, com ênfase nas abordagens mais empregadas para avaliar as condições desses pavimentos. São destacados métodos como a inspeção visual realizada a pé, a inspeção com veículos terrestres equipados e a inspeção por meio de veículos aéreos não tripulados (VANTs).

No quarto capítulo “Avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso ao *Pavement Condition Index* (PCI)”, são apresentados os passos para a determinação do índice PCI, como classificar o estado do pavimento, através da escala do PCI, e ainda quais são as manutenções e reabilitações a se fazer tendo em conta os valores do PCI.

No quinto capítulo, é apresentado o “Caso de estudo”, abrangendo a descrição detalhada dos procedimentos adotados para o levantamento e o tratamento dos dados relacionados à caracterização do estado de conservação dos pavimentos. Além disso, o capítulo inclui uma análise aprofundada dos resultados obtidos.

No sexto capítulo, intitulado "Conclusões", são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido, bem como as limitações identificadas ao longo do estudo. Adicionalmente, são sugeridas propostas de trabalhos futuros que visam o aprimoramento da abordagem proposta, contribuindo para o avanço na área de estudo.

2. Pavimentos rodoviários

2.1. Introdução

Os pavimentos rodoviários desempenham um papel fundamental na infraestrutura de transporte, garantindo a mobilidade eficiente de pessoas e mercadorias.

Segundo a definição estabelecida no Vocabulário de estradas e aeródromos do LNEC de 1962 (LNEC, 1962), um pavimento é a “parte da estrada, rua, ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respetivas solicitações à infraestrutura: terreno, obras de arte, etc. Pode ser constituído por uma ou mais camadas tendo, no caso geral, uma camada de desgaste e uma camada de fundação. Cada uma destas camadas pode ser composta e constituída por camadas elementares”. Segundo Branco et al. (2008), “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 (a vida do pavimento), sob a ação das ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram” (ver Figura 2.1).

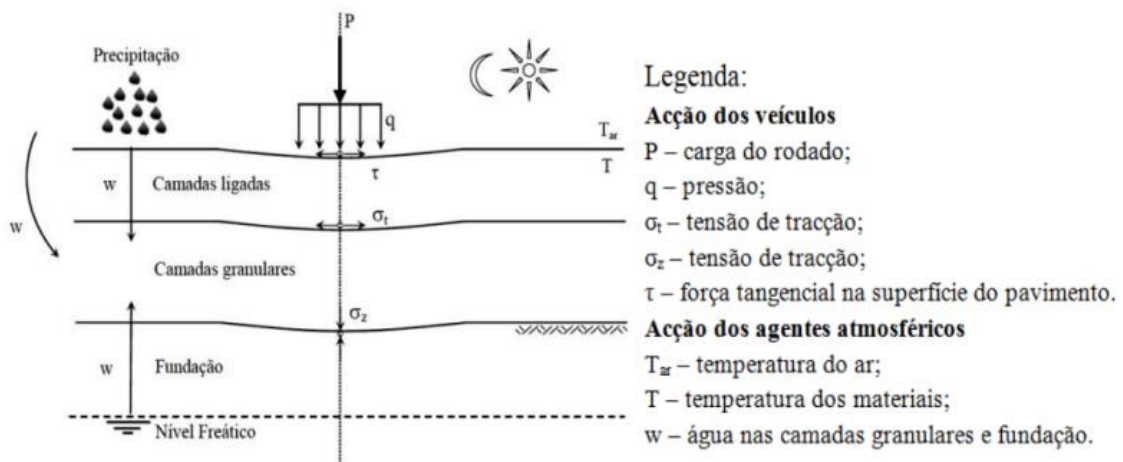


Figura 2.1: Pavimento Rodoviário: Constituição e Ações (Branco, et al., 2008).

Um pavimento deve atender a dois tipos de qualidades essenciais: a funcional e a estrutural. A qualidade funcional refere-se às necessidades dos usuários, garantindo conforto e segurança durante a circulação. Já a qualidade estrutural está relacionada à capacidade do pavimento de suportar o tráfego veicular sem apresentar deformações ou danos significativos que comprometam a funcionalidade percebida pelos usuários (Branco et al., 2008).

2.2. Ações às quais estão sujeitos os pavimentos rodoviários

Os pavimentos estão sujeitos a uma variedade de ações e condições que podem impactar a sua integridade e desempenho ao longo do tempo. Algumas das principais ações a que os pavimentos estão sujeitos incluem:

- Tráfego

As cargas dinâmicas e estáticas geradas pelo tráfego de veículos são uma das principais fontes de solicitação nos pavimentos. O volume, peso e tipo de veículos que transitam sobre a superfície podem influenciar significativamente o desgaste e a degradação do pavimento.

- Clima

As condições climáticas, como a chuva, neve, gelo, variações de temperatura e exposição ao sol, desempenham um papel crucial na deterioração dos pavimentos. A água é especialmente prejudicial, podendo infiltrar-se nas camadas do pavimento e causar danos associados à deformação das camadas granulares, potenciando o aparecimento e agravamento das degradações, e danos devido a ciclos de congelamento e descongelamento. A presença de lençóis freáticos elevados também pode resultar em problemas de drenagem e contribuir para a saturação do solo, prejudicando a capacidade do pavimento de suportar cargas. A variação de temperatura gera ciclos contínuos de aquecimento e resfriamento, resultando na expansão e contração do material betuminoso. Esse processo pode levar ao desenvolvimento de fendas no pavimento, atribuídas à fadiga decorrente dessas alterações térmicas repetitivas.

- Cargas Concentradas

Cargas concentradas com permanência ao longo do tempo, como aquelas causadas por veículos pesados em pontos específicos, podem levar a deformações localizadas e danos do pavimento. Isso é comumente observado em áreas de estacionamento, interseções e locais de carga e descarga.

- Químicos e Poluentes

Produtos químicos, combustíveis derramados e poluentes atmosféricos podem causar danos químicos aos materiais constituintes do pavimento, resultando em desgaste prematuro da superfície do pavimento.

A compreensão dessas ações é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de projeto, construção e manutenção de pavimentos, visando prolongar sua vida útil e garantir um desempenho seguro e eficiente.

2.3. Tipos de Pavimentos Rodoviários

Segundo as Diretivas para a concepção de pavimentos - Critério de dimensionamento do IMT (2009), de modo geral, os pavimentos são classificados em três tipos, em função da sua deformabilidade e dos materiais que os constituem:

- Pavimento flexível, no qual as camadas superiores são constituídas por misturas betuminosas, sendo as camadas subjacentes às betuminosas e sobrejacentes ao leito do pavimento compostas por materiais granulares.
- Pavimento semirrígido, no qual as camadas superiores são compostas por misturas betuminosas, sendo as camadas subjacentes às betuminosas e sobrejacentes ao leito do pavimento constituídas por materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos, com uma importante influência na capacidade de carga do pavimento (aumenta).
- Pavimento rígido, constituída por uma camada de betão de cimento de elevada resistência, equivalente às camadas superiores de desgaste e de base. Devido à sua elevada resistência, os pavimentos rígidos podem ou não incluir uma camada de sub-base constituídas por material granular estabilizado com ligante hidráulico ou apenas constituídas por material granular, dependendo diretamente da qualidade do material utilizado na fundação.

A resposta estrutural de cada um destes tipos de pavimentos é diferente perante as mesmas ações, devido ao tipo de material constituinte. Os pavimentos flexíveis apresentam uma elevada flexibilidade, o que resulta em uma maior concentração de tensões transmitidas ao solo de fundação. Por outro lado, os pavimentos rígidos, devido à sua rigidez estrutural, promovem uma distribuição mais ampla das tensões ao longo do solo de fundação.

Dentre os diferentes tipos de pavimentos, os flexíveis são os mais utilizados devido à sua capacidade de se adaptarem melhor às deformações impostas pelas cargas de tráfego, e às variações climáticas.

2.4. Pavimentos flexíveis

Os pavimentos rodoviários flexíveis são compostos por várias camadas betuminosas e granulares, projetadas para suportar e distribuir as cargas aplicadas pelos veículos e suportar as solicitações do clima. As camadas superiores são designadas de camadas betuminosas, por serem compostas por materiais granulares ligados com betume asfáltico. Por apresentarem uma elevada deformabilidade são camadas que conferem resistência à tração e à fadiga. Já as camadas inferiores (não ligadas) são constituídas por material granular não ligado e juntamente com o solo de fundação, conferem ao pavimento resistência às tensões de compressão (ver Figura 2.2).

Segundo Branco et al. (2008), essas diferentes camadas dispõem-se, com qualidade e resistência decrescentes, de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução de esforços em profundidade, e que em geral, também têm como função dar apoio à realização da camada sobrejacente. As camadas devem garantir em conjunto o adequado desempenho estrutural e funcional do pavimento.

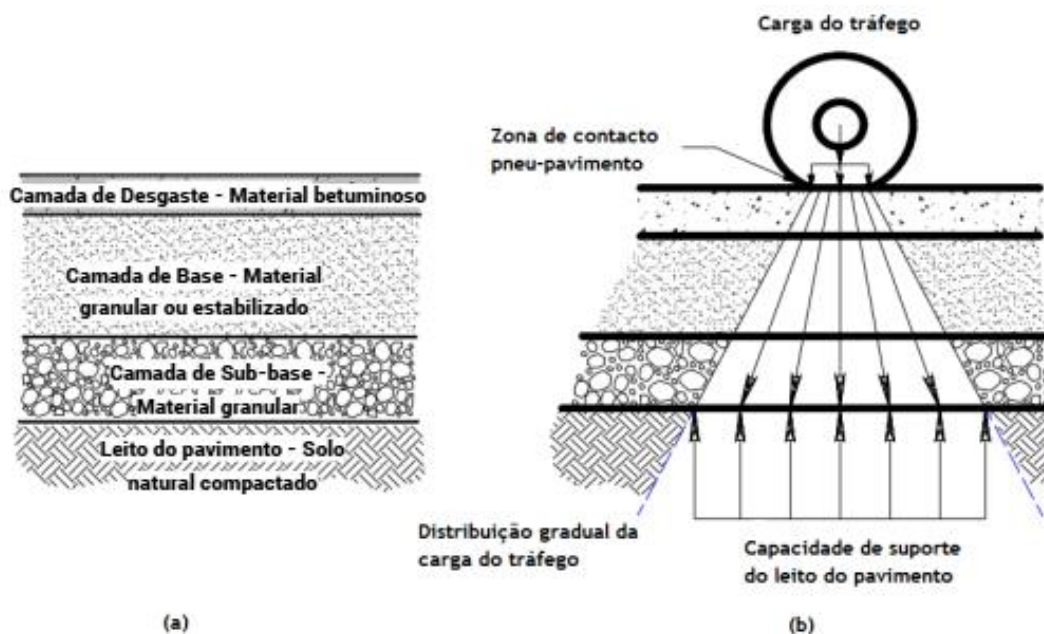


Figura 2.2: (a) Estrutura típica de um pavimento flexível; (b) Distribuição da carga do tráfego em pavimentos flexíveis (adaptado Lima, 2016).

Os pavimentos flexíveis são em geral constituídos pelas seguintes camadas (Branco et al., 2008) (IMT, 2009):

- Camada de desgaste - é a camada mais superficial do pavimento, que está em contacto direto com o tráfego. É constituída por material betuminoso com agregados de alta resistência, sendo geralmente composta por misturas betuminosas. Sua função principal é suportar diretamente o tráfego, redistribuir e transferir para as camadas inferiores as tensões induzidas pelos rodados dos veículos, oferecendo resistência ao desgaste, impermeabilidade e uma superfície regular para a circulação dos veículos. Também desempenha funções de drenagem e impermeabilização das camadas inferiores, assegurando uma circulação confortável, económica e segura, com características de rugosidade necessárias para gerar atrito.
- Camada de regularização - tem como principal função proporcionar uma superfície uniforme e regular para receber as camadas subsequentes do pavimento. Ela é aplicada geralmente sobre a sub-base ou base e serve para corrigir irregularidades, nivelar deformações e garantir uma melhor distribuição das tensões ao longo do pavimento. Essa camada é composta, em geral, por uma mistura de materiais granulares ou, em alguns casos, pode incluir materiais estabilizados com ligantes, dependendo das especificações do projeto. Além disso, a regularidade da camada é fundamental para assegurar o desempenho estrutural e funcional do pavimento, contribuindo para a durabilidade e conforto do tráfego.
- Camada de base - é uma camada estrutural projetada para distribuir as tensões provenientes do tráfego para as camadas inferiores de maneira uniforme. É considerada a camada estruturalmente mais importante deste tipo de pavimento, pois suporta as solicitações induzidas pelo tráfego, assegurando a degradação das tensões de forma compatível com a necessidade de evitar a mobilização excessiva das características resistentes da fundação. Pode ser composta por materiais granulares ou estabilizados com cimento ou betume asfáltico, sendo frequentemente constituída por agregado britado de granulometria extensa. A qualidade da camada de base influencia diretamente a capacidade de resistência do pavimento e a sua durabilidade.
- Camada de sub-base - constituída por material granular do tipo *tout-venant* ou com recomposição em central, a camada de sub-base é usada em áreas onde a ação de gelo é severa ou o solo de fundação apresenta baixa capacidade de suporte. A sub-base suporta, redistribui e transfere para a fundação as tensões transmitidas ao nível da base, funcionando de forma semelhante à camada de

base, mas sendo submetida a cargas inferiores. Por isso, os requisitos de material para as camadas de sub-base não são tão rigorosos como para as camadas de base. Além disso, a sub-base apresenta características drenantes, com permeabilidade adequada para se opor à estagnação da água e evitar que as águas ascensionais ou águas capilares atinjam as camadas mais nobres do pavimento.

- Leito do pavimento – é a camada de solo natural compactado, que serve como fundação para todas as camadas superiores. Sua qualidade é crucial para o desempenho global do pavimento. É utilizado em casos onde a condição natural da fundação não atende aos requisitos necessários de suporte para o pavimento. Durante a fase construtiva, desempenha funções essenciais, como a proteção do solo de fundação, a garantia de uma superfície nivelada e a viabilização da traficabilidade dos equipamentos de obras, na fase de exploração suas funções estendem-se para a melhoria das características da fundação, e a proteção contra a ação do gelo. As camadas superiores devem ter a capacidade de dissipar cargas impostas pelo tráfego para valores baixos o suficiente, que não provoquem deformações e deslocamentos excessivos da fundação.

2.5. Degradações superficiais em pavimentos rodoviários flexíveis

“Logo após a sua construção, os pavimentos são sujeitos a ações diversas que vão diminuindo a sua vida útil e a sua qualidade” (Pinto, 2021).

Segundo (Melo et al.,2021), o processo de degradação de um pavimento e suas causas são classificadas em dois grupos de fatores: fatores passivos e fatores ativos. Entre os fatores passivos, destacam-se as características intrínsecas do pavimento, como a espessura das camadas, os materiais utilizados e a qualidade da construção. Já os fatores ativos englobam as ações do tráfego e dos agentes climáticos, principais responsáveis pelo processo de degradação.

O processo de evolução das degradações em um pavimento baseia-se no princípio da cadeia de consequências, segundo o qual uma degradação inicial não se desenvolve de forma isolada ao longo do tempo. Pelo contrário, ela desencadeia o surgimento de novos tipos de degradações, que, por sua vez, interagem e impactam as características das degradações originais. Esse mecanismo gera um ciclo contínuo de deterioração, no qual diferentes tipos de degradações se influenciam mutuamente, acelerando o processo de degradação do pavimento (Melo et al.,2021).

As tabelas 2.1 a 2.21 apresentam o conjunto das degradações superficiais usualmente consideradas na avaliação do estado superficial de pavimentos flexíveis. Para cada degradação é apresentada uma descrição, uma fotografia exemplificativa, a descrição dos níveis de gravidade considerados e a forma de medição da degradação. A informação apresentada baseia-se nas descrições constantes da norma ASTM 6433-23 (2023), uma vez que a avaliação da qualidade da extensão de pavimento flexível do caso de estudo apresentado será realizada com recurso à metodologia descrita nesta norma.

O conjunto de degradações consideradas incluem 20 tipos de degradações superficiais, nomeadamente: Pele de Crocodilo (fadiga), Exsudação, Fendas cruzadas, Alteamentos e Abatimentos, Ondulação, Depressões, Fendas de canto, Fendas de reflexão no local das juntas de lajes rígidas em pavimentos semirrígidos – longitudinais e transversais, Desnível via/berma, Fendilhamento longitudinal e transversal, Reparações e cortes técnicos, Polimento dos agregados, Covas, Passagem de linha de caminho de ferro, Rodeiras, Escorregamento, Fendas em forma de "meia-lua", Empolamento, Desagregação superficial do agregado em misturas betuminosas densas, Desagregação superficial da mástique em misturas betuminosas densas.

Importa realçar que para as degradações do tipo alteamentos e abatimentos, ondulação, passagem de nível, escorregamento, e empolamento, o efeito que estas degradações têm na qualidade de circulação do tráfego é determinado pelo inspetor, que deve conduzir em condições normais de velocidade da operação, com um veículo semelhante ao normalmente utilizado nesses locais, e usar as seguintes definições de nível de gravidade de acordo com a qualidade de circulação do tráfego:

- Baixo – as degradações praticamente não afetam a qualidade de circulação do tráfego. Isto significa que são perceptíveis vibrações do veículo, por exemplo, na ondulação, mas nenhuma redução na velocidade é necessária para manter o conforto ou a segurança. Em alteamentos e/ou abatimentos individuais verifica-se ressalto ligeiro do veículo, mas pouco desconforto.
- Medio – as degradações afetam medianamente a qualidade de circulação. Isto significa que as vibrações do veículo são significativas e alguma redução na velocidade é necessária para garantir a segurança e o conforto de circulação. Provocam ressalto significativo do veículo, criando algum desconforto.
- Alto – As degradações afetam severamente a qualidade de circulação. Isto significa que as vibrações do veículo são tão excessivas que a velocidade deve ser reduzida consideravelmente para garantir a segurança e o conforto. Provocam

ressalto excessivo do veículo, criando desconforto substancial, falta de segurança ou alto potencial de danos ao veículo.

Tabela 2.1: Ficha de caracterização da degradação Pele de Crocodilo.


<p>Pele de Crocodilo (fadiga) (<i>Alligator or Fatigue Cracking</i>)</p>	 <p>Fonte: Morgan Pavement (2022)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>Conjunto de fendas interligadas causadas pela atuação repetida das cargas do tráfego. A fissuração começa na parte inferior da camada de desgaste ou na camada de base e propaga-se até à superfície inicialmente como fendas longitudinais paralelas. Após cargas repetidas do tráfego, as fendas conectam-se formando um padrão semelhante à pele de um crocodilo.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>Fendas finas e longitudinais, paralelas umas às outras, sem nenhuma ou pouca interligação entre elas. As fendas não apresentam abertura dos bordos.</p>
	<p>Médio</p>	<p>Resulta do desenvolvimento das fendas finas para um padrão ou malha de fendas bem definido com ligeira abertura dos bordos.</p>
	<p>Alto</p>	<p>Malha de fendas bem definida. As fendas apresentam abertura dos bordos, com possibilidade de desagregação de material. Algumas peças podem mover-se devido à passagem dos veículos.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>	
<p>Observações</p>	<p>Caso se verifiquem diferentes níveis de gravidade, estes devem ser registados separadamente. Caso não seja fácil distingui-los, a área total deve ser registada com o nível de gravidade mais condicionante.</p>	

Tabela 2.2: Ficha de caracterização da degradação Exsudação.

Exsudação
(*Bleeding*)



Fonte: Washington Asphalt Pavement Association (2008)

Descrição	Acumulação de material betuminoso na superfície do pavimento que cria uma superfície refletiva brilhante, semelhante a vidro, que geralmente se torna bastante pegajosa. É causada pela utilização de quantidades excessivas de betume nas misturas betuminosas, aplicação excessiva de selante betuminoso, baixo teor de vazios da mistura, ou uma combinação destes. Ocorre quando o betume preenche os vazios da mistura durante a época do ano mais quente e depois se expande para a superfície do pavimento. Como o processo não é reversível dos meses mais frios, o betume acumula-se na superfície.	
Níveis de Gravidade	Baixo	Quando a exsudação ocorre em grau muito leve e é perceptível apenas durante alguns dias do ano. O betume não se cola aos sapatos ou aos veículos.
	Médio	Quando a exsudação ocorre ao ponto de o betume aderir aos sapatos e aos veículos durante apenas algumas semanas do ano.
	Alto	Quando a exsudação ocorre extensivamente e o betume adere consideravelmente aos sapatos e aos veículos durante pelo menos várias semanas do ano.
Quantificação	Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m ²).	
Observações	Se a exsudação for contabilizada, o polimento dos agregados não deverá ser contabilizado.	

Tabela 2.3: Ficha de caracterização da degradação Fendas Cruzadas.


<p>Fendas Cruzadas (<i>Block cracking</i>)</p>	 <p>Fonte: afsahara (2023)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>Fendas interligadas que dividem o pavimento em pedaços aproximadamente retangulares (blocos). Os blocos podem variar em tamanho desde aproximadamente 0,3 por 0,3m a 3 por 3m. São causadas principalmente pela retração do betão betuminoso e pela variação diária da temperatura, o que resulta em ciclos diários de tensão/deformação. Não está associado às cargas do tráfego. Normalmente é um indício de que a mistura endureceu significativamente. A fissuração dos blocos normalmente ocorre numa área grande do pavimento, mas às vezes poderá ocorrer apenas em áreas sem tráfego.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>Fendas não preenchidas com largura (abertura) $\leq 13\text{mm}$ ou fendas preenchidas de qualquer largura com o enchimento em condições satisfatórias.</p>
	<p>Médio</p>	<p>Verifica-se uma das seguintes condições: fendas não preenchidas com largura > 13 e $\leq 50\text{mm}$; fendas não preenchidas de qualquer largura 50mm com falha de $< 10\text{mm}$, ou fenda preenchida de qualquer largura com falha $< 10\text{mm}$.</p>
	<p>Alto</p>	<p>Existe uma das seguintes condições: fenda não preenchida com largura $> 50\text{mm}$, ou fenda preenchida ou não preenchida de qualquer largura com falha $> 10\text{mm}$.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m^2).</p>	
<p>Observações</p>	<p>Geralmente ocorre um determinado nível de gravidade em uma determinada secção do pavimento; contudo, se áreas com diferentes níveis de gravidade puderem ser facilmente distinguidas umas das outras, deverão ser medidas e registadas separadamente.</p>	

Tabela 2.4: Ficha de caracterização da degradação Alteamentos e Abatimentos.


<p>Alteamentos e Abatimentos (<i>Bumps and Sags</i>)</p>		
<p>Fonte: Tri-Service Transportation (2024)</p>		
<p>Descrição</p>	<p>Alteamentos são pequenos deslocamentos localizados e ascendentes da superfície do pavimento. Abatimentos são pequenos deslocamentos abruptos e descendentes da superfície do pavimento. Os alteamentos podem ser causados por vários fatores, incluindo: encurvamento e abaulamento das lajes de betão subjacentes a camadas superficiais betuminosas, geada/gelo e infiltração e acumulação de material nas fendas em combinação com as cargas de tráfego.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>Os alteamentos e abatimentos praticamente não afetam a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p>Médio</p>	<p>Os alteamentos e abatimentos afetam medianamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p>Alto</p>	<p>Os alteamentos e abatimentos afetam severamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Os alteamentos e abatimentos são medidos em metros lineares (m).</p>	
<p>Observações</p>	<p>Se o alteamento/abatimento ocorrer em combinação com uma fenda, a fenda também deverá ser registada. Os alteamentos e abatimentos só devem ser contabilizados se houver a possibilidade de o tráfego passar por cima deles.</p>	

Tabela 2.5: Ficha de caracterização da degradação Ondulação.


<p>Ondulação (<i>Corrugation</i>)</p>	 <p>Fonte: Tri-Service Transportation (2024)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>Conjunto de elevações e depressões perpendiculares ao fluxo do tráfego, espaçadas em intervalos regulares com um comprimento máximo de 3m. Geralmente é causada pela ação das cargas do tráfego associada à má compactação ou instabilidade das camadas da superfície ou de base.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>A ondulação praticamente não afeta a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p>Médio</p>	<p>A ondulação afeta medianamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p>Alto</p>	<p>A ondulação afeta severamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>	

Tabela 2.6: Ficha de caracterização da degradação Depressões.

Depressões
(*Depression*)



Fonte: Tri-Service Transportation (2024)

Descrição	Áreas localizadas da superfície do pavimento com elevação ligeiramente inferior à do pavimento circundante. São áreas facilmente perceptíveis após a ocorrência de chuva devido à formação de pequenas poças de água, podendo provocar a hidroplanagem dos veículos. No pavimento seco, as depressões podem ser detetadas procurando manchas causadas pela acumulação de água. As depressões têm origem no assentamento do solo de fundação ou são consequência de uma construção inadequada.	
Níveis de Gravidade	Baixo	Profundidade máxima entre 13 a 25mm.
	Médio	Profundidade máxima entre 25 a 50mm.
	Alto	Profundidade máxima superior a 50mm.
Quantificação	Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação em metros quadrados (m ²).	

Tabela 2.7: Ficha de caracterização da degradação Fendas de Canto.

Fendas de Canto
(*Edge cracking*)



Fonte: Gaddes Strategic LLC (2022)

Descrição	As fendas de canto são paralelas e localizam-se geralmente entre 0,3 a 0,5m da borda externa do pavimento. Podem ser causadas por camada de base ou sub-base enfraquecidas pelo gelo, associado à ação das cargas do tráfego.	
Níveis de Gravidade	Baixo	Fendas de nível de gravidade baixo ou médio sem rutura ou desagregação.
	Médio	Fendas de nível de gravidade médio com rutura e desagregação.
	Alto	Rotura considerável ou desagregação ao longo da borda do pavimento.
Quantificação	As fendas de canto são medidas em metros lineares (m).	

Tabela 2.8: Ficha de caracterização da degradação Fendas de reflexão no local das juntas de lajes rígidas em pavimentos semirrígidos longitudinais e transversais.

Fendas de reflexão no local das juntas de lajes rígidas em pavimentos semirrígidos - longitudinais e transversais
(*Joint reflection cracking*)



Fonte: Pavement Interactive (2023)

Descrição	Esta degradação ocorre apenas em camadas betuminosas construídas sobre uma laje de betão. As fendas são causadas pelo movimento de retração e expansão da laje de betão devido à variação da temperatura e da humidade. Esta degradação não está relacionada com o efeito das cargas do tráfego, no entanto, estas cargas podem causar desagregação do material betuminoso perto das fendas.	
Níveis de Gravidade	Baixo	Verifica-se uma das seguintes condições: A largura da fenda não preenchida é <10mm ou fenda preenchida de qualquer largura (preenchimento em condições satisfatórias).
	Médio	Verifica-se uma das seguintes condições: A largura da fenda não preenchida é $\geq 10\text{mm}$ e $< 75\text{mm}$; fenda não preenchida com largura $\leq 75\text{mm}$ circundada por fendas secundárias de nível de gravidade baixo; ou, fendas preenchidas de qualquer largura circundadas por fendas secundárias de nível de gravidade baixo.
	Alto	Verifica-se uma das seguintes condições: Qualquer fenda preenchida ou não, circundada por fendas secundárias de nível de gravidade médio ou alto; fendas não tratadas com largura $> 75\text{mm}$; ou, fendas de qualquer largura onde aproximadamente 100mm do pavimento ao redor da fenda se encontra severamente desagregado.
Quantificação	Medição do desenvolvimento das fendas em metros lineares (m).	
Observações	A extensão e o nível de gravidade de cada fenda devem ser identificados e registados separadamente. Se ocorrer um alteamento junto com a fenda de reflexão, as duas degradações devem ser registadas.	

Tabela 2.9: Ficha de caracterização da degradação Desnível via/berma.

Desnível via/berma
(Lane/shoulder Drop-off)



Fonte: Crash Forensics (2008)

Descrição	A degradação desnível via/berma é caracterizada por uma diferença de elevação entre a borda do pavimento da via e a berma. Esta degradação é causada pela erosão da berma, assentamento da berma ou pela construção do pavimento sem ajuste adequado do nível da berma.	
Níveis de Gravidade	Baixo	O desnível entre a borda do pavimento da via e a berma é >25mm e <50mm.
	Médio	O desnível entre a borda do pavimento da via e a berma é >50mm e <100mm.
	Alto	O desnível entre a borda do pavimento da via e a berma é >100mm.
Quantificação	O desnível via/berma é medido em metros lineares (m).	

Tabela 2.10: Ficha de caracterização da degradação Fendilhamento longitudinal e transversal.


<p>Fendilhamento longitudinal e transversal (<i>Longitudinal and transverse cracking</i>)</p>	 <p>Fonte: Tri-Service Transportation (2024)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>As fendas longitudinais são paralelas ao eixo central do pavimento e as transversais são aproximadamente perpendiculares a esse mesmo eixo. As causas associadas ao aparecimento de fendas longitudinais estão relacionadas com uma incorreta construção das juntas de pavimentação, com a retração das camadas betuminosas devido a variações da temperatura ou endurecimento do betume, e com o aparecimento de fendas com origem nas das camadas inferiores, incluindo as fendas que ocorrem nas lajes de betão de cimento (fora do local das juntas). O aparecimento de fendas transversais não está geralmente relacionado com as cargas do tráfego.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>Verifica-se uma das seguintes condições: a largura da fenda não preenchida é <10mm ou fenda preenchida de qualquer largura (preenchimento em condições satisfatórias).</p>
	<p>Médio</p>	<p>Verifica-se uma das seguintes condições: a largura da fenda não preenchida é $\geq 10\text{mm}$ e $< 75\text{mm}$; a fenda não preenchida apresenta largura $\leq 75\text{mm}$ circundada por fendas de nível de gravidade baixo e aleatórias; ou, a fenda preenchida é de qualquer largura e encontra-se circundada por fendas aleatórias de nível de gravidade baixo.</p>
	<p>Alto</p>	<p>Verifica-se uma das seguintes condições: qualquer fenda preenchida ou não preenchida cercada por fendas aleatórias de nível de gravidade médio ou alto; fendas não preenchidas com largura $> 75\text{mm}$; ou uma fenda de qualquer largura onde aproximadamente 100mm do pavimento ao redor da fenda se encontra gravemente desagregado.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição do desenvolvimento das fendas em metros lineares (m).</p>	
<p>Observações</p>	<p>Se a fenda não apresentar o mesmo nível de gravidade ao longo de todo o seu desenvolvimento, cada nível de gravidade deve ser registado separadamente. Caso não seja possível identificar os diferentes níveis de gravidade presentes, a fenda deve ser registada com o nível mais grave identificado.</p>	

Tabela 2.11: Ficha de caracterização da degradação Reparações e cortes técnicos.

Reparações e cortes técnicos
(*Patching and utility cut patching*)



Fonte: Pavement Interactive (2023)

Descrição	Uma reparação é uma área do pavimento que foi substituída por novo material para reparar um defeito do pavimento existente. Para o efeito é necessário efetuar cortes no pavimento existente. Uma reparação é considerada uma degradação (áreas reparadas ou adjacentes à reparação geralmente não apresentam um desempenho tão bom quanto o estado original do pavimento).	
Níveis de Gravidade	Baixo	A reparação está em boas condições e foi realizada de forma adequada. Praticamente não afeta a qualidade de circulação do tráfego.
	Médio	A reparação encontra-se ligeiramente deteriorada, afetando a qualidade de circulação do tráfego.
	Alto	A reparação encontra-se muito deteriorada, afetando significativamente a qualidade de circulação do tráfego. A reparação necessita de intervenção.
Quantificação	Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m ²).	
Observações	Se numa mesma reparação se verificarem áreas com níveis de gravidade diferente, essas áreas deverão ser medidas e registadas separadamente. Qualquer degradação dentro da área da reparação não deve ser registada, no entanto, na determinação do nível de gravidade da reparação, devem ser considerados os efeitos das degradações existentes.	

Tabela 2.12: Ficha de caracterização da degradação Polimento dos agregados.


<p>Polimento dos agregados (<i>Polished aggregate</i>)</p>	 <p>Fonte: Pavement Interactive (2023)</p>
<p>Descrição</p>	<p>Esta degradação é causada pela ação repetida do tráfego. O agregado polido está presente quando um exame minucioso do pavimento revela que a porção do agregado que se estende acima do betume asfáltico é muito pequena ou não há partículas de agregado ásperas ou angulares para garantir a resistência à derrapagem. Este tipo de degradação é registado quando o valor dum teste de resistência à derrapagem é baixo ou caiu significativamente em relação ao obtido num teste anterior.</p>
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Nenhum nível de gravidade definido.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>
<p>Observações</p>	<p>Se a exsudação for contabilizada, o polimento do agregado não deverá ser contabilizado.</p>

Tabela 2.13: Ficha de caracterização da degradação Covas.


<p>Covas (<i>Potholes</i>)</p>	
<p>Fonte: Tri-Service Transportation (2024)</p>	
Descrição	As covas são pequenas depressões em forma de tigela na superfície do pavimento, geralmente apresentando dimensão inferior a 750mm de diâmetro. Apresentam geralmente bordos afiados e lados verticais próximos ao topo da cova.
Níveis de Gravidade	Os níveis de gravidade para covas com dimensão inferior a 750mm de diâmetro são baseados tanto no diâmetro quanto na profundidade das covas, conforme apresentado na Tabela 2.14. Se a cova apresentar um diâmetro >750mm, a área deverá ser determinada em metros quadrados e dividida por 0,5m ² para encontrar o número equivalente de covas. Se a profundidade for ≤25mm, as covas são consideradas de gravidade média. Se a profundidade for >25mm são considerados de severidade alta.
Quantificação	Número de covas (número inteiro).
Observações	Quando as covas têm origem em pele de crocodilo de com nível de gravidade alto, devem ser identificadas como covas e não como desagregação do mástique.

Tabela 2.14: Tabela dos níveis de gravidade para covas com menos de 750 mm de diâmetro, baseados tanto no diâmetro quanto na profundidade das covas.

Profundidade máxima das Covas	Diâmetro médio (mm)		
	100 a 200mm	200 a 450mm	450 a 750mm
13 a ≤25mm	L	L	M
>25 e ≤50mm	L	M	H
>50mm	M	M	H

Tabela 2.15: Ficha de caracterização da degradação Passagem de linha de caminho de ferro.

**Passagem de linha de
caminho de ferro**
(*Railroad Crossing*)



Fonte: Tri-Service Transportation (2024)

Descrição	As degradações do tipo passagem de linha de caminho de ferro são depressões ou saliências ao redor e/ou entre os trilhos dos caminhos de ferro.	
Níveis de Gravidade	Baixo	A passagem da linha de caminho de ferro praticamente não afeta a qualidade de circulação do tráfego.
	Médio	A passagem da linha de caminho de ferro afeta medianamente a qualidade de circulação do tráfego.
	Alto	A passagem da linha de caminho de ferro afeta severamente a qualidade de circulação do tráfego.
Quantificação	Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m ²).	
Observações	Qualquer alteamento criado pelos trilhos deve ser contabilizado como parte da degradação passagem de linha de caminho de ferro.	

Tabela 2.16: Ficha de caracterização da degradação Rodeiras.


<p>Rodeiras (<i>Rutting</i>)</p>	 <p>Fonte: Tensar U.K (2021)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>Depressão da superfície do pavimento devido à passagem repetidas dos rodados dos veículos no mesmo local. Por vezes, apenas são visíveis após uma chuvada, quando retêm a água. As rodeiras ocorrem devido a uma deformação permanente em qualquer uma das camadas ou do leito do pavimento, geralmente causada por movimento consolidado ou lateral dos materiais devido à ação das cargas do tráfego.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>Profundidade média da rodeira entre 6 a 13mm.</p>
	<p>Médio</p>	<p>Profundidade média da rodeira entre 13 a 25mm.</p>
	<p>Alto</p>	<p>Profundidade média da rodeira superior a 25mm.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>	
<p>Observações</p>	<p>A profundidade média da rodeira é calculada pousando uma régua na direção perpendicular do desenvolvimento da mesma e medindo a sua profundidade em vários locais ao longo do seu comprimento para calcular a sua profundidade média, em milímetros. A largura da rodeira deve ser medida a partir do ponto onde a superfície do pavimento se afasta da régua.</p>	

Tabela 2.17: Ficha de caracterização da degradação Escorregamento.


<p>Escorregamento (<i>Shoving</i>)</p>	 <p>Fonte: Municipal Impact (2022)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>O escorregamento é um deslocamento longitudinal permanente de uma área localizada da superfície do pavimento causado pela ação das cargas do tráfego. Quando o tráfego empurra o pavimento, produz uma onda curta e abrupta na superfície do pavimento. Esta degradação ocorre normalmente em pavimentos constituídos por misturas betuminosas líquidas instáveis (uso de betume fluidificado ou emulsão betuminosa). Também ocorrem em camadas betuminosas assentes sobre lajes de betão. As lajes de betão, devido a sua dilatação, “aumentam” de comprimento e empurram o material betuminoso, provocando o escorregamento.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>O escorregamento praticamente não afeta a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p>Médio</p>	<p>O escorregamento afeta medianamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p>Alto</p>	<p>O escorregamento afeta severamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>	
<p>Observações</p>	<p>Os escorregamentos que ocorrem em reparações são considerados como reparações, e não como uma degradação separada.</p>	

Tabela 2.18: Ficha de caracterização da degradação Fendas em forma de “meia-lua”.


<p>Fendas em forma de "meia-lua" (<i>Slippage cracking</i>)</p>	 <p>Fonte: Paveman Pro (2011)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>Este tipo de fendas apresentam uma forma de crescente ou meia-lua, geralmente transversais à direção do deslocamento do tráfego. Elas são produzidas quando a travagem ou a viragem das rodas dos veículos provocam o deslizamento ou deformação da superfície do pavimento. Esta degradação geralmente ocorre quando há uma má ligação entre a camada de desgaste e a camada seguinte da estrutura do pavimento.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>A largura média da fenda é <10mm.</p>
	<p>Médio</p>	<p>Verifica-se uma das seguintes condições: a largura média da fenda é ≥10 e <40mm; ou a área ao redor da fenda está moderadamente desagregada ou cercada por fendas secundárias.</p>
	<p>Alto</p>	<p>Verifica-se uma das seguintes condições: a largura média da fenda é >40mm; ou a área ao redor da fenda encontra-se desagregada em pedaços facilmente removíveis.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>	

Tabela 2.19: Ficha de caracterização da degradação Empolamento.

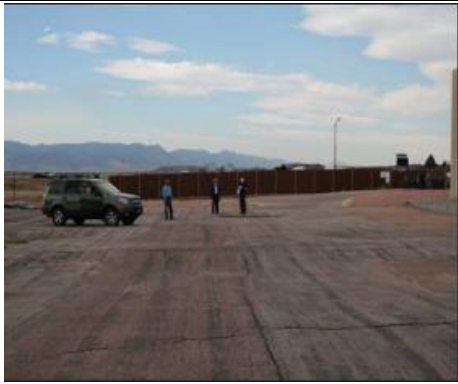
<p style="text-align: center;">Empolamento (<i>Swell</i>)</p>	 <p style="text-align: center;">Fonte: Tri-Service Transportation (2024)</p>	
<p style="text-align: center;">Descrição</p>	<p>Esta degradação é caracterizada por uma protuberância ascendente na superfície do pavimento, uma onda longa e gradual com mais de 3 m de comprimento. Pode ser acompanhada por fendas superficiais. Esta degradação geralmente é causada pela ação do gelo no leito do pavimento ou pela expansão do solo.</p>	
<p style="text-align: center;">Níveis de Gravidade</p>	<p style="text-align: center;">Baixo</p>	<p>O empolamento praticamente não afeta a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p style="text-align: center;">Médio</p>	<p>O empolamento afeta medianamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
	<p style="text-align: center;">Alto</p>	<p>O empolamento afeta severamente a qualidade de circulação do tráfego.</p>
<p style="text-align: center;">Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação em metros quadrados (m²).</p>	

Tabela 2.20: Ficha de caracterização da degradação Desagregação superficial do agregado em misturas betuminosas densas.



<p>Desagregação superficial do agregado em misturas betuminosas densas (<i>Raveling</i>)</p>	 <p>Fonte: Tri-Service Transportation (2024)</p>	
<p>Descrição</p>	<p>Esta degradação é caracterizada pelo desalojamento de partículas de agregados grossos da superfície do pavimento. O desalojamento pode ser causado pela utilização insuficiente de ligante asfáltico, má qualidade da mistura, compactação insuficiente, segregação ou desprendimento.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>Não aplicável.</p>
	<p>Médio</p>	<p>Perda considerável da fração de agregado grosso da superfície da camada de desgaste, correspondendo a mais de 20 partículas por metro quadrado ou à existência de locais de concentração de perda destes agregados (<i>clusters</i>).</p>
	<p>Alto</p>	<p>A superfície é muito rugosa e esburacada, podendo ser completamente removida em alguns sítios.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície do pavimento afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>	
<p>Observações</p>	<p>Os danos mecânicos causados por ganchos de arrastamento, jantes de pneus ou máquinas de limpeza de neve são contabilizados como desagregação superficial do agregado. Se houver desagregação superficial do agregado, a desagregação superficial do mástique não é registrada.</p>	

Tabela 2.21: Ficha de caracterização da degradação Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas.

<p>Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas (<i>Weathering</i>)</p>		
<p>Descrição</p>	<p>Esta degradação é caracterizada pelo desgaste do ligante asfáltico e do agregado fino à superfície do pavimento. É normalmente causada por oxidação do ligante, compactação inadequada, teor insuficiente de ligante, excesso de areia natural, erosão hídrica superficial e pela ação do tráfego. Ocorre mais rapidamente em áreas com alta radiação solar.</p>	
<p>Níveis de Gravidade</p>	<p>Baixo</p>	<p>A superfície do pavimento começa a apresentar sinais de envelhecimento. A perda da matriz de agregados finos é perceptível e pode ser acompanhada de desbotamento da cor da mistura betuminosa. As bordas dos agregados grossos começam a ficar expostas (menos de 1 mm).</p>
	<p>Médio</p>	<p>A perda da matriz de agregado fino da superfície do pavimento é perceptível e as bordas do agregado grosso encontram-se expostas até ¼ da largura da sua dimensão maior.</p>
	<p>Alto</p>	<p>As bordas do agregado grosso foram expostas em mais de ¼ da largura da sua maior dimensão. Há perda considerável da matriz de agregado fino levando a alguma perda de agregado grosso.</p>
<p>Quantificação</p>	<p>Medição da área da superfície afetada pela degradação, em metros quadrados (m²).</p>	
<p>Observações</p>	<p>Se a desagregação superficial do agregado em misturas betuminosas densas for registada, a desagregação superficial do mástique não deve ser registada.</p>	

3. Métodos de inspeção da superfície de pavimentos rodoviários

3.1. Introdução

A manutenção adequada da superfície de pavimentos rodoviários é essencial para garantir a segurança dos usuários, a eficiência no transporte e a longevidade das infraestruturas. Nesse contexto, a inspeção de pavimentos desempenha um papel crucial ao permitir a identificação de defeitos funcionais e estruturais (Yu et al., 2024).

Segundo dos Santos (2018), as degradações dos pavimentos podem ser observadas de uma forma geral por três métodos:

- Observação visual manual, estas dependem de operadores que inspecionam as degradações do pavimento e registam as informações em papel ou com apoio computadorizado.
- A observação através de equipamento do tipo vídeo ou fotográfico, estas consistem em capturar fotografias da superfície, de maneira pontual ou contínua, para posterior análise das imagens e identificação das degradações.
- E os perfilômetros, estas empregam métodos a laser ou acústicos para medir deformações, sendo especialmente indicados para avaliar esse tipo específico de degradação.

Contudo, os avanços tecnológicos têm impulsionado a adoção de métodos mais sofisticados, incluindo a utilização de veículos aéreos não tripulados e o uso de técnicas de processamento de imagens e inteligência artificial. Estas técnicas têm transformado este campo de atuação, oferecendo novos caminhos para a aquisição de dados e para a detecção automática de degradações, assim como para a reconstrução tridimensional das superfícies. As inovações da utilização destas técnicas inovadoras possibilitam avaliações mais rápidas, detalhadas e consistentes do estado do pavimento. Esses métodos permitem ainda que gestores da infraestrutura implementem estratégias de manutenção proativa, reduzindo custos e impactos no tráfego. Portanto, o estudo dos métodos de inspeção de pavimentos rodoviários é fundamental para o avanço da eficiência dos sistemas gestão e manutenção de pavimentos rodoviários, com implicações diretas na segurança e economia dos sistemas de transporte.

Este capítulo explorará as diferentes tecnologias disponíveis para a inspeção visual e análise de informações relacionadas ao estado dos pavimentos, bem como as suas

aplicações práticas. Serão abordados métodos tradicionais, bem como soluções tecnológicas mais inovadoras. Entre os métodos mais utilizados para avaliar o estado dos pavimentos, destacam-se a inspeção visual a efetuada a pé, a inspeção com recurso a veículos terrestres equipados e a inspeção com veículos aéreos não tripulados (VANTs).

3.2. Inspeção visual a pé

A inspeção visual a pé é realizada por um técnico (inspetor) que observa visualmente e diretamente as degradações presentes na superfície do pavimento, com base num documento orientador (catálogo de degradações) e na sua perceção individual. Durante esse processo, são registados os diversos tipos de degradações, bem como o seu nível de gravidade e extensão, expressa em comprimento, profundidade ou área afetada. As informações coletadas são inseridas numa folha de inspeção (ver Figuras 3.1 e 3.2), que pode ser em formato de papel ou digital.

Na inspeção visual a pé, o técnico deve fazer-se acompanhar por um odómetro, fita métrica, réguas ou linha de corda, catálogo de degradações e folhas de inspeção (onde regista as seguintes informações: data, localização, ramo, seção, área da unidade de amostra, número e tamanho da laje, tipos de degradações, níveis de gravidade, quantidades por degradação e nível de gravidade, e identificação do inspetor). Para além destes equipamentos, o técnico deve envergar equipamento de proteção individual (colete refletor e calçado confortável) e os locais a inspecionar devem apresentar sinalização temporária, por forma a alertar os condutores para a realização das observações, garantindo desta forma a segurança dos técnicos e dos utentes (Videira, 2014).

As principais vantagens deste tipo de método de inspeção é que exige menos meios, logo é mais económico a este nível (Videira, 2014), e permite identificar no local de inspeção, através de uma visualização direta, as degradações e os seus respetivos níveis de gravidade (Nery, 2023).

Como desvantagens destacam-se o tempo elevado de recolha e tratamento de dados; a eventual necessidade de limitar o acesso à estrada ou parte dela, afetando o tráfego local; o baixo rendimento, uma vez que um técnico menos experiente pode demorar mais tempo do que um técnico mais experiente a identificar e classificar o nível de gravidade das degradações; a subjetividade inerente a uma avaliação humana, visto que uma mesma degradação pode receber classificações diferentes por parte de dois inspetores distintos ou até mesmo ser avaliada de maneira divergente pelo mesmo inspetor,

do pavimento, enquanto os equipamentos a laser procuram criar uma imagem tridimensional da superfície do pavimento, através do princípio da “triangulação laser”.

As principais vantagens desse tipo de método são uma elevada reprodutibilidade do processo de observação, ou seja, tem-se a possibilidade de observar várias vezes o pavimento sem necessidade de se repetir a observação “*in situ*” (Branco et al., 2008, Santos et al., 2020), o menor tempo de inspeção e a integração dos veículos no tráfego. Por exemplo, os sistemas baseados em laser são considerados técnicas mais precisas para a detecção de degradações superficiais de pavimentos, uma vez que permitem inspeções em longos trechos de pavimento em menos tempo, podem ser integrados na corrente de tráfego e minimizam a exposição dos inspetores ao tráfego.

Como desvantagens destacam-se o custo elevado dos equipamentos de gravação de imagem e dos que recorrem à tecnologia laser, a necessidade de profissionais capacitados para operar os equipamentos e interpretar os dados, e o processamento e análise de dados que podem exigir software especializado.

Em seguida serão apresentados vários exemplos de equipamentos utilizados na inspeção com veículos terrestre equipados.

O sistema VIZIROAD (ver Figura 3.3) é integrado num veículo e consiste em um computador portátil e dois teclados programados para registar eventos específicos. Esses teclados possuem botões que permitem identificar parâmetros relacionados a diferentes tipos de degradação e seus níveis de gravidade, enquanto o veículo percorre o pavimento. O sistema está conectado ao conta-quilómetros do veículo, o que possibilita associar os registos de eventos à distância linear percorrida (em metros), desde o início da seção avaliada até o ponto onde a degradação foi detetada. Trata-se de um equipamento configurável, com a flexibilidade de ajustar o software conforme o tipo de informações que se pretende observar (Feitosa, 2020).



Figura 3.3: Equipamento VIZIROAD (Igm, 2022).

O *Laser Crack Measurement System* (LCMS) (ver Figura 3.4), é um sistema de perfil transversal 3D baseado em laser, de alta velocidade e alta resolução. O LCMS consiste em duas câmaras de varredura de linha de alta velocidade voltadas para baixo e projetores de linha a laser de alta potência para adquirir imagens 2D e perfis 3D de alta resolução da superfície do pavimento. Os lasers são projetados na superfície do pavimento a ser inspecionado, sendo a sua imagem capturada pelas câmaras. Este equipamento está projetado para operação diurna e noturna em todos os tipos de condições de iluminação, o sistema é imune ao sol e às sombras e é capaz de medir degradações em todos os tipos de pavimentos. O LCMS pode ser operado a velocidades até 100 km/h, em estradas com largura até 4 m. Os dados de alcance e intensidade do LCMS são processados usando algoritmos automatizados de imagem que analisam cada perfil de dados para determinar a extensão e a gravidade das degradações existentes na superfície do pavimento, incluindo fendas, reparações, desagregação superficial do agregado e rodeiras (Mulry et al.,2015).

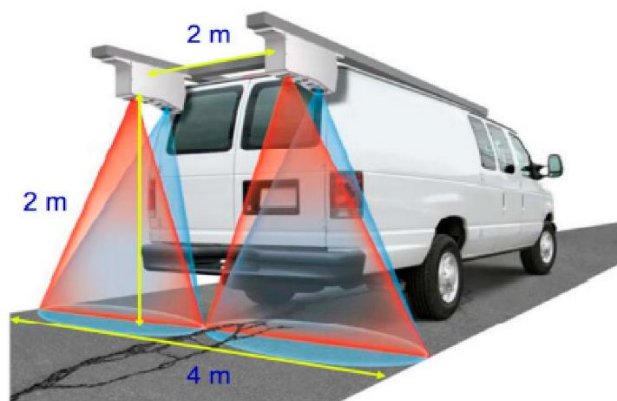


Figura 3.4: Laser Crack Measurement System - LCMS (Fonte: Huang et al., 2024).

O sistema *PASCO Roadrecon* (ver Figura 3.5) foi desenvolvido pela *PASCO Corporation* no Japão e tem sido utilizado no estudo US-LTPP (*Long-Term Pavement Performance*). O sistema está equipado com sensores laser e uma câmara de 35 mm montada numa

estrutura cantilêver no topo do veículo que produz uma gravação contínua da superfície do pavimento. O veículo pode ser operado a velocidades até 80 km/h, e as imagens são captadas à noite com um sistema de luz artificial para controlar as condições de iluminação. A interpretação visual das imagens em gabinete é necessária para avaliar o desgaste do pavimento (Joni et al., 2020, Fwa, 2006).

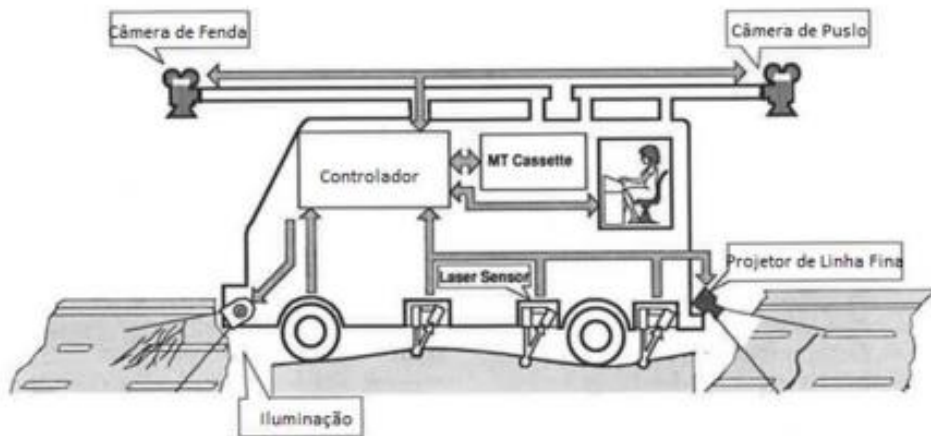


Figura 3.5: Representação do sistema PASCO Roadrecon (Fonte: Nery, 2023).

O *Groupe d'Examen Routier par PHotographie* (GERPHO) (ver Figura 3.6) é um equipamento que consiste em um veículo equipado com uma câmara fotográfica de 35 mm, de saída contínua, montada em um suporte mecânico que possibilita capturar imagens verticais do pavimento enquanto o veículo se desloca a uma velocidade de 60 km/h. O sistema GERPHO foi desenvolvido pelo Laboratório Central *Des Ponts et Chaussées* (LCPC), na França. O veículo é equipado com uma fonte de luz, composta por projetores inclinados, direcionados para o pavimento, e possui um sistema de iluminação ajustável à velocidade do veículo, já que o levantamento deverá ser efetuado durante a noite, de modo a garantir condições de luminosidade constante do pavimento (Branco et al., 2008).



Figura 3.6: Veículo Gerpho e pormenor do equipamento fotográfico (Fonte: Nery, 2023).

No *Automated Road Analyzer* (ARAN) (ver Figura 3.7) as degradações do pavimento são observadas através do para-brisas do veículo, enquanto as informações coletadas são

inseridas em dois teclados de classificação. A avaliação da profundidade das fendas é feita utilizando sensores ultrassônicos montados em uma barra fixa no para-choques dianteiro do veículo, enquanto a medição da rugosidade é realizada com um acelerômetro acoplado ao eixo traseiro. Duas câmaras de vídeo são responsáveis por capturar imagens da superfície do pavimento. Contudo, o sistema apresenta restrições, sendo operável apenas durante o dia e em condições de clima seco. Além disso, requer três operadores, tornando-o dependente da disponibilidade de mão-de-obra para a sua operação (Nery, 2020).



Figura 3.7: Automated Road Analyzer - ARAN (Fonte: Center for Transportation Research and Education, 2012).

O *Road Assessment Vehicle (RAV)* (ver Figura 3.8) foi desenvolvido no ano 2000 por *Wright, Dawson & McEwan Limited*. Este sistema é constituído por câmaras e sensores acoplados a um veículo e que pode circular à velocidade de 100 km/h. O vídeo gravado é posteriormente analisado em câmara lenta por um inspetor, de modo a identificar de forma precisa as degradações existentes no pavimento. Esse sistema é um dos adotados na recolha de dados sobre o estado da superfície de pavimentos no Reino Unido. Com esse sistema pode-se medir/registar a rugosidade e textura do pavimento, as fendas, a profundidade das rodeiras e o desnível via/berma (Joni et al.,2020).



Figura 3.8: Road Assessment Vehicle – RAV (Fonte: wdm, 2020).

O *ROad Measurement and Data Acquisition System* (ROMDAS) (ver Figura 3.9) é uma tecnologia de levantamento de vídeo desenvolvida pela *Data Collection Ltd.* (DCL) como um sistema genérico para recolha de dados sobre o estado de estradas e tempo de viagem. Com o ROMDAS é possível realizar diversos levantamentos de informação que incluem dados de rugosidade do pavimento, tempo de viagem, congestionamento do tráfego, inventário, tráfego em movimento, perfil transversal. Podem ser recolhidos e criados dados de Sistemas de Posicionamento Global (GPS), como a localização de fotografias digitais gravadas, assim como dados de registos de voz associados a atributos da estrada. O sistema consiste em uma câmara de vídeo e diversos dispositivos de medição, incluindo um giroscópio, recetores GPS, odómetro, integrador de colisão, etc., montados em um veículo, juntamente com um software que processa as medições (Kayondo-Ndandiko et al., 2011).

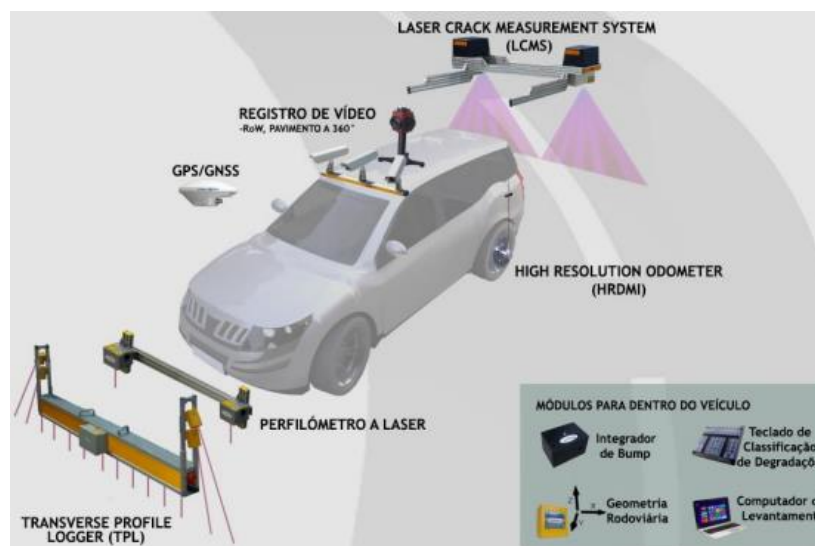


Figura 3.9: Sistema ROMDAS (Fonte: Feitosa, 2020).

O sistema *Hawkeye* (ver Figura 3.10) é um veículo produzido pelo *Australian Road Research Board* (ARRB), operando desde 2018 para fins de levantamento do estado das estradas. O *Hawkeye* permite avaliar com rapidez e precisão a irregularidade da superfície da estrada, o índice internacional de rugosidade IRI (*International Roughness Index*) e os danos presentes na superfície do pavimento. Além disso, o *Hawkeye* é usado para produzir resultados variáveis de elementos geométricos de estradas e ativos rodoviários, que também podem ser utilizados para determinar o nível de desempenho da segurança rodoviária. Durante as operações de aquisição de dados, o *Hawkeye* pode deslocar-se por autoestradas e estradas nacionais com velocidade mínima de 30 km/h e máxima de 100 km/h (Novianti et al., 2024).



Figura 3.10: Hawkeye Veículo (Fonte: IRAP, 2021).

A evolução dessas técnicas tem sido marcada por uma progressiva automação e pela utilização de tecnologias mais avançadas, como sensores a laser, câmaras de alta-definição, e sistemas de análise em tempo real, que permitiram não só uma maior precisão nas medições, mas também uma abordagem mais abrangente e eficiente. Essas inovações tornaram as inspeções rodoviárias mais rápidas, menos dependentes de trabalho manual e com uma maior capacidade de coletar dados em tempo real, proporcionando um apoio valioso na gestão e manutenção das infraestruturas rodoviárias.

3.4. Inspeção com veículo aéreo não tripulado

A tecnologia de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) representa a solução mais moderna para a inspeção de degradações na superfície de pavimentos. Os VANT são altamente flexíveis, permitindo a recolha de dados de imagem com menor custo e maior rapidez e segurança (Zhang, 2008). Graças ao potencial de alta flexibilidade e eficiência dos (VANT), os gestores da manutenção de pavimentos podem avaliar áreas com extensão significativa, muitas vezes inacessíveis, em pouco tempo, fornecendo informações valiosas e atualizadas sobre a deterioração do pavimento (Leonardi et al., 2019).

De acordo com a Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO - *International Civil Aviation Organization*), os veículos aéreos não tripulados ou drones (como são conhecidos) (ver Figura 3.11) são aeronaves que não possuem piloto a bordo, podem ser controladas por um operador a partir de uma estação remota ou podem ser guiados de forma autónoma com base em missões pré-programadas para realizar uma tarefa específica (Cruz, 2023).



Figura 3.11: Esquema de um veículo aéreo não tripulado (Fonte: adaptado de Tatale et al., 2018).

Para o levantamento de dados relativos a degradações superficiais do pavimento, geralmente é utilizado um sistema constituído por um VANT equipado com um *LiDAR* (ver Figura 3.12), que permite adquirir diretamente as informações tridimensionais (3D) do pavimento deteriorado para medir as dimensões geométricas das degradações do pavimento. Esta tecnologia utiliza o sistema GPS (*Global Positioning System*) que fornece a posição da aeronave, o sistema INS (*Inertial Navigation System*) que determina os ângulos de atitude da aeronave, e telêmetros a laser para coletar/determinar coordenadas da superfície terrestre, georreferenciadas com precisão, resultando em uma nuvem de pontos densa (Paska, 2009).

Essa tecnologia opera com base na emissão de pulsos de laser que são disparados rapidamente, varrendo a superfície e obtendo múltiplas reflexões desta, portanto, vários pulsos laser podem ser refletidos sobre um mesmo alvo. O sensor *LiDAR* deteta a luz refletida, mede a sua velocidade e regista o tempo decorrido entre a emissão do pulso e seu retorno. Com essas informações, o dispositivo calcula a distância entre o sensor e o alvo analisado (Feitosa, 2020).

Visto que os VANT equipados com um *LiDAR* são mais dispendiosos, para obter sistemas funcionais a um custo acessível, as soluções de inspeção aérea normalmente incorporam apenas câmaras e sistemas de posicionamento GPS/GNSS. Avanços recentes em câmaras óticas de alta resolução e técnicas de processamento de imagem, bem como posicionamento baseado em satélite, como RTK GNSS e geomática, permitem a criação de modelos 3D a partir de imagens de VANT com alta precisão e eficiência. Isto torna os modelos 3D baseados em imagens de VANT uma alternativa econômica ao

escaneamento a laser 3D atualmente empregado em sistemas de inspeção de veículos terrestres. Múltiplas opções de software de modelagem 3D e fotogramétricos capazes de automatizar essas tarefas estão disponíveis no mercado. Uma técnica adotada por estes softwares é o *Structure from Motion* (SfM). Esta técnica permite a definição da forma, dimensões e posição espacial de qualquer objeto a partir de um conjunto de imagens 2D (Feitosa et al., 2024).

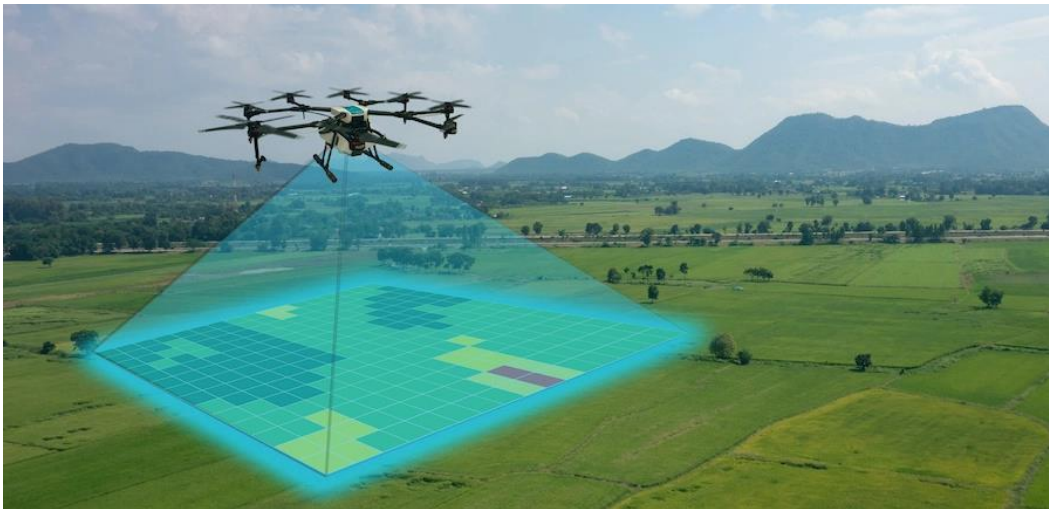


Figura 3.12: Tecnologia LiDAR em VANT (Fonte: CPE Tecnologias, 2019).

A utilização de VANT apresenta algumas restrições a ter em conta em trabalhos de inspeção de pavimentos, como por exemplo:

- a capacidade de carga, visto que drones menores possuem limitações no transporte de sensores e equipamentos avançados, como câmaras de alta resolução ou sensores *LiDAR* mais robustos;
- as condições climáticas, como chuvas, ventos fortes, neblina ou temperaturas extremas podem comprometer o desempenho e a segurança do voo;
- a duração limitada da bateria (cerca de 20 a 30 minutos), o que pode não ser suficiente para a realização da inspeção e requerer interrupções;
- o risco de colisões com obstáculos como fios elétricos, postes ou árvores;
- a diminuição da qualidade das imagens em alturas de voo maiores, limitando a capacidade de detetar degradações de menores dimensões;
- a falta de pilotos qualificados para pilotar o VANT e a inexistência de um procedimento padrão para a inspeção da superfície de pavimentos rodoviários com essa tecnologia.

4. Avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso ao *Pavement Condition Index (PCI)*

O *Pavement Condition Index (PCI)* ou Índice de Qualidade do Pavimento é uma classificação numérica do estado do pavimento que varia de 0 a 100, com o 0 sendo o pior estado possível (pavimento em ruína) e 100 o melhor estado possível (pavimento novo). Foi desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* e verificado e adotado pelo *Department of Defense (DOD)* e pelo *American Public Works Association (APWA)* (ASTM D6433-23, 2023).

O PCI fornece uma medida da qualidade atual do pavimento com base nas degradações observadas na superfície do pavimento, o que indica indiretamente a integridade estrutural e a condição operacional da superfície (rugosidade localizada e segurança). Fornece uma base objetiva e racional para determinar as necessidades e prioridades de manutenção e reabilitação (ASTM D6433-23, 2023).

As degradações consideradas para a sua determinação são 20, nomeadamente, Pele de Crocodilo (fadiga), Exsudação, Fendas cruzadas, Alteamentos e Abatimentos, Ondulação, Depressões, Fendas de canto, Fendas de reflexão no local das juntas de lajes rígidas em pavimentos semirrígidos – longitudinais e transversais, Desnível via/berma, Fendilhamento longitudinal e transversal, Reparações e cortes técnicos, Polimento dos agregados, Covas, Passagem de linha de caminho de ferro, Rodeiras, Escorregamento, Fendas em forma de "meia-lua", Empolamento, Desagregação superficial do agregado em misturas betuminosas densas, Desagregação superficial da mástique em misturas betuminosas densas.

De acordo com a norma ASTM 6433-23, para a determinação do índice PCI e interpretação dos resultados, devem ser seguidos os seguintes passos:

- Identificação e seccionamento da rede de pavimentos rodoviários a analisar (em ramos, secções e unidades de amostra).
- Determinação e seleção do número de unidades de amostra a inspecionar.
- Inspeção das unidades de amostra.
- Cálculo do PCI para cada unidade de amostra.
- Cálculo do PCI para cada secção.

- Classificação do estado do pavimento de cada unidade de amostra e secção em função do valor de PCI.

4.1. Identificação e seccionamento da rede de pavimentos rodoviários a analisar

Inicialmente identifica-se os pavimentos da rede a analisar com diferentes usos, constituindo estes os ramos, como por exemplo as vias de tráfego e os locais de estacionamento junto às vias.

Seguidamente divide-se cada ramo em secções com base na informação do projeto dos pavimentos, histórico de construção, tráfego e estado geral.

Por fim, dividem-se as secções do pavimento em unidades amostrais com tamanho padrão. A dimensão padrão das unidades de amostra para pavimentos flexíveis é de 225 m². Caso a área do pavimento não for divisível por este valor, ou caso seja necessário ajustar a divisão às condições locais, a área pode variar até ± 90 m².

4.2. Determinação e seleção do número de unidades de amostra a inspecionar

Como a inspeção de todas as unidades amostrais em cada secção está condicionada à disponibilidade de mão-de-obra, recursos financeiros e tempo, a metodologia sugere a definição de um número mínimo de unidades de amostra a serem avaliadas, garantindo assim um nível de confiança de 95% na determinação do PCI por secção.

O número mínimo de unidades de amostra a observar (n) é calculado pela aplicação da expressão 4.1.

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

(Exp. 4.1)

Onde:

e - Erro aceitável na estimativa do PCI da secção. Em geral é considerado $e = \pm 5$ pontos de PCI.

s - Desvio padrão do PCI de uma unidade de amostra para outra dentro da mesma secção. Na inspeção inicial assume-se a seguinte hipótese: desvio padrão de 10 pontos para os pavimentos flexíveis (AC). Nas inspeções seguintes o desvio padrão da observação anterior deve ser utilizado no cálculo de n .

N - Número total de unidades de amostra da secção.

Se for necessário obter um nível de confiança de 95%, deve ser confirmada a adequação do número de unidades de amostra inspeccionadas. O número de unidades de amostra foi estimado com base num desvio padrão assumido. O desvio padrão real (s) pode ser calculado através da expressão 4.2.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PCI_i - PCI_s)^2}{n-1}}$$

(Exp. 4.2)

Em que:

PCI_i - PCI das unidades de amostra inspeccionadas i .

PCI_s - PCI da secção.

n - Número total de unidade de amostra observadas.

Com o valor de s real obtido recalcula-se o número mínimo de unidades de amostras n utilizando a Expressão 4.1. Caso o novo valor de n for superior ao número de unidades de amostra já inspeccionadas, é necessário seleccionar de modo aleatório, e uniformemente espaçadas ao longo da secção, as unidades de amostra adicionais. Repetir o processo de verificação do n revisto e das unidades de amostra adicionais, até que o número de unidades de amostra a inspecionar seja superior ou igual ao número mínimo de unidades de amostra requeridas pela aplicação da Expressão 4.1.

Uma vez determinado o número de amostras a inspecionar, é necessário calcular o espaçamento entre elas. As amostras são igualmente espaçadas ao longo da secção, sendo a primeira amostra seleccionada aleatoriamente.

O intervalo de espaçamento das unidades (i) é calculado pela aplicação da Expressão 4.3, sendo o resultado arredondado para o número inteiro mais baixo.

$$i = \frac{N}{n}$$

(Exp. 4.3)

Onde:

N – Número total de unidades de amostras da secção.

n - Número de unidades de amostra a inspecionar.

4.3. Inspeção das unidades de amostra

O procedimento de inspeção visual consiste nos seguintes passos: realiza-se a inspeção individual de cada unidade de amostra selecionada; elabora-se um esboço da unidade de amostra indicando a sua orientação; registra-se o número do ramo, a secção correspondente, o tipo da unidade de amostra (aleatória ou adicional) e as suas dimensões; procede-se à inspeção das degradações caminhando pela unidade de amostra, medindo a quantidade de cada nível de gravidade das degradações superficiais identificadas no pavimento; e, por fim, os dados recolhidos são registrados em uma ficha específica para levantamento do estado do pavimento (ver Figura 3.1).

4.4. Cálculo do PCI para cada unidade de amostra

Para a obtenção do valor de PCI de uma unidade de amostra é necessário determinar a densidade de degradação, os valores de dedução (*DV*), o valor máximo de dedução corrigido (*Max CDV*) e o número máximo de degradações admissíveis (*m*). De seguida é apresentada uma descrição do procedimento a seguir para determinar estas quantidades e valores.

4.4.1. Densidade (*D*)

A densidade (*D*) é a percentagem de incidência de uma degradação, calculada por nível de gravidade, numa determinada unidade de amostra. É a divisão da quantidade total afetada pela degradação (em m ou m²) pela área total da unidade de amostra (*UA*) (ver Expressão 4.4).

$$D(\%) = \frac{\text{Quantidade da degradação (m ou m}^2\text{)}}{\text{Area total de UA (m}^2\text{)}} \times 100$$

(Exp. 4.4)

4.4.2. Valores de Dedução (*DV*), Valor Máximo de Dedução Corrigido (*Max CDV*) e Número Máximo de Degradações Admissíveis (*m*)

Os valores de dedução (*DV*) são obtidos para cada tipo de degradação e nível de gravidade registado em função dos valores das densidades. Estes valores são obtidos por interpretação das curvas de dedução que se encontram no Apêndice X3 da norma, e ordenados por ordem decrescente. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de determinação de *DV* para uma degradação do tipo Pele de Crocodilo com o nível de gravidade médio (*M*) e densidade igual a 27,2.

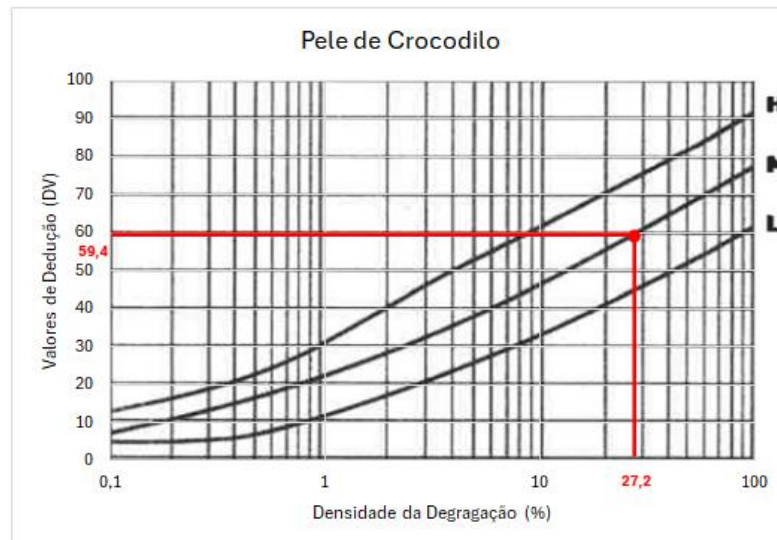


Figura 4.1: Exemplo da determinação de DV para uma degradação do tipo Pele de Crocodilo.

Se nenhum ou apenas um dos valores de dedução é superior a dois, o valor máximo de dedução corrigido (*Max CDV*) a usar no cálculo do PCI é igual a soma de todos os *DV*.

Caso mais do que um *DV* apresente valor superior a dois, é necessário calcular o número máximo de deduções (*m*) a considerar no cálculo de forma a ajustar a influência que o conjunto das anomalias produz no estado da unidade de amostra, evitando assim resultados de PCI exagerados ou irrealistas. A seguir apresenta-se o procedimento a adotar nestes casos.

Primeiro é calculado o número máximo de degradações admissíveis (*m*) com recurso à Expressão 4.5.

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) \times (100 - HDV) \leq 10 \quad (\text{Exp. 4.5})$$

Em que:

m - Número admissível de deduções, incluindo frações (deve ser igual ou inferior a dez).

HDV - O maior valor de dedução (*DV*) da unidade de amostra.

Se o valor do “*m*” encontrado for maior do que o número de deduções, usam-se todos os valores das deduções, mas se o valor do “*m*” encontrado for menor do que o número de deduções, o número de deduções é ajustado ao valor do “*m*”, incluindo a parte fracionária.

Por exemplo no caso da unidade de amostra 36 (UA36) da secção 1 do caso de estudo em que se tem os valores de dedução 59.4, 23.7, 19.2, 18.2, 5.2 e o “*m*” calculado é igual a 4.7, tendo 5 valores de deduções, que é um valor superior a 4.7, isto significa que devem

ser escolhidos os primeiros 4 DVs e 0.7 do quinto valor, ou seja, 5.2×0.7 que nesse caso é igual a 3.6. Assim, para o passo seguinte usam-se os valores de dedução: 59.4, 23.7, 19.2, 18.2, 5.2, 3.6.

O Valor Máximo de Dedução Corrigido é o valor a ser deduzido do valor máximo do PCI, sendo determinado através de um processo iterativo que inclui:

- Determinar o valor total das deduções somando os valores de dedução individuais.
- Determinar o valor (q) que corresponde ao número de deduções com valor superior a 2.
- Determinar o valor de dedução corrigido (CDV) usando o valor total das deduções e o valor do (q) na curva de correção apropriada para pavimentos flexíveis apresentada no Apêndice X3 da norma (ver Figura 4.2).

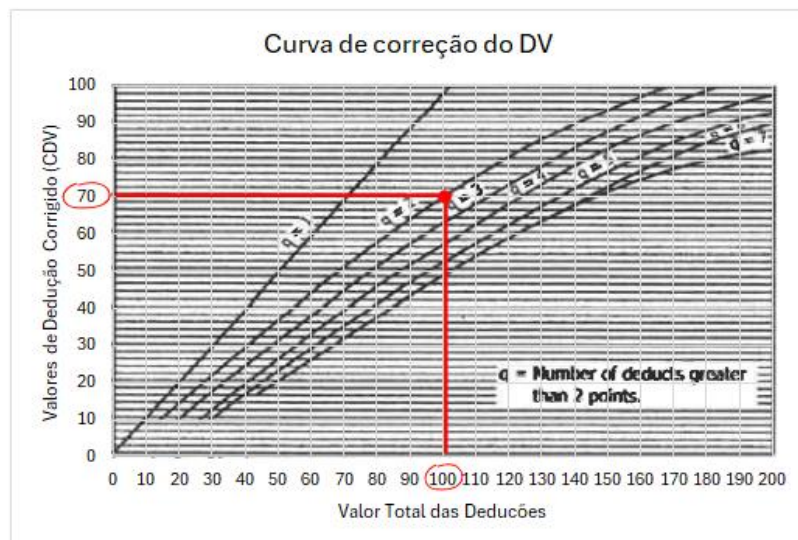


Figura 4.2: Exemplo da determinação de CDV para valor total das deduções igual a 100 e $q=3$.

- Reduzir o menor valor das deduções individuais maiores que dois para dois, e repetir os passos da alínea a) à alínea c) até obter $q=1$.
- O $Max\ CDV$ é o maior dos valores de CDV determinados por este processo.

4.4.3. Cálculo do PCI

O PCI da unidade amostra (PCI_{UA}) calcula-se através da aplicação da Expressão 4.6.

$$PCI_{UA} = 100 - MaxCDV$$

(Exp. 4.6)

Em que:

100 – Valor máximo do PCI;

$Max\ CDV$ – valor máximo de dedução corrigido.

No entanto, numa mesma unidade de amostra podem estar presentes diferentes níveis de gravidade de uma dada degradação. Nestes casos o cálculo do PCI deve ter em conta o seguinte procedimento:

Hipótese 1: quando existem dois níveis de gravidade de uma degradação na mesma unidade de amostra:

- Determinar o valor de PCI considerando os dois níveis de gravidade separadamente.
- Determinar o valor de PCI considerando apenas o nível de gravidade mais condicionante, ou seja, as quantidades afetadas pela degradação são somadas e a esse valor é atribuído o nível de gravidade mais condicionante.
- Após os cálculos, é atribuído à unidade de amostra o valor de PCI mais elevado, ou seja, o menos condicionante.

Hipótese 2: quando existem três níveis de gravidade de uma dada degradação na mesma unidade de amostra:

- Determinar o valor do PCI para as alternativas de combinação das quantidades registadas em cada nível de gravidade apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Combinações das quantidades em cada nível de gravidade a considerar quando existem três níveis de gravidade de uma dada degradação na mesma unidade de amostra (adaptado de Norma ASIM 6433-23, 2023).

	Degradações	Valores de PCI
Começar com l, m e h	l, m, h	→PCI (l, m, h)
Considerar (l+m) =M	→0, M, h	→PCI (0, M, h)
Considerar (l+h) =H	→0, m, H	→PCI (0, m, H)
Considerar (m+h) =H	→l, 0, H	→PCI (l, 0, H)
Considerar (l+m+h) =H	→0, 0, H	→PCI (0, 0, H)

Em que l é nível de gravidade leve, m é nível de gravidade médio e h nível de gravidade alto.

- Após os cálculos, é atribuído à unidade de amostra o maior valor de PCI encontrado, ou seja, o menos condicionante.

4.5. Cálculo do PCI para cada secção

Se todas as unidades de amostra analisadas tiverem sido selecionadas aleatoriamente, então o valor do PCI da secção (PCI_s) é a media ponderada do PCI das unidades de amostra ($\overline{PCI_r}$) que constituem a secção (ver Expressão 4.7).

$$PCI_s = \overline{PCI_r} = \frac{\sum_{i=1}^n (PCI_{ri} \times A_{ri})}{\sum_{i=1}^n A_{ri}} \quad (\text{Exp. 4.7})$$

PCI_s – valor do PCI da secção;

$\overline{PCI_r}$ - Média dos valores de PCI das unidades de amostra aleatoriamente selecionadas;

PCI_{ri} - PCI da unidade de amostra i aleatoriamente selecionada;

A_{ri} - Área da unidade de amostra i aleatoriamente selecionada;

n - Número total de unidades de amostras aleatoriamente selecionadas.

No caso de terem sido consideradas unidades de amostra adicionais durante o processo de inspeção, é necessário determinar a média ponderada do PCI das unidades de amostras adicionais ($\overline{PCI_a}$) (ver Expressão 4.8).

$$\overline{PCI_a} = \frac{\sum_{i=1}^m (PCI_{ai} \times A_{ai})}{\sum_{i=1}^m A_{ai}} \quad (\text{Exp. 4.8})$$

Em que:

$\overline{PCI_{ai}}$ - Média do PCI das unidades de amostras adicionais, ponderada pela área das unidades de amostra;

PCI_{ai} – PCI da unidade de amostra adicional i ;

A_{ai} – Área da unidade de amostra adicional i ;

m – Número total de unidades de amostras adicionais.

O PCI do pavimento da secção (PCI_s) é então determinado através da Expressão 4.9.

$$PCI_s = \frac{\overline{PCI_r}(A - \sum_{i=1}^m A_{ai}) + \overline{PCI_a}(\sum_{i=1}^m A_{ai})}{A} \quad (\text{Exp. 4.9})$$

Onde:

PCI_s – Valor do PCI do pavimento da secção, ponderado pela área;

A – Área total da secção.

4.6. Definição da estratégia de intervenção em função do valor de PCI

A gestão eficiente de pavimentos rodoviários é essencial para garantir a segurança e o conforto dos usuários, bem como a otimização dos custos ao longo do ciclo de vida das estruturas. Nesse contexto, as atividades de Manutenção e Reabilitação (M&R) desempenham um papel fundamental. O processo de tomada de decisão relacionado com as intervenções de M&R deve considerar fatores como o Índice de Qualidade do Pavimento (PCI), as características de degradação e a taxa de deterioração.

O fluxograma apresentado na Figura 4.3 detalha o processo lógico para a avaliação e definição das estratégias de M&R. O objetivo principal do fluxograma é assegurar que decisões sejam tomadas com base em análises técnicas e económicas consistentes, considerando as condições estruturais e funcionais do pavimento.

O processo inicia-se com a entrada de parâmetros essenciais, como o PCI e a taxa de deterioração. Em seguida é avaliada a existência de problemas críticos, como a degradação essencialmente estrutural ou a verificação de taxas elevadas de deterioração. Caso nenhuma destas condições limite seja excedida, recomenda-se a continuidade da estratégia de manutenção vigente. Por outro lado, se forem identificadas necessidades de intervenção, são avaliadas alternativas de M&R e realizada uma análise de ciclo de vida para determinar a melhor solução.

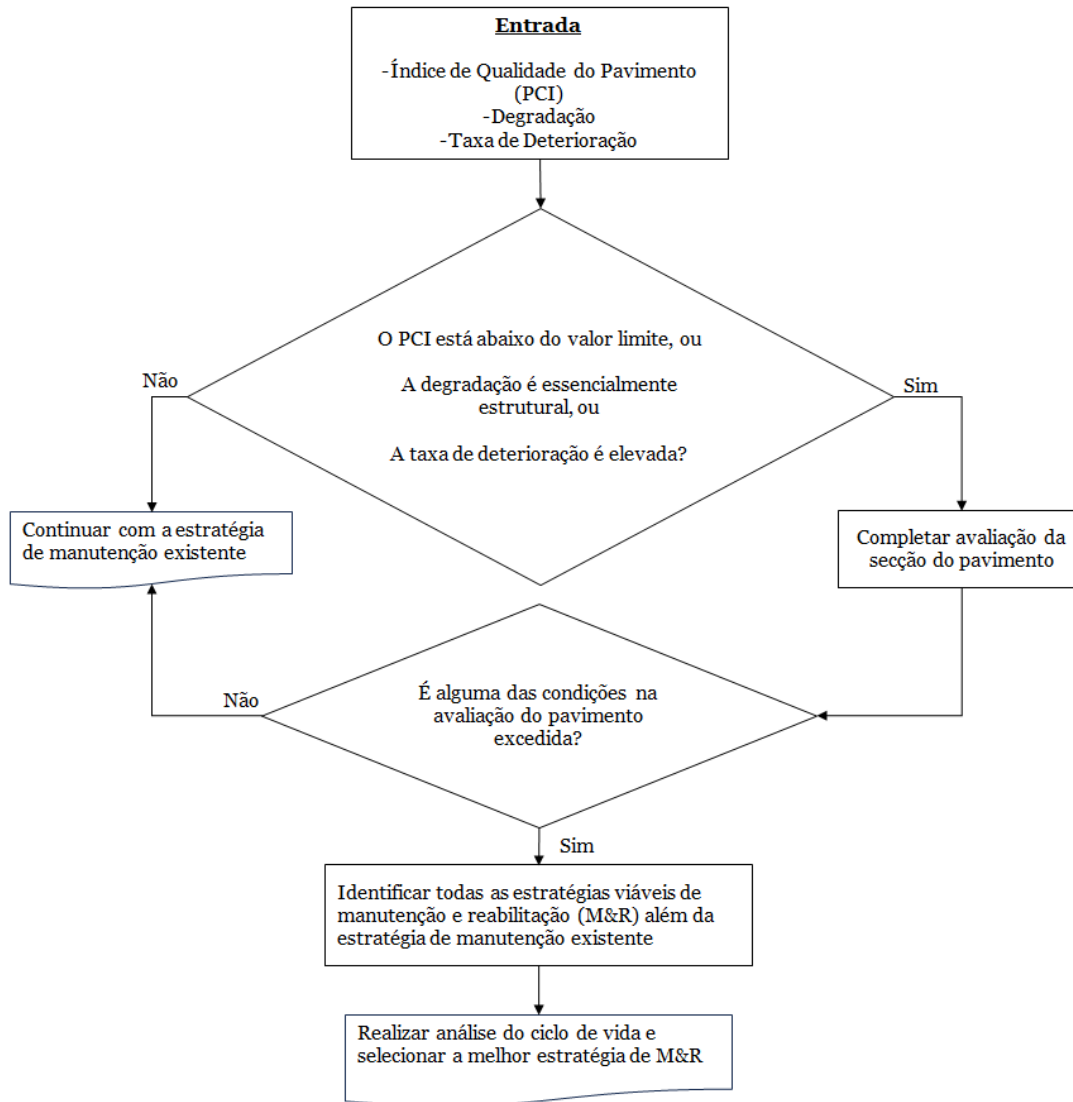


Figura 4.3: Fluxograma do processo para a avaliação e definição de estratégias de M&R (adaptado de Shahin et al., 1982).

Normalmente, um pavimento mantém-se em bom estado de conservação durante grande parte do seu ciclo de vida. Contudo, ao alcançar o chamado "estado crítico", o ritmo de degradação acelera significativamente. A duração desse período de bom desempenho varia conforme diversos fatores, como o tipo e a qualidade da construção, o uso a que o pavimento é submetido, as condições climáticas e as práticas de manutenção adotadas (Domingos, 2017).

Quando a deterioração significativa começa, é comum observar um declínio rápido do pavimento. Este fenómeno deve-se, geralmente, a uma combinação de cargas aplicadas e aos efeitos da presença adicional de humidade (ver Figura 4.4). À medida que o pavimento envelhece e surgem mais fissuras, uma maior quantidade de água pode infiltrar-se no pavimento, acelerando o ritmo de degradação (Walker et al., 1987).

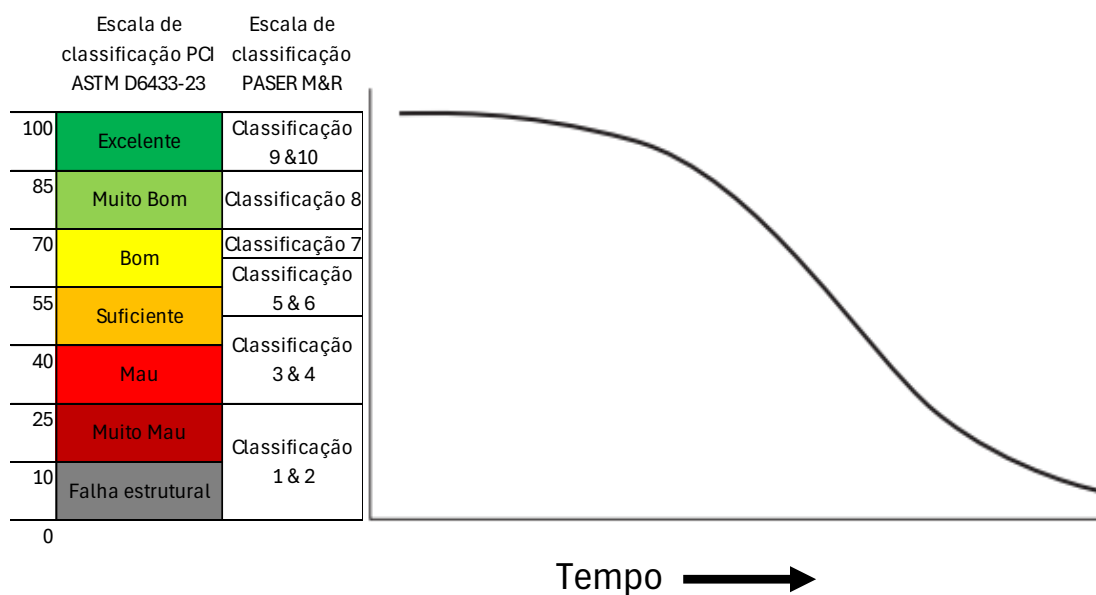


Figura 4.4: Degradação do estado de um pavimento ao longo do seu ciclo de vida em função do PCI e M&R (adaptado de Walker et al., 1987)

Para mitigar esses problemas e prolongar a vida útil dos pavimentos, são realizadas diversas intervenções, cada uma com objetivos específicos e adequados ao estado de conservação do pavimento. As intervenções de M&R podem ser realizadas recorrendo a duas abordagens complementares: uma abordagem mais geral, com base no valor do PCI e uma abordagem específica para cada tipo de degradação e respetivo nível de gravidade.

Na abordagem mais geral, as intervenções de M&R podem ser classificadas em diferentes tipos de manutenção, conforme descrito a seguir:

- **Manutenção de rotina** - Refere-se às atividades regulares e recorrentes realizadas para corrigir pequenos problemas e manter o pavimento em boas condições de segurança e funcionalidade no dia a dia. As atividades que são realizadas neste tipo de manutenção incluem a remoção de detritos e vegetação, a reparação de pequenas covas e a limpeza e desobstrução do sistema de drenagem.
- **Manutenção Preventiva** - Realizada para melhorar ou prolongar a vida funcional de um pavimento. É uma estratégia que consiste em tratamentos e operações de intervenção ao nível da superfície, destinada a retardar a deterioração. Na maioria dos casos, as atividades que são realizadas neste tipo de manutenção são a selagem de fendas e de juntas e a realização de pequenas reparações do pavimento.
- **Manutenção Corretiva** - Realizada após a ocorrência de alguns tipos de degradações no pavimento, como covas de nível de gravidade médio ou alto ou fendas extensas. A intervenção mais comum nesse contexto é a reabilitação do

pavimento, que pode incluir atividades de fresagem e a aplicação de uma camada de reforço utilizando o pavimento existente como fundação, ou até mesmo a substituição da camada de desgaste.

- Reconstrução – É adotada quando a reabilitação não permite resolver os problemas do pavimento, comprometendo a segurança dos utilizadores. A reconstrução envolve a remoção do pavimento existente, a correção da fundação, quando necessário, e a construção de um novo pavimento utilizando materiais novos ou reciclados.

Cada tipo de manutenção é escolhido com base em fatores como o estado do pavimento, o tráfego, a disponibilidade de recursos e os objetivos de longo prazo para a infraestrutura. A combinação de manutenção preventiva e corretiva é geralmente a mais eficiente em termos de custos, reduzindo a necessidade de recorrer à reconstrução do pavimento.

Nesta abordagem os resultados de PCI são associados à escala de classificação do PCI, conforme ilustrado na Figura 4.5. Esta classificação permite avaliar o estado de conservação do pavimento em excelente, muito bom, bom, suficiente, mau, muito mau e falha estrutural.

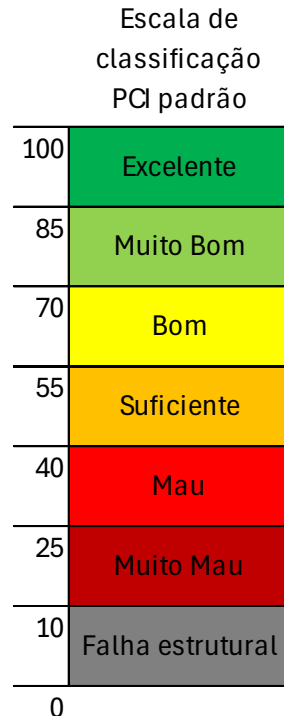


Figura 4.5: - Escala de classificação do estado do pavimento em função do PCI (adaptado de ASTM 6433-23).

Segundo Lima (2016), a escala utilizada para classificar o estado de conservação do pavimento, representada pelo PCI, fornece informações sobre o nível de degradação do pavimento e o tipo de intervenção necessário:

- Excelente (86-100): O pavimento apresenta mínimas ou nenhuma degradação de nível de gravidade baixo. Requer apenas manutenção corrente.
- Muito Bom (71-85): O pavimento exibe algumas degradações de baixo nível de gravidade. Indica a realização de manutenção preventiva.
- Bom (56-70): O pavimento apresenta degradações de nível de gravidade baixo a médio. Necessita de manutenção preventiva a curto prazo ou obras de reconstrução.
- Suficiente (41-55): O pavimento apresenta degradações de nível de gravidade baixo, médio e alto, comprometendo a operacionalidade. O pavimento necessita de manutenção reconstrutiva a curto prazo.
- Mau (26-40): O pavimento possui degradações predominantemente de nível de gravidade médio e alto, gerando problemas significativos de funcionalidade. Exige reconstrução a curto prazo.
- Muito Mau (11-25): O pavimento apresenta degradações majoritariamente de nível de gravidade alto, limitando consideravelmente a operação dos veículos. Exige reconstrução urgente.
- Falha Estrutural (0-10): O pavimento encontra-se em estado crítico de deterioração, impossibilitando a operação segura dos veículos. Requer reconstrução imediata e completa.

Os valores de PCI associados à realização de intervenções de manutenção e reabilitação podem apresentar variações, embora estas sejam geralmente pouco significativas. Na Tabela 4.2 apresenta-se uma tabela comparativo entre os valores de PCI e as intervenções de M&R recomendadas no *Overview of the PAVER pavement management system* (Shahin et al., 1982) e no *PASER Manual Asphalt Roads* (Walker et al., 1987).

	Classificação PCI	M&R PAVER	Descrição PASER	M&R PASER
100	Excelente	Manutenção de rotina	9 e 10 - O pavimento é novo ou seminovo.	Não é necessária manutenção
85	Muito Bom		8 - O pavimento apresenta fendas transversais ocasionais, amplamente espaçadas.	Pouca ou nenhuma manutenção
70	Bom	Manutenção de rotina, Manutenção corretiva, Reabilitação	7 e 6 - O pavimento apresenta algum desgaste, fendas significativas, fendas cruzadas de nível baixo e poucas reparações em excelentes condições.	Manutenção de rotina
55	Suficiente		5 e 4 - O pavimento apresenta desagregação superficial médio a alto, fendas de nível alto, fendas cruzadas em mais de 50% da superfície, fendas de canto e polimento dos agregados.	Manutenção de preventiva
40	Mau	Manutenção corretiva, Reabilitação	3 - O pavimento apresenta fendas e fendas cruzadas de nível alto, pele de crocodilo em menos de 25% do pavimento, reparações e rodeiras de nível baixo a médio e covas ocasionais.	Reabilitação
25	Muito Mau	Reabilitação	1 e 2 - Degradações graves com extensa perda de integridade da superfície. O pavimento apresenta pele de crocodilo em mais de 25% do pavimento, rodeiras com mais de 2cm de profundidade, reparações extensas de nível baixo, muitas covas.	Reconstrução
10	Falha estrutural			
0				

Tabela 4.2: Tabela comparativo entre os valores de PCI, e as intervenções de M&R a se realizar (adaptado Shahin et al., 1982, Walker et al., 1987).

No que respeita à abordagem mais específica, a tabela 4.3 apresenta-se um exemplo das intervenções de M&R típicas para diferentes tipos de degradações em função do seu nível de gravidade.

Tipo de Degradação	Intervenções de M&R									
	Não fazer nada	Selagem de Fendas	Reparação de profundidade parcial	Reparação de profundidade total	Reparação superficial	Enchimento de Covas	Aplicar calor e expalhar areia	Aplicar emulsão de selagem de superfície	Aplicar rejuvenecedor	Aplicar camada de selagem com agregado
Pele de Crocodilo (fadiga)			M,H	M,H				L	L	
Exsudação	L						L,M,H			
Fendas Cruzadas	L	L,M,H							L	L,M
Alteamentos e Abatimentos	L		M,H	M,H	M,H					
Ondulação	L		M,H	M,H						
Depressões	L		M,H	M,H	M,H					
Fendas de Canto	L	L,M	M,H	M,H						
Fendas de reflexão no local das juntas de lajes rígidas em pavimentos semirrígidos	L	L,M,H	H							
Desnível via/berma	L									
Fendilhamento longitudinal e transversal	L	L,M,H	H					L	L	L,M
Reparações e cortes técnicos	L	M	H*	H*						
Polimento dos agregados	A									A
Covas			L	L,M,H		L,M,H				
Passagem de linha de caminho de ferro	L				L,M,H					
Rodeiras	L		L,M,H	M,H	L,M,H					
Escorregamento	L		M,H							
Fendas em forma de "meia-lua"	L	L	M,H							
Empolamento	L			M,H						
Desagregação superficial do agregado e do mástique em misturas betuminosas densas	L		H					L,M	L	M,H

Tabela 4.3: Intervenções de M&R a serem realizadas em função da degradação existente e o seu nível de gravidade (adaptado de Headquarters Department of the Army Washington DC, 1982)

5. Caso de estudo

5.1. Enquadramento

No presente capítulo, apresenta-se um caso de estudo cujo levantamento de dados sobre o estado da superfície do pavimento foi realizado com recurso a um veículo terrestre equipado com dispositivos de captação e registo de imagens, bem como de georreferenciação. O estudo incidiu sobre um trecho da estrada N238, com uma via em cada sentido, localizada em Silvaes, Portugal (ver Figura 5.1), abrangendo uma extensão de 8 km, dividida em 4 km no sentido Silvaes-Barroca e 4 km no sentido Barroca-Silvaes. O pavimento analisado corresponde a um pavimento flexível.

A área de estudo é constituída por um único ramo (Ramo 1), dividido em três secções: duas com desenvolvimento em meio rural (Secção 1 e Secção 3) e uma que se desenvolve em meio urbano (Secção 2). As secções as secções por sua vez foram divididas em unidades de amostra, totalizando 80 unidades de amostra ao longo de todo o ramo, 40 unidades de amostra em cada sentido.

Os dados recolhidos foram processados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) utilizando o *software* ArcMap 10.8.2. Este processamento permitiu a identificação das degradações presentes na superfície do pavimento, a avaliação do respetivo nível de gravidade e a medição de comprimentos e áreas, necessárias para caracterizar essas degradações, possibilitando o cálculo do índice PCI (*Pavement Condition Index*).

Durante a análise, foram identificados seis tipos de degradações: pele de crocodilo, fendas cruzadas, fendas de canto, fendilhamento transversal e longitudinal, reparações e cortes técnicos, e desagregação superficial do mástique.

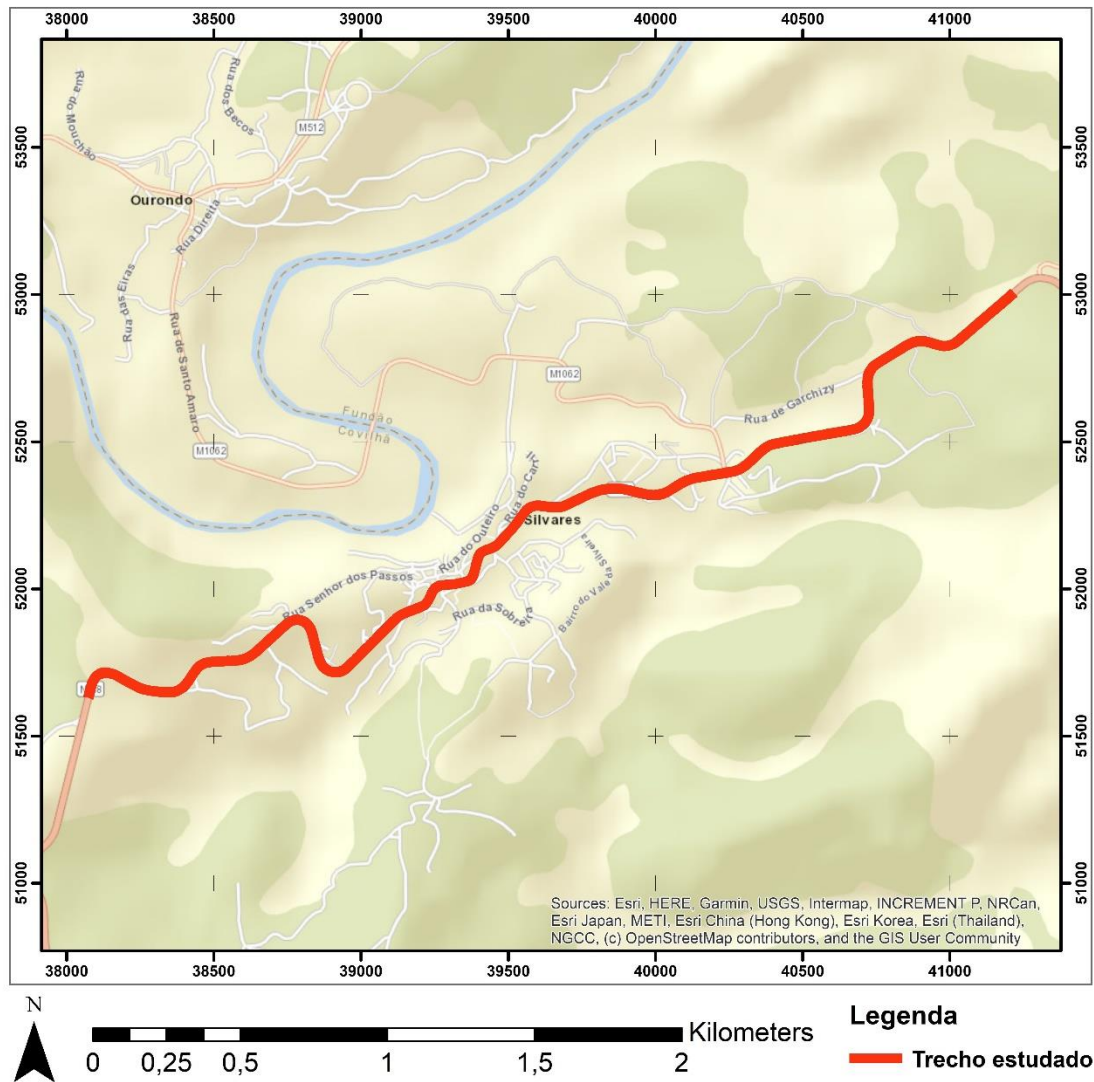


Figura 5.1: Localização do trecho da estrada estudado (Ramo 1).

5.2. Método de inspeção adotado

O levantamento das degradações existentes na superfície do pavimento foi realizado com um veículo terrestre equipado com dispositivos de captação e registo de imagens, bem como de georreferenciação. O método de inspeção utilizado foi desenvolvido com base em pesquisas anteriores realizadas no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI, permitindo a recolha de dados de degradações superficiais em pavimentos rodoviários e aeroportuários (Santos et al.,2019) (Lima, 2016) (Domingos, 2017).

O processo de levantamento dos dados do pavimento foi conduzido por um conjunto de alunos e docentes do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI, em colaboração com a Câmara Municipal do Fundão, responsável pela administração desse trecho de estrada. A campanha de levantamento de dados ocorreu no dia 18 de dezembro

de 2023, no período diurno, num dia com boas condições atmosféricas, de modo a obter imagens com boa qualidade.

O sistema de inspeção é composto pelos seguintes equipamentos (ver Figura 5.2):

- 1 estrutura metálica para fixar os equipamentos de captação de imagem e de georreferenciação;
- 1 câmara de vídeo GoPro 7 Silver;
- 2 câmaras de vídeo Olympus OM-D E-M10;
- 1 recetor GPS Zeno Flx100;
- 3 recetores GPS Garmin 17N;
- 2 recetores GPS Trimble 4000 SSI (dupla frequência);
- 1 computador portátil;
- 1 veículo do tipo todo-o-terreno.



Figura 5.2: Equipamentos usados no levantamento de dados do pavimento e a sua disposição no veículo terrestre utilizado.

Antes de iniciar a campanha de recolha de dados sobre a degradação da superfície do pavimento, foi necessário verificar a área abrangida pelas imagens captadas. Para isso, com o veículo estacionado, duas miras foram posicionadas no pavimento, tanto perpendicular quanto paralelamente à direção do movimento (ver Figura 5.3). Foi constatado que o alcance transversal da imagem excede 4 metros, enquanto o alcance

longitudinal (referente ao sentido de movimento do veículo e da estrada) excede 2,5 metros. Foi ainda necessário identificar *in situ* as extremidades e o centro da largura das vias, configurar a câmara e assegurar a conexão dos equipamentos ao computador portátil para registar e armazenar os dados de imagem e de georreferenciação.



Figura 5.3: - Verificação da amplitude de captação de imagem na posição paralelo e perpendicular ao sentido de movimento do veículo.

De seguida, foi confirmado que todos os equipamentos estavam em pleno funcionamento, permitindo o início da recolha de dados a uma velocidade aproximada de 40 Km/h.

Após a conclusão da inspeção, foi obtido um conjunto de informações, incluindo imagens e dados de georreferenciação, que, ao serem integrados em um SIG, possibilitaram a visualização da superfície do pavimento a ser analisado e a medição das quantidades de degradação.

5.3. Pré-tratamento dos dados obtidos no levantamento com veículo terrestre equipado

No pré-tratamento dos dados identificaram-se a existência de problemas com o registo de dados do GPS Garmin devido a um erro de leitura dos dados do GPS no computador portátil, e do GPS Zeno Flx100, porque este não registou a data/hora das posições, sendo informação fundamental para georreferenciar as imagens obtidas com as camaras Olympus. Devido aos erros identificados, para todas as imagens optou-se por usar os dados de GPS da camara GoPro, uma vez esta camara permite o registo de dados de imagem e posição, o que constitui uma vantagem.

O tratamento dos dados obtidos iniciou-se com a georreferenciação das imagens obtidas. Para tal procedeu-se da seguinte forma:

- 1) Extraíram-se as coordenadas GPS da câmara GoPro, através do *software* Maps-video, e com essas coordenadas preparou-se o ficheiro de georreferenciação;
- 2) Retiraram-se as *frames* dos vídeos, para obter ficheiros de imagens isoladas através do *software* Shutter Encoder;
- 3) Através de um *software* proprietário, fez-se a ligação entre o ficheiro de coordenadas de posição e os ficheiros de imagem. O *software* permite atribuir uma coordenada e uma orientação a cada uma das imagens, e cria um ficheiro de georreferenciação para cada imagem.
- 4) A informação obtida no passo anterior foi introduzida no SIG, de modo a confirmar as posições das imagens. Caso se verifique a necessidade de fazer ajustes, volta-se a utilizar o *software* proprietário para correção da informação.

5.4. Segmentação da rede

A avaliação do estado de uma rede de pavimentos pelo método PCI requer, inicialmente, a divisão da rede em Ramos, Secções e Unidades de Amostra. Para isso, foram considerados os critérios descritos no capítulo 4 (secção 4.1).

Assim, o trecho a analisar foi considerado um único ramo subdividido em secções sem considerar as bermas (ver Figura 5.4), identificados pelo seguinte código:

- Ramo 1 (O1) – Código atribuído ao trecho (toda a extensão analisada), considerado subdividido em 3 secções.
- Secção 1 (S1) – Representa a secção mais a nordeste do ramo, com uma área de 11400m², subdividida em 38 unidades de amostra (UA1 até UA38) com área igual a 300m² (área de cada unidade de amostra).
- Secção 2 (S2) – Representa a secção mais ao centro do ramo, com uma área de 4800m², subdividida em 16 unidades de amostra (UA39 até UA54) com área igual a 300m² (área de cada unidade de amostra).
- Secção 3 (S3) – Representa a secção mais a sudoeste do ramo, com uma área de 7800m², subdividida em 26 unidades de amostra (UA55 até UA80) com área igual a 300m² (área de cada unidade de amostra).

Exemplo de código: EN238_O1_S1_01, representando o ramo 1, a secção 1 e a unidade de amostra 1.

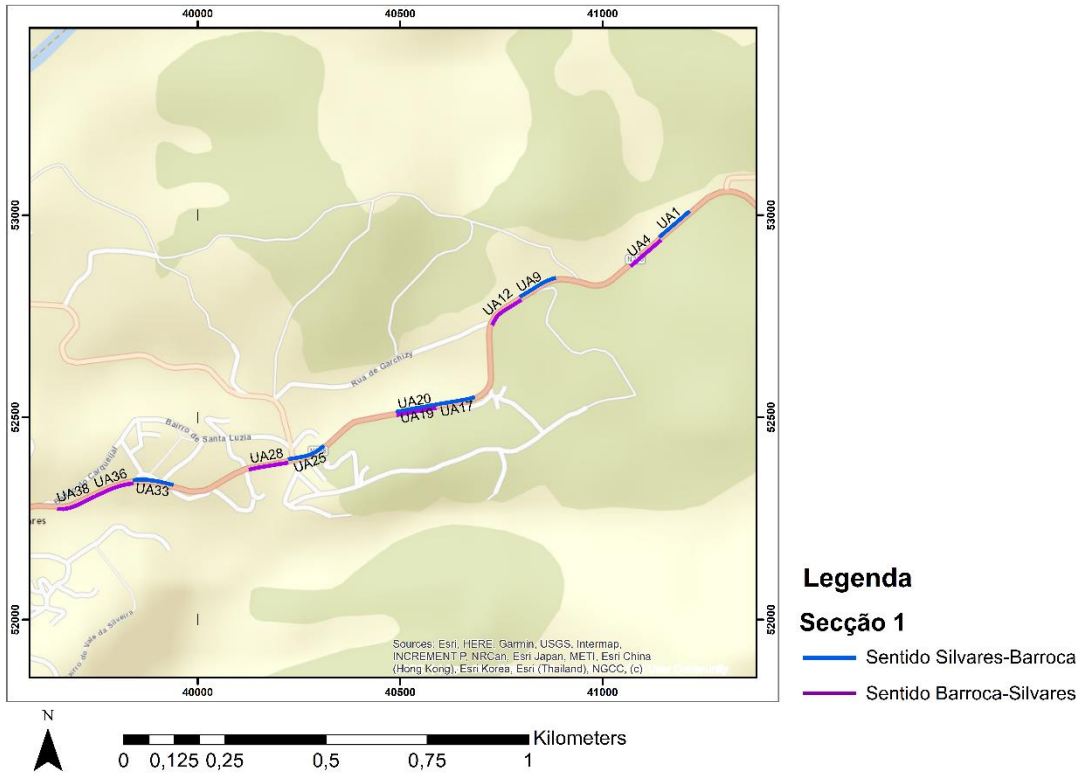


Figura 5.5: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas da secção 1.

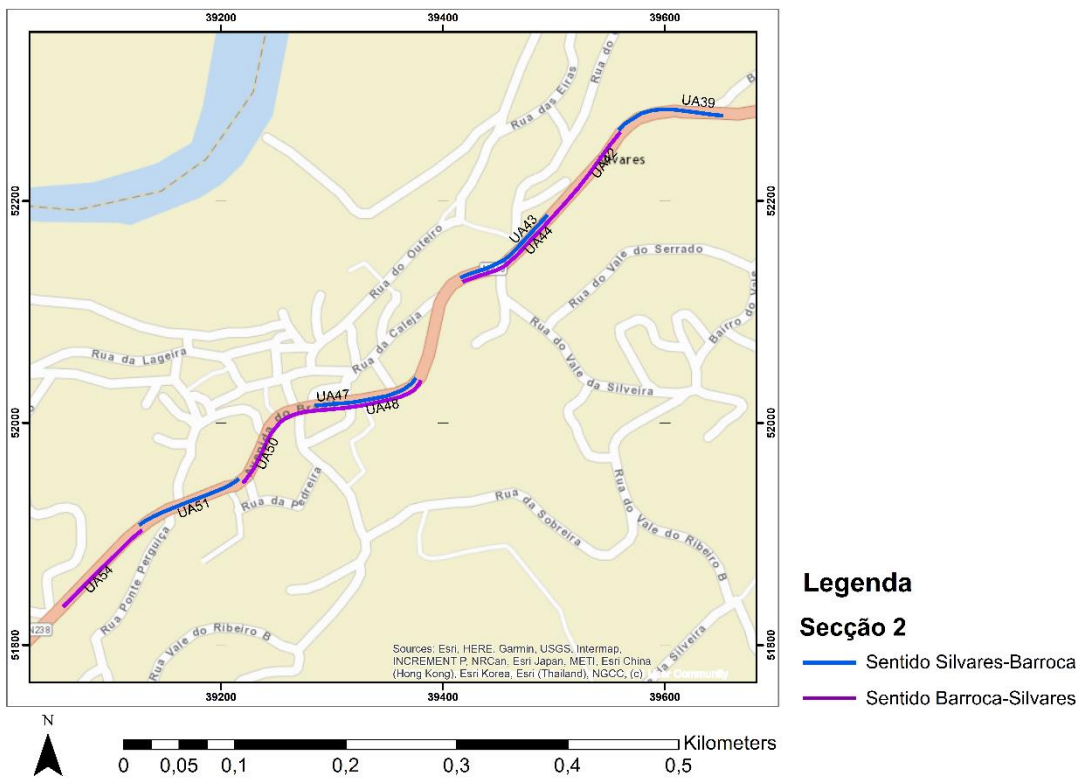


Figura 5.6: Mapa com a localização das unidades de amostra inspecionadas da secção 2.

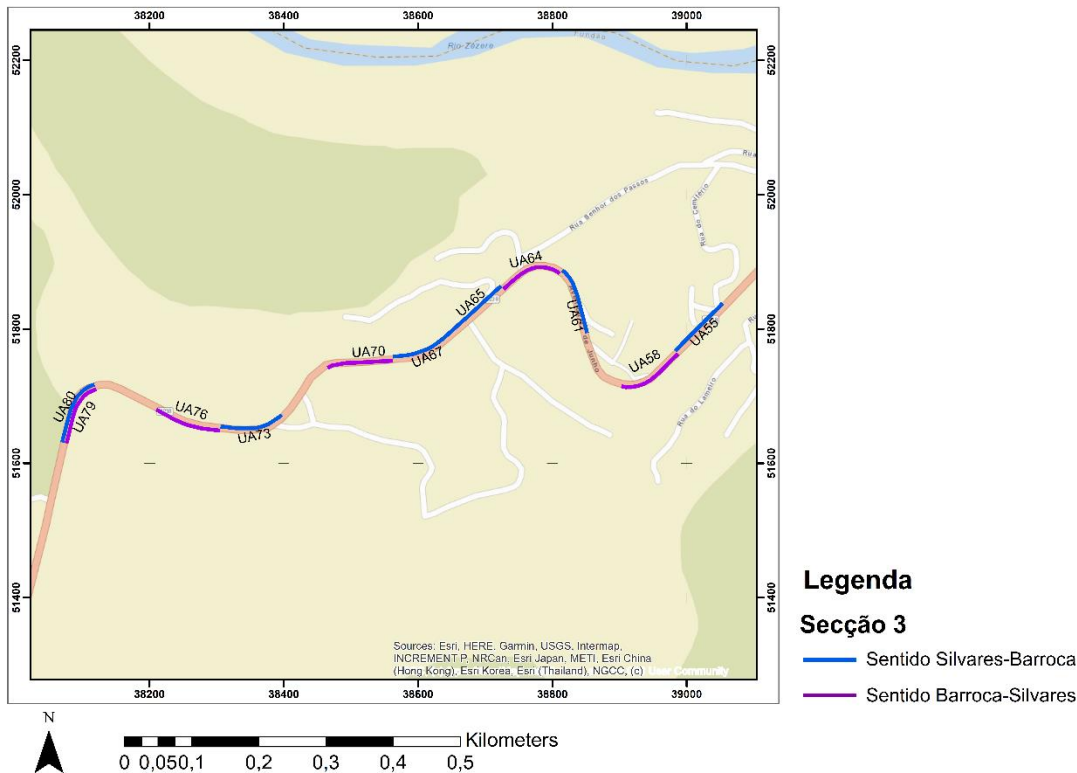


Figura 5.7: Mapa com a localização das unidades de amostra inspeccionadas da secção 3.

Depois do pré-tratamento dos dados, esses foram importados para um projeto ArcMap. Para cada unidade de amostra a analisar foram carregadas as imagens correspondentes obtidas no levantamento, permitindo o tratamento das informações, nomeadamente a identificação e classificação dos níveis de gravidade das degradações, bem como a medição de comprimentos e áreas.

Para registar as informações identificadas e medidas no SIG, foram criadas *shapefiles* do tipo linha ou polígono, conforme o tipo de degradação e o método de medição das áreas afetadas (comprimento ou área). Na tabela de atributos de cada *shapefile* foram definidos os seguintes campos (ver figura 5.8):

- Código: este campo, do tipo texto, é utilizado para registar o código da unidade de amostra em avaliação;
- Compri_m (comprimento): campo de tipo numérico, incluído nas *shapefiles* das degradações que exigem a medição do comprimento em metros lineares;
- Area_m2 (área): campo numérico, presente nas *shapefiles* das degradações que necessitam da medição da área degradada em metros quadrados;
- N_G (nível de gravidade): Campo do tipo texto, utilizado para registar o nível de gravidade da degradação observada, com as opções: B (Baixo), M (Médio) e A (Alto).

- U_A (unidade de amostra): este campo, do tipo numérico, é utilizado para registrar o código da unidade de amostra.

FID	Shape *	Id	Codigo	Area m2	U A	N G
0	Polygon	0	EN238_01_S1_01	0,93	1	L
1	Polygon	0	EN238_01_S1_01	1,29	1	L
2	Polygon	0	EN238_01_S1_09	3,56	9	L
3	Polygon	0	EN238_01_S1_09	0,56	9	L
4	Polygon	0	EN238_01_S1_09	1,18	9	L
5	Polygon	0	EN238_01_S1_09	0,56	9	L
6	Polygon	0	EN238_01_S1_09	0,72	9	L
7	Polygon	0	EN238_01_S1_25	5,97	25	M
8	Polygon	0	EN238_01_S1_25	5,84	25	M
9	Polygon	0	EN238_01_S1_25	2,7	25	M
10	Polygon	0	EN238_01_S1_25	5,27	25	M
11	Polygon	0	EN238_01_S1_25	6,27	25	M
12	Polygon	0	EN238_01_S1_25	3,39	25	M
13	Polygon	0	EN238_01_S1_25	3,68	25	M
14	Polygon	0	EN238_01_S1_25	6,63	25	M
15	Polygon	0	EN238_01_S1_25	5,14	25	M
16	Polygon	0	EN238_01_S1_25	6,97	25	M
17	Polygon	0	EN238_01_S1_25	8,73	25	M
18	Polygon	0	EN238_01_S1_25	8,59	25	M
19	Polygon	0	EN238_01_S1_25	9,9	25	M

Figura 5.8: Exemplo da tabela de atributos da *shapefile* Fendas cruzadas.

Durante o processamento dos dados, surgiram diversas dificuldades, sendo as mais relevantes relacionadas à identificação e diferenciação de algumas degradações, bem como à classificação dos níveis de gravidade dessas degradações. Essas dificuldades decorreram, principalmente, da qualidade insuficiente de algumas imagens, que não permitiam uma percepção clara da superfície do pavimento, além das variações de tonalidade causadas por distorções das câmaras ou pela presença de sombras na superfície.

Perante essas limitações, foi necessário retornar ao local de estudo para confirmar a identificação de determinadas degradações, como a desagregação superficial do mástique, reparações e cortes técnicos, utilizando o método de inspeção visual a pé (ver Figura 5.9).



Figura 5.9: Verificação “in situ” da identificação e nível de gravidade das degradações desagregação superficial do mástique e reparações, com recurso a inspeção visual a pé.

Após a análise de todas as unidades de amostra, os dados das quantidades de degradação por nível de gravidade foram organizados em folhas de cálculos MS Excel para a determinação do PCI (conforme ilustrado na Figura 5.10 e Figura 5.11).

S3UA73 - Calculo Normal									
Ramo:	<u>1</u>	Secção:	<u>S3</u>	Unidade de amostra:	<u>UA73</u>				
Técnico:	<u>Wesley Eusébio</u>	Data:	<u>05/12/2024</u>	Área da unidade de amo	<u>300</u> [m ²]				
Tipo de degradação	N.G.	Quantidade			OBS:	Total	Densidade [%]	Valor deduzido (ver tabelas)	DV por ordem
1. Pele de Crocodilo (Alligator or fatigue cracking)	L					0	0,00%		48,4
	M	36,18				36,18	12,06%	48,4	20
	H					0	0,00%		13,5
3. Fendas cruzadas - formando blocos (Block cracking)	L					0	0,00%		3,5
	M	23,82				23,82	7,94%	13,5	
	H					0	0,00%		
7. Fendas de canto (Edge cracking)	L	11,51				11,51	3,84%	3,5	
	M					0	0,00%		
	H					0	0,00%		
10. Fendilhamento longitudinal e transversal (Longitudinal and transverse cracking)	L	157,23				157,23	52,41%	20	
	M					0	0,00%		
	H					0	0,00%		

Figura 5.10: Exemplo da folha de cálculo de registo de informação de quantidades de degradação para determinação do PCI.

HDV = 48,4 maior DV
 m = 5,7 $m=1+(9/98)*(100-HDV) \leq 10$

#	1	2	3	4	5	6	7	8	total	q	CDV
1	48,4	20	13,5	3,5					85,4	4	48,7
2	48,4	20	13,5	2					83,9	3	53,3
3	48,4	20	2	2					72,4	2	52,5
4	48,4	2	2	2					54,4	1	54,4
5									0		
6									0		
7									0		
8									0		

Max CDV = 54,4

PCI = 100 - Max CDV = 45,6

Classificação: **SUFICIENTE**

Figura 5.11: Exemplo do cálculo do PCI da unidade de amostra 73 na secção 3.

5.6. Resultados e discussão

5.6.1. Pavement Condition Index - PCI

Com base na análise dos dados recolhidos por meio da inspeção realizada com recurso a um veículo terrestre equipado, os valores de PCI calculados para as unidades amostra de cada secção são apresentados nos mapas das Figuras 5.14, 5.17, 5.20 e nos gráficos das Figuras 5.12, 5.15, 5.18.

Adicionalmente, foram elaborados histogramas para representar a distribuição de frequência dos valores de PCI nos intervalos estabelecidos pela norma adotada, que classifica o pavimento nas categorias como Falha Estrutural, Muito Mau, Mau, Suficiente, Bom, Muito Bom e Excelente. Esses histogramas são apresentados nas Figuras 5.13, 5.16, 5.19.

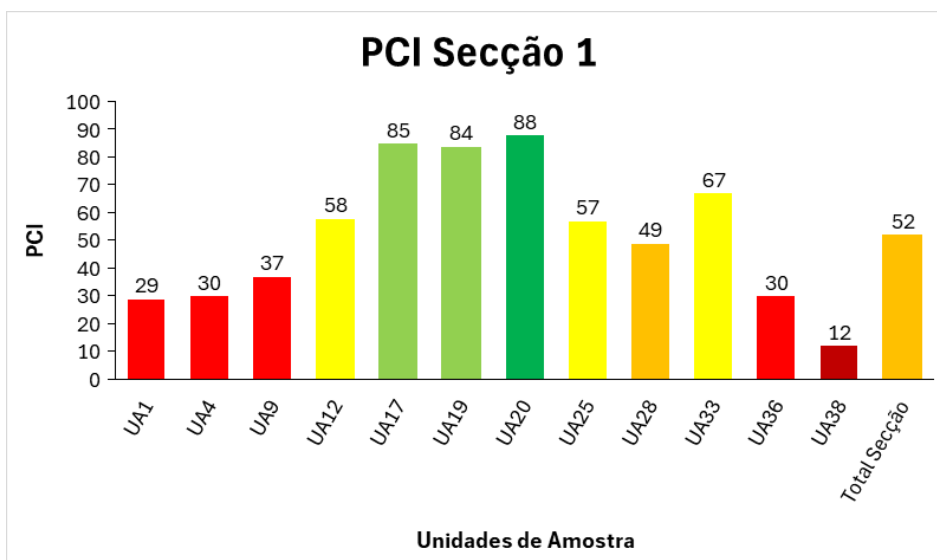


Figura 5.12: Valores do PCI para as unidades de amostra selecionadas na secção 1.

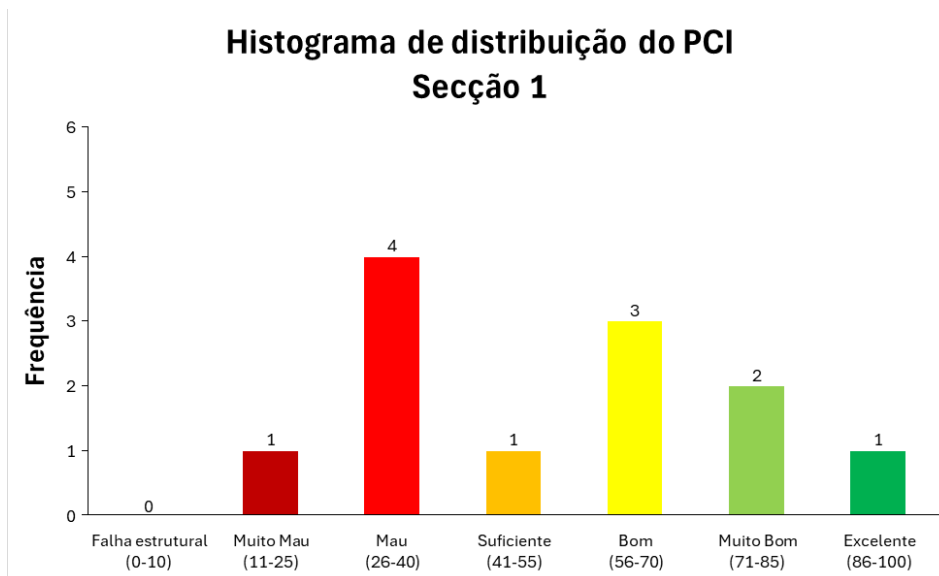


Figura 5.13: Histograma de distribuição do PCI das unidades de amostra selecionadas na secção 1, por categoria do PCI.

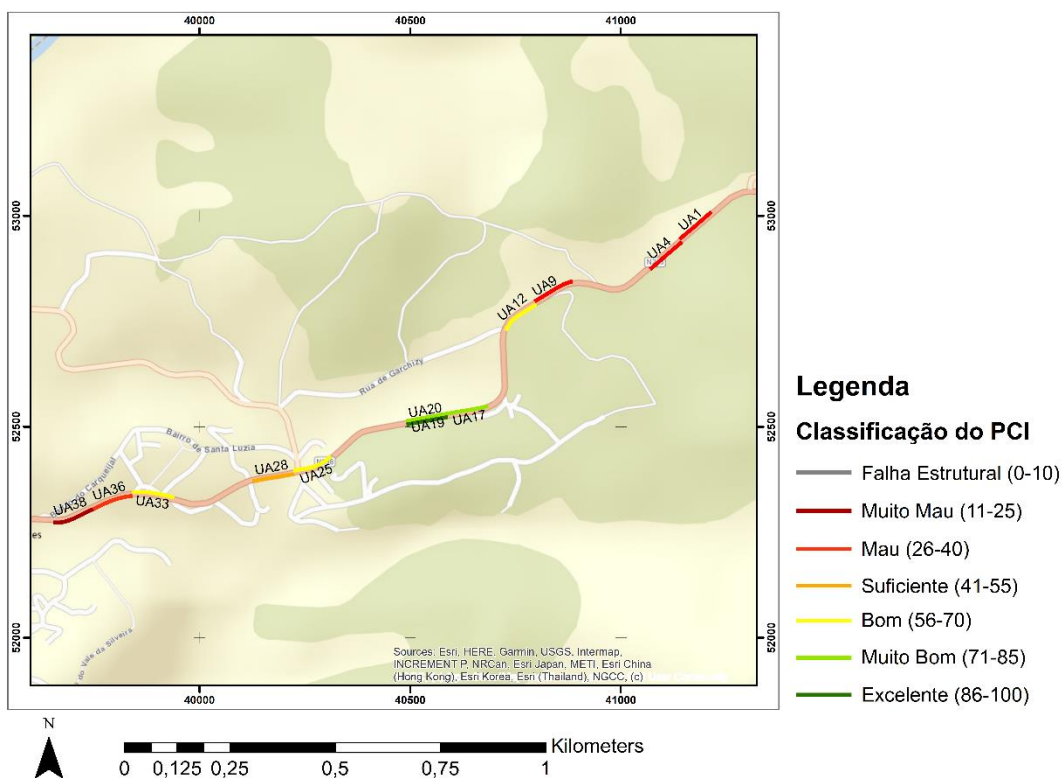


Figura 5.14: Mapa com a localização das unidades de amostra inspeccionadas representadas pelas cores do PCI da secção 1.

Na secção 1 verificou-se alguma disparidade entre os valores de PCI calculados para as unidades de amostra analisadas. Nas unidades de amostra localizadas no início e no fim da secção obtiveram-se os resultados mais baixos de PCI e conseqüentemente as unidades de amostra mais degradadas. Na parte central da secção obtiveram-se valores elevados do PCI e conseqüentemente as unidades de amostra com o pavimento em bom

estado. Verificou-se também que 5 unidades de amostra da seção 1 estão na categoria "Mau" ou "Muito Mau" e que 6 unidades de amostra apresentam classificação "Bom" ou superior. O valor do PCI da seção 1 é igual a 52, o que reflete uma condição geral "Suficiente", mas existem unidades de amostra específicas em estado crítico (UA1, UA4, UA9, UA36 e UA38).

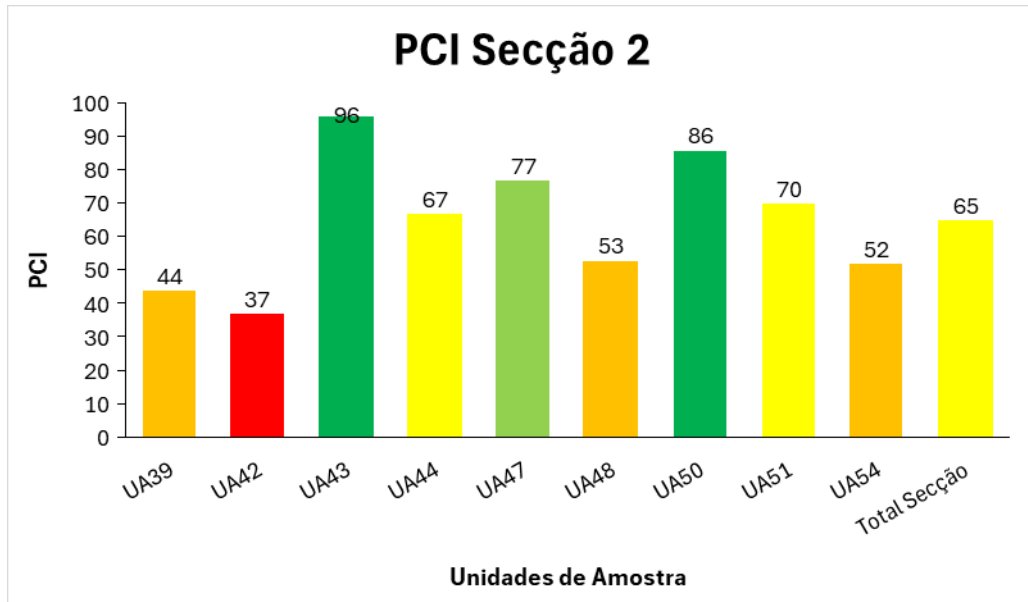


Figura 5.15: Valores do PCI para as unidades de amostra selecionadas na seção 2.

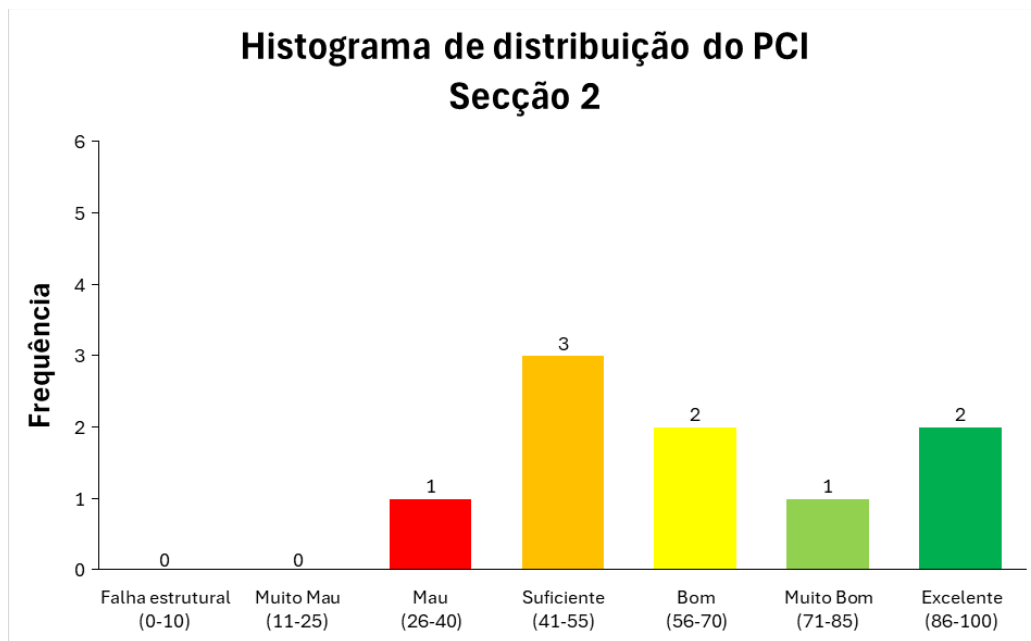


Figura 5.16: Histograma de distribuição do PCI das unidades de amostra selecionadas na seção 2, por categoria do PCI.

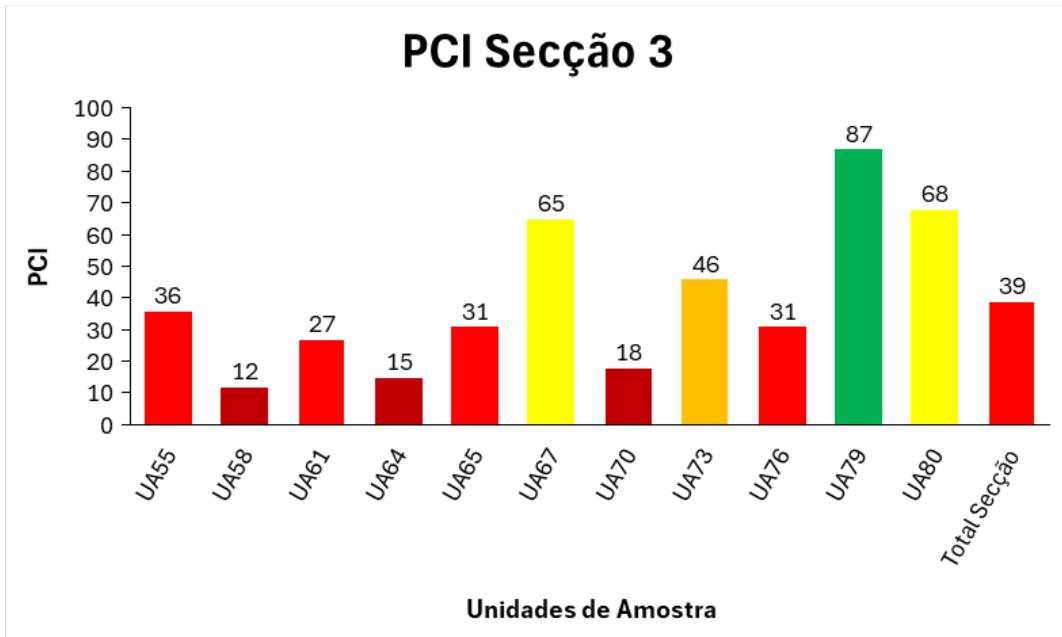


Figura 5.18: Valores do PCI para as unidades de amostra selecionadas na secção 3.

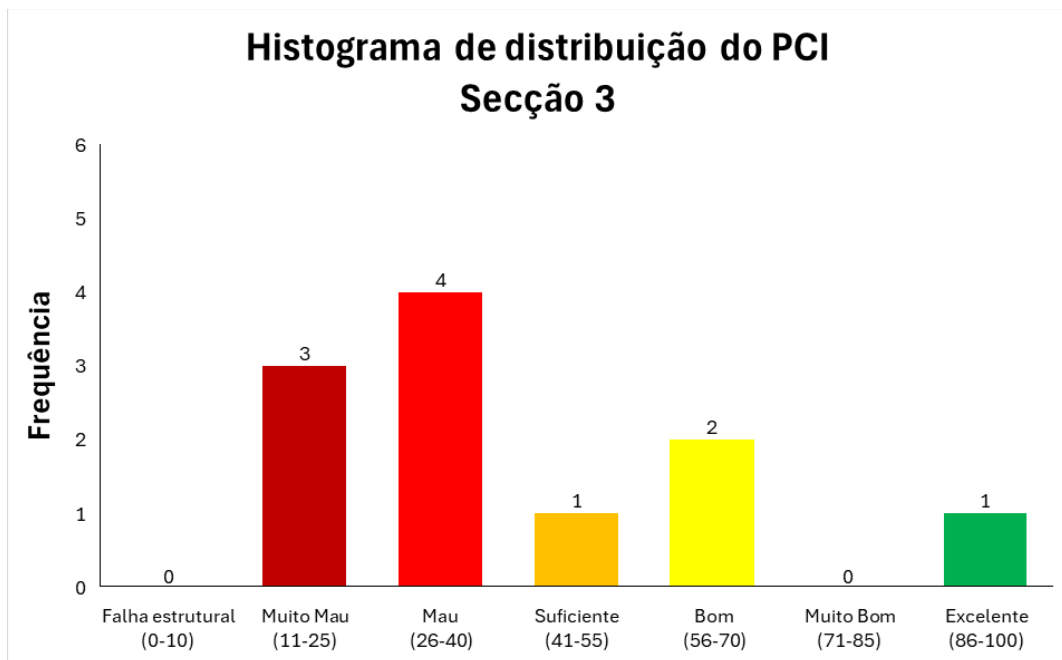


Figura 5.19: Histograma de distribuição do PCI das unidades de amostra selecionadas na secção 3, por categoria de PCI.

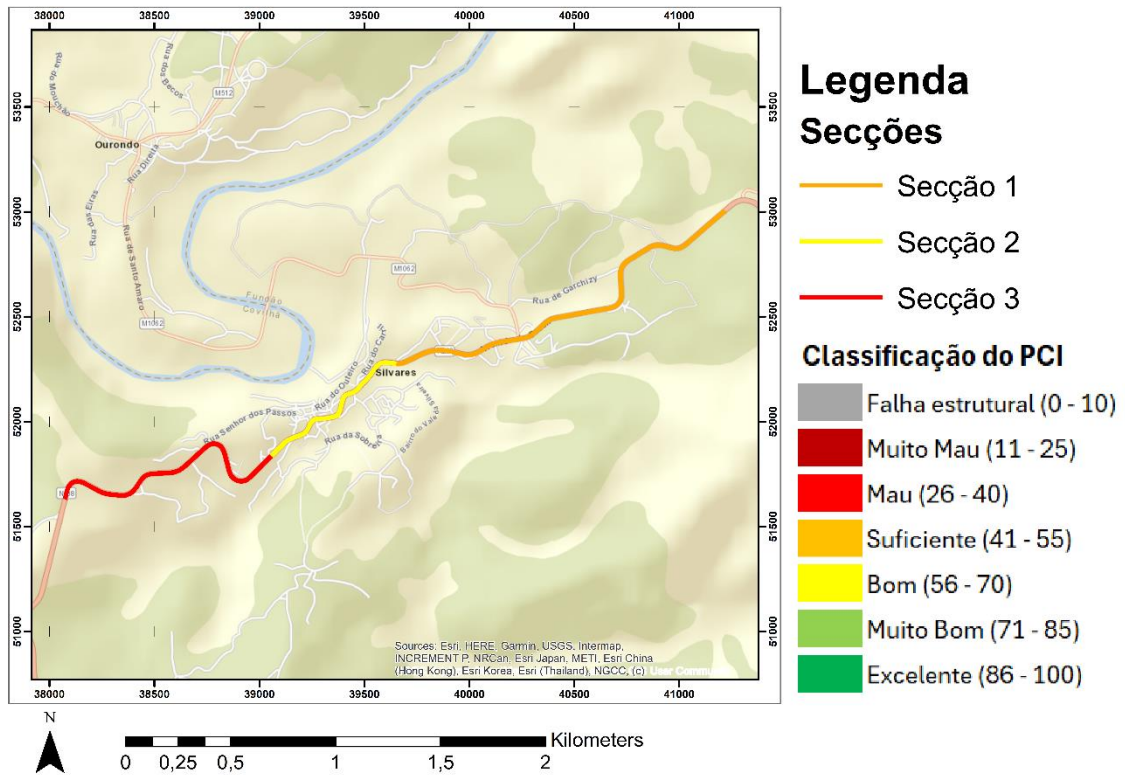


Figura 5.21: Representação do trecho estudado e respectivos valores de PCI para cada secção.

5.6.2. Análise das degradações superficiais do pavimento

Para complementar a análise realizada por meio da determinação do PCI, foi avaliada a densidade das degradações identificadas na área inspecionada do trecho, considerando a percentagem da área ou do comprimento afetado pelas degradações.

Durante a análise, foram identificados seis tipos de degradações: pele de crocodilo, fendas cruzadas, fendas de canto, fendilhamento transversal e longitudinal, reparações e cortes técnicos, e desagregação superficial do mástique. As densidades das degradações, por unidade de amostra inspecionada e para o total da área inspecionada do trecho, são apresentadas nas Figuras 5.22 a 5.27.

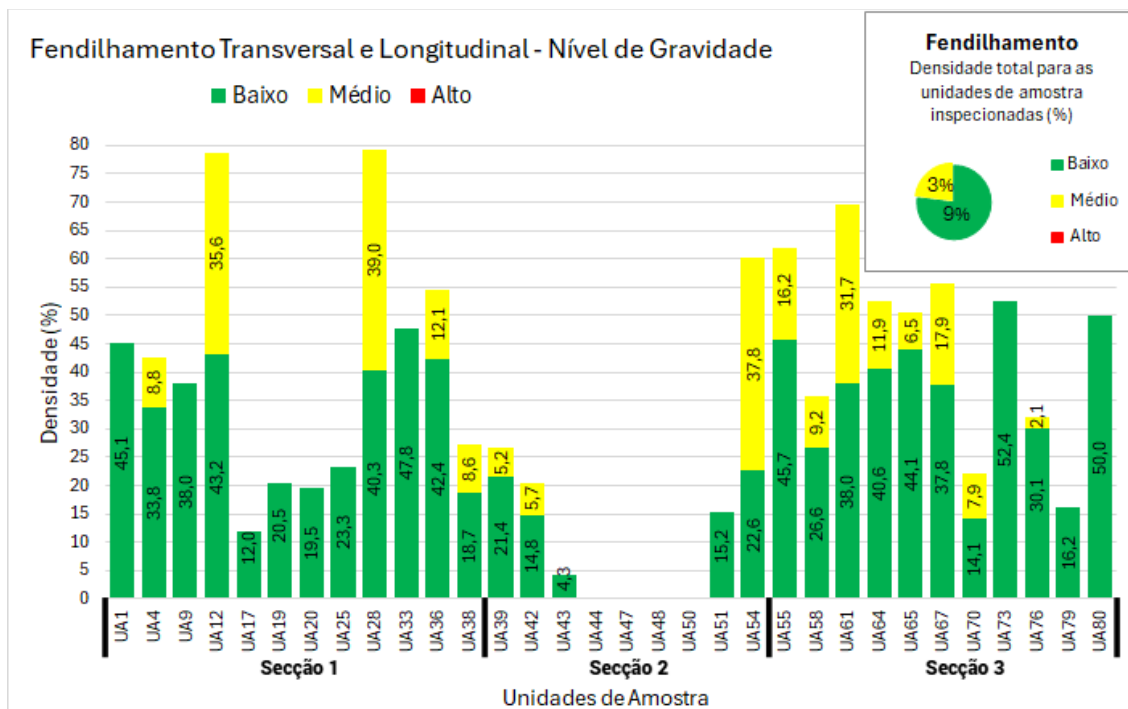


Figura 5.22: Densidade da degradação fendilhamento transversal e longitudinal, por unidades de amostra inspeccionadas e para o total da área inspeccionada.

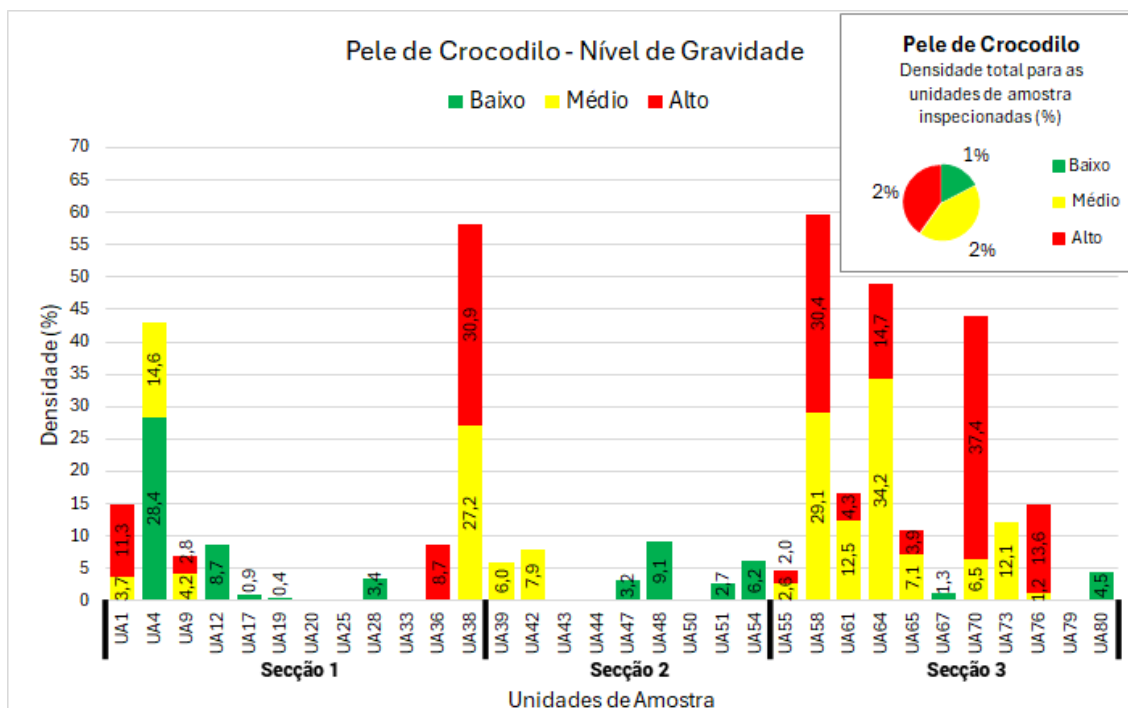


Figura 5.23: Densidade da degradação pele de crocodilo, por unidades de amostra inspeccionadas e para o total da área inspeccionada.

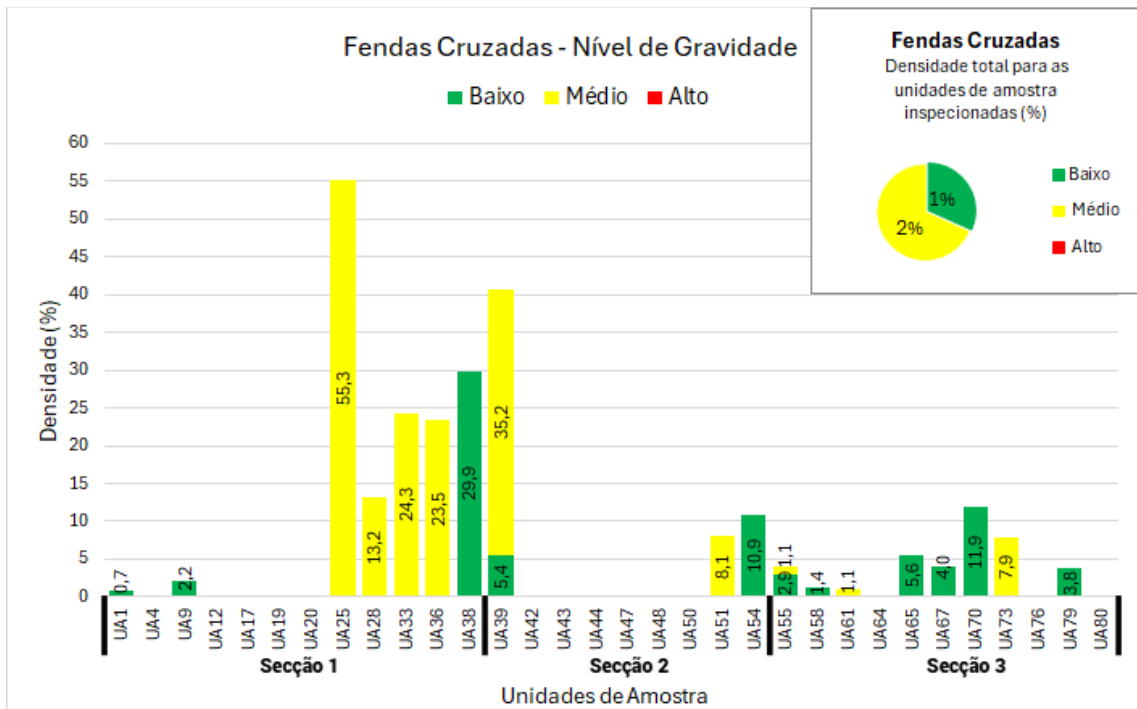


Figura 5.24: Densidade da degradação fendas cruzadas, por unidades de amostra inspeccionadas e para o total da área inspeccionada.

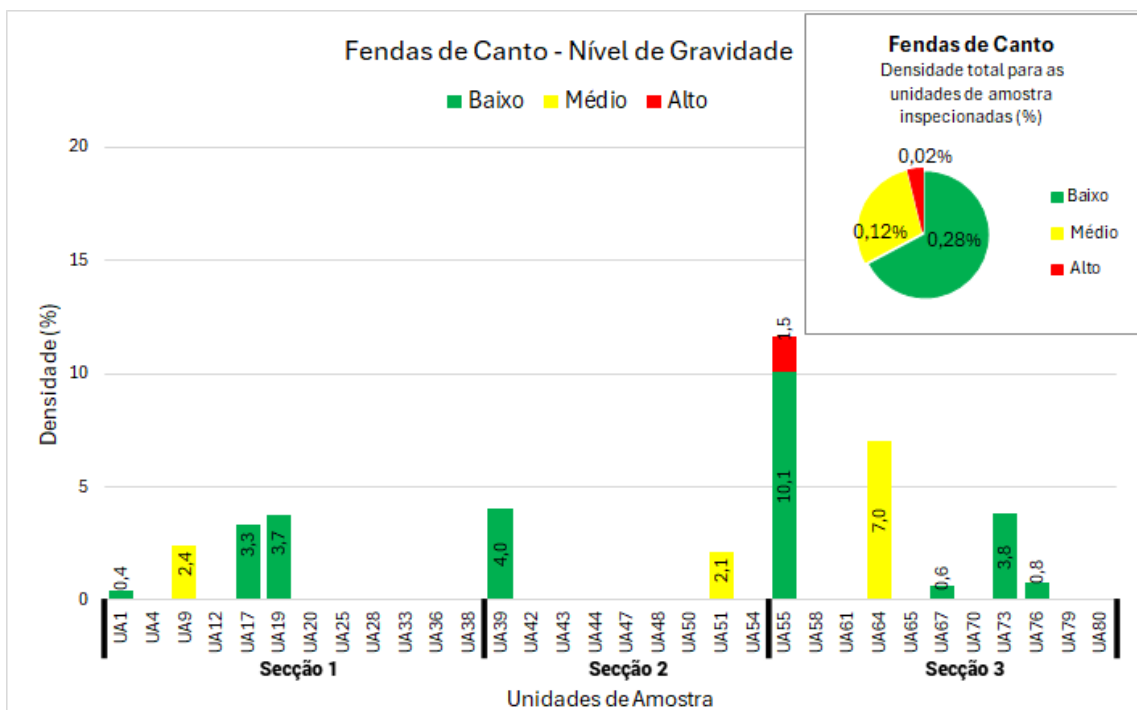


Figura 5.25: Densidade da degradação fendas de canto, por unidades de amostra inspeccionadas e para o total da área inspeccionada.

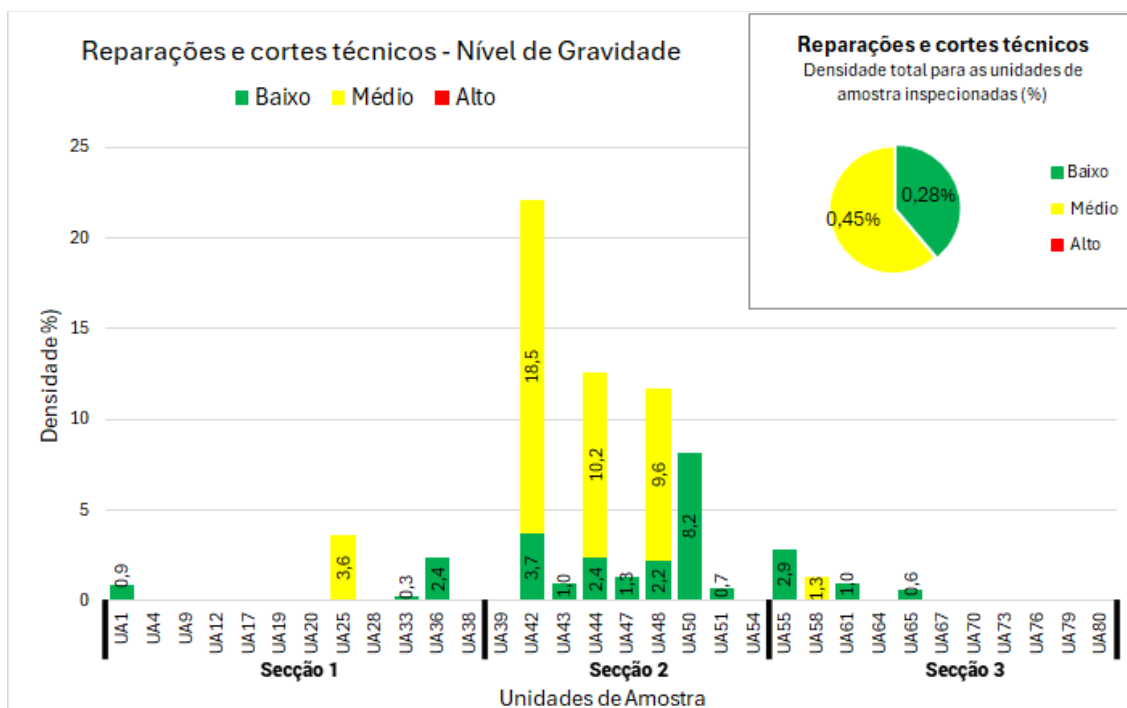


Figura 5.26: Densidade da degradação reparações e cortes técnicos, por unidades de amostra inspeccionadas e para o total da área inspeccionada.

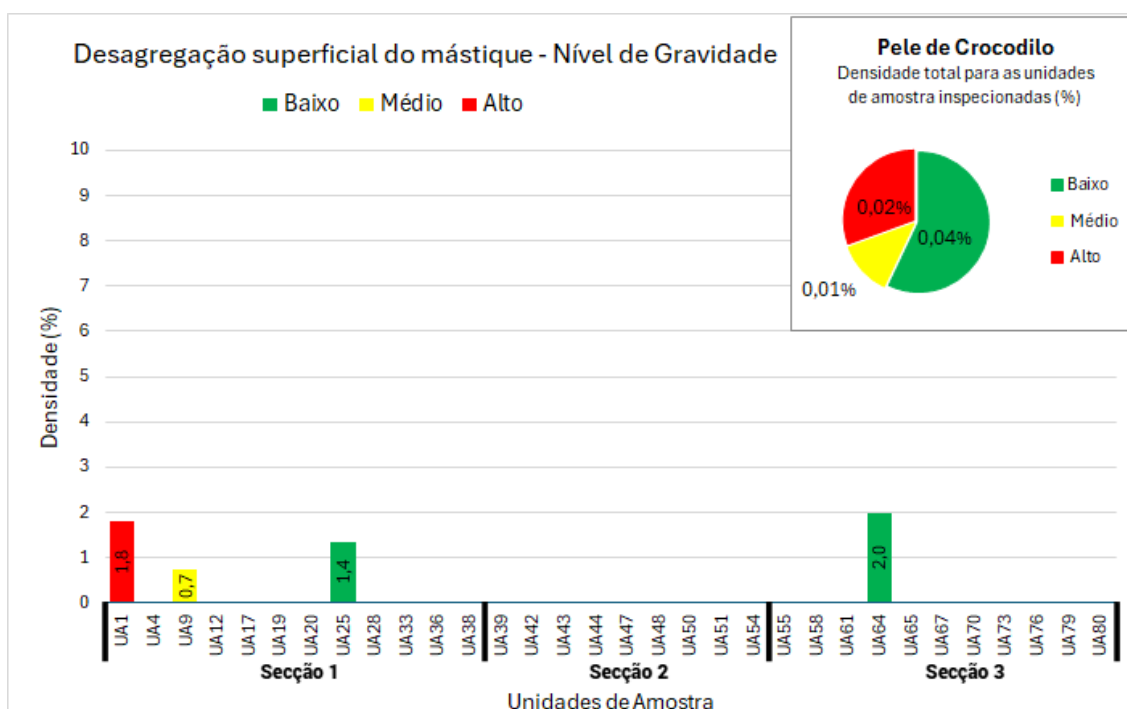


Figura 5.27: Densidade da degradação desagregação superficial do mástique, por unidades de amostra inspeccionadas e para o total da área inspeccionada.

É possível observar que o tipo de degradação que apresenta uma maior densidade são as fendas longitudinais e transversais, estando localizadas essencialmente nas secções 1 e 3. No entanto, os níveis de gravidade identificados são essencialmente o médio e baixo.

De destacar que essa degradação foi identificada na maioria das unidades de amostra do trecho, exceto nas unidades de amostras UA44, UA47, UA48 e UA50 da secção 2.

A degradação pele de crocodilo apresenta também densidades significativas, pois afeta a maioria das unidades de amostra inspecionadas (25 em 32). Esta degradação foi identificada em todos os níveis de gravidade ao longo do trecho, destacando-se o nível de gravidade médio e maioritariamente alto na secção 3.

As fendas cruzadas foram identificadas nas secções 1 e 3, com nível de gravidade maioritariamente médio e alto, respetivamente.

Relativamente às fendas de canto, observou-se que apresentam pouca densidade, e que se localizam maioritariamente na secção 3 com um nível de gravidade baixo.

Quanto às reparações e cortes técnicos, verificou-se uma maior incidência na secção 2, com níveis de gravidade baixo e médio, sendo o médio predominante.

O tipo de degradação que apresenta uma menor densidade é a desagregação superficial do mástique. No entanto, destaca-se a obtenção de todos os níveis de gravidade na secção 1.

5.6.3. Estratégia de intervenção de M&R em função do PCI

Depois de determinados e analisados os valores de PCI e das densidades de degradação para cada unidade de amostra inspecionada e secção, é possível identificar a estratégia de intervenção M&R a considerar para o trecho em análise.

Com base nos resultados de PCI obtidos, a Tabela 5.3 apresenta o tipo de intervenção necessária para as diferentes secções do trecho, assim como para uma avaliação global do PCI.

Tabela 5.3- Estratégia de intervenção de M&R em função do valor do PCI para cada secção e total do trecho.

Secção	Localização	PCI da Secção	Tipo de Intervenção
Secção 1	Zona rural (Nordeste)	52	Manutenção Corretiva
Secção 2	Zona urbana (Central)	65	Manutenção de Rotina
Secção 3	Zona rural (Sudoeste)	39	Reabilitação
Total do trecho	-	51	Manutenção Corretiva

Tendo em conta que os valores de PCI calculados para as secções do trecho variam entre 39 e 65, resultando num valor do PCI total do trecho de 52, verifica-se que o trecho estudado necessita de uma intervenção do tipo manutenção corretiva do pavimento, incluindo medidas como, reparações profundas com a remoção de camadas comprometidas e reconstrução completa da área danificada e selagem de fendas com aplicação de materiais de preenchimento para impedir a infiltração de água.

Salienta-se que a secção 3 apresenta um PCI de 39, correspondendo a uma classificação de “Mau”, o que requer uma reabilitação do pavimento que inclui medidas como a colocação de camadas de reforço ou a substituição da camada de desgaste.

5.6.4. Estratégia de intervenção por tipo de degradação

Depois de analisados os valores de PCI obtidos, e determinado o tipo de intervenção necessária para o trecho em geral, foram analisados os tipos de intervenções a realizar-se por degradação identificada e com maior impacto nas unidades de amostra analisadas (ver Tabela 5.4).

Tabela 5.4: Tipos de intervenções M&R por degradação e nível de gravidade identificados

Degradação	Intervenções de M&R		
	Secção 1	Secção 2	Secção 3
Pele de Crocodilo	Reparação de profundidade total	Aplicar emulsão de selagem de superfície	Reparação de profundidade total
Fendas cruzadas	Aplicar camada de selagem com agregado	Aplicar camada de selagem com agregado	Aplicar rejuvenescedor
Fendas de Canto	Selagem de Fendas	Selagem de Fendas	Selagem de Fendas
Fendilhamento transversal e longitudinal	Aplicar camada de selagem com agregado	Aplicar camada de selagem com agregado	Aplicar camada de selagem com agregado
Reparações e cortes técnicos	Selagem de Fendas	Selagem de Fendas	Selagem de Fendas
Desagregação superficial do mástique	Aplicar emulsão de selagem de superfície	Não fazer nada	Aplicar rejuvenescedor
Proposta de intervenção	Reparação de profundidade total	Aplicar camada de selagem com agregado e selagem de fendas	Reparação de profundidade total

No entanto, tendo em conta que os tipos de intervenção obtidos foram de reabilitação, e o conjunto alargado de operações individuais que seria necessário efetuar, justifica-se a reparação de profundidade total nas secções 1 e 3, e de aplicação de uma camada de selagem com agregado e selagem de fendas na secção 2.

6. Conclusão

O presente trabalho está dividido em duas partes principais: uma teórica e outra prática. A parte teórica aborda os conceitos fundamentais que sustentam a aplicação prática apresentada no caso de estudo.

A partir do desenvolvimento do conteúdo teórico, constatou-se que a avaliação do estado dos pavimentos rodoviários desempenha um papel essencial no Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP). Essa avaliação possibilita a gestão sustentável, eficiente e segura das redes de pavimentos, atendendo tanto às necessidades dos usuários quanto às restrições orçamentais. Em concreto, fornece uma base sustentada de apoio às decisões relacionadas com a manutenção, reabilitação e construção, garantindo uma maior precisão e eficácia das intervenções.

A precisão da avaliação da condição dos pavimentos rodoviários depende fortemente da qualidade dos dados recolhidos durante as inspeções realizadas à superfície dos pavimentos. Tradicionalmente, essas inspeções eram efetuadas a pé, um método que, apesar de permitir uma análise detalhada, apresenta desvantagens como a elevada subjetividade, a morosidade do processo e a exposição dos inspetores a riscos rodoviários.

Com os avanços tecnológicos, os métodos de inspeção evoluíram para abordagens mais rápidas e eficientes, incluindo a utilização de veículos terrestres instrumentados e veículos aéreos não tripulados (VANT). Estes métodos permitem a recolha sistemática e georreferenciada de imagens e outros dados, aumentando a reprodutibilidade e precisão da avaliação do estado do pavimento, enquanto reduzem o tempo e os custos operacionais.

Com base na bibliografia consultada, verificou-se que o PCI (*Pavement Condition Index*) pode ser utilizado na seleção da estratégia de intervenção a adotar na conservação dos pavimentos. Valores de PCI entre 100 e 70 indicam a necessidade de manutenção de rotina; entre 70 e 40 a adoção de uma manutenção corretiva; entre 40 e 25 a necessidade de reabilitação; e valores inferiores a 25 apontam para a necessidade de reconstrução do pavimento.

Relativamente à componente prática, foi desenvolvido um caso de estudo numa extensão de 8 km da EN238, entre as localidades de Silvares e Barroca (Concelho do Fundão), na qual a estrada apresenta um pavimento flexível. A inspeção da superfície do pavimento

foi realizada com recurso a um veículo terrestre equipado com dispositivos GPS e de captação de vídeo, apresentando diversas vantagens, como a possibilidade de inspecionar toda a superfície do pavimento de forma contínua e a velocidades mais elevadas do que as da inspeção realizada a pé, e a redução significativa do tempo de recolha dos dados de degradação. A avaliação das degradações foi realizada posteriormente em gabinete utilizando as informações coletadas. Os dados de imagem e georreferenciação permitiram agilizar o processo de identificação, avaliação do nível de gravidade e quantificação das degradações, uma vez que toda a informação pôde ser analisada de forma integrada num Sistema de Informação Geográfica (SIG), que se revelou ser uma ferramenta fundamental no estudo.

As maiores dificuldades sentidas nas fases de levantamento de dados com recurso ao veículo terrestre equipado e de tratamento dos dados, foram as seguintes:

- A qualidade das imagens captadas durante o levantamento não foi suficiente para permitir, em gabinete, uma distinção clara e uma identificação precisa das degradações do tipo desagregação superficial do agregado e do mástique, assim como dos respetivos níveis de gravidade. Para identificar e avaliar adequadamente o nível de gravidade destes tipos de degradação, é essencial perceber a rugosidade e a textura da superfície do pavimento. No entanto, a resolução espacial das imagens não alcançou o grau de detalhamento necessário para essa análise, o que exigiu uma deslocação ao local para calibrar e validar as classificações realizadas a partir das imagens.
- A existência de sombras captadas nas não permitiu identificar de modo claro e preciso algumas degradações e os seus níveis de gravidade.
- Através das imagens das camaras não é possível identificar visualmente e/ou medir os deslocamentos verticais do pavimento, logo não foi possível identificar com precisão degradações como a ondulação, as depressões, as rodeiras, os alteamentos e abatimentos, o desnível da via/berma, as covas, o escorregamento e o empolamento.

Após o tratamento dos dados de georreferenciação e de imagem num projeto SIG, foi realizado o cálculo do Índice de Qualidade do Pavimento (PCI) para as 32 unidades de amostra selecionadas. Os valores obtidos variaram entre 12 e 96 pontos PCI, abrangendo quase todos os intervalos da classificação PCI, exceto a categoria "Falha Estrutural". Dentre as classificações, destacou-se a categoria "Mau", com 9 unidades de amostra, seguida pelas categorias "Bom" e "Suficiente", com 7 e 5 unidades de amostra, respetivamente. As categorias "Muito Mau" e "Excelente" apresentaram 4 unidades de

amostra cada, enquanto a categoria "Muito Bom" contou com 3 unidades de amostra. distribuição Os valores obtidos traduziram-se num PCI de 52 pontos ("Suficiente") para a secção 1, localizada na zona rural a nordeste do trecho; num PCI de 65 pontos ("Bom") para a zona urbana localizada na parte central do trecho; e num PCI de 39 pontos ("Mau") para a secção 3 localizada na zona rural a sudoeste do trecho. Esses resultados indicam que o trecho analisado se encontra em um estado significativo de deterioração, apresentando um PCI médio de 51 pontos.

A análise dos valores de PCI obtidos permitiu concluir que as medidas necessárias para recuperar o pavimento do trecho se enquadram no tipo de manutenção corretiva, já que o PCI total do trecho é de 51 pontos. Uma análise ao nível das secções apontam para uma manutenção corretiva para a secção 1, uma manutenção de rotina para a secção 2 e uma reabilitação para a secção 3. As ações de manutenção apropriadas podem incluir a remoção do pavimento degradado, a substituição das camadas de base e de desgaste, ou a aplicação de uma nova camada betuminosa para corrigir deformações. No entanto, é importante destacar que a secção 3, classificada como "Mau", requer uma reabilitação urgente de forma a evitar uma deterioração mais severa que possa levar à necessidade de reconstrução completa do pavimento.

A análise das degradações observadas e das suas respectivas densidades revelou a presença de diversas falhas significativas, indicando um estado avançado de deterioração do pavimento em vários locais do trecho, o que se traduz em problemas funcionais e estruturais. Entre as degradações identificadas destacam-se as fendas longitudinais e transversais, além da ocorrência de pele de crocodilo, com densidade significativa nas secções 1, 2 e 3, e fendas cruzadas, mais prevalentes nas secções 1 e 3. Diante dos valores das densidade destas degradações, conclui-se que as intervenções mais adequadas são a reparação de profundidade do pavimento afetada para as secções 1 e 3 e a selagem de fendas e tratamento das reparações e cortes técnicos existentes para a secção 2.

Desta forma, numa perspetiva global, justifica-se a remoção do pavimento degradado, seguida da substituição por novas camadas de base e revestimento em todo o trecho nas secções 1 e 3, e a aplicação de uma camada de selagem da superfície na secção 2.

Os resultados obtidos confirmaram a viabilidade da utilização do veículo terrestre equipado no processo de avaliação do estado dos pavimentos rodoviários considerado nos SGP. Esse método mostrou-se eficiente e pode ser considerado uma ferramenta essencial para apoiar a tomada de decisões relacionadas com a definição de intervenções nos pavimentos rodoviários.

Para investigações futuras propõem-se os seguintes avanços:

- Aperfeiçoamento da solução de inspeção com veículo terrestre equipado, visando superar as dificuldades identificadas, mas mantendo o seu carácter de baixo custo.
- Emprego de sistemas avançados, como feixes laser, para a deteção de deslocamentos verticais do pavimento, permitindo a identificação de degradações anteriormente não detetadas devido à ausência desses recursos.
- Implementação de abordagens de inteligência artificial para identificação das degradações a partir das imagens recolhidas nas operações de inspeção.

7. Referências Bibliográficas

Afsahara. (2023). Roads in Distress: Exploring the Types and Causes of Pavement Defects and Failures <https://blog.afsahara.co.ke/roads-in-distress-exploring-the-types-and-causes-of-pavement-defects-and-failures/> Consultado a 05 de dezembro de 2024.

ASTM D6433 – 23. (2023). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys.

Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2008). Pavimentos Rodoviários (Edições Almeida, SA., Vol. 3).

Center for Transportation Research and Education. (2012). CTRE|IPMP Services|Automated Distress Data Collection. <https://ctre.iastate.edu/ipmp/ipmp-services/automated-distress-data-collection/> Consultado a 06/01/2025.

CPE Tecnologia. (2019). Laser Scanner: o que é e principais vantagens. <https://blog.cpetecnologia.com.br/laser-scanner-a-tecnologia-aliada-em-seus-trabalhos/> Consultado a 03/01/2025.

Crash Forensics. (2008). A Primer on Roadway Pavement Edge Drop Offs <https://www.crashforensics.com/papers.cfm?PaperID=26> Consultado a 09 de dezembro de 2024.

Cruz, J. (2023). Aplicações de drones em rodovias e aeroportos. Dynatest. <https://www.dynatestlatam.com/pt/aplicacoes-de-drones-em-rodovias-e-aeroportos/> Consultado a 03/01/2025.

Domingos, A. (2017). Determinação e Interpretação do Índice PCI de Pavimentos Aeroportuários, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior.

Dos Santos, E. (2018). Sistemas de Observação do Estado Superficial de Pavimentos: Otimização do Sistema com Equipamento Fotográfico (fendilhamentos), Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

Feitosa, I., Santos, B., & Almeida, P. G. (2024). Pavement Inspection in Transport Infrastructures Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Sustainability*, 16(5), 2207. <https://doi.org/10.3390/su16052207>

Feitosa, I. (2020). Validação de um método indireto de auscultação de degradações para avaliação da qualidade de pavimentos aeroportuários, Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior.

Fwa, T. F. (2006). The handbook of highway engineering. Taylor & Francis.

Gaddes Strategic LLC. (2022). Asphalt Patching Services in West Nashville,TN <https://nashvillethermoplastickmarkings.com/asphalt-patching-west-nashville/> Consultado a 05 de dezembro de 2024.

Gavinhos, J. (2023). Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) na Inspeção de infraestruturas de transporte – Inspeção de Pavimentos, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior.

Headquarters Department of the Army Washington DC. (1982). Pavement Maintenance Management. Technical Manual No. 5-623

Huang, L. -L., Lin, J. -D., Huang, W. -H., Kuo, C. -H., & Huang, M. -Y. (2024). Application of Automated Pavement Inspection Technology in Provincial Highway Pavement Maintenance Decision-Making. Applied Sciences, 14(15), 6549. <https://doi.org/10.3390/app14156549>

H. Joni, H., A. Alwan, I., & A. Naji, G. (2020). Utilizing Artificial Intelligence to Collect Pavement Surface Condition Data. Engineering and Technology Journal, 38(1A), 74-82. <https://doi.org/10.30684/etj.v38i1A.251>

Ibragimov, E., Kim, Y., Lee, J. H., Cho, J., & Lee, J. -J. (2024). Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and Image Analysis: An End-to-End Approach. Sensors, 24(7), 2333. <https://doi.org/10.3390/s24072333>

Igm. (2022). Accueil>In Situ>Essais Routiers>Auscultation de chaussée>I12 002 à I12 005 VIZIROAD. <https://igm.fr/produit/i12-002-a-i12-005-viziroad/> Consultado a 05 de dezembro de 2024.

IMT. (2009). Diretivas para a conceção de pavimentos - Critério de dimensionamento.

Irap. (2021). Meet an iRAP Accredited Supplier – ARRB Systems Africa. <https://irap.org/2021/02/meet-an-irap-accredited-supplier-arrb-systems-africa/> Consultado a 06/01/2025.

Kayondo-Ndandiko, L.M., Bax, G., & Togboa, S.S. (2011). Low Cost Methodology for Preliminary Road Maintenance Decision Support. <https://www.semanticscholar.org/paper/Low-Cost-Methodology-for-Preliminary-Road-Decision-Kayondo-Ndandiko-Bax/co4a114fd4f31cb79ac050c1e6e40b8f0f8afcc4>

Lima, D. (2016). Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários para Cabo Verde, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior.

Leonardi, G., Barrile, V., Palamara, R., Suraci, F., & Candela, G. (2019). 3D mapping of pavement distresses using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. In *New Metropolitan Perspectives: Local Knowledge and Innovation Dynamics Towards Territory Attractiveness Through the Implementation of Horizon/E2020/Agenda2030—Volume 2* (pp. 164-171). Springer International Publishing. https://www.researchgate.net/profile/Rocco-Palamara/publication/325260263_3D_Mapping_of_Pavement_Distresses_Using_an_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV_System/links/6332c08c86b22d3db4e82f55/3D-Mapping-of-Pavement-Distresses-Using-an-Unmanned-Aerial-Vehicle-UAV-System.pdf

LNEC. (1962). Vocabulário de estradas e aeródromos.

Melo, R. L., de Oliveira, F. R. (2021). Deterioração de pavimentos rodoviários: estudo de caso do trecho da MG 190 e Monte Carmelo entre Abadia do Dourados. <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2454>

Morgan Pavement. (2022). Common Asphalt Pavement Issues and How to Fix Them <https://www.asphaltrepairservices.com/blog/common-asphalt-pavement-issues-and-how-to-fix-them/> Consultado a 05 de dezembro de 2024.

Mulry, B., Jordan, M., & O'Brien, D. A. (2015). Automated pavement condition assessment using laser crack measurement system (LCMS) on airfield pavements in Ireland. In *Proceedings of the 9th International Conference on Managing Pavement Assets*, Alexandria, VA, USA. <https://vtechworks.lib.vt.edu/items/72bcd036-f3a2-4984-904d-598233bd515e>

Municipal Impact. (2022). Town of Carefree Pavement Preservation Program https://carefree.municipalimpact.com/documents/431/2022-04-08_Town_of_Carefree_Pavement_Preservation_Program_Report.pdf Consultado a 10 de dezembro de 2024.

Nery, D. (2023). Otimização de métodos de auscultação de pavimentos rodoviários com recurso à geomática e veículos aéreos não tripulados (VANT), Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior.

Novianti, P. K., Setyawan, A., Pramesti, F. P. (2024). Evaluation of Road Functional Performance Using Pavement Condition Index (PCI) and International Roughness Index (IRI) Methods Using Hawkeye (Case Study: Demak Ring Road, Central Java Province). IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1381 012035. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1381/1/012035>

Qureshi, W. S., Hassan, S. I., McKeever, S., Power, D., Mulry, B., Feighan, K., & O'Sullivan, D. (2022). An Exploration of Recent Intelligent Image Analysis Techniques for Visual Pavement Surface Condition Assessment. Sensors, 22(22), 9019. <https://doi.org/10.3390/s22229019>

Paska, E. P. (2009). State-of-the-art remote sensing geospatial technologies in support of transportation monitoring and management [Doctoral dissertation, Ohio State University]. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1238159593

Pavement Interactive. (2023). Pavement Interactive > Reference Desk > Pavement Management > Pavement Distresses. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/> Consultado a 09 de dezembro de 2024.

Pavement Interactive. (2023). Pavement Interactive > Reference Desk > Pavement Management > Pavement Distresses > Reflection Cracking. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/reflection-cracking/> Consultado a 09 de dezembro de 2024.

Pavement Interactive. (2023). Pavement Interactive > Reference Desk > Pavement Management > Pavement Distresses > Polished Aggregate <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/polished-aggregate/> Consultado a 09 de dezembro de 2024.

Paveman Pro. 13. (2011). Pavement Defects and Failures You Should Know! https://www.pavemanpro.com/article/identifying_asphalt_pavement_defects/ Consultado a 10 de dezembro de 2024.

Pinto, R. (2021). Desenvolvimento de um Sistema de Informação Georreferenciado dos Pavimentos Rodoviários de Vila Nova de Famalicão, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

Santos, B., Almeida, G. P., Feitosa, I., Lima, D. (2020). Validation of an indirect data collection method to assess airport pavement condition. Case Studies in Construction Materials, Volume 13, e00419, ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00419>.

Santos, B., Almeida, P. G. & Maganinho, L. (2019). Data Collection Methodology to Assess Road Pavement Condition Using GNSS, Video Image and GIS". IOP Conference Series Materials Science and Engineering 603: 042083. <https://doi:10.1088/1757-899X/603/4/042083>.

Shahin, Y. M., Kohn, D. S. (1982). Overview of the "PAVER" pavement management system.

Tatale, O., Anekar, N. R., Phatak, S. & Sarkale, S. (2018). Quadcopter: Design, Construction and Testing. International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM), 4.0. https://www.ijream.org/papers/IJREAM_AMET_0001.pdf

Tensar U.K. (2021). What is rutting in roads and pavements? <https://www.tensar.co.uk/resources/articles/what-is-rutting-in-roads> Consultado a 09 de dezembro de 2024.

Tri-Service Transportation. (2024). Road Asphalt Distress Manual <https://transportation.erd.c.dren.mil/paver/Documents/Road%20Asphalt%20Distress%20Manual.pdf> Consultado a 05 de dezembro de 2024.

Videira, F. (2014). Manual de Conservação de Pavimentos para Pequenas Redes Rodoviárias Municipais: bases para a sua elaboração, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Walker, D., Entine, L., Kummer, S. (1987). PASER Asphalt Roads Pavement Surface Evaluation and Rating PASER Manual Asphalt Roads. <http://tic.egr.wisc.edu>

Washington Asphalt Pavement Association. (2008). Bleeding. <https://www.asphaltwa.com/bleeding/> Consultado a 05 de dezembro de 2024.

Wdm. (2020). Véhicule d'évaluation de l'état des routes (RAV). <https://www.wdm-int.fr/equipements/vehicule-devaluation-de-letat-des-routes-rav> Consultado a 06/01/2025.

Xu, F., Wan, Y., Ning, Z., & Wang, H. (2024). Comparative Study of Lightweight Target Detection Methods for Unmanned Aerial Vehicle-Based Road Distress Survey. *Sensors*, 24(18), 6159. <https://doi.org/10.3390/s24186159>

Yu, J., Jiaqi, J., Fichera, S., Paoletti, P., Layzell, L., Mehta, D. & Luo, S. (2024). Road Surface Defect Detection—From Image-based to Non-image-based, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25 (9), <https://doi.org/10581-10603>.

Zhang, C. (2008). An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS Congress, XXXVII. Part B https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/109.pdf