

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

João Vieira Baptista

**Desenvolvimento de uma Solução de
Reabilitação Sustentável para o
Pavimento da Estrada Desclassificada
EN 306 em Barcelos**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Vieira Baptista

**Desenvolvimento de uma Solução de
Reabilitação Sustentável para o
Pavimento da Estrada Desclassificada
EN 306 em Barcelos**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Joel Ricardo Martins de Oliveira

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contatar o autor, através do Repositório da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-SemDerivações

CC BY-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Agradecimentos

Após estes dois anos como aluno na Universidade do Minho, sinto-me profundamente grato e honrado por alcançar mais uma etapa importante no meu percurso académico, com a conclusão do Mestrado em Engenharia Urbana. Esta jornada foi marcada por experiências enriquecedoras, orientações valiosas e ensinamentos que não só irão ampliar o meu conhecimento técnico e científico, mas também contribuir para o meu desenvolvimento pessoal e cívico.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu Orientador, Professor Joel Oliveira, por me ter dado a oportunidade de ser seu mestrando. A sua sabedoria e competência na orientação foram determinantes para a definição e desenvolvimento desta dissertação. Destaco, ainda, a sua exemplar coordenação dos trabalhos, bem como a sua constante disponibilidade e dedicação em prestar esclarecimentos.

Ao Engenheiro Carlos Palha, expresso a minha sincera gratidão pela valiosa assistência nos trabalhos de campo, designadamente na gestão e utilização do equipamento técnico necessário aos ensaios realizados neste trabalho. Agradeço, igualmente, a partilha do seu saber prático e tecnicamente qualificado, que foi essencial para reunir informação necessária ao desenvolvimento deste estudo.

Manifesto o meu agradecimento ao município de Barcelos pela oportunidade deste estudo, em particular à Exma. Câmara Municipal de Barcelos, liderada pelo Sr. Presidente Dr. Mário Constantino, que autorizou e contribui nos trabalhos de campo. À equipa multidisciplinar da Divisão de Gestão e Conservação do Património, agradeço o excelente apoio prestado durante os ensaios em obra. À Divisão de Mobilidade Urbana pela consideração e reconhecimento deste trabalho académico.

Ao Laboratório de Pavimentos Rodoviários da Universidade do Minho, expresso o meu agradecimento pela disponibilização dos equipamentos técnicos de elevada qualidade, indispensáveis à realização dos ensaios necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Também quero agradecer aos Docentes do Mestrado em Engenharia Urbana pelo ensino de conteúdos académicos que ampliaram os meus conhecimentos e competências em diversas áreas, nomeadamente nas áreas da Engenharia de Gestão e Planeamento, Engenharia Rodoviária e Engenharia Hidráulica.

Por fim, expresso a minha profunda gratidão à minha esposa, Regina, e aos meus filhos, Tiago e Filipe, pela paciência, compreensão e apoio incondicional. A sua solidariedade e amizade foram fundamentais para enfrentar esta jornada, marcada pela privação do convívio familiar.

“Decisões sensatas são resultados do uso consciente do conhecimento”

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo propor uma solução sustentável para a reabilitação de um trecho da estrada desclassificada EN306, situado no concelho de Barcelos.

O trabalho centra-se na repavimentação das camadas betuminosas de um pavimento flexível que se encontra num estado avançado de degradação.

A metodologia de investigação inclui a realização de análises do tráfego rodoviário e trabalhos de auscultação do pavimento, com o objetivo de avaliar as condições de agressividade dos veículos pesados, assim como as características estruturais e funcionais do pavimento existente.

Com base nos resultados obtidos, a partir dos levantamentos de campo, foram idealizadas três soluções distintas, diferenciadas tanto pelo método de aplicação como pelo tipo de ligantes betuminosos utilizados. Dentro dessas soluções, destaca-se uma pela combinação equilibrada entre os fatores económicos, ambientais e funcionais.

O estudo apresenta soluções de pavimentação, incluindo a aplicação de materiais produzidos a quente em central, que podem ser misturas betuminosas convencionais ou compostas por 50% de material fresado.

Embora esteja fora do âmbito desta dissertação, a inoperacionalidade do sistema de drenagem de águas pluviais verificada ao longo do trecho em estudo, demonstrou ter um impacto direto na funcionalidade do pavimento, o que poderá limitar o período de longevidade das soluções propostas neste trabalho.

Palavras-Chave:

Desempenho dos pavimentos rodoviários; conservação/reabilitação de pavimentos; técnicas de conservação/reabilitação; reciclagem de misturas betuminosas; sustentabilidade.

Abstract

This dissertation aims to propose a sustainable solution for rehabilitating a section of the EN306 road in the municipality of Barcelos. The work focuses on resurfacing the asphalt layers of a flexible pavement that is in an advanced state of degradation.

The research methodology included studies on road traffic and pavement evaluation, aiming to assess the impact of heavy vehicle traffic and the existing pavement's structural and functional characteristics.

Based on the results obtained from the field survey, three distinct solutions were designed, differentiated by both the application method and the type of bituminous binders used. Among these solutions, one stands out for achieving a balanced combination of economic, environmental, and functional factors.

The study presents paving solutions involving materials produced at high temperatures in the asphalt plant, which may consist of conventional bituminous mixtures or blends incorporating 50% reclaimed asphalt pavement (RAP).

Although it falls outside the scope of this thesis, the inoperability of the stormwater drainage system observed along the road section studied has been shown to directly impact the pavement's functionality, potentially limiting the service life of the solutions proposed in this work.

Keywords:

Road pavement performance; pavement maintenance/rehabilitation; maintenance/rehabilitation techniques; recycling of asphalt mixtures; sustainability.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABELAS	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. REDE VIÁRIA.....	4
2.1.1. Rede Rodoviária Nacional.....	5
2.1.2. Sinopse ao Plano Rodoviário Nacional	7
2.1.3. Estrada Desclassificada.....	10
2.2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ESTADO DE PAVIMENTOS.....	12
2.2.1. Introdução	12
2.2.2. Regularidade Longitudinal	13
2.2.3. Regularidade Transversal	14
2.2.4. Estado Superficial	15
2.2.5. Textura	18
2.2.6. Atrito	21
2.2.7. Deflexão.....	22
2.2.8. Considerações finais sobre a avaliação da qualidade de pavimentos	24
2.3. CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS	25
2.3.1. Tipos de Pavimentos.....	27
2.3.2. Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos	29
2.3.3. Promoção da Reciclagem de Pavimentos	30
2.3.4. Métodos de Reciclagem de Pavimentos	31

3. CASO DE ESTUDO E METODOLOGIAS UTILIZADAS.....	39
3.1. CARACTERÍSTICAS DO TRECHO EM ESTUDO	40
3.1.1. Enquadramento geográfico.....	40
3.1.2. Caracterização da estrada.....	41
3.2. METODOLOGIAS UTILIZADAS	43
3.2.1. Contagens de Tráfego	43
3.2.2. Observação do Estado Superficial.....	46
3.2.3. Avaliação da Capacidade de Carga.....	47
3.2.4. Avaliação da Irregularidade Longitudinal.....	48
3.2.5. Avaliação Estrutural do Pavimento.....	50
3.2.6. Dimensionamento da reabilitação de pavimentos	53
3.2.7. Avaliação económica das soluções de reabilitação	56
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	57
4.1. CONTAGENS DE TRÁFEGO	57
4.2. OBSERVAÇÃO DO ESTADO SUPERFICIAL.....	58
4.3. CAPACIDADE DE CARGA DO PAVIMENTO	61
4.4. IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO	64
4.5. MODELOS ESTRUTURAIS DO PAVIMENTO	65
4.6. DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO	69
4.6.1. Reforço com sobreposição de novas camadas.....	70
4.6.2. Substituição das camadas ligadas por materiais novos	72
4.6.3. Otimização das espessuras a reabilitar.....	73
4.6.4. Análise comparativa das alternativas de reabilitação	74
4.7. AVALIAÇÃO ECONÓMICA DAS SOLUÇÕES	74
4.7.1. Custos do reforço com sobreposição de novas camadas.....	75
4.7.2. Custos da substituição das camadas ligadas por materiais novos	75
4.7.3. Custos da solução de otimização das espessuras a reabilitar	76
4.7.4. Avaliação comparativa das soluções estudadas	76

4.8. IMPLICAÇÕES DA AUSÊNCIA DE CONSERVAÇÃO CORRENTE E PERIÓDICA NO DESEMPENHO DAS SOLUÇÕES ESTUDADAS	77
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
5.1. CONCLUSÕES	82
5.2. TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Rede rodoviária pavimentada das principais economias no ano de 2020 (dados obtidos a partir de IRF, 2021)	5
Figura 2 – Densidade de rede de autoestradas na Europa (adaptado de Eurostat, 2023)	6
Figura 3 – Rede rodoviária nacional (imagem obtida através software SIG a partir de https://dados.gov.pt/pt/datasets/rede-rodoviaria-nacional/).....	7
Figura 4 – Evolução do PRN: a) PRN45 (JAE, 1950); b) PRN85 (DPL e GCGSI, 2011); c) PRN2000 (DPL e GCGSI, 2011).....	10
Figura 5 – Rede rodoviária de Barcelos (imagem obtida através software SIG a partir de https://dados.gov.pt/pt/datasets/rede-rodoviaria-nacional/).....	11
Figura 6 – Esquema dos parâmetros de avaliação do estado do pavimento	13
Figura 7 – Exemplo de perfilómetro a laser RST (IP, 2021a).....	14
Figura 8 – Scanner de perfil de estrada (Fraunhofer IPM, 2018)	15
Figura 9 – Exemplos de degradações superficiais do tipo “fendilhamento/pele de crocodilo” (LCPC, 1998, EP, 2008).....	16
Figura 10 – Sistema de Medição de Fendas a Laser (TII, 2020)	17
Figura 11 – Modelo 3D e parâmetros da secção transversal de marcação de pavimento (adaptado de Woodward <i>et al.</i> , 2014).....	20
Figura 12 – Modelos de imagens 3D criado a partir de amostra betuminosa (imagem adaptada de Medeiros Jr <i>et al.</i> , 2023): a) Modelo fotogramétrico de curto alcance; b) Modelo scanner a laser 3D	20
Figura 13 – Equipamentos de medição do atrito: a) Pêndulo Britânico (SET, 2023), b) Grip Tester (Findlay Irvine, 2024), c) SCRIM (SARSYS-ASFT, 2024)	22
Figura 14 – Defletómetro de alta velocidade (TSD) (adaptado de Greenwood Engineering, 2024).....	23
Figura 15 – Pavimentos rodoviários estratificados (adaptado de Branco et al., 2016)	27
Figura 16 – Composição de um comboio de reciclagem a frio <i>in situ</i> com betume-espuma (adaptado de WIRTGEN, 2024)	34
Figura 17 – Esquema de repavimentação com reciclagem do material fresado a frio na central.....	34
Figura 18 – Composição de comboio de reciclagem a quente <i>in situ</i> (adaptado de WIRTGEN, 2016, WIRTGEN, 2024).....	37
Figura 19 – Esquema de reabilitação com reciclagem do material fresado a quente em central.....	38
Figura 20 – Traçado da EN306: a) extensão total da EN306; b) trecho da EN306 alvo de estudo	41

Figura 21 – Perfil transversal tipo de Estradas Nacionais de 3ª classe (adaptado de MOPC, 1945).....	42
Figura 22 – Localização das zonas de contagem do tráfego	45
Figura 23 – Defletómetro de impacto (FWD) - Dynatest 8000	48
Figura 24 – Sensores (geofones) e placa de aplicação da carga	48
Figura 25 – (a) equipamento em ação, (b) módulo computacional de bordo	49
Figura 26 – Perfilómetro a Laser	49
Figura 27 – Fendilhamento: a) fendas longitudinais - nível 2; b) fendas longitudinais - nível 3; c) pele de crocodilo - nível 1; d) pele de crocodilo - nível 3	58
Figura 28 – Deformações: a) deformações localizadas - nível 3; b) rodeiras - nível 3	59
Figura 29 – Defeitos de superfície: a) ninhos e peladas - nível 3; b) desagregação superficial - nível 3	59
Figura 30 – Reparações: a) tapagem de covas - nível 3; b) remendos - nível 3	60
Figura 31 – Caracterização do estado superficial do pavimento:	60
Figura 32 – Deflexões normalizadas para uma carga de 65kN: a) Sentido Norte/Sul; b) Sentido Sul/Norte	62
Figura 33 – Divisão do pavimento em trechos de comportamento homogéneo: a) sentido Norte/Sul; b) sentido Sul/Norte	62
Figura 34 – Localização dos trechos de comportamento homogéneo	63
Figura 35 – Valores de IRI: a) no sentido Norte/Sul; b) no sentido Sul/Norte	64
Figura 36 – Localização e processo de abertura dos dois poços de sondagem	66
Figura 37 – Amostra das camadas betuminosas extraídas dos poços de sondagem: a) poço 1; b) poço 2	66
Figura 38 – Composição do pavimento estratificado em cada poço de sondagem	67
Figura 39 – Exemplo de modelação do pavimento no JPavBack	68
Figura 40 – Exemplo de cálculo do novo do pavimento no JPav	70
Figura 41 – Esquema em perfil longitudinal para a solução de reforço: a) 1ª proposta no sentido Norte/Sul; b) 1ª proposta no sentido Sul/Norte; c) 2ª proposta para ambos sentidos	71
Figura 42 – Esquema em perfil longitudinal para a solução de substituição integral das camadas betuminosas existentes: a) sentido Norte/Sul; b) sentido Sul/Norte	72
Figura 43 – Esquema em perfil longitudinal para a solução otimizada de substituição das camadas existentes: a) sentido Norte/Sul; b) sentido Sul/Norte	73

Figura 44 – Análise comparativa dos custos estimativos para cada solução.....	77
Figura 45 – Degradações superficiais do pavimento provocadas por: a) problemas de drenagem; falta de conservação	78
Figura 46 – Degradação superficial do pavimento: a) ninhos e peladas associadas a um elevado nível de fendilhamento do tipo “pele de corcodilo”; b) fendilhamento generalizado do pavimento	78
Figura 47 – Acumulação de água na superfície do pavimento por falta de conservação corrente.....	79
Figura 48 – Anomalias na drenagem de águas pluviais	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Extensão das estradas desclassificadas em Barcelos	11
Tabela 2 – Classe, tipologia e cargas por eixos, dos veículos pesados (adaptado de Pais e Pereira, 2016)	46
Tabela 3 – Classificação dos valores de IRI (EP, 2014)	50
Tabela 4 – Valores de referência do IRI (adaptado de EP, 2014)	50
Tabela 5 – Valor estimativo do custo de produção das misturas betuminosas consideradas.....	56
Tabela 6 – Valores de NAEP (para 20 anos) dos locais de contagem	57
Tabela 7 – Extensão e deflexão característica de cada trecho de comportamento homogêneo	63
Tabela 8 – Percentagem de valores que cumprem os limites especificados	65
Tabela 9 – Representação do modelo estrutural de cada trecho	68
Tabela 10 – Estimativa do dano e vida útil para a solução de reforço do pavimento	71
Tabela 11 – Estimativa do dano e vida útil para a solução de substituição integral das camadas betuminosas existentes	72
Tabela 12 – Estimativa do dano e vida útil para a Solução 1 do novo pavimento.....	74
Tabela 13 – Estimativa de custo da solução de reforço com sobreposição de novas camadas	75
Tabela 14 – Estimativa de custo da solução de substituição integral das camadas betuminosas existentes	76
Tabela 15 – Estimativa de custo da solução de otimização das espessuras a reabilitar	76
Tabela 16 – Avaliação multidimensional das soluções.....	77

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

Num mundo em contínuo crescimento e transformação, as ligações rodoviárias assumem cada vez mais importância no progresso e bem-estar da sociedade moderna. A construção de infraestruturas rodoviárias eficientes e sustentáveis, determinante para a mobilidade de pessoas, bens e serviços, desempenham um papel decisivo na promoção e continuidade do desenvolvimento integrado de um território, contribuindo diretamente para o fortalecimento da sua estrutura económica e social (Mendes, 2011).

No período pós-Segunda Guerra Mundial, durante a chamada “idade de ouro do crescimento económico”, Portugal assistiu a um forte crescimento do setor rodoviário, impulsionado pelo aumento expressivo do uso de veículos motorizados. Em resposta às crescentes necessidades viárias do país, a Junta Autónoma das Estradas (JAE), então responsável pela gestão rodoviária, implementou uma profunda reestruturação da rede rodoviária nacional. Este ambicioso programa de modernização levou à atualização e expansão das infraestruturas viárias em todo o território, com o objetivo de melhorar a economia através de uma maior conectividade e reduzir as desigualdades entre regiões do continente (Amaral, 2019).

Apesar da expansão significativa da Rede Rodoviária Nacional (RRN) ao longo dos anos, destinada a acompanhar o aumento do uso de veículos motorizados no país, os projetos de desenvolvimento enfrentaram problemas significativos no que diz respeito à eficiência da gestão e manutenção da rede viária.

Atualmente, uma parte desta importante infraestrutura de transporte está sob responsabilidade das autarquias municipais e locais. No entanto, a falta de recursos financeiros e de profissionais envolvidos tem dificultado a manutenção adequada das infraestruturas, representando um desafio para os gestores diretos.

A redução do investimento no setor rodoviário, aliada à falta de planos estratégicos e eficazes de gestão, compromete significativamente a funcionalidade das vias. O aumento contínuo do número de utilizadores, combinado com a carência de medidas preventivas e de atividades regulares de manutenção, surgem como fatores responsáveis para o atual estado de degradação de muitas estradas.

O município de Barcelos possui uma extensa rede viária que ultrapassa os 2100 km, predominantemente composta por estradas em pavimento asfáltico, organizada em 61 freguesias (89 freguesias antes da reorganização administrativa). A maior parte destas vias encontram-se sob a jurisdição da autarquia municipal e das autarquias locais. Para contextualizar, os 2100 km de estradas do município representam cerca de 1/7 da extensão total da rede rodoviária gerida pela Infraestruturas de Portugal (IP), que, em 2021, somava 15 056 km em todo o território nacional (IP, 2021b).

Nas últimas duas décadas, a falta de investimento na manutenção das infraestruturas rodoviárias tem resultado em condições de funcionalidade precárias em determinados eixos da rede do concelho. Este problema é particularmente evidente nas vias coletoras que se interligam ao anel rodoviário da cidade, fundamental para o escoamento de uma parte significativa do parque industrial do município.

Em relação ao trecho de 13 km de estrada que será objeto de estudo neste trabalho de dissertação, partes do pavimento encontram-se em avançado estado de degradação, resultado do fim do ciclo de vida e das intervenções realizadas no âmbito da instalação de sistemas de recolha de águas residuais. Com o passar do tempo, o pavimento, sujeito à circulação intensiva de tráfego pesado, começou a evidenciar sinais claros de fadiga, especialmente nas áreas que foram intervencionadas para a colocação de coletores e ramais de águas.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo técnico sobre a reabilitação de um troço de 13 km da Estrada Nacional 306, doravante designada EN306, com início localizado na margem sul do município de Barcelos. Paralelamente, o trabalho visa realizar uma avaliação técnica das condições atuais da infraestrutura, com foco na reabilitação e conservação do trecho em questão. Com base nos dados obtidos em campo, pretende caracterizar-se o estado atual do pavimento, seguido do dimensionamento da reabilitação, com recurso a técnicas de pavimentação mais sustentáveis.

Desta forma, o estudo pretende apresentar uma análise técnico-científica centrada na eficiência de custos e na preservação dos recursos naturais, promovendo soluções inovadoras utilizadas na reabilitação de pavimentos rodoviários.

Adicionalmente, o trabalho procura evidenciar a importância de práticas preventivas de controlo e conservação periódica para preservar a funcionalidade da via ao longo do tempo. Deste modo, a avaliação das infraestruturas existentes, como por exemplo a rede de drenagem de águas pluviais, poderão facilitar

na identificação de problemas e sugerir soluções para evitar a degradação precoce do pavimento. Desta forma, o projeto não visa apenas a reabilitação da estrada, mas também sugere a implementação de medidas preventivas de manutenção contínua, de forma a garantir a operacionalidade da via a longo prazo.

1.3. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

Inicialmente este trabalho apresenta uma revisão sobre a evolução da rede viária em Portugal, destacando a sua importância territorial, económica e social. Para o enquadramento do tema, e com recurso à pesquisa bibliográfica, faz-se uma abordagem à estruturação histórica da Rede Rodoviária Nacional, bem como os Planos Rodoviários Nacionais que impulsionaram a modernização das infraestruturas. A abordagem foca ainda o processo de desclassificação de estradas e transferência de gestão, com um olhar particular para o concelho de Barcelos. Adicionalmente, são apresentados métodos utilizados para avaliar o estado dos pavimentos rodoviários, divididos entre a Avaliação Funcional, que analisa o desempenho superficial, e a Avaliação Estrutural, que foca o comportamento mecânico das camadas do pavimento. Por fim, a revisão da literatura explora a conservação dos pavimentos, destacando os tipos de pavimentos utilizados em Portugal e as técnicas de reabilitação, com especial atenção às técnicas de reciclagem, que contribuem para a sustentabilidade da repavimentação.

Na parte prática, a dissertação apresenta um estudo sobre a reabilitação de um trecho da EN306, situado na margem sul do concelho de Barcelos, com o objetivo de comparar diferentes alternativas de intervenção. As soluções avaliadas envolvem o uso de diferentes métodos e tipos de material betuminoso, seja convencional ou composto por 50% de material fresado. O estudo iniciou com a recolha de dados em campo, que serviram como base para o dimensionamento das propostas de reabilitação. A partir dos dados obtidos, realizaram-se análises e cálculos que visam identificar as alternativas mais eficientes para a intervenção.

Por fim, apresentam-se as conclusões do trabalho, sintetizando os principais resultados obtidos e as propostas para estudos futuros, tendo em consideração os aspetos que não foi possível abordar durante o período de realização desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo analisa a evolução e gestão da rede viária em Portugal, destacando a sua importância territorial, económica e social.

A primeira parte aborda a estruturação histórica da Rede Rodoviária Nacional, a sua inserção no contexto europeu e os Planos Rodoviários Nacionais que moldaram a modernização das infraestruturas. Segue-se o processo de desclassificação de estradas e a transferência de gestão, focando-se no concelho de Barcelos.

A segunda parte incide sobre os métodos utilizados para avaliar o estado dos pavimentos rodoviários. A abordagem divide-se em duas vertentes complementares: a Avaliação Funcional, que verifica o desempenho superficial, e Avaliação Estrutural focada no comportamento das camadas internas do pavimento.

Por fim, a terceira parte explora a conservação dos pavimentos, com foco na durabilidade e funcionalidade das vias. São ainda abordados os tipos de pavimentos utilizados em Portugal, designadamente os flexíveis, semirrígidos e rígidos, assim como as técnicas de reabilitação, com especial atenção para as técnicas de reciclagem mais usuais na pavimentação.

2.1. REDE VIÁRIA

Desde sempre que as deslocações tiveram um papel importante na humanidade. Os trajetos frequentes e necessários até um determinado local, como seja, as deslocações aos cursos de água para aliviar a sede, conduziram à nascença oportuna de uma vereda ou de um carreiro. Com o decorrer do tempo e do uso crescente, determinados carreiros ganharam definição e forma, passando a ser identificados como caminhos e, pelo uso intensivo, acabaram por ser designadas como estradas.

Da necessidade em encurtar distâncias ou mesmo de povoar localidades, foram planeadas e abertas novas estradas, mais ou menos diferenciadas, dando origem a uma vasta e complexa estrutura rodoviária entrelaçada, que estabelece a ligação territorial.

Abordando deste modo a temática da rede viária nacional, atualmente, a Infraestruturas de Portugal, sob a orientação do Estado, assume a responsabilidade pela gestão da rede rodoviária estruturante do território nacional. Esta rede é composta por estradas e autoestradas que suportam o tráfego em longas

distâncias, garantido a comunicação rodoviária entre regiões, distritos, concelhos, bem como a ligação aos principais polos económicos, zonas portuárias e limites fronteiriços.

2.1.1. Rede Rodoviária Nacional

O desenvolvimento das infraestruturas rodoviárias assume grande importância no crescimento económico e populacional de qualquer território (Rocha *et al.*, 2023). A partir do final dos anos 80 e o início dos anos 90, Portugal registou uma evolução significativa nas suas infraestruturas rodoviárias, impulsionada pela execução do Plano Rodoviário Nacional, no âmbito da integração do país na União Europeia. Este período ficou marcado pela expansão da rede de Itinerários Principais (IP) e Itinerários Complementares (IC), que fortaleceu a conectividade e a coesão territorial, enquanto impulsionou o desenvolvimento económico do país. Estas melhorias infraestruturais constituíram um pilar fundamental para a integração de Portugal no espaço europeu.

Antes de proceder à análise da rede rodoviária a nível nacional, é importante considerar alguns dados sobre as infraestruturas rodoviárias numa escala global. A próxima abordagem pretende facilitar a contextualização da densidade das infraestruturas rodoviárias no território nacional, permitindo a sua comparação com outros estados/países.

Assim, e como se pode verificar na Figura 1, no contexto global das infraestruturas rodoviárias, em 2020 a União Europeia (UE-27) dispunha de uma extensa rede de estradas pavimentadas, totalizando 4,5 milhões de quilómetros, de acordo com dados da Federação Rodoviária da União Europeia (ERF). Esta dimensão coloca a rede rodoviária europeia ao nível das maiores do mundo, comparável apenas à dos Estados Unidos e da China.

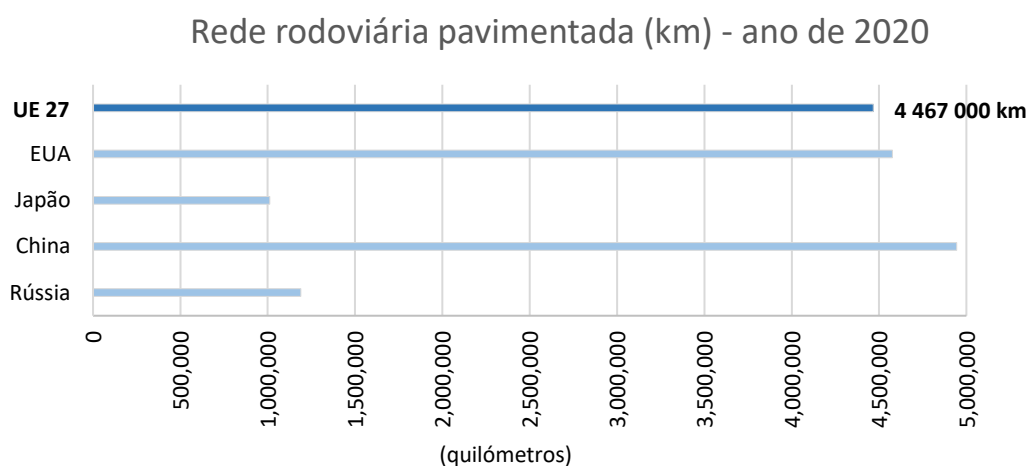


Figura 1 – Rede rodoviária pavimentada das principais economias no ano de 2020 (dados obtidos a partir de IRF, 2021)

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Para efeito de comparação, no mesmo ano, o Japão possuía uma rede rodoviária de 1 milhão de quilómetros, enquanto a Rússia contava com 1,2 milhões de quilómetros (IRF, 2021).

Relativamente às infraestruturas rodoviárias no espaço da zona Euro, os dados divulgados pelo Eurostat em 2021 destacam uma extensão significativa de autoestradas nas regiões mais desenvolvidas da União Europeia, conforme ilustrado na Figura 2. Portugal acompanha esta tendência apresentando uma densidade média de 34 km de autoestradas por cada 1000 km², o que reflete o investimento contínuo na melhoria da conectividade e acessibilidade rodoviária no país e nações vizinhas (Eurostat, 2023, Rocha *et al.*, 2023).

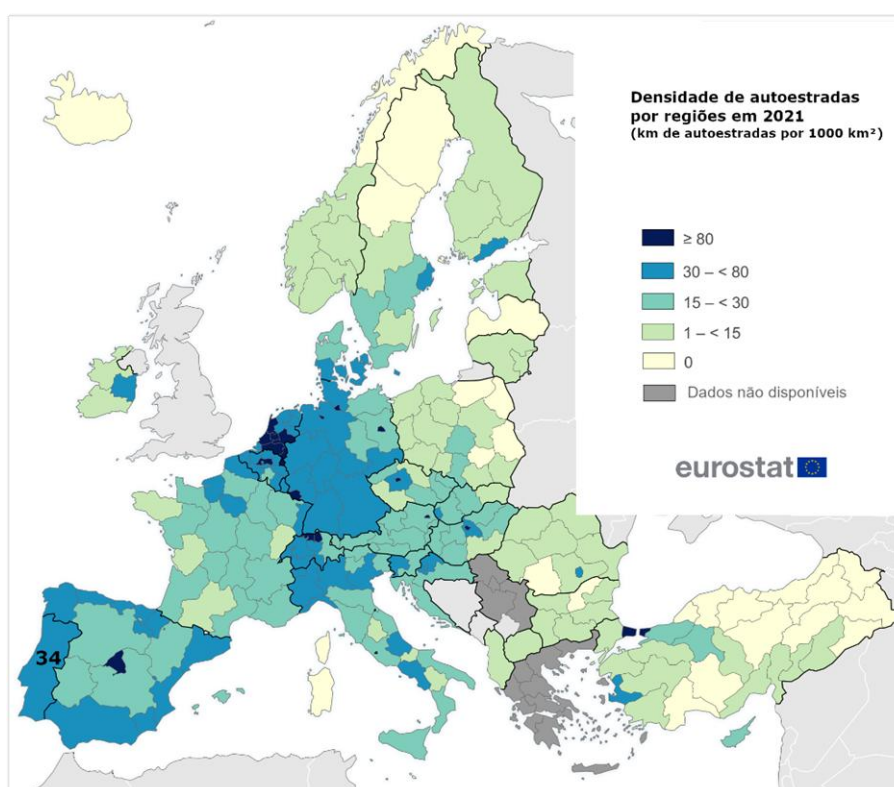


Figura 2 – Densidade de rede de autoestradas na Europa (adaptado de Eurostat, 2023)

No território continental, a rede rodoviária é constituída por uma vasta malha de estradas e autoestradas que totalizam 30.902 km de extensão. Dentre este total, 14.325 km estão integrados no Plano Rodoviário Nacional, sob a gestão direta da Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP, 2021b, IRF, 2021). Como se verifica na Figura 3, esta rede abrange autoestradas, estradas nacionais, estradas regionais, itinerários principais, itinerários complementares e ramos de ligação, estabelecendo conexões importantes entre as diversas regiões do país e da vizinha Espanha.

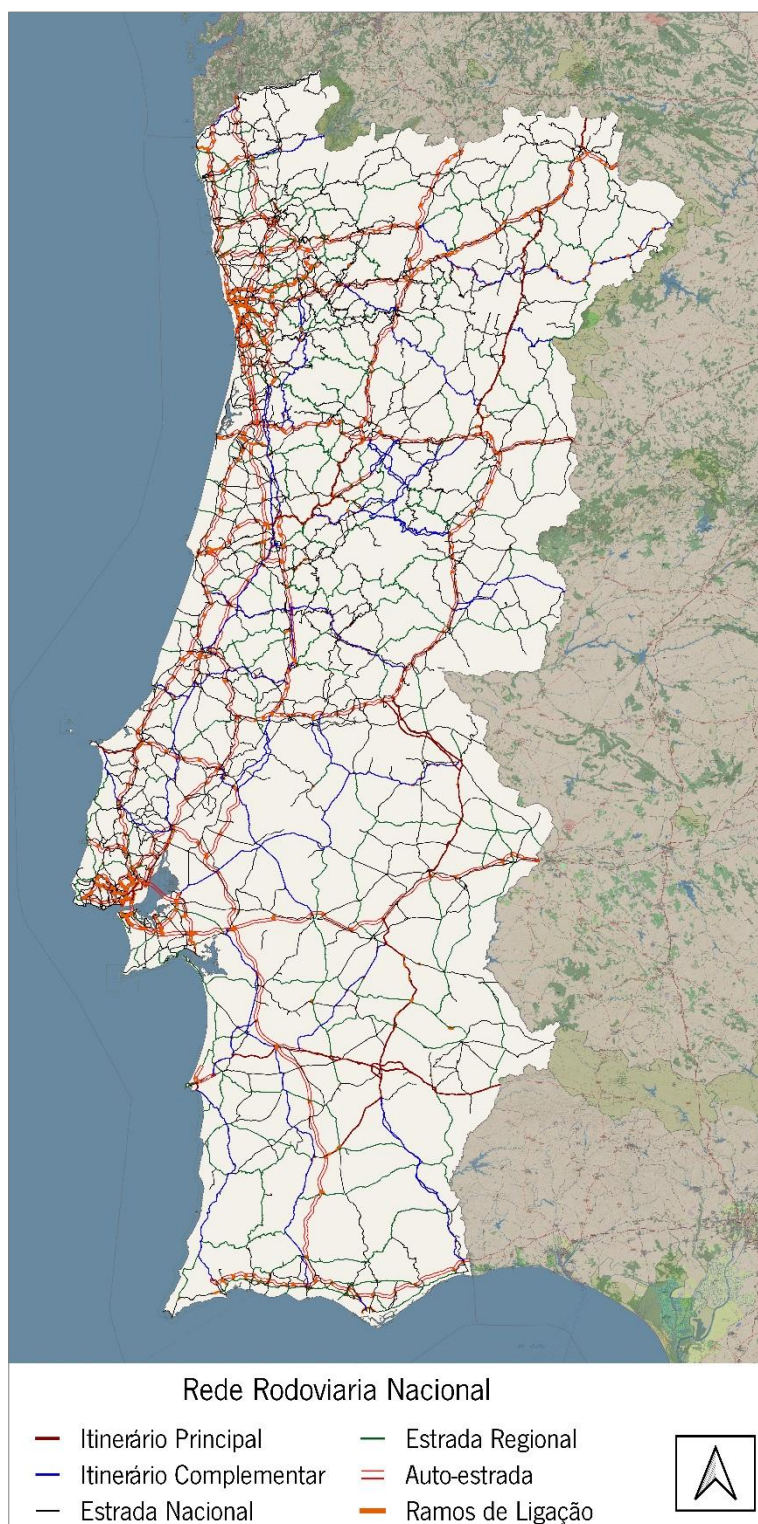


Figura 3 – Rede rodoviária nacional (imagem obtida através de *software* SIG a partir de <https://dados.gov.pt/pt/datasets/rede-rodoviaria-nacional/>)

2.1.2. Sinopse ao Plano Rodoviário Nacional

Atualmente, com a crescente utilização de automóveis nas estradas do continente, torna-se imperativo proceder à reestruturação das redes viárias, a fim de garantir o seu uso às exigências territoriais e às necessidades dos utilizadores. Esses requisitos exigem uma atuação coerente e disciplinada, pautada

por diretrizes estabelecidas pelo Plano Nacional Rodoviário. Neste sentido, os próximos parágrafos apresentam uma análise sucinta dos três Planos Rodoviários Nacionais (PRN45, PRN85 e PRN2000), documentos fundamentais que definem as necessidades das comunicações rodoviárias em Portugal.

Plano Rodoviário de 1945

Em Portugal, na metade do século XX, durante a revolução industrial que se seguiu à Segunda Guerra Mundial, surge o primeiro Plano Rodoviário Nacional em 1945. O PRN45, estabelecido pelo Decreto-Lei 34:593 em 11 de maio de 1945, conferiu a classificação viária previamente definida pelo Decreto-Lei nº 23:239 de 20 de novembro de 1933.

O Plano Rodoviário Nacional de 1945 (PRN45) foi organizado em cinco capítulos que abordaram a classificação de 21 mil quilómetros de vias com a caracterização das estradas nacionais, municipais e caminhos públicos. Neste Plano, as estradas nacionais foram reclassificadas e hierarquizadas em três classes, de acordo com a sua relevância estratégica: as estradas de 1.^a classe ligam entre si os principais centros urbanos, portos e fronteiras; as estradas 2.^a classe complementam a rede fundamental com a ligação dos principais centros de cada distrito às estradas de 1.^a classe; e as estradas 3.^a classe interligam os concelhos, servindo regiões ricas, portos, estações ferroviárias e áreas turísticas (MOPC, 1945, Pacheco, 2001).

O Plano, coordenado pela Junta Autónoma das Estradas (JAE), resultou numa expansão de 20.597 km de estradas nacionais classificadas em todo o país, com um impacto importante na redução da distância entre regiões geograficamente mais isoladas (Farinha, 2021).

Plano Rodoviário Nacional de 1985

Para dar resposta aos avanços socioeconómicos, às transformações demográficas e ao aumento do tráfego registados desde a implementação do Plano Rodoviário de 1945, foi desenvolvido o Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN85), consagrado no Decreto-Lei n.º 380/85, de 26 de setembro.

O PRN85 definiu como principais objetivos assegurar o funcionamento eficiente do sistema de transporte rodoviário através de uma rede modernizada, promover o desenvolvimento regional, reduzir os custos dos transportes, aumentar a segurança rodoviária, responder às exigências do tráfego internacional e otimizar a gestão financeira e administrativa das infraestruturas. Este plano de modernização foi também um elemento crucial para a integração de Portugal na União Europeia (Rangel de Lima, 1995).

Este novo Plano introduziu os conceitos de rede nacional fundamental e rede nacional complementar, representadas a vermelho e azul, respetivamente, na Figura 4b. No âmbito desta reestruturação, cerca de 12 000 km de estradas nacionais foram desclassificadas e transferidas para a rede municipal, sob a responsabilidade das autarquias, passando a ser conhecidas como Estradas Desclassificadas. Como resultado desta transferência, a Rede Nacional Rodoviária foi reduzida a cerca de 10 000 km, divididos em 2 700 km de rede fundamental, composta por itinerários principais, e 7 300 km de rede complementar, que inclui itinerários complementares e outras vias (MES, 1985, DPL e GCGSI, 2011).

Plano Rodoviário Nacional de 1998

Conhecido como PRN2000, a última revisão do Plano Rodoviário Nacional, realizada em 1998, introduziu mudanças significativas na rede viária do país. Entre as principais alterações, destacou-se a expansão da rede nacional complementar, que passou a incluir Itinerários Complementares (ICs) e Estradas Nacionais (ENs), reforçando a estrutura rodoviária e melhorando a conectividade entre diferentes regiões.

Com o Decreto-Lei n.º 222/98, a rede viária foi ampliada para 11 350 km com a criação de uma extensa rede de autoestradas, representando mais da metade da extensão da rede de Itinerários Principais (IPs) e Itinerários Complementares (ICs).

O PRN2000 também teve como objetivo melhorar a cobertura territorial, completar as redes viárias e aprimorar as acessibilidades aos concelhos, com o intuito de corrigir as desigualdades socioeconómicas no território continental. A qualidade da rede rodoviária foi uma prioridade, com especial atenção à proteção ambiental nas áreas urbanas e à criação de variantes e anéis circulares nas principais cidades, visando uma distribuição mais eficiente do tráfego rodoviário.

No âmbito da segurança rodoviária, esta revisão do PRN introduziu a realização de auditorias regulares e a implementação de planos anuais de segurança. Para otimizar a gestão da rede e aumentar a eficiência do sistema de transporte, foram integrados sistemas inteligentes de informação e monitorização do tráfego rodoviário (MEPAT, 1998).

A Figura 4 ilustra a evolução da Rede Rodoviária Nacional (RRN) desde o primeiro Plano Rodoviário Nacional (PRN45) até ao último (PRN2000). Apresentados em ordem cronológica, os mapas oferecem uma visão da expansão da rede ao longo das décadas, evidenciando o crescimento e o alargamento das infraestruturas rodoviárias em todo o território nacional. Nas imagens, verifica-se uma maior densidade da rede rodoviária, particularmente no centro litoral e no quadrilátero da região norte, em correlação com

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

a distribuição da densidade populacional (Rocha *et al.*, 2023). Estes dados podem sugerir um desenvolvimento económico mais acentuado nessas áreas.

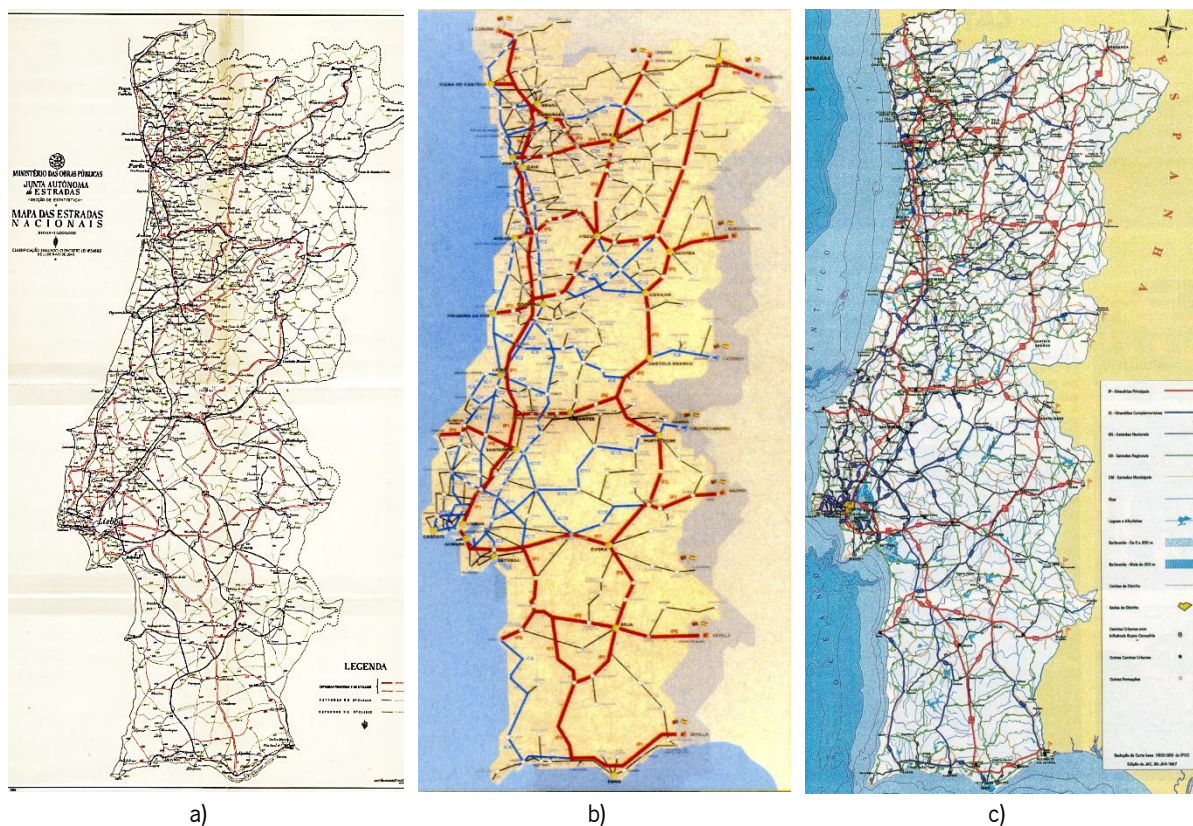


Figura 4 – Evolução do PRN: a) PRN45 (JAE, 1950); b) PRN85 (DPL e GCGSI, 2011); c) PRN2000 (DPL e GCGSI, 2011)

2.1.3. Estrada Desclassificada

De acordo com o estabelecido na legislação em vigor, o termo "Estrada desclassificada" refere-se a todas as estradas que anteriormente pertenciam à RRN, e que, com a sua desclassificação, deixaram de integrar a Rede. A designação é atribuída às estradas que perderam a sua integração na RRN, sendo aplicadas alterações na categoria da estrada e nas responsabilidades de gestão (Lei 34/2015, 2015).

Até à data, no concelho de Barcelos, foi transferido para a rede municipal um total de 57,13km de estradas anteriormente integradas na Rede Rodoviária Nacional, conforme se descreve na Tabela 1.

Os planos de desclassificações das Estradas Nacionais no concelho foram decorrentes da construção de novas variantes no município ou submetidas ao Programa de Requalificação da Rede Rodoviária Nacional, do PRN2000.

A gestão da EN306, que atravessa o concelho de Barcelos, foi passada para domínio municipal no dia 15 de abril de 2004, mediante a formalização de um Auto de Entrega entre o município de Barcelos e o

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Instituto das Estradas de Portugal, entidade gestora da Rede Rodoviária Nacional naquela época (MOPTH e CMBarcelos, 2004).

A Figura 5 e Tabela 1 mostram as estradas nacionais existentes no município de Barcelos e as extensões dos lanços de estrada que foram alvo do processo de desclassificação.

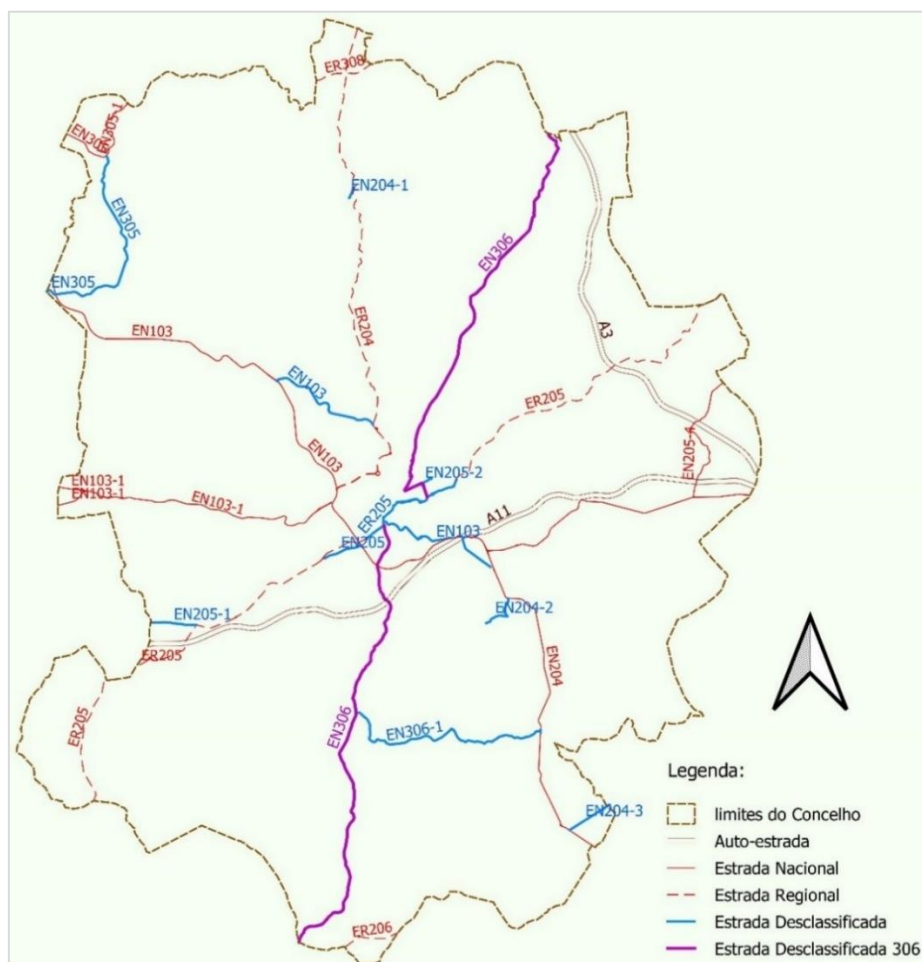


Figura 5 – Rede rodoviária de Barcelos (imagem obtida através de *software* SIG a partir de <https://dados.gov.pt/pt/datasets/rede-rodoviaria-nacional/>)

Tabela 1 – Extensão das estradas desclassificadas em Barcelos

Estrada	Extensão Total (km)	Extensão Desclassificada (km)
E.N. 103	34,907	7,160
E.N. 204 -1	0,358	0,358
E.N. 204 -2	1,290	1,290
E.N. 204 -3	1,529	1,529
E.N. 205	1,149	1,149
E.N. 205 -1	1,329	1,329
E.N. 205 -2	0,486	0,486
E.N. 305	7,666	6,300
E.N. 306	26,419	26,419
E.N. 306 -1	6,660	6,660
E.R. 205	28,178	4,445
TOTAL:	109,971	57,125

2.2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ESTADO DE PAVIMENTOS

2.2.1. Introdução

Durante a fase de exploração de uma estrada, as avaliações periódicas do estado do pavimento são elementares para analisar e avaliar o desempenho da infraestrutura. Estas avaliações permitem verificar a conformidade dos parâmetros para os quais a estrada foi projetada e identificar as necessidades de intervenções, seja em trabalhos de conservação ou de reabilitação. A qualidade destas avaliações, implementadas no momento adequado, são determinantes no apoio a decisões que possam garantir a funcionalidade da infraestrutura e no prolongamento do seu ciclo de vida.

Assim, esta secção irá abordar alguns métodos de avaliação da qualidade de um pavimento, com a descrição dos parâmetros adotados na avaliação estrutural e funcional de um pavimento do tipo flexível.

A avaliação do estado do pavimento opera em dois domínios elementares designados: Avaliação Funcional e Avaliação Estrutural. Cada um desses domínios será caracterizado nos parágrafos seguintes, incluindo a sua subdivisão em parâmetros que permitem uma leitura objetiva do estado em que um determinado tipo de pavimento se apresenta.

De acordo com a sua designação, a Avaliação Funcional traduz-se numa técnica que verifica o estado de desempenho da superfície do pavimento a partir do registo de irregularidades geométricas (regularidade longitudinal e transversal), observação das condições funcionais da superfície do pavimento (estado superficial), e da apreciação da aderência do pneu em contacto com o pavimento (textura e atrito). A Avaliação Funcional realiza-se através de ensaios no local, utilizando equipamentos técnicos de medição e análise detalhada das condições da infraestrutura, alguns dos quais serão apresentados de seguida.

Já a Avaliação Estrutural compreende a análise do comportamento de uma estrutura de pavimento, através de cargas induzidas que simulam as condições reais de circulação. Esta análise visa obter informações abrangentes sobre as propriedades mecânicas e a capacidade de suporte do pavimento, desde a fundação até às diversas camadas que o compõem, com o propósito de avaliar o nível de desempenho mecânico em que a estrada se apresenta. Assim como na Avaliação Funcional, esta análise requer o uso de equipamentos apropriados para o efeito.

Para verificar a constituição das camadas estruturais do pavimento, desde a fundação até à camada de desgaste, são realizados ensaios complementares de prospeção geotécnica, nos quais se procede à caracterização estrutural do pavimento. Este processo, que envolve a abertura de poços de sondagem e

a perfuração das camadas por meio do método de carotagem, possibilitando a análise da constituição das diferentes camadas do pavimento. De um modo geral, a abertura de poços permite um diagnóstico estrutural de todas as camadas sobrejacentes ao solo de fundação, enquanto a recolha de carotes possibilita apenas a recolha de dados das camadas betuminosas. Não obstante, é oportuno indicar que estes métodos não fornecem registos contínuos das propriedades que se pretendem, sendo por isso uma caracterização complementar e não um parâmetro de estado (Branco *et al.*, 2016).

Deste modo, e como ilustra o esquema da Figura 6, a estrutura da Avaliação do Estado do Pavimento encontra-se organizada de seguinte forma:

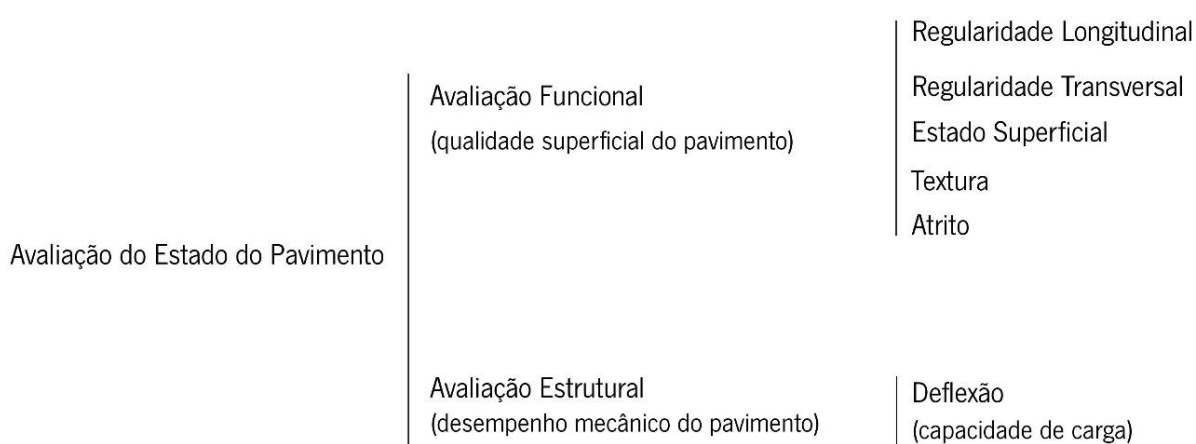


Figura 6 – Esquema dos parâmetros de avaliação do estado do pavimento

2.2.2. Regularidade Longitudinal

Entende-se por Regularidade Longitudinal a ausência de irregularidades, variáveis em grau, causadas por defeitos na construção da infraestrutura ou na degradação progressiva ao longo do ciclo de vida da estrada (Boulet *et al.*, 2009).

Além de intensificar a fadiga da estrutura da estrada, a irregularidade longitudinal também interfere na dinâmica do tráfego, comprometendo as condições de circulação dos utilizadores, designadamente, na segurança do trânsito, comodidade de circulação, desgaste da viatura e no consumo de combustível.

No âmbito da avaliação do estado do pavimento, o aparelho de medição do tipo “perfilómetro a laser” destaca-se como um dos equipamentos mais utilizados para medir o índice de irregularidade internacional (da terminologia inglesa: International Roughness Index - IRI), um indicador determinante na avaliação do parâmetro de Regularidade Longitudinal do pavimento.

Atualmente, esses equipamentos de grande fiabilidade, tal como o perfilómetro a laser RST (IP, 2021a) que será descrito no parágrafo seguinte, permitem uma leitura dos parâmetros de Regularidade Longitudinal, Regularidade Transversal e do Estado Superficial do pavimento.

Perfilómetro Laser (Laser Road Surface Tester - Laser RST)

O perfilómetro a laser RST consiste num equipamento de medição contínua acoplado a um veículo, semelhante ao apresentado na Figura 7, composto por diversos leitores de medição dos quais poderão incluir lasers, acelerómetros, inclinómetros, giroscópio, unidade de medição de distância, e GPS. Este equipamento de ensaio permite obter dados de alta resolução do perfil longitudinal e transversal da estrada com valores próximos da escala micro, assim como o cálculo dos parâmetros de irregularidade (IRI), inclinação da superfície e raio de curvatura. Adicionalmente, fornece informações sobre a macrotextura superficial, registos videográficos, e elementos das estradas incluindo características do pavimento, geometria, tráfego e intervenções de conservação (IP, 2021c).



Figura 7 – Exemplo de perfilómetro a laser RST (IP, 2021a)

2.2.3. Regularidade Transversal

A Regularidade Transversal, tal como a Regularidade Longitudinal, representa um critério de medida preponderante na análise do estado e da uniformidade da superfície do pavimento.

Este parâmetro permite registar dados de deformações ou fendas localizadas na zona de passagem dos rodados dos veículos, elementos que poderão revelar uma possível fadiga da camada de desgaste do pavimento. Adicionalmente, este parâmetro possibilita a caracterização das condições de drenagem superficial, como a inclinação transversal da estrada e as áreas suscetíveis à acumulação de água.

Os métodos utilizados na recolha de parâmetros Regularidade Transversal poderão ser métodos manuais ou automatizados. Os métodos manuais incluem a inspeção visual, realizada através da observação direta do pavimento, e o uso de réguas para medir as irregularidades à superfície da estrada. Já nos

métodos automatizados, é comum o uso de equipamentos do tipo “perfilómetro a laser” para o levantamento dos dados. No entanto, para avaliar a Regularidade Transversal, Regularidade Longitudinal e do Estado Superficial, o scanner de perfil de estrada (Pavement Profile Scanner - PPS) desempenha funções semelhantes ao do perfilómetro a laser, utilizando a análise baseada em imagens termogramas.

Scanner de Perfil de Estrada (Pavement Profile Scanner - PPS)

O scanner de perfil de estrada (PPS) representado na Figura 8, consiste num dispositivo de alta precisão que utiliza tecnologia de deteção remota de imagem (Light Detection And Ranging - LiDAR) para a avaliação do estado da superfície de rodagem, no perfil longitudinal e transversal, independentemente da velocidade de deslocamento. À semelhança do perfilómetro laser (Laser Road Surface Tester - Laser RST) este equipamento permite a obtenção de dados num parâmetro de precisão inferior ao milímetro, através de um feixe laser que gera um modelo tridimensional da superfície, sendo uma solução viável para a caracterização da superfície do pavimento e deteção de anomalias, contribuindo para a melhoria da segurança e durabilidade do pavimento (Aurstad et al., 2019).



Figura 8 – Scanner de perfil de estrada (Fraunhofer IPM, 2018)

2.2.4. Estado Superficial

Com o decréscimo da vida útil da estrada e os múltiplos efeitos resultantes das solicitações provocadas pelo tráfego, o Estado Superficial do pavimento tende a diminuir gradualmente as suas qualidades, afastando-se das condições de desempenho para as quais a infraestrutura foi originalmente projetada. A avaliação deste parâmetro pretende determinar e classificar o estado de degradação da superfície do pavimento, mediante o registo das patologias observáveis na estrada.

Quanto às metodologias e técnicas de análise na avaliação do estado de conservação da superfície de pavimento, um levantamento do Estado Superficial pode ser feito através da observação visual ou a inspeção visual assistida por meios informáticos (por exemplo, VIZIROAD) para registar anomalias.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Na observação visual em campo, a avaliação das degradações superficiais é geralmente realizada com recurso a catálogos específicos desenvolvidos para este fim, como o “Catalogue des Dégradations de Surface des Chaussées” do LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, e o “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários” da IP. Estes guias têm como finalidade uniformizar a identificação, classificação e descrição das patologias observadas nas superfícies rodoviárias. Para tal, disponibilizam fichas ilustrativas organizadas de forma hierárquica, contendo imagens representativas de diferentes tipos de degradação (Figura 9). Estas fichas técnicas permitem uma correspondência entre as patologias identificadas no terreno e o respetivo nível de gravidade, classificado em três níveis.



Fenda longitudinal - nível 2 (LCPC)



Fenda longitudinal - nível 2 (IP)



Fenda longitudinal - nível 3 (LCPC)



Fenda longitudinal - nível 3 (IP)



Pele de crocodilo - nível 3 (LCPC)



Pele de crocodilo - nível 3 (IP)

Figura 9 – Exemplos de degradações superficiais do tipo “fendilhamento/pele de crocodilo” (LCPC, 1998, EP, 2008)

Um outro método alternativo para a observação do estado superficial do pavimento, destacado pelos autores Vyas *et al.* (2020) e Plati *et al.* (2014) nos seus artigos, envolve a utilização de equipamento de termografia infravermelha (IRT). Esta técnica, regularmente usada em laboratórios, recorre a imagens térmicas para identificar falhas na superfície do pavimento, através de sensores que captam a radiação térmica emitida pela mesma.

Quanto aos métodos que envolvem o uso de equipamentos mais complexos na análise dos pavimentos, destes destacam-se o perfilómetro e scanner, equipamentos cujas funções foram já mencionadas em secções anteriores.

Relativamente a novas técnicas de inspeção, tem-se verificado avanços significativos no desenvolvimento de sistemas automatizados de apoio à análise de pavimentos, como é o caso do equipamento Laser Crack Measurement System (LCM), um dispositivo de medição com tecnologia laser que possibilita uma monitorização eficiente da superfície rodoviária.

Sistema de Medição de Fendas a Laser (LCMS - (Laser Crack Measurement System))

O sistema de medição de fendas a laser (LCMS) define-se como um equipamento de tecnologia de vanguarda, projetado para monitorizar as condições da superfície do pavimento rodoviário. Através de câmaras de alta velocidade com ótica personalizada e projetores de linha laser, este equipamento de varrimento a laser, semelhante ao ilustrado na Figura 10, gera imagens 2D e perfis 3D de alta resolução. Esta tecnologia permite a deteção de anomalias superficiais mais ou menos pronunciadas, a avaliação da macrotextura, identificação do desgaste do pavimento, entre outras características.



Figura 10 – Sistema de Medição de Fendas a Laser (TII, 2020)

A versatilidade deste equipamento permite operar em diferentes condições de luminosidade, diurnas ou noturnas, indiferente à luminosidade solar e às sombras. Com a vantagem de recolher informação de diversos tipos de pavimento, com velocidades de até 100 km/h, o equipamento destaca-se pela

capacidade de detetar fendas, marcações de pavimento, empolamentos, peladas e desgaste da superfície do pavimento. As medições rigorosas apresentam-se com uma precisão no alinhamento transversal de 1 mm, e na profundidade de 0,5 mm (TII, 2020).

2.2.5. Textura

No contexto da segurança rodoviária, a Textura Superficial tende a avaliar a resistência à derrapagem (fricção) e a aderência na interface entre pneu e pavimento (InIR, 2024).

A Textura do pavimento representa uma característica determinante na comodidade e segurança dos automobilistas. A sua configuração geométrica tem uma ação direta nos fatores de aderência entre o pneu e o pavimento, bem como no sistema de drenagem para prevenir a acumulação de água na superfície do pavimento.

No plano de interação entre o pavimento e o veículo, a textura do pavimento é caracterizada pelas suas irregularidades superficiais, as quais se subdividem em três níveis: microtextura, macrotextura e megatextura.

De acordo com a norma 13473-5 da ISO (2009), a classificação da textura de um pavimento é determinada com base no seu comprimento de onda (medido na horizontal) e na sua amplitude (medida na vertical). As classificações das diferentes texturas apresentam-se de seguinte modo:

- A microtextura compreende uma escala que varia de 0 a 0,5 mm na horizontal, e 0 a 0,2 mm na vertical. Este tipo de textura define-se pelas características angulares e rugosas das pequenas partículas impercetível a olho nu, existentes na superfície do pavimento. A microtextura afeta diretamente a aderência dos pneus em contacto com a superfície, com efeitos na resistência ao deslizamento;
- A macrotextura compreende variação de 0,5 e 50 mm na horizontal, e 0,2 a 10 mm na vertical. As superfícies de pavimento são projetadas com uma macrotextura definida para garantir uma boa drenagem da água na interface entre o pneu e o pavimento. Segundo um estudo conduzido por Pranjic *et al.* (2020), este tipo de textura desempenha funções determinantes na resistência à derrapagem em alta velocidade;
- A megatextura compreende uma escala com ordens de grandeza que vai desde 50 e 500 mm na horizontal, e 0,1 a 50 mm na vertical. Caracterizada pela irregularidade superficial, a megatextura está frequentemente associada à degradação do pavimento, exercendo efeitos na vibração dos veículos e, por conseguinte, na instabilidade da condução e segurança rodoviária.

Tomando as referências dos autores Sulandari *et al.* (2023) e Hun (2002), no âmbito da Textura do pavimento, enquanto a microtextura descreve a regularidade da superfície do agregado, a macrotextura representa a rugosidade da camada de mistura betuminosa. Já a megatextura resulta de uma modificação não intencional da superfície de pavimento, geralmente associada a degradações superficiais como por exemplo ninhos e peladas.

Em matéria da segurança, tendo em conta as condições de permeabilidade (fatores climáticos) e da aderência do pavimento (fatores de segurança), alguns estudos indicam que o aumento da profundidade da Textura Superficial do pavimento de 0,3 mm para 1,5 mm reduz a taxa de acidentes em cerca de 50% (Brna *et al.*, 2023).

Entre os equipamentos e ensaios vulgarmente utilizados na medição da textura, encontram-se o perfilómetro a laser e o ensaio da mancha. Além desses métodos tradicionais, a fotogrametria digital emerge como uma alternativa de baixo custo na análise desta característica.

Fotogrametria de Curto Alcance (Close-Range Photogrammetry (CRP))

Com o progresso tecnológico surgem novas soluções para enfrentar desafios emergentes. Nos últimos tempos a fotogrametria tem tido avanços consistentes no desenvolvimento de aplicações de imagens tridimensionais.

Assim, no âmbito da avaliação funcional dos pavimentos, o método de Fotogrametria de Curto Alcance (CRP) representa uma técnica de digitalização de superfícies a partir da captura de imagens fotográficas tiradas à curta distância. Essas imagens de duas dimensões são transformadas em modelos 3D (três dimensões) através do cálculo de algoritmos, com recurso a *softwares* específicos. Os resultados da CRP traduzem-se numa informação tridimensional com alto nível de resolução, útil numa vasta gama de aplicações, onde a precisão e pormenor da imagem são fatores preponderantes. (Schenk, 2005).

Relativamente à aplicação do método para a quantificação dos parâmetros de rugosidade, microtextura e macrotextura, esta técnica de imagem CRP representado na Figura 11, permite registar e sondar anomalias numa superfície do pavimento (McQuaid *et al.*, 2015), analisar a profundidade ou calcular a volumetria de uma determinada textura, sondar deformidades numa amplitude entre a macro microescala, ou ainda monitorizar o desgaste do pavimento durante o seu ciclo de vida (Woodward *et al.*, 2014).

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Ao comparar os dados de desempenho desta metodologia com as técnicas de scanner a laser 3D (equipamento representado na Figura 10), verifica-se que este método de captura de imagem proporciona resultados de análise de elevada qualidade, conforme se pode observar nas Figuras 11 e 12, a um custo consideravelmente mais baixo em relação aos equipamentos de laser (Medeiros Jr *et al.*, 2023).

Na medição da macrotextura e microtextura, estudos mostram que há uma forte correlação entre os parâmetros obtidos pelo tradicional método volumétrico da mancha e a técnica da captura fotogramétrica. Os mesmos estudos também demonstraram uma excelente correlação nos parâmetros do atrito. (Al-Assi *et al.*, 2020).

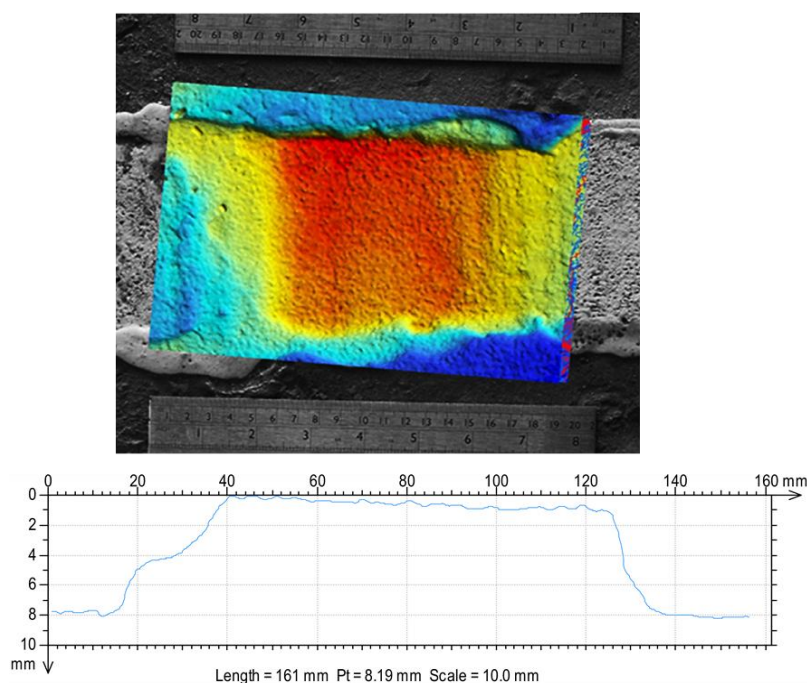


Figura 11 – Modelo 3D e parâmetros da secção transversal de marcação de pavimento (adaptado de Woodward *et al.*, 2014)

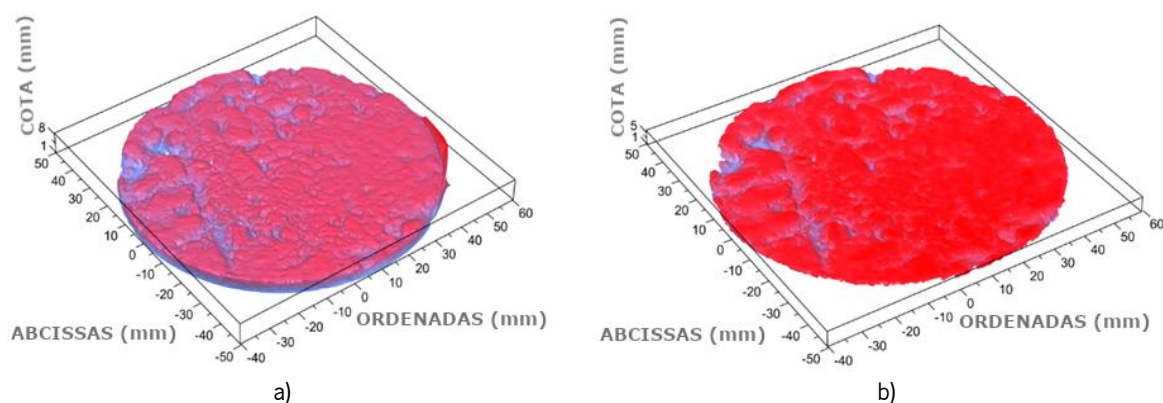


Figura 12 – Modelos de imagens 3D criados a partir de amostra betuminosa (imagem adaptada de Medeiros Jr *et al.*, 2023):
a) Modelo fotogramétrico de curto alcance; b) Modelo scanner a laser 3D

2.2.6. Atrito

Em conformidade com a Textura, o Coeficiente de Atrito assume uma posição relevante no comportamento dos veículos sobre a superfície da estrada, sendo influente nas condições de aderência longitudinal e transversal na interface entre pneu e pavimento.

A velocidade da condução, o tipo de piso, as condições meteorológicas e as propriedades dos pneus, são fatores determinantes utilizados para a avaliação do coeficiente de atrito e do nível de aderência presente numa estrada. Estas variáveis têm efeitos diretos na interação entre pneu e pavimento, designadamente, na distância de travagem, na resistência à derrapagem e na segurança na condução em curvas (He *et al.*, 2023).

Relativamente aos fatores de segurança e qualidade de circulação na estrada, certos estudos demonstram que a redução do Coeficiente de Atrito para valores inferiores a 0,45 poderá aumentar o risco de acidente em 20 vezes. Quando esses valores ficam abaixo de 0,30, o risco de acidente é 300 vezes mais provável (Čelko *et al.*, 2016).

Quanto aos métodos de quantificação do Atrito, o levantamento de registos subdividem-se em três principais categorias: a medição manual, a medição em condições estáticas ou em velocidades reduzidas, e a medição dinâmica realizadas em velocidades consideráveis (Aurstad *et al.*, 2019).

Entre os diversos equipamentos estáticos e móveis utilizados para determinar os valores dos parâmetros de atrito, destacam-se os equipamentos representados na Figura 13, que variam conforme o tipo de ensaio a considerar:

- Pêndulo Britânico, um equipamento portátil de medição pontual do coeficiente de atrito;
- Grip Tester, um dispositivo caracterizado por um pequeno atrelado de três rodas, projetado para medir a resistência ao deslizamento dos pavimentos na direção longitudinal;
- O SCRIM (Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine), enquanto dispositivo de medição contínua, o equipamento apresenta características semelhantes ao mencionado no ponto anterior. No entanto, este último destaca-se pela medição do coeficiente de atrito transversal.

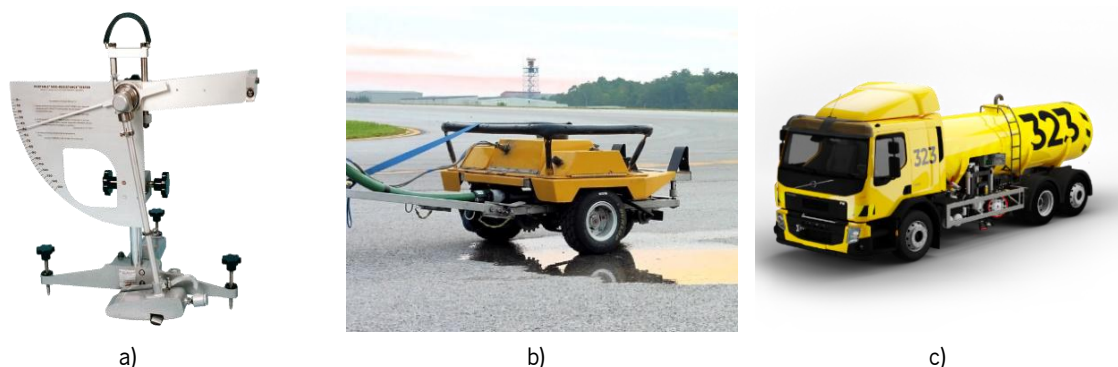


Figura 13 – Equipamentos de medição do atrito: a) Pêndulo Britânico (SET, 2023), b) Grip Tester (Findlay Irvine, 2024), c) SCRIM (SARSYS-ASFT, 2024)

Um dos equipamentos mais utilizados atualmente para a medição do atrito é o Grip Tester. Este caracteriza-se por ser equipamento de medição contínua do atrito, utilizado principalmente em estradas para avaliar a resistência ao deslizamento de superfícies. Projetado para contribuir para uma melhoria da segurança rodoviária, o equipamento permite avaliar o risco de derrapagem em diferentes condições climáticas, fornecendo resultados de atrito que se podem correlacionar com o coeficiente de atrito transversal obtido pelo SCRIM. A sua operação, segura e estável, é garantida pela tração leve da barra de reboque e baixo centro de gravidade. Equipado com mecanismos de inibição da rotação do pneu durante o ensaio, o Grip Tester mede as forças de atrito e dados precisos em intervalos curtos, contribuindo para uma análise e gestão eficiente e segura das estradas (Findlay Irvine, 2024).

2.2.7. Deflexão

Para avaliar as condições e o desempenho mecânico do pavimento (Avaliação Estrutural), são realizados ensaios de capacidade de carga nas diversas camadas que o compõem, bem como sondagens das suas estruturas, com o objetivo de determinar a capacidade de suporte e verificar o comportamento estrutural do pavimento. Os resultados obtidos são comparados com os valores previstos no projeto, assegurando que o pavimento cumpre os requisitos de desempenho estipulados.

As metodologias normalmente utilizadas na Avaliação Estrutural visam avaliar a Deflexão do pavimento quando submetido a uma determinada carga. Para complementar este método são realizadas prospeções geotécnicas envolvendo ensaios destrutivos, como a extração de carotes para inspeção das camadas ligadas, e/ou a abertura de poços para inspeção das subcamadas granulares e camadas ligadas. A utilização de metodologias apropriadas na Avaliação Estrutural permite a seleção de soluções mais adequadas, resultando numa redução nos custos de manutenção ao longo do ciclo de vida da estrada (Antunes *et al.*, 2016).

Os equipamentos mais conhecidos e utilizados em Portugal para a realização de ensaios de avaliação da capacidade de carga do pavimento incluem: o defletómetro estático, defletómetro de impacto (cuja descrição mais detalhada é feita no Capítulo 3), o curvímeter e defletómetro dinâmico. Na categoria dos defletómetros dinâmicos, destaca-se o defletómetro de velocidade de tráfego (TSD), um equipamento emergente na avaliação dos parâmetros da deflexão, reconhecido pelo excelente desempenho em termos de capacidade e qualidade na recolha de dados.

Defletómetro de Velocidade de Tráfego (Traffic Speed Deflectometer - TSD)

Dentro da categoria dos defletómetros, o defletómetro de velocidade do tráfego (Traffic Speed Deflectometer - TSD) apresentado na Figura 14, destaca-se pela sua tecnologia avançada, que proporciona soluções eficazes no campo da engenharia de pavimentos.

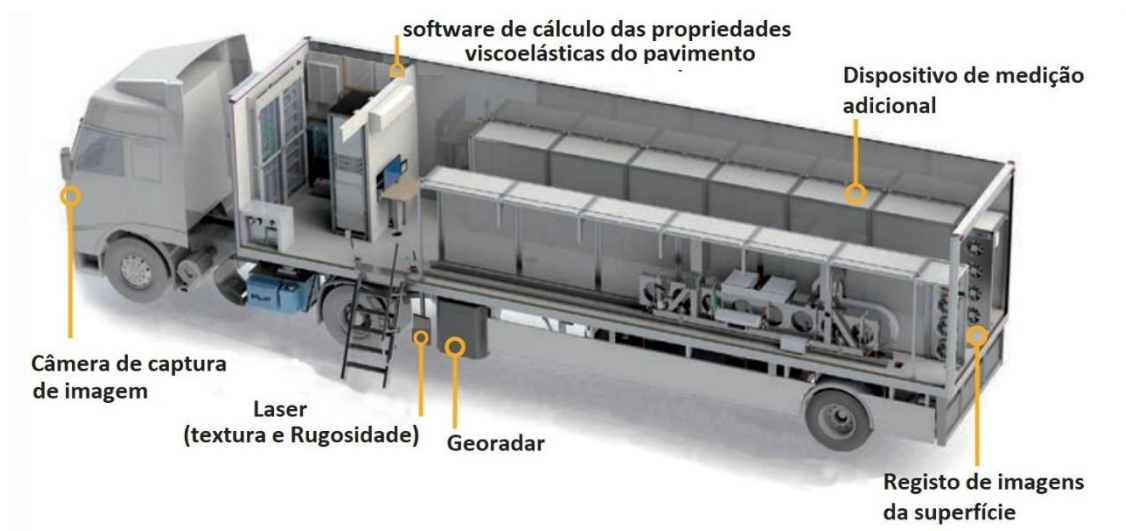


Figura 14 – Defletómetro de alta velocidade (TSD) (adaptado de Greenwood Engineering, 2024)

Caracterizado pelos seus dispositivos de alta tecnologia acoplados num veículo semirreboque, o TSD é utilizado para avaliar as condições estruturais do pavimento, incluindo a medição das deflexões, a obtenção de índices de capacidade de carga ou da fadiga do pavimento, e a estimativa da vida residual do pavimento (Greenwood Engineering, 2024).

Além da análise estrutural, a ampla variedade de dispositivos deste equipamento permite também auxiliar na avaliação funcional do pavimento, designadamente quanto às condições da superfície da estrada.

De entre os dispositivos integrados no veículo TSD, destacam-se as câmaras de captura de imagens digitais (ROW), o laser de medição da textura e rugosidade, o sistema de recolha de imagens da superfície de pavimento (SIS), e o georradar (GPR) para a identificação das subcamadas.

Graças à sua tecnologia de ponta, o TSD permite (Aurstad *et al.*, 2019):

- efetuar as suas operações de forma contínua e sincronizada com o tráfego, sem a necessidade de interromper o fluxo rodoviário;
- realizar uma avaliação abrangente da condição estrutural das camadas de pavimento como também contribui na avaliação funcional do pavimento;
- facilitar a identificação de trechos viários com maior exigência de intervenção, otimizando os custos nas operações de manutenção.

Num estudo comparativo entre o dispositivo TSD e o defletómetro de impacto (FWD), no cálculo do índice de deflexão do pavimento foi possível observar uma correlação nos resultados entre os referidos equipamentos, embora se verifiquem diferenças nas medições devido às características individuais de cada um destes dispositivos (Levenberg *et al.*, 2018).

Outros estudos demonstram a fiabilidade e exatidão das medições dos parâmetros estruturais de um pavimento realizadas por estes equipamentos, como também a sua capacidade de identificar trechos de estrada em diferentes estados de degradação (Nasimifar *et al.*, 2022).

2.2.8. Considerações finais sobre a avaliação da qualidade de pavimentos

A expansão da rede rodoviária, a par da necessidade de assegurar a funcionalidade e a modernização das infraestruturas existentes, constitui atualmente um desafio para os gestores deste tipo de património. A morosidade na execução das intervenções de conservação, aliada aos elevados custos envolvidos nas operações de conservação, tem conduzido a um agravamento progressivo dos encargos, atingindo níveis economicamente insustentáveis. Esta realidade compromete os princípios da preservação da operacionalidade e da segurança das infraestruturas rodoviárias (Babashamsi *et al.*, 2016).

Relativamente às técnicas de avaliação periódica do estado do pavimento, algumas das quais estão resumidas neste capítulo, é importante destacar que, apesar da ampla variedade de equipamentos e métodos de análise disponíveis, os custos elevados associados a estes trabalhos têm sido um fator determinante na falta de contratação desses estudos.

Para além dos elevados custos associados à monitorização do estado do pavimento rodoviário, a negligência na gestão e manutenção da rede viária constitui um problema generalizado em grande parte das infraestruturas sob a responsabilidade das autarquias. As autoridades locais, muitas vezes com baixa experiência e formação no campo da preservação rodoviária, enfrentam dificuldades para realizar avaliações regulares e sistemáticas do estado de conservação das suas estradas.

2.3. CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS

No contexto socioeconómico, o desenvolvimento, expansão e competitividade de um território estão intrinsecamente ligados às suas acessibilidades e condições rodoviárias. Uma rede de estradas em boas condições de conservação e operacionalidade constitui um ativo importante para o crescimento e a prosperidade dos setores comercial, industrial e local de uma região.

Porém, numa rede desgastada e envelhecida, cujo desempenho se encontra marcado por recorrentes críticas e exigências dos seus utentes, torna-se imperativo reconhecer a importância da implementação de programas de conservação da estrutura viária de forma a garantir a vitalidade da rede rodoviária. Essas medidas quando aplicadas periodicamente, seguindo diretrizes específicas, representam um custo/benefício na operacionalidade e longevidade da infraestrutura, com efeitos na interconectividade económica da região.

Assim, priorizando as condições de operacionalidade das infraestruturas viárias, a evolução do setor rodoviário tem sido marcada por avanços relevantes nas áreas de conservação e reabilitação de estradas. Num contexto global, uma parte considerável desses progressos resultam de programas de cooperação internacional, oriundos de organizações e associações apolíticas e sem fins lucrativos, muitas delas de reconhecimento internacional como a *Permanent International Association of Road Congresses* (PIARC), a *European Union Road Federation* (ERF) e a *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD), que se dedicam à investigação, promoção e desenvolvimento do setor rodoviário (ERF, 2024, OECD, 2024, PIARC, 2024).

Na perspetiva das estratégias de conservação de pavimentos, em resposta à carga crescente do transporte rodoviário nos Estados Unidos da América, diversos estados investem em iniciativas de formação para os seus colaboradores, no domínio da conservação dos pavimentos. Essas formações são disponibilizadas em academias especializadas, como é o caso da *Maintenance Leadership Academy* (MLA), com objetivo de dotar os participantes de competências de gestão da conservação de pavimentos. Os programas de formação capacitam os profissionais a implementar soluções eficazes de conservação, otimizar os recursos disponíveis e prolongar a vida útil das infraestruturas (NHI, 2024).

Num cenário inverso, uma ausência de investimentos em planos estratégicos de conservação das estradas por parte das autoridades rodoviárias, são tendências que culminam no acumular de reabilitações necessárias na estrutura rodoviária, tornando a rede saturada e envelhecida. Na prática,

estas condutas omissivas acabam por resultar numa deficiente operacionalidade das estradas, com tendência para uma obsolescência do sistema rodoviário.

A partir da pesquisa bibliográfica, é possível identificar tendências emergentes no domínio da sustentabilidade das infraestruturas rodoviárias. Segundo Evdorides *et al.* (2012), a resposta aos desafios provenientes da falta de investimento na conservação rodoviária, deve ser conduzida com auxílio a modelos de gestão da conservação viária. Assim, com recurso ao *software* de cálculo HDM-4, que também disponibiliza projeções do desempenho dos pavimentos, os autores propõem a adoção de estratégias e padrões destinados a mitigar os efeitos da negligência na conservação das estradas, ajustando essas medidas às limitações orçamentais, e adaptando-as, de forma similar, às autoridades responsáveis pela gestão das infraestruturas.

Plati (2019) aborda o tema da sustentabilidade no domínio dos pavimentos, dando prioridade aos assuntos de foro ambiental e socioeconómico, numa perspetiva à escala global. Numa ampla análise do estudo, a autora sustenta que as mudanças climáticas e a exaustão dos recursos naturais requerem uma mudança eminente no comportamento humano. Com o propósito delineado e fundamentada em experiências internacionais, esta sugere a utilização de pavimentos que integrem materiais sustentáveis, conhecidos por “amigos do ambiente” (*eco-friendly*). Essa abordagem não só visa melhorar a funcionalidade e eficiência dos materiais, mas também promover comportamentos sustentáveis a partir da utilização de materiais reaproveitados e reutilizados, ações que ajudam a reduzir a emissão de gases de efeito estufa, e uma consequente diminuição da pegada de carbono.

Na mesma linha de pensamento, Pacheco-Torgal e Amirkhanian (2020) analisam a importância da utilização de materiais reciclados que podem ser aplicados na construção dos pavimentos, materiais ambientalmente sustentáveis e eficientes em termos de recursos. Na sua compilação, os autores abordam a importância da sustentabilidade global e a necessidade de limitar o uso insustentável de recursos naturais através da aplicação de técnicas de reciclagem e o uso de materiais sustentáveis “amigos do ambiente”, em pavimentos. Essa publicação é dividida em três tópicos: explora as técnicas de reciclagem de materiais no segmento “amigos do ambiente” para uso em pavimentos; relata o contributo dos pavimentos “amigos do ambiente” na mitigação das alterações climáticas, e por fim, destaca as soluções promissoras para aumento do período de vida de um pavimento com foco na autorreparação dos pavimentos através da aplicação de tecnologias simples e inovadoras.

2.3.1. Tipos de Pavimentos

Das estradas compostas por multicamadas, os pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos são reconhecidos como os três principais tipos de pavimentos estratificados utilizados nos processos de dimensionamento em Portugal. Tal como ilustra a Figura 15, estas estruturas caracterizam-se em função dos materiais utilizados, designadamente quanto à composição dos ligantes, podendo conter agregados naturais de calcário e/ou basalto, filler e betume (ligantes betuminosos) (Oreto *et al.*, 2021), ou em betão de cimento (ligantes hidráulicos) (Branco *et al.*, 2016).

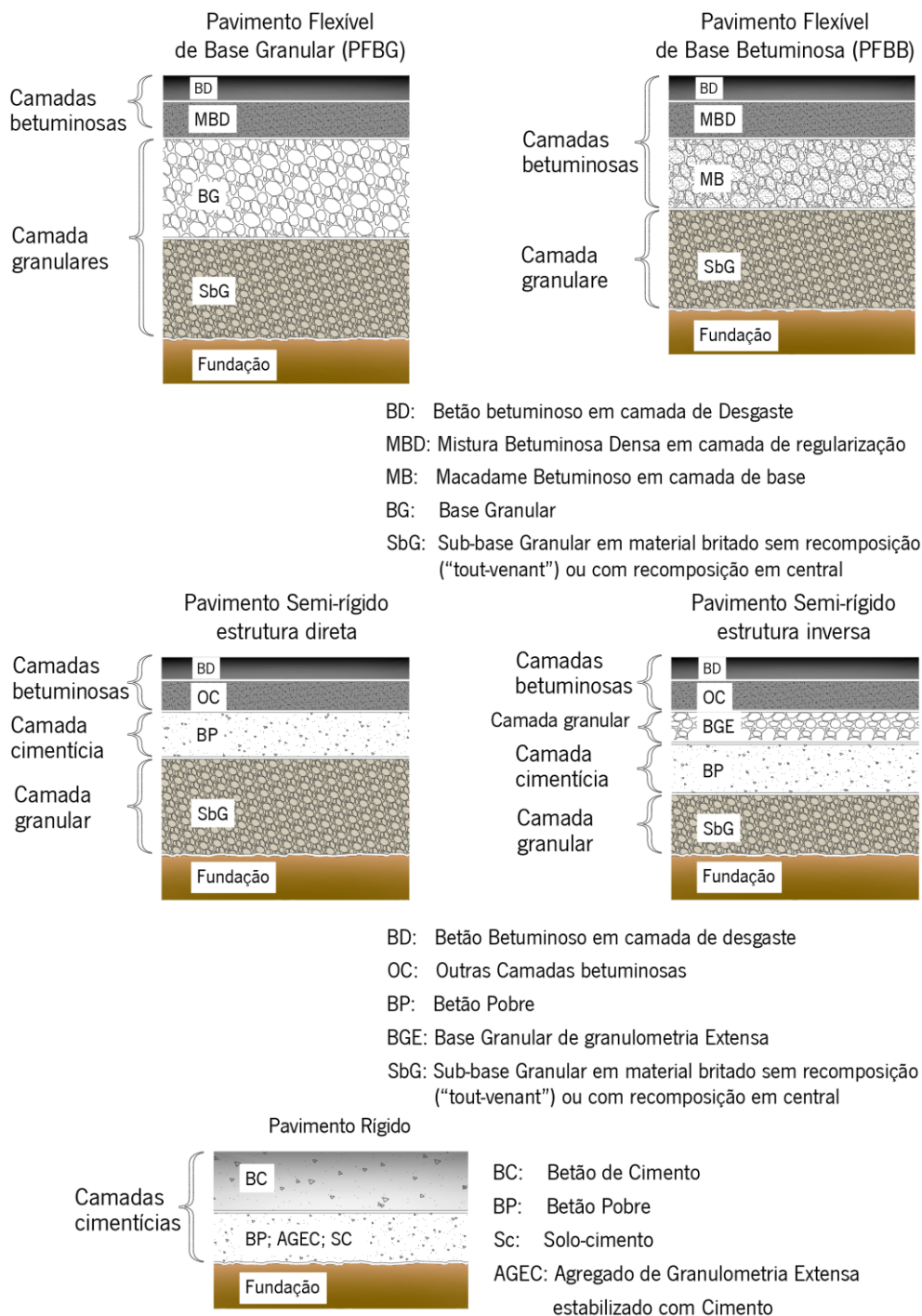


Figura 15 – Pavimentos rodoviários estratificados (adaptado de Branco *et al.*, 2016)

Estes pavimentos diferenciam-se fundamentalmente pela rigidez ou flexibilidade, durabilidade e pelo modo como as cargas de tráfego se distribuem nas camadas subjacentes e no subleito.

Os pavimentos rígidos, que tendem a ser mais duradouros, dissipam as cargas sobre extensas áreas das camadas inferiores, reduzindo assim a pressão no solo de fundação. Já nos pavimentos flexíveis, a distribuição das cargas concentra-se mais próximo da área de aplicação, resultando numa maior transferência das cargas para o solo de fundação. (Solanki e Zaman, 2017).

Pavimentos Flexíveis

Dos tipos de pavimentos mais utilizados no continente, os pavimentos flexíveis representam mais de 90% da extensão da rede rodoviária (Batista, 2004). Em geral, este tipo de pavimentos é constituído por um sistema de múltiplas camadas, formadas pela mistura de agregados e betume, compactadas sobre uma base granular. De acordo com o Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV), estes pavimentos podem ser categorizados em dois grupos distintos, dependendo da composição da camada de base que pode ser em material granular, enquanto que outros combinam material granular com misturas betuminosas (JAE, 1995). Os primeiros, adequados a classes de tráfego ligeiro, são dispostos por camadas de misturas betuminosas nas camadas superiores, com espessura igual ou inferior a 100 mm, sobrepostas nas camadas de base e sub-base de material granular não ligado, habitualmente denominado de “macadame”, em tributo ao seu inventor, John Loudon McAdam (McAdam, 1827, Ebels *et al.*, 2004). Já nos pavimentos flexíveis onde as camadas de base incluem betume na sua composição, as espessuras das camadas ligadas ultrapassam geralmente os 150 mm. Este tipo de pavimentos é habitualmente aplicado em autoestradas e itinerários principais, onde se antecipa um tráfego elevado de veículos pesados.

Pavimentos Semirrígidos

Menos comuns do que os pavimentos flexíveis, os pavimentos semirrígidos são compostos por uma ou mais camadas de misturas betuminosas, localizadas na camada de desgaste e na camada intermédia do pavimento, seguidas inferiormente por numa base cimentada de materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos. Os ligantes utilizados na base cimentada têm como objetivo aumentar rigidez dessas mesmas camadas, com o propósito de diminuir as tensões induzidas pelo tráfego, tanto no solo de fundação como nas camadas betuminosas superiores (Bonnot *et al.*, 1991).

Pavimentos Rígidos

Os pavimentos rígidos, embora menos utilizados do que os pavimentos flexíveis e semirrígidos, são igualmente notáveis pela sua longa durabilidade e pela sua estrutura mais resistente. Este tipo de pavimento é geralmente constituído por uma camada de desgaste e uma camada de base em betão, seja ele armado ou não armado, seguidas por uma sub-base de material granular, frequentemente utilizada para regularizar o solo de fundação. Nestes pavimentos é comum reforçar o leito (camada de sub-base) com ligantes hidráulicos em estradas sujeitas a condições severas de tráfego pesado ou quando é necessário reforçar as características do solo de fundação. Este tipo de pavimento é indicado para estradas sujeitas a tráfego intenso e cargas pesadas, destaca-se pela sua longevidade com baixos custos de manutenção. No entanto, as principais desvantagens deste tipo de pavimento encontram-se nos custos e o tempo necessários para a sua construção inicial (Jiménez, 2014).

2.3.2. Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos

De acordo com Oliveira (2003), dependendo do tipo de característica do pavimento a recuperar, as técnicas utilizadas para conservar ou reabilitar os pavimentos rodoviários podem ser separadas em técnicas de conservação das características superficiais ou das características estruturais. Assim, no primeiro grupo, que inclui a aplicação de camadas de reduzida espessura sobre o pavimento existente, pode distinguir-se as seguintes técnicas: (i) revestimentos superficiais; (ii) microaglomerados betuminosos a frio; (iii) betões betuminosos muito delgados; (iv) betões betuminosos ultra delgados; (v) microbetões betuminosos rugosos; (vi) betões betuminosos drenantes. Relativamente ao segundo grupo, as técnicas aplicáveis são: (i) a realização de um reforço estrutural; (ii) a substituição do material das camadas degradadas e; (iii) a reciclagem do pavimento. O reforço estrutural pode ser realizado com recurso a materiais betuminosos produzidos a quente ou a frio, eventualmente precedidos da aplicação de grelhas ou membranas de reforço para retardar a propagação de reflexão de fendas do pavimento existente para as novas camadas. Em casos onde existem limitações de cota do pavimento, a reabilitação estrutural pode incluir a fresagem das zonas degradadas e a sua substituição por materiais novos, ou em alternativa a reciclagem dos mesmos *in situ* ou em central.

Dado que este trabalho pretende contribuir para uma maior utilização de técnicas de reabilitação mais sustentáveis, as metodologias de conservação e reabilitação dos pavimentos centram-se mais especificamente na reabilitação de pavimentos betuminosos do tipo flexível (por ser o tipo de pavimento do caso de estudo), priorizando a utilização de técnicas de reciclagem com recurso a misturas betuminosas recuperadas, vulgarmente conhecidas como material fresado. Na terminologia anglo-

saxónica este composto é conhecido como *reclaimed asphalt pavement* (RAP). Nesse sentido, nos subcapítulos seguintes faz-se uma análise mais detalhada das várias técnicas de reabilitação com recurso à reciclagem de pavimentos.

2.3.3. Promoção da Reciclagem de Pavimentos

Com a expansão da rede rodoviária em Portugal continental nas décadas de 1990 e 2000, impulsionada em grande parte por projetos financiados pelos Quadros Comunitários de Apoio da União Europeia, a conservação e reabilitação de pavimentos adquiriu uma importância significativa no domínio das vias de transporte rodoviário (Sousa *et al.*, 2011, Cruz, 2021). Esta opção é atribuída à necessidade premente de assegurar a sustentabilidade e a funcionalidade da extensa rede de infraestruturas rodoviárias, que atualmente se aproxima do final da sua vida útil e requer intervenções de reabilitação (Fonseca *et al.*, 2013).

Esta prioridade na conservação também se revela de particular importância em municípios como Barcelos, que, segundo o último relatório da Revisão do Plano Diretor Municipal (2002/2005), contabiliza uma extensão de 360 quilómetros de estradas em pavimento asfáltico no concelho (C. M. Barcelos, 2010).

Nesse contexto, torna-se fundamental reconhecer os problemas de preservação que os pavimentos rodoviários enfrentam ao longo do seu período de vida. Desde a entrada em atividade até ao final do seu ciclo de serviço, as estradas enfrentam sucessivas patologias e degradações nas suas componentes funcionais e estruturais. Os danos resultantes da fadiga do pavimento têm efeitos adversos na qualidade da circulação dos veículos e na integridade estrutural do pavimento, resultando numa diminuição gradual da sua capacidade funcional.

Para enfrentar esses desafios e prolongar a vida útil das estradas, é fundamental conhecer e selecionar técnicas de conservação que tenham em consideração os aspetos técnicos, económicos e ambientais. Entre as técnicas mais promissoras na área dos pavimentos rodoviários, destaca-se a técnica da reciclagem de pavimentos, com a reutilização das misturas betuminosas recuperadas (vulgarmente designadas de material fresado), designado na terminologia internacional por RAP.

Atualmente, e com a contribuição do conhecimento científico, a utilização deste recurso tem ganho crescente reconhecimento na escolha de soluções de reabilitação de pavimentos flexíveis em todo o mundo. Não obstante, também se vê um gradual interesse em alargar o uso desta técnica em pavimentos

do tipo rígido, com a exploração de novas metodologias e adaptações que permitam a sua útil aplicação (Rout *et al.*, 2023).

Na área da engenharia rodoviária sustentável, a reciclagem de pavimentos emergiu como uma abordagem proeminente para lidar com o problema do tratamento de material fresado extraído nos pavimentos a reabilitar. O tema da reciclagem popularizado na década de 1970 através da Diretiva 75/442/CEE do Conselho das Comunidades Europeias (CCE, 1975), surgiu como resposta à majoração do preço das matérias-primas virgens (inertes e betume), assim como nos custos e no impacto ambiental associados ao transporte e deposição do material deteriorado ou sobranter em aterros (Joint Departments of the Army and Air Force, 1988, Rathore *et al.*, 2019, Department of Defense, 2021).

Desde então, os parceiros europeus têm dedicado esforços na implementação de práticas sustentáveis na gestão de resíduos, com o objetivo não só de mitigar o impacto ambiental, mas também de otimizar o uso dos recursos naturais disponíveis. Um exemplo claro desse compromisso foi estabelecido pela Diretiva do Quadro de Resíduos da UE 2008/98/CE, que definiu uma meta ambiciosa de reciclagem de 70% para resíduos não perigosos de construção e demolição, incluindo resíduos de asfalto, a ser alcançada até o ano de 2020 (Diretiva 2008/98/CE, 2008).

Assim, desde a sua implementação, a técnica da reciclagem de pavimentos procura maximizar a reutilização do asfalto reciclado como uma prática de pavimentação sustentável, sendo reconhecida ao longo dos tempos como uma estratégia eficaz e versátil na reabilitação das estradas (Zaumanis *et al.*, 2016). Em Portugal, vários investigadores da comunidade científica, como (Martinho *et al.*, 2004, Pereira *et al.*, 2004, Baptista, 2006, Pais *et al.*, 2008, Oliveira *et al.*, 2012, Silva *et al.*, 2012, Rodrigues *et al.*, 2020), têm abordado extensivamente este tema. Estes autores sublinham a relevância da aplicação de métodos específicos para a reciclagem de pavimentos, em conformidade com as orientações prescritas pela norma técnica NP EN 13108-5:2016, que estabelece as diretrizes para a reciclagem de materiais betuminosos em pavimentações rodoviárias (CEN, 2016).

2.3.4. Métodos de Reciclagem de Pavimentos

As técnicas tradicionais de conservação e reciclagem de pavimentos rodoviários constituem um conjunto de metodologias essenciais na preservação ambiental e na manutenção das infraestruturas rodoviárias. Num processo de reciclagem de pavimentos, os materiais asfálticos provenientes de pavimentos antigos são submetidos a um processo de recuperação e reutilização, através da incorporação de novos ligantes, betumes asfálticos, emulsões betuminosas ou cimentos (Branco *et al.*, 2016). A reintegração dos

materiais a recuperar é realizada através de métodos de produção que podem variar entre a reciclagem a frio, temperada ou a quente, os quais podem ser executados tanto *in situ* como na central (Baptista, 2006). Quanto ao desempenho das misturas betuminosas recicladas, estes materiais apresentam características equivalentes às das misturas virgens, mantendo as suas propriedades mecânicas e resistência sob condições de uso similares (Department of Defense, 2021).

Porém, no domínio da reciclagem de pavimentos, a integração de material fresado em misturas asfálticas tem levantado preocupações devido ao endurecimento do ligante, com consequências na fadiga e fendilhamento do pavimento. A utilização combinada de ligantes oxidados (do material fresado) com ligantes virgens tende a incrementar a rigidez da camada asfáltica (Zaumanis *et al.*, 2014). Para mitigar este efeito adverso, torna-se essencial o emprego de rejuvenescedores, com o intuito de restaurar a flexibilidade e prolongar a vida útil das misturas recicladas (Ongel e Hugener, 2015). Neste contexto, diversos estudos científicos têm sido dedicados ao desenvolvimento desses aditivos destinados a melhorar as propriedades de desempenho das misturas betuminosas fabricadas a partir de material fresado reciclado. Entre os benefícios associados ao uso de rejuvenescedores, destacam-se (Silva *et al.*, 2012, Im *et al.*, 2014, Zaumanis *et al.*, 2014, Ongel e Hugener, 2015, Nabizadeh *et al.*, 2017, Kawakami *et al.*, 2019, Slabonski *et al.*, 2021):

- a conservação de recursos minerais e petrolíferos;
- uma resposta para reabilitação da vasta rede betuminosa rodoviária;
- uma solução aplicável em reparações pontuais de pavimentos;
- o aumento do ciclo de vida do pavimento;
- o restauro das propriedades originais de ligantes asfálticos envelhecidos;
- a otimização da combinação entre o material asfáltico a ser recuperado e os novos agregados e ligantes;
- a redução da temperatura de produção da mistura (quando utilizada a tecnologia das misturas temperadas) e mesmo da temperatura necessária para a sua compactação;
- o restabelecimento das propriedades do betume reutilizado aproximando-o das propriedades do betume virgem. No entanto, o envelhecimento do betume virgem ocorre mais lentamente comparado ao do betume rejuvenescido, podendo este último apresentar um desempenho inferior ao longo do tempo;
- a redução da rigidez do ligante envelhecido nos materiais reciclados resultando numa melhoria da resistência ao fendilhamento por fadiga;

- a melhoria da resistência à humidade e da durabilidade das misturas que incluem materiais reciclados;
- a aplicação de rejuvenescedores em misturas asfálticas com materiais reciclados representa uma solução económica no desenvolvimento dessas misturas.

Embora a técnica de reciclagem a frio *in situ* com cimento seja adequada para vários pavimentos existentes em Portugal (Branco *et al.*, 2016), a reabilitação de pavimentos flexíveis com a utilização da técnica de reciclagem a quente em central tem gerado interesse no mercado nacional da repavimentação. Esta preferência deve-se aos elevados custos envolvidos na aquisição de equipamentos de reciclagem *in situ*, agravados pelas restrições de acessibilidade e pelas dimensões limitadas das estradas, que dificultam o manuseamento desses equipamentos (em especial os de reciclagem *in situ* a quente). Além disso, a competitividade do custo de produção em outras técnicas de reciclagem, torna o preço do material como um fator decisivo na escolha de alternativas mais viáveis.

Em seguida, será feita uma síntese de cada uma das técnicas mais comuns aplicadas na área da reciclagem de pavimentos.

Reciclagem a Frio *in situ*

Partindo para uma descrição genérica das principais técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis, a reciclagem a frio *in situ* define-se como um processo de reabilitação que envolve a remoção das camadas betuminosas envelhecidas do pavimento e a reposição de parte ou da totalidade deste material estabilizado através de uma técnica de recuperação realizada a frio. No local do projeto, o material removido (fresado) é reutilizado nas camadas ligadas do novo pavimento através de uma operação contínua e realizada numa única passagem, utilizando equipamentos específicos, semelhante ao “comboio” representado na Figura 16. Sem a necessidade de pré-aquecimento, ou seja, à temperatura ambiente, o material fresado é submetido a um processo de mistura com novos agentes ou aditivos, como cimento, betume-espuma ou emulsão betuminosa. Este procedimento a frio resulta num material estabilizado, cuja resistência é inferior quando comparada às técnicas de produção que envolvem temperaturas a quente. Na fase de compactação, o material processado é compactado formando uma nova camada de ligação, sendo necessária a aplicação de uma camada adicional de reforço/proteção na camada de desgaste (Branco *et al.*, 2016, WIRTGEN, 2024). Este método implica que as camadas subjacentes do pavimento e o sistema de drenagem estejam em boas condições de funcionalidade (Department of Defense, 2021).

A reciclagem a frio *in situ* é uma técnica particularmente vantajosa na reabilitação de estradas com largas dimensões localizadas em zonas rurais, especialmente em locais remotos ou distantes de centrais de produção de misturas betuminosas. Este processo a frio leva à diminuição significativa do uso de energia necessária para a produção do material asfáltico. Desta forma, este método revela-se uma solução economicamente viável e ambientalmente sustentável. Adicionalmente, este método dispensa o transporte de materiais para aterros, reduzindo as emissões de CO₂ e diminuindo o consumo de novos agregados e ligantes (Jacobson, 2002, Tabaković *et al.*, 2016).

Reciclagem a frio *in situ*



Figura 16 – Composição de um comboio de reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma (adaptado de WIRTGEN, 2024)

Reciclagem a Frio em Central

Diferente das misturas a quente ou a frio *in situ*, a produção de misturas asfálticas recicladas a frio em central, caracteriza-se por um processo simples que, em termos tecnológicos, não necessita de equipamentos extremamente avançados. Todo o material fresado é transportado e recuperado numa central fixa ou móvel, onde é processado e posteriormente reutilizado em obras de reabilitação ou novos projetos de pavimentação, conforme esquema ilustrado na Figura 17.

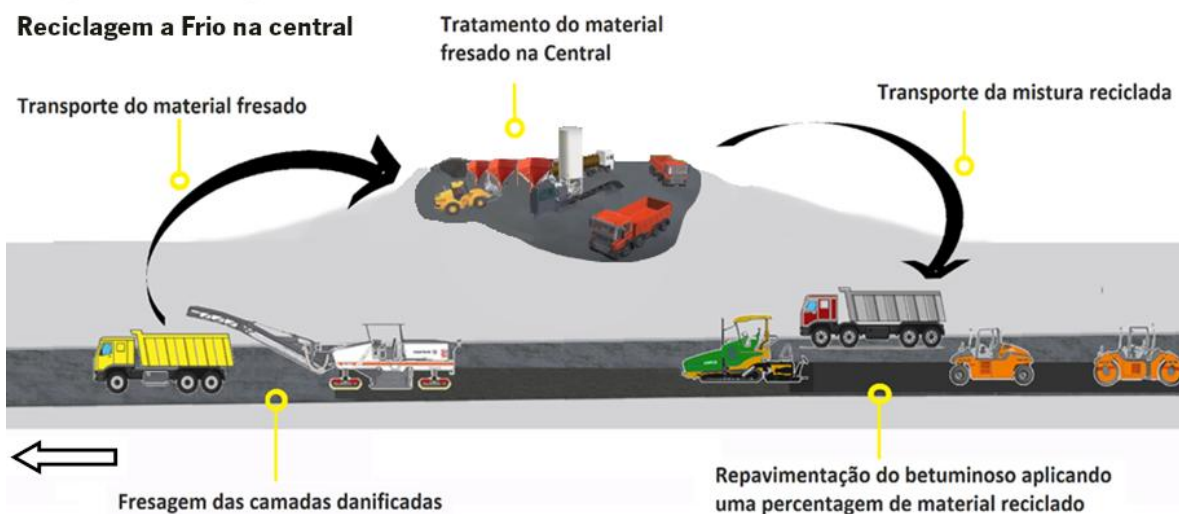


Figura 17 – Esquema de repavimentação com reciclagem do material fresado a frio na central

Geralmente, as misturas a frio são aplicadas em operações de pequena escala, adequadas para estradas de baixa e média intensidade de tráfego. O material reciclado pode ser aplicado como camada estrutural, desde que sobreposta por uma camada de desgaste a quente para produzir efeitos duradouros no pavimento.

Na reciclagem a frio em central, a nova mistura asfáltica resulta da combinação do material fresado à temperatura ambiente com betume-espuma ou com emulsão betuminosa aquecida entre 50 e 60°C. Em algumas das novas misturas a frio é feita a incorporação 10 a 20% de agregados virgens (Jacobson, 2002).

Ao contrário do método de reciclagem *in situ*, onde o material fresado é continuamente recuperado sem possibilidade de análise prévia do inerte, na reciclagem em central, o material fresado passa por uma triagem para aferir as suas propriedades antes de ser reutilizado. Durante a etapa de separação são avaliados o teor e a consistência do betume residual presente no material, assim como a separação dos inertes por granulometria e composição. Adicionalmente fazem-se ensaios de laboratório para se poder determinar a composição mais adequada para conseguir as melhores misturas, tendo em consideração o tipo e a qualidade do material recuperado disponível.

Uma outra vantagem desta técnica a frio está nas misturas produzidas sem aglomerantes hidráulicos, onde a composição reciclada pode ser armazenada temporariamente em estaleiro, permitindo uma logística mais eficiente do material sem a necessidade de sua aplicação imediata na obra (Unger Filho *et al.*, 2020).

Importa realçar que face aos elevados custos de produção e ao significativo impacto ambiental associados às técnicas de reciclagem a quente, as misturas recicladas a frio têm despertado um crescente interesse e aceitação da comunidade científica. Dentro deste método de reciclagem, diversos estudos mostram avanços significativos no desenvolvimento de novas misturas a frio de alta qualidade e desempenho, podendo ser uma opção económica viável e ambientalmente sustentável (Unger Filho *et al.*, 2020, Wacker *et al.*, 2020, Diefenderfer *et al.*, 2021, Bairgi *et al.*, 2022, Oliveira *et al.*, 2023).

Em Portugal, um estudo recente explorou a aplicação inovadora da reciclagem a frio com betume-espuma num trecho de 5km da Estrada Regional 243 (ER243), uma estrada localizada na localidade de Riachos, concelho de Torres Novas, distrito de Santarém (Castro *et al.*, 2024). A técnica utilizada teve como objetivo utilizar uma alternativa sustentável à tradicional técnica de reabilitação com recurso à aplicação de misturas betuminosas a quente. Os trabalhos experimentais foram realizados num troço de 400

metros de comprimento da ER243, com a aplicação de material estabilizado betume-espuma produzido numa central móvel do tipo contínua, montada especificamente para o efeito.

Os benefícios da técnica de reciclagem a frio foram evidentes. Primeiramente, destaca-se a significativa redução de emissões de CO₂. Esta solução possibilitou uma diminuição de 66% nas emissões de CO₂ em comparação com a reabilitação tradicional utilizando misturas betuminosas a quente. Além disso, a recuperação do material fresado contribuiu para uma redução significativa do uso de materiais virgens e no consumo energético, tanto no transporte dos materiais como no aquecimento dos agregados.

Outro ponto de destaque no estudo foi a promoção da sustentabilidade, conseguida pela reutilização do material fresado dos pavimentos. Esta abordagem não só diminui a dependência de novos materiais, mas também diminui a geração de resíduos, alinhando-se com os princípios da economia circular e as diretrizes ambientais estabelecidas pela União Europeia.

Por último, é relevante salientar a implementação bem-sucedida desta técnica inovadora, fruto da colaboração entre a Universidade do Minho, a Infraestruturas de Portugal e a empresa Construções Pragosa, apoiada pela equipa técnica da Wirtgen. Esta parceria evidenciou a importância da cooperação entre o ambiente académico, o setor industrial e as administrações rodoviárias para o sucesso de projetos que promovem a inovação e a sustentabilidade do setor (Castro *et al.*, 2024).

Reciclagem a Quente *in situ*

A reciclagem a quente *in situ* consiste numa técnica de reabilitação de pavimentos asfálticos que envolve o aquecimento da camada superficial do pavimento, visando restaurar as suas propriedades originais (Li *et al.*, 2021). Esta técnica é exclusiva à correção de anomalias superficiais, razão pela qual as camadas subjacentes devem garantir um suporte adequado às cargas previstas no novo pavimento.

Este procedimento baseia-se no aquecimento da camada de desgaste a temperaturas elevadas induzido por painéis radiantes, seguido pela compactação para uma simples correção do perfil, ou o aquecimento, escarificação, nivelamento e compactação do pavimento a reabilitar. Em ambas as alternativas, é usado um conjunto de equipamentos altamente específicos semelhante àqueles apresentados na Figura 18. Nesta técnica destacam-se os dispositivos de aquecimento de grande porte capazes de produzir temperaturas de 600 °C na superfície do pavimento.

A reciclagem a quente *in situ* melhora todas as propriedades relevantes da superfície e do perfil do pavimento, incluindo a composição das frações agregadas. Este método corrige anomalias como fendas e deformações dos pavimentos, além de restaurar as propriedades dos betumes envelhecidos.

Em termos de impacto ambiental, esta técnica isenta o transporte de materiais para aterros ou depósitos e reduz significativamente o consumo de novos agregados e ligantes. No entanto, uma das limitações mais relevantes desta técnica verifica-se no consumo excessivo de energia nos pré-aquecedores, que se traduz num aumento considerável dos custos da empreitada.

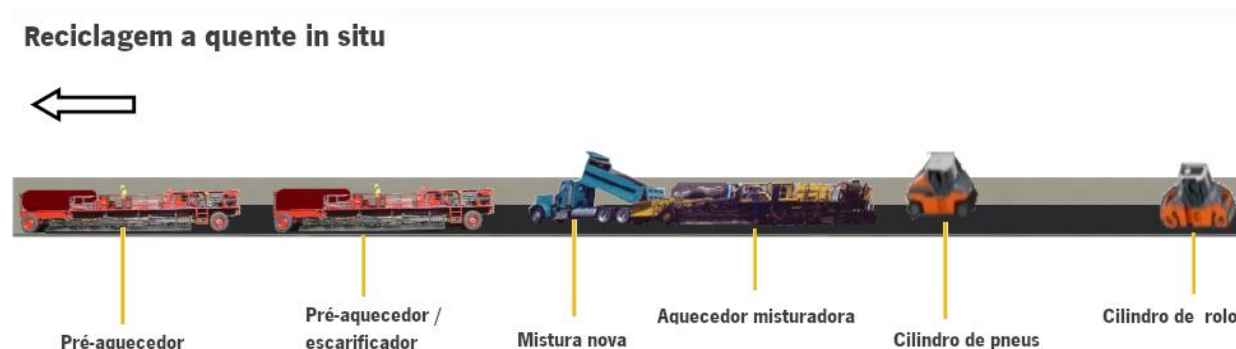


Figura 18 – Composição de comboio de reciclagem a quente *in situ* (adaptado de WIRTGEN, 2016, WIRTGEN, 2024)

Reciclagem a Quente em central

O método de reciclagem a quente em central compreende várias fases para garantir a produção de misturas betuminosas recicladas de boa qualidade, através do reaproveitamento de pavimentos betuminosos antigos. Este processo possibilita a reutilização de material fresado, com taxas de reciclagem que podem chegar a 100%, dependendo da configuração e da eficiência da central (Pais *et al.*, 2008, Branco *et al.*, 2016). Atualmente, em Portugal este tipo de central incorpora até 50% de material fresado em novas misturas betuminosas (Fonseca *et al.*, 2013).

De acordo com Fonseca *et al.* (2013), de forma semelhante à reciclagem a frio em central, o processo de reciclagem de pavimentos a quente em central inicia-se com a receção do material fresado, seguido do seu armazenamento em depósitos específicos preparados para esse fim. Na fase de armazenamento é feita uma seleção e ajustamento do material tendo em conta as suas características granulométricas, tipo e composição do inerte, com o objetivo de melhorar a qualidade das misturas em fases posteriores do processo. Durante a produção das misturas betuminosas recicladas a quente, o material fresado é combinado com novos agregados, betumes e rejuvenescedores, sendo posteriormente processado num tambor secador ou um tambor secador misturador, conforme o tipo de central, descontinua ou contínua. Este processo deve atingir uma temperatura ideal da mistura que pode variar entre 170 e 180 °C numa

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

reciclagem a quente, e 110 °C e 140 °C numa reciclagem temperada, assegurando uma coesão adequada entre os materiais e a reativação do betume oxidado presente no material fresado.

As técnicas de reciclagem a quente são aplicadas apenas nas camadas ligadas do pavimento pelo que as estruturas subjacentes devem cumprir todas as exigências de capacidade de suporte. O controlo restrito das condições de produção permite obter misturas com desempenho equivalente às misturas novas e com melhor desempenho comparativamente às misturas produzidas *in situ* (Fonseca *et al.*, 2013). A Figura 19 ilustra um esquema de repavimentação com recurso a uma central betuminosa a quente do tipo contínuo.

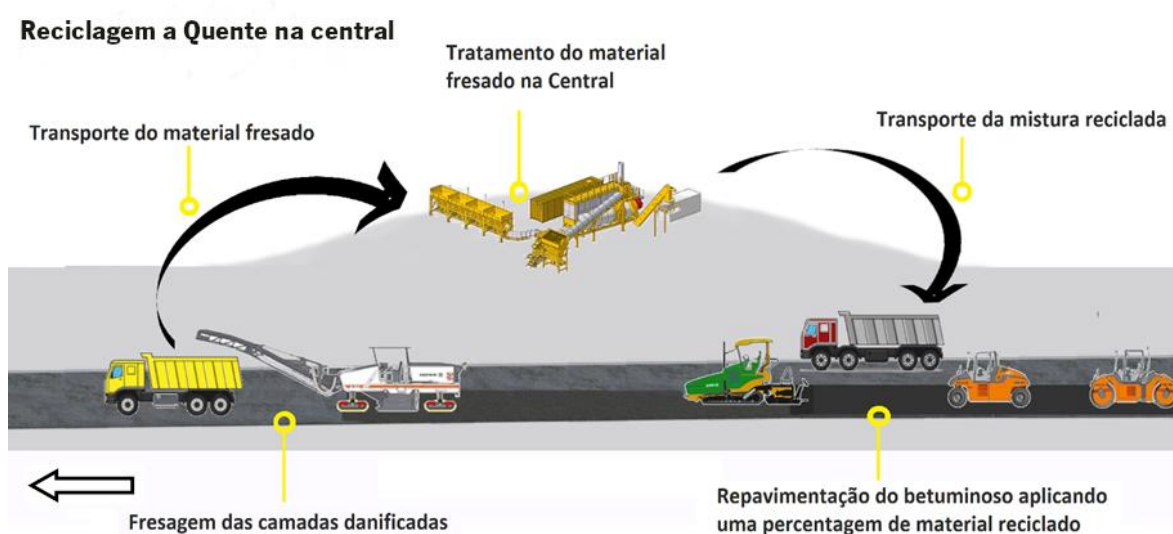


Figura 19 – Esquema de reabilitação com reciclagem do material fresado a quente em central

3. CASO DE ESTUDO E METODOLOGIAS UTILIZADAS

O presente caso de estudo propõe uma solução de reabilitação de um troço da estrada desclassificada E.D. 306, numa via localizada na margem sul do concelho de Barcelos, recorrendo a diferentes métodos de pavimentação.

O objetivo deste caso estudo visa comparar três alternativas de reabilitação, considerando diferentes abordagens técnicas e económicas. As soluções analisadas diferem no método de intervenção, que pode ser em profundidade ou sobre a cota existente do pavimento, e pelo tipo de material betuminoso utilizado, seja uma mistura convencional ou uma composição com 50% de material fresado, produzidas a quente em central. Cada alternativa é avaliada com base nos custos estimados e na sua viabilidade técnica.

Neste capítulo são estabelecidas as bases para a análise do caso de estudo, abordando de forma estruturada as principais características do trecho rodoviário em análise e as metodologias aplicadas ao longo deste trabalho.

Inicialmente é feito um enquadramento geográfico, apresentando a localização do trecho e a sua importância no contexto da rede rodoviária. Este ponto é complementado pela identificação de condições logísticas que influenciam o desempenho da infraestrutura.

Em seguida é explorada a caracterização da estrada, onde se analisa elementos fundamentais como a geometria, a tipologia dos pavimentos, e a distribuição do tráfego. Estes dados permitem compreender o comportamento estrutural da estrada, e das exigências técnicas do processo de repavimentação.

Por último, a análise estabelece um enquadramento estruturado para as metodologias adotadas, servindo como base para a avaliação das soluções apresentadas no próximo capítulo. Relativamente aos elementos de caracterização da estrada em estudo, tanto a Câmara Municipal como uma antiga entidade gestora (IP), informaram não dispor de quaisquer registos documentais ou informações técnicas da estrada, que possam contribuir para o presente trabalho.

Face a ausência de dados preexistentes, considerados essenciais para a avaliação técnica e o desenvolvimento deste estudo, tornou-se necessário proceder ao levantamento direto das condições atuais da estrada. Este levantamento incluiu a análise das características funcionais e estruturais da via, bem como a realização de um estudo de tráfego.

3.1. CARACTERÍSTICAS DO TRECHO EM ESTUDO

Com cerca de 13 quilómetros, o troço em estudo localizado a sul de Barcelos, suporta um volume expressivo de tráfego de atravessamento, servindo simultaneamente a indústria e população local. Sujeita a uma pressão de tráfego pesado, a superfície betuminosa da infraestrutura evidencia um desgaste considerável em várias zonas do seu trajeto, justificando um estudo de intervenção de repavimentação.

3.1.1. Enquadramento geográfico

Para uma compreensão espacial do local em análise, apresenta-se uma descrição sumária das características e localização da EN306 e do trecho em estudo.

Outrora denominada de EN306, a Estrada Desclassificada 306 caracterizava-se por uma estrada nacional de 3ª classe, integrada na rede primária definida pelo PRN45 (JAE, 1950). Com uma extensão aproximada de 63,8 quilómetros, esta via bidirecional localizada a noroeste do país, contribui em grande parte na ligação intermunicipal e, também, como eixo de travessia entre concelhos. Apesar da sua desclassificação pelo PRN2000, a estrada preservou a sua função histórica e complementar de eixo de interligação entre antigas províncias do Minho e Douro Litoral.

No contexto intermunicipal, a EN306 tem início no concelho de Paredes de Coura e término no concelho de Vila do Conde, com passagem pelos concelhos de Ponte de Lima, Barcelos e Póvoa de Varzim, conforme representado no mapa a), da Figura 20. Estabelecendo a ligação entre as antigas províncias, esta infraestrutura constitui atualmente uma mais-valia para o desenvolvimento económico e social intermunicipal, cumprindo assim com as suas funções delineadas no projeto original.

No concelho de Barcelos, a Estrada Desclassificada 306 inicia ao quilómetro Pk 40+020, na freguesia de Panque, nas proximidades do limite com a freguesia de Sandiães, do concelho de Ponte de Lima. Este eixo, com uma extensão aproximada de 26 quilómetros, desenvolve-se numa orientação diagonal de norte para sul, cruzando 13 freguesias do município de Barcelos até terminar na interseção entre as freguesias de Macieira de Rates e Balazar, esta última localizada no concelho da Póvoa de Varzim.

Tal como representado na carta b) da Figura 20, a estrada alvo deste estudo compreende um trecho de aproximadamente 13 quilómetros da EN306, localizado a sul do município de Barcelos. Com início no Pk 52+560, na freguesia de Barcelinhos, o eixo intersesta a EN306-1 na freguesia de Góios, e finaliza no Pk 66+010 em Macieira de Rates, próximo do limite do município da Póvoa de Varzim.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

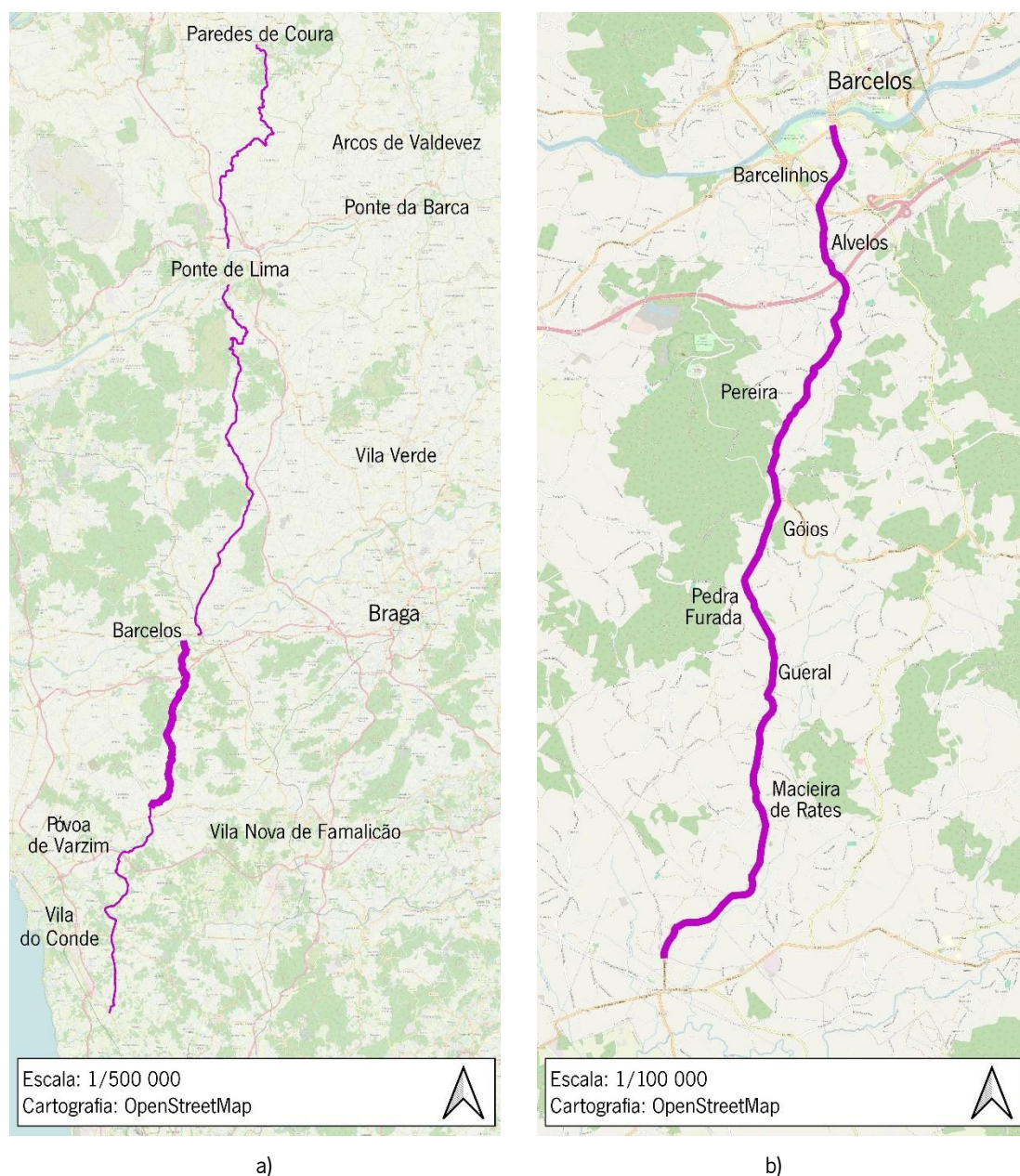


Figura 20 – Traçado da EN306: a) extensão total da EN306; b) trecho da EN306 alvo de estudo

3.1.2. Caracterização da estrada

Sob administração do Estado até o ano 2004 (MOPTH e CMBarcelos, 2004), a estrada apresenta um perfil transversal com uma faixa de rodagem de 6 metros. A plataforma da estrada é composta por bermas ou passeios, e uma faixa de rodagem com uma via de tráfego em cada sentido, conforme ilustra o perfil transversal tipo representado na Figura 21 (MOPC, 1945). Relativamente à configuração longitudinal e altimétrica, em praticamente todo o percurso, a rasante apresenta um conjunto de traineis de inclinações suaves.

Atualmente limitada a uma velocidade máxima de 50km/h, a via é utilizada por um conjunto variado de utilizadores, incluindo veículos ligeiros, pesados, agrícolas, transportes públicos. A circulação de peões

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

é marcada por uma presença significativa de peregrinos do Caminho de Santiago, que utilizam as bermas, valetas e passeios ao longo do seu trajeto.



Figura 21 – Perfil transversal tipo de Estradas Nacionais de 3ª classe (adaptado de MOPC, 1945)

Relativamente aos elementos que integram a estrada, destacam-se os seguintes:

- uma superfície de pavimento composta por um pavimento betuminoso flexível, com sinais evidentes de fadiga em vários pontos ao longo do trecho;
- infraestruturas subterrâneas, incluindo:
 - rede abastecimento “em baixa”;
 - rede de saneamento de águas residuais;
 - rede de drenagem de águas pluviais na freguesia de Barcelinhos, nas restantes freguesias a água é drenada pelas valetas e canaletes, em espaço aberto;
 - rede de abastecimento de gás natural na freguesia de Barcelinhos.
- linha elétrica e elementos de iluminação pública (luminárias);
- equipamentos de segurança (barreiras e guardas de segurança) e sinalética de trânsito;
- corredores e travessias pedonais, das quais sete são do tipo “passadeiras sobrelevadas”;
- dois viadutos de passagem superior localizados na freguesia de Alvelos.

O trecho em estudo revela uma pressão moderada e regular de tráfego de veículos pesados ao longo do dia. Além de suportar o tráfego de atravessamento, a artéria serve ainda como via de acesso a pequenos núcleos industriais e uma ampla área de exploração agrícola situada a sul do concelho de Barcelos.

De acordo com o estabelecido no Plano Diretor Municipal, uma área de 14,5 hectares contígua à estrada em análise se encontra destinada a atividades económicas e industriais. Deste total, 8,9 hectares, correspondentes 61%, encontram-se atualmente em plena exploração, com as unidades económicas a contribuírem para um fluxo regular de veículos pesados ao serviço do setor industrial (Barcelos, 2024).

No que se refere à produção agrícola, as freguesias a sul deste eixo evidenciam uma atividade agropecuária expressiva, especialmente centrada na criação de gado bovino. A utilização de maquinaria pesada, própria deste tipo de exploração, intensifica a pressão de tráfego pesado sobre o pavimento.

Para contextualizar, o índice de mecanização das explorações agrícolas, calculado com base na relação entre o número de tratores e a superfície agrícola utilizada, revela que regiões como o Alentejo, caracterizadas por grandes propriedades, apresentam um índice reduzido de mecanização de 1 trator por cada 100 hectares. Em contrapartida, áreas com predominância de pequenas explorações, como Entre Douro e Minho, regiões onde se localiza o trecho em estudo, registam índices substancialmente mais elevados, alcançando 16 tratores por 100 hectares (INE, 2021).

Além do tráfego associado ao setor industrial e agrícola, a via suporta ainda carreiras de transporte público de passageiros, registando atualmente uma média de 19 passagens por cada dia útil e 4 passagens aos fins de semana (DMU, 2024).

3.2. METODOLOGIAS UTILIZADAS

Em estudos de larga amplitude, como o que se verifica neste caso, a aplicação de metodologias de trabalho integra uma combinação de procedimentos técnicos, incluindo análises de campo e de laboratório, que permitem avaliar as condições do pavimento e estabelecer estratégias de intervenção de acordo com as exigências e horizonte do projeto. Assim, com base nos parâmetros de estado obtidos a partir ensaios de campo, tornou-se possível uma caracterização objetiva do estado do pavimento, bem como a sua avaliação estrutural e funcional.

Nesse sentido, foram realizados os ensaios de campo e o respetivo processamento de dados. O suporte técnico envolveu o uso de tecnologia avançada, nomeadamente o perfilómetro a laser e o defletómetro de impacto, facultado pela Universidade do Minho.

Seguidamente, são descritas as etapas das metodologias de ensaio adotadas no presente estudo de reabilitação rodoviária.

3.2.1. Contagens de Tráfego

Os débitos de tráfego pesado constituem um elemento fundamental no desenvolvimento de projetos de engenharia rodoviária, servindo de base para decisões de dimensionamento e planeamento de intervenções sustentáveis e eficientes.

Nas últimas décadas, o aumento das cargas por eixo nos veículos pesados tem agravado consideravelmente os danos nos pavimentos. Para ilustrar a dimensão deste impacto, um veículo pesado

com uma carga por eixo de 10 toneladas gera danos equivalentes aos provocados por 160 000 veículos ligeiros, cada um com uma carga por eixo de 0,5 toneladas (Martinho *et al.*, 2004).

Neste estudo, a contagem de veículos pesados visa determinar a agressividade das cargas aplicadas no pavimento ao longo do período de serviço estimado para a nova estrutura (20 anos). Com base nos resultados do volume de tráfego para o horizonte de projeto adiante demonstrado, foi possível avaliar a capacidade funcional e estrutural da via, assim como definir as novas camadas de pavimento.

Devido à ausência de registos de contagem de tráfego, foi necessário efetuar medições em quatro pontos previamente sinalizados como zonas de maior volume no eixo em estudo. As contagens realizadas nos locais representados na Figura 22, ao longo de sete dias, permitiram estimar o fluxo de tráfego em termos horários e diários. Os dados obtidos foram utilizados para calcular o fator de agressividade dos veículos pesados, um parâmetro essencial para o dimensionamento da solução de reabilitação do pavimento em estudo.

A amostra incluiu cinco dias úteis, um feriado e um sábado no mês de abril, com o objetivo de captar as variações de tráfego entre dias úteis, fins de semana e feriados. A contagem foi baseada em registos contínuos de filmagem, com os vídeos analisados e monitorizados em gabinete. Para este estudo, considerou-se o período compreendido entre as 7h00 e as 20h00, uma vez que o tráfego pesado fora desse intervalo apresentava valores residuais, sem relevância prática para os objetivos deste trabalho.

Durante a contagem manual em gabinete, houve dificuldades na distinção de algumas categorias de veículos pesados de mercadorias pelas suas características, podem ser confundidos com ligeiros de peso bruto inferior a 3,5 toneladas, nomeadamente, os veículos das categorias N1 e N2. De acordo com a terminologia definida no DL 16/2010 (MOPCT, 2010), os veículos da categoria N1 podem ter um peso bruto autorizado de até 3,5 toneladas, enquanto os da categoria N2 podem ter um peso bruto inferior a 12 toneladas (Daimler Truck, 2023). Desta forma, e excluindo apenas os tratores agrícolas, o critério estabelecido para a contagem visual dos pesados considerou todos os veículos com mais de dois eixos, ou com dois eixos e rodas duplas no eixo traseiro.

Relativamente à inclusão de veículos agrícolas na análise do tráfego, importa primeiramente considerar os limites máximos de peso definidos no Decreto-Lei n.º 132/2017, de 11 de outubro. Este diploma fixa o peso bruto máximo permitido para máquinas agrícolas em 40 toneladas, podendo ser alargado para 60 toneladas, excecionalmente em condições específicas, conforme estipula no artigo 11.º do mesmo regulamento. Adicionalmente, os artigos 14.º e 15.º determinam que o peso por eixo não pode exceder

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

12 toneladas, enquanto que o peso bruto rebocável, subordinado a um sistema de travagem hidráulica ou pneumática incluído equipamento rebocado, pode ir até seis vezes o peso do trator (MPI, 2017). Tais fatores evidenciam que os veículos afetos à exploração agrícolas também são importantes para a degradação do pavimento, justificando sua inclusão na contagem do tráfego pesado.

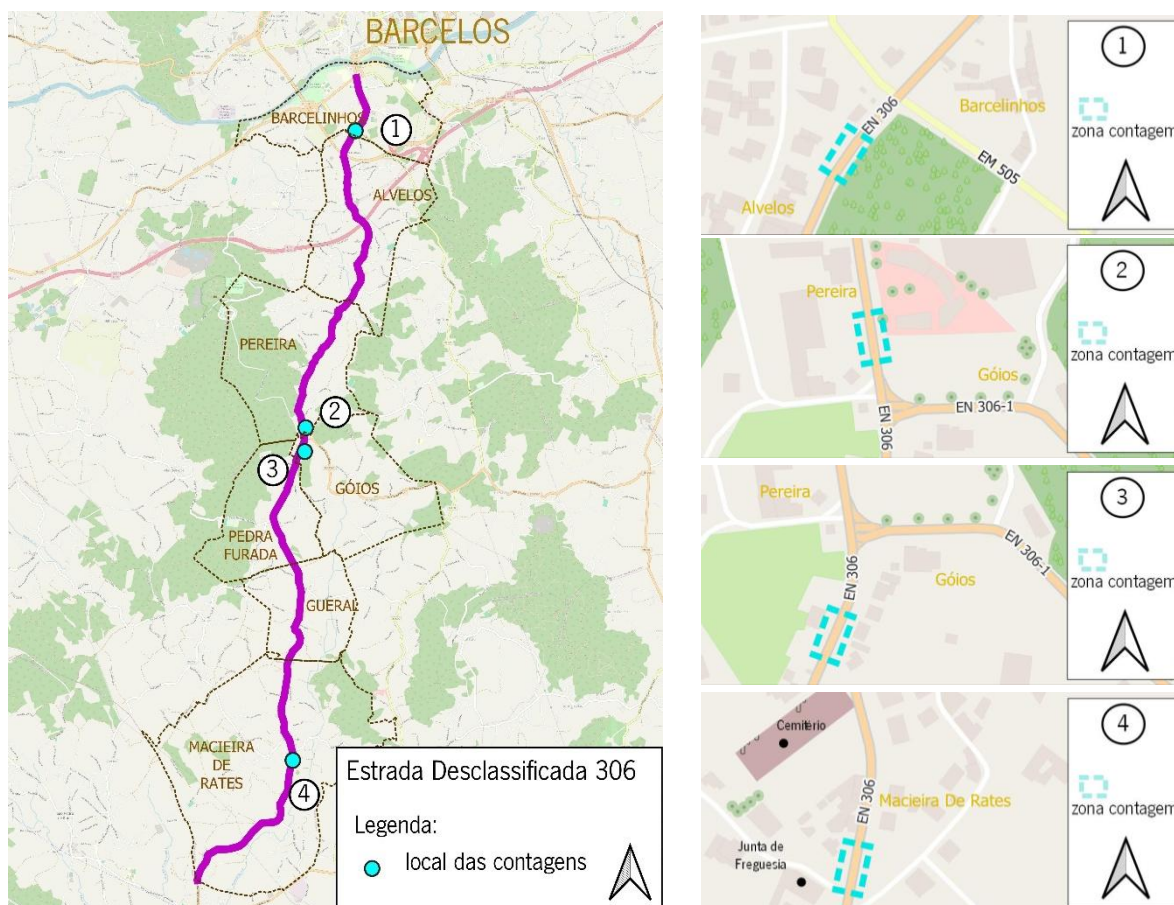


Figura 22 – Localização das zonas de contagem do tráfego

Como mencionado anteriormente, a margem sul do concelho de Barcelos destaca-se pela sua ampla contribuição na atividade agrícola industrial do município. Este setor, impulsionado pelo avanço da tecnologia mecânica, tem vindo a integrar um número crescente de veículos agrícolas caracterizados por elevada potência e peso, refletindo a intensificação e modernização das práticas agrícolas na região.

Um exemplo representativo desta realidade são os tratores da série Fendt “900 Vario”, com um peso vazio próximo de 12 000 kg e um peso total admissível de até 20 000 kg (AGCO, 2024). Estes tratores agrícolas ilustram as exigências que os pavimentos rodoviários enfrentam devido ao impacto provocado pelo trânsito de equipamentos agrícolas de grande porte. Além disso, as alfaías agrícolas acopladas a estes tratores, como por exemplo, as unidades multifunções de carga suspensa, com um peso a rondar os 7 000 kg (FAE, 2024, NAMYSLO, 2024), contribuem significativamente para o aumento da pressão exercida sobre as infraestruturas rodoviárias.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

O impacto do peso excessivo destes veículos agrícolas, conjugado com a frequência de circulação, foram fatores determinantes para se incluir este tipo de veículo na contagem e caracterização dos veículos pesados, conforme será detalhado posteriormente.

Com base no estudo de Pais e Pereira, a Tabela 2 ordena as classes de veículos pesados de acordo com a distribuição do peso bruto legal pelos seus eixos, tendo em conta cada classe de veículo. A organização das cargas teve em consideração as normas estabelecidas pelo Decreto-Lei n.º 132/2017, de 11 de outubro, que especifica os limites do peso bruto máximo dos veículos e os critérios de carga por eixo (Pais e Pereira, 2016, MPI, 2017).

Tabela 2 – Classe, tipologia e cargas por eixos, dos veículos pesados (adaptado de Pais e Pereira, 2016)

Classe de Tráfego	Silhueta	Peso Bruto (Ton)	Distribuição do Peso Bruto nos eixos					
			Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4	Eixo 5	Eixo 6
F1		19	7	12				
F2		26	7	10	9			
F3		26	7	7	12			
F4		32	6	7	10	9		
G1		37	7	12	9	9		
G2		44	8	12	8.5	8	7.5	
G3		44	7	10	9	9	9	
H1		29	7	12	10			
H2		38	9	9.5	9.5	10		
H3		38	7	12	10	9		
H4		44	7	9.5	9.5	9	9	
H5		44	8	12	9	8	7	
H6		44	7	8	8	8	7	6
I1		19,5	7.5	12				
I2		26	7	10	9			
Trator		15	3	12				
Trator reb. 1 eix.		25	3	12	10			
Trator reb. 2 eix.		33	3	12	10	8		

legenda:
 rodado simples
 rodado duplo
 eixo de tração com rodado simples
 eixo de tração com rodado duplo

3.2.2. Observação do Estado Superficial

Nesta subsecção apresenta-se a metodologia utilizada para identificar as patologias superficiais existentes na estrada em estudo, as quais comprometem a funcionalidade e a segurança da via.

A avaliação do estado de conservação do pavimento baseou-se numa inspeção visual e em ensaios realizados com o perfilómetro a laser, permitindo identificar anomalias que afetam tanto a integridade estrutural como o desempenho funcional da infraestrutura rodoviária.

As patologias foram avaliadas com base no Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários das Estradas de Portugal (EP). O documento reúne os tipos de patologia por família estrutural, parametrizados com os diferentes níveis de gravidade (EP, 2008).

Conforme será apresentado posteriormente no Capítulo IV, o referido Catálogo serviu de referência neste trabalho para classificar as patologias identificadas no pavimento, numa escala de gravidade que varia entre 1 e 3 níveis.

Para facilitar a apresentação e interpretação dos gráficos, em algumas categorias optou-se por agrupar diferentes tipos de patologias na mesma representação. Nesse contexto, a "Pele de Crocodilo" foi classificada como uma evolução das "Fendas Longitudinais". Ambos os indicadores foram avaliados em conjunto, utilizando uma escala de 1 a 6 níveis, que se representam da seguinte forma:

- os níveis 1 a 3 utilizados na avaliação das fendas longitudinais;
- os níveis 4 a 6 aplicam-se à pele de crocodilo.

3.2.3. Avaliação da Capacidade de Carga

Com vista à avaliação das condições estruturais e funcionais da infraestrutura, a etapa inicial dos trabalhos de campo incluiu ensaios de auscultação do pavimento, realizados com recurso a equipamentos especializados, incluindo o defletómetro de impacto e o perfilómetro a laser.

Embora a Revisão Bibliográfica desta dissertação apresente uma descrição do defletómetro de velocidade de tráfego, o defletómetro de impacto (FWD – Falling Weight Deflectometer) Dynatest 8000 representado na Figura 23, foi o equipamento utilizado para a avaliação da capacidade de carga do pavimento em estudo. Este dispositivo projetado para quantificar as deflexões do pavimento sob o efeito de uma carga dinâmica, foi utilizado principalmente para a determinação das deflexões e aferição dos módulos de rigidez da estrutura do pavimento (Mohammad *et al.*, 2007, Dynatest, 2020).

O equipamento simula uma carga pontual exercida por um pneu de veículo sobre o pavimento. Em intervalos previamente definidos (na maior parte dos casos, de aproximadamente 100 metros), com o equipamento imobilizado é aplicada uma carga dinâmica vertical equivalente a 65 kN ao pavimento por uma placa circular de 300 mm de diâmetro, simulando a passagem de um rodado de um veículo pesado.



Figura 23 – Defletómetro de impacto (FWD) - Dynatest 8000

As deflexões resultantes são medidas por uma série de nove sensores denominados de geofones, conforme se representa na Figura 24. Os ensaios são controlados por um computador de bordo (Figura 24), que faz o registo dos resultados para posterior análise.



Figura 24 – Sensores (geofones) e placa de aplicação da carga

Para se determinar a capacidade estrutural do pavimento em estudo, ao longo dos 26 quilómetros de extensão, 13 por cada sentido, foram efetuados cerca de 260 ensaios de medição de avaliação à capacidade de carga, com recurso ao referido equipamento.

3.2.4. Avaliação da Irregularidade Longitudinal

De acordo com a informação descrita no capítulo anterior, o perfilómetro a laser é constituído por uma barra rígida equipada com cinco lasers, dois acelerómetros e um sensor inercial de movimento, montada na parte dianteira do veículo, ao nível dos para-choques. Através de um módulo computacional de bordo, o equipamento regista continuamente diversas características superficiais dos pavimentos.

No âmbito da avaliação da qualidade superficial e estrutural da estrada em análise, foram realizados ensaios com o objetivo de caracterizar a irregularidade longitudinal do pavimento. Para tal, recorreu-se ao perfilómetro a laser Dynatest RSP (Road Surface Profiler), representado na Figura 26, um dispositivo

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada
Desclassificada EN 306 em Barcelos

multifuncional que serviu para o para identificar a presença de rodeiras e os valores do IRI (International Roughness Index).



(a)



(b)

Figura 25 – Defletómetro de Impacto: (a) equipamento em ação, (b) módulo computacional de bordo

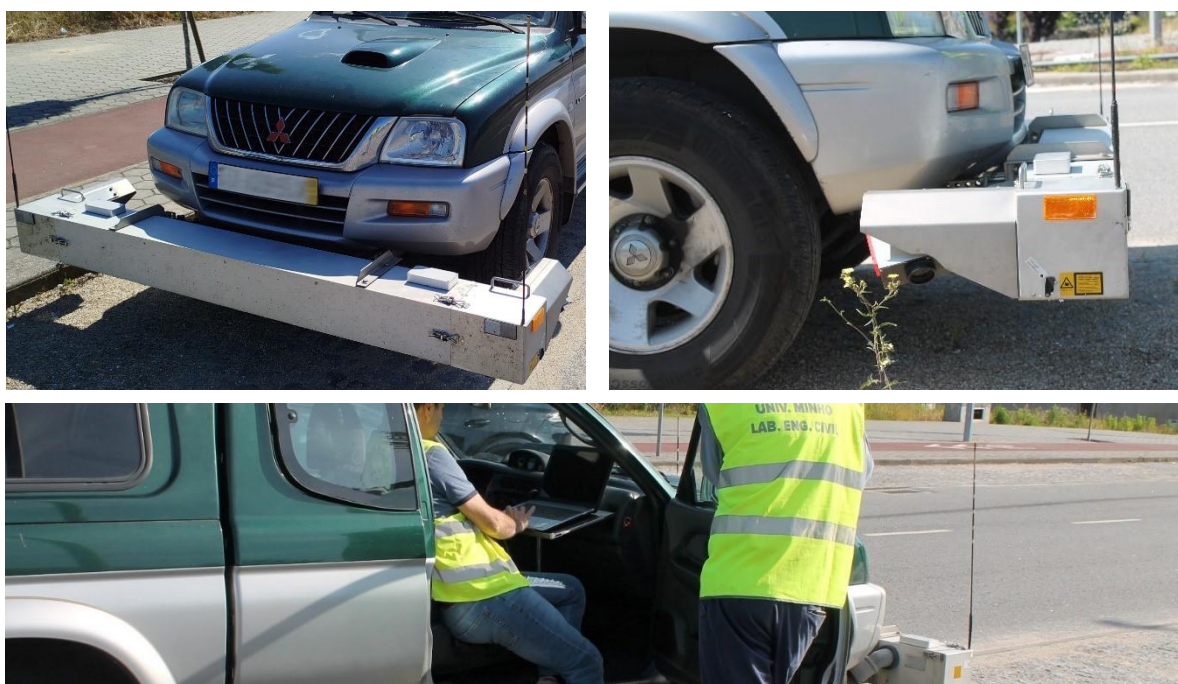


Figura 26 – Perfilómetro a Laser

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Os níveis de IRI tiveram por base os limites de conformidade para misturas betuminosas a quente, previstos no Caderno de Encargos Tipo de Obra (Tabela 3), da antiga Estradas de Portugal (EP).

Tabela 3 – Classificação dos valores de IRI (EP, 2014)

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

Os valores limites estipulados no Caderno de Encargos Tipo Obra são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de referência do IRI (adaptado de EP, 2014)

Percentagem admissível de valores de IRI para cada extensão de trecho		
50% ≤ 2,0 (m/km)	80% ≤ 3,0 (m/km)	100% ≤ 3,5 (m/km)

Com base nos índices de IRI apresentados na Tabela 3, e confrontados com os valores limites estipulados no Caderno de Encargos Tipo Obra apresentados na Tabela 4, obtiveram-se os resultados que serão apresentados no capítulo seguinte.

3.2.5. Avaliação Estrutural do Pavimento

Numa fase posterior aos ensaios de auscultação do pavimento, procedeu-se à realização de poços de sondagem em zonas distintas que permitiram fazer prospeções geotécnicas das camadas de base e sub-base, no sentido de complementar a avaliação da capacidade de carga da infraestrutura. Esta abordagem permitiu a inspeção das subcamadas granulares e das camadas ligadas, assim como perceber as possíveis causas da degradação do pavimento.

Com base nos resultados dos ensaios de capacidade de carga foram obtidas informações que permitiram aferir a qualidade estrutural do pavimento, que é complementada pelo estado de degradação da camada superficial do pavimento. Para definir os modelos estruturais a considerar na fase de dimensionamento, recorreu-se ao programa de modelação JPavBack que permitiu determinar os módulos de rigidez e deformabilidade das diferentes camadas do pavimento por análise inversa.

Numa fase inicial da modelação computacional do pavimento, procedeu-se à análise dos valores de deflexão obtidos nos ensaios realizados com o defletómetro de impacto (FWD). Estes valores correspondem ao parâmetro de estado relacionado com a capacidade estrutural de pavimento.

Definição de trechos de comportamento homogéneo

Na avaliação da capacidade estrutural de pavimentos betuminosos flexíveis, a definição de trechos homogéneos consiste na identificação de secções de estrada com propriedades estruturais similares. Este processo, realizado com base na análise das diferenças acumuladas através das Equações 1 a 3, é um método que permite caracterizar o comportamento do pavimento ao longo do seu traçado, facilitando a segmentação do trecho em áreas com condições estruturais comparáveis.

$$A_{acum} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{d_{i-1} + d_i}{2} * (k_i - k_{i-1}) \right] \quad (1)$$

em que:

A_{acum} – área acumulada

d_i – valor máximo da deflexão do ponto de ensaio i

k_i – distância dos pontos de ensaio

No passo seguinte são determinadas as diferenças acumuladas a partir da diferença entre a área acumulada e a área correspondente a uma linha de referência, dado pela equação (2), que representa o valor médio das deflexões em todo o comprimento, até ao ponto considerado.

$$d_{méd} = \frac{A_{acum}}{k_n - k_0} \quad (2)$$

onde,

$d_{méd}$ – valor médio da deflexão

A_{acum} – área acumulada

k – distância correspondente ao ponto ensaiado

Por fim são calculadas as diferenças acumuladas a partir da expressão 3:

$$Dif.Acum_i = A_{acum} - d_{méd} * (k_i - k_0) \quad (3)$$

onde,

$Dif.Acum_i$ – diferenças acumuladas

A_{acum} – área acumulada

$d_{méd}$ – valor médio da deflexão

k_i – distância em cada ponto de cálculo

k_0 – distância inicial

Esta metodologia permite identificar diferentes tendências na evolução das diferenças acumuladas, as quais são usadas para definir os subtrechos de comportamento homogêneo. Nesse sentido, sempre que se verifica uma mudança no sinal da inclinação dessas tendências no gráfico das diferenças acumuladas, é definido o início de um novo subtrecho.

De seguida procedeu-se à identificação das deformadas (deflexões) características de cada trecho, sendo estas definidas pelas deflexões correspondentes ao percentil 85% dos valores registados pelos geofones. Este parâmetro representa as condições estruturais mais críticas ou próximas do limite superior admissível para o segmento avaliado (EP, 2014).

Relativamente à caracterização do pavimento existente, os locais para a abertura dos poços de sondagem foram determinados com base na análise dos valores característicos de deflexão do pavimento. Neste tipo de análise, como se irá apresentar adiante, para assegurar a precisão dos resultados, deve-se proceder à caracterização individual de cada trecho homogêneo de forma a garantir a representatividade das condições estruturais de cada um destes. Contudo, considerando a morosidade do processo, bem como os impactos no tráfego e nos recursos humanos e financeiros que a abertura dos poços envolve, optou-se por limitar o estudo à abertura de apenas dois poços de sondagem. Assim, na seleção desses locais foram priorizados os trechos onde os valores característicos de deflexão registaram os seus extremos, tanto máximos como mínimos.

Modelação do pavimento existente

Os modelos estruturais das diferentes camadas de pavimento, em cada trecho de comportamento homogêneo, foram obtidos através do método de retroanálise com recurso ao *software* JPavBack, tendo por base os resultados registados no defletómetro de Impacto, e na informação estrutural do pavimento recolhida na abertura dos poços. Através das deflexões, em pontos representativos de cada subtrecho, o *software* indicado é utilizado para ajustar os módulos de elasticidade simulados de tal forma que a resposta teórica (deformada na superfície) do modelo de pavimento se aproxime dos valores medidos no local no ensaio de deflexão. Considera-se que o modelo representa adequadamente a estrutura do pavimento existente em cada subtrecho quando os valores de deflexão calculados no *software* se aproximam dos valores medidos em campo, com o defletómetro.

Os modelos de retroanálise, ou análise inversa, apresentam determinadas restrições com a constituição do pavimento. Este programa assume que existe um determinado número de camadas horizontais contínuas, homogêneas, isotrópicas e que as mesmas apresentam um comportamento elástico-linear,

estando apoiadas num maciço semi-infinito. A distribuição interna de tensões/extensões é calculada para determinar a resposta do pavimento sob uma carga vertical uniformemente distribuída em área circular. Em alguns casos estas simplificações podem dificultar a representação fidedigna do comportamento do pavimento, nomeadamente, em casos de pavimentos extremamente fendilhados, cujas descontinuidades não são possíveis de simular. No entanto, este modelo tem sido amplamente utilizado ao longo das últimas décadas, no âmbito da engenharia de pavimentos para análises estruturais.

3.2.6. Dimensionamento da reabilitação de pavimentos

O dimensionamento de qualquer solução de reabilitação de pavimentos, exige o conhecimento prévio das cargas a que o pavimento estará sujeito ao longo do período de vida útil considerado na fase de projeto. Assim, a estimativa do tráfego de projeto baseia-se na determinação do Número Acumulado de Eixo Padrão (NAEP) que vão solicitar a infraestrutura em estudo no período de vida considerado. Este cálculo considera fatores como o tráfego médio diário anual (TMDA) dos veículos pesados, a taxa de crescimento do tráfego e a sua agressividade.

Segue-se a apresentação das etapas para a determinação do tráfego de projeto para este estudo, com base nos parâmetros associados ao Número Acumulado de Eixo Padrão (NAEP).

Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados (TMDAVP)

O tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano inicial de exploração $TMDAVP_{(ano\ zero)}$ é determinado pela equação (4):

$$TMDAVP_{ano\ zero} = TMDA \times \%VP \quad (4)$$

sendo $TMDA$ o Tráfego Médio Diário Anual e $\%VP$ é a percentagem de veículos pesados.

Em alternativa, o $TMDAVP$ pode ser obtido diretamente de contagens de tráfego onde se diferencie os veículos ligeiros e pesados. Nesse caso, o $TMDAVP$ pode ser estimado, conforme se indica na expressão (5), a partir de uma ponderação entre os veículos pesados quantificados em dias úteis ($TMDAVP_{dias\ úteis}$) e aos fins de semana ($TMDAVP_{fim\ de\ semana}$).

$$TMDAVP = TMDAVP_{dias\ úteis} \times n^o du + TMDAVP_{fim\ de\ semana} \times n^o dfds \quad (5)$$

em que $n^o du$ representa o número de dias úteis e $n^o dfds$ representa o número de dias de fim de semana. Num ano bissexto, estes assumem os valores de 253 e 113, respetivamente.

Tráfego Acumulado no Horizonte de Projeto

Para o período de vida útil da estrada, o número acumulado de veículos pesados representado na equação (6) por $NAVP_{(ano\ horizonte)}$, é calculado considerando a taxa de crescimento anual (t) e o número de anos do horizonte do projeto (n), a partir do $TMDAVP_{(ano\ zero)}$, onde:

$$NAVP_{ano\ horizonte} = TMDAVP_{ano\ zero} * 365 * \frac{(1 + t)^n - 1}{t} \quad (6)$$

Número Acumulado de Eixos Padrão (NAEP)

O número acumulado de eixos padrão no final do horizonte de projeto $NAEP$, descrito na equação (7), é obtido pelo produto do tráfego acumulado com o fator caminhão (C):

$$NAEP = NAVP_{ano\ horizonte} * C \quad (7)$$

Para o cálculo do fator caminhão (C) é necessário determinar a agressividade média do tráfego pesado, conforme se indica de seguida.

Coefficiente de Agressividade do Tráfego Pesado

O coeficiente de agressividade (γ), definido da equação (8), reflete o impacto de um eixo real em relação a um eixo padrão de 130 kN, sendo calculado como (LCPC e SETRA, 1994):

$$\gamma = k * \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^\alpha \quad (8)$$

onde,

$$k, \quad \text{fator dependente do tipo de eixo} \begin{pmatrix} \text{eixo simples, } k = 1 \\ \text{eixo simples, } k = 0.75 \\ \text{eixo simples, } k = 1,1 \end{pmatrix}$$

P_i , carga de eixo real (ton)

P_{ref} , carga do eixo de referência (130kN)

α , fator exponencial da agressividade dependente do tipo de pavimento ($\alpha = 5$)

Assim, a agressividade de um veículo pesado resulta do somatório da agressividade de todos os seus eixos dado pela expressão (9):

$$\gamma_{veículo} = \sum_{i=1}^n k * \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^\alpha \quad (9)$$

em que n representa o número de eixos do veículo em análise.

Fator Camião

O fator camião (C) quantifica o dano médio acumulado causado por um veículo pesado em comparação com o dano de um eixo-padrão (eixo de referência) usado para dimensionamento, conforme se expressa na equação (10):

$$C = \sum_{i=1}^n \gamma_{média\ veículos} \quad (10)$$

em que $\gamma_{média\ veículos}$ representa a média da agressividade das diferentes classes de veículo observadas num determinado posto de contagem, dada pela equação (11):

$$\gamma_{média\ veículos} = \gamma_{veículo} * f_{veículo} \quad (11)$$

sendo $\gamma_{veículo}$ a agressividade dum uma determinada classe de veículos, e $f_{veículo}$ a frequência com que essa classe de veículos passa no posto de contagem.

O cálculo da frequência do veículo é dado pela expressão (12):

$$f_{classe\ veículo_i} = \frac{n^o\ de\ veículos\ da\ classe\ i}{total\ dos\ veículos} \quad (12)$$

Dimensionamento da solução de reabilitação

O estudo em questão aborda diferentes propostas para a reabilitação do pavimento em análise, sendo o dimensionamento realizado com recurso ao *software* JPav. Cada proposta apresenta abordagens distintas de intervenção, incluindo diferentes tipos de misturas betuminosas a quente, que podem ser convencionais ou com a utilização de 50% de material betuminoso reciclado (fresado). No entanto, todas elas convergem para o objetivo comum de identificar uma solução representativa de repavimentação que seja tecnicamente adequada e sustentável.

Assim, numa primeira abordagem, o estudo propõe o dimensionamento de um reforço do pavimento baseado na aplicação de camadas betuminosas adicionais sobre as camadas existentes. Esta solução implica um acréscimo da espessura total do pavimento, resultando no aumento da sua cota.

Outra abordagem considera a remoção das camadas betuminosas existentes, seguida da sua substituição por camadas betuminosas novas ou recicladas. Este método permite preservar a cota original do pavimento, removendo toda a espessura betuminosa degradada.

Por fim, é apresentada uma solução otimizada, que consiste na substituição de parte das camadas betuminosas existentes por camadas betuminosas novas ou recicladas. Tal como na abordagem anterior,

esta opção garante a manutenção do perfil altimétrico existente, mas não remove a totalidade da espessura ligada existente.

3.2.7. Avaliação económica das soluções de reabilitação

Para a análise económica das soluções de reabilitação propostas neste estudo, foram estimados os custos associados à produção de misturas betuminosas, aos eventuais trabalhos de fresagem de pavimentos e de aplicação de uma membrana retardadora da propagação de fendas, considerando as técnicas que serão apresentadas no capítulo seguinte. A estimativa baseou-se em dados obtidos através de pesquisas de mercado, junto de empresas especializadas no setor.

Na Tabela 5 encontram-se os valores médios, estimados para a produção de misturas betuminosas à boca da central, excluindo os custos de aplicação.

Tabela 5 – Valor estimativo do custo de produção das misturas betuminosas consideradas

Mistura	Classificação	Custo (€/ton)
Convencional	AC20 bin/base 35/50 (MB)	57,00
	AC14 surf 35/50 (BB)	62,00
Reciclada (50% RAP)	AC20 bin/base (MB)	45,00
	AC14 bin/base	50,00

De acordo com a pesquisa de mercado, o custo das operações de fresagem, calculado por metro quadrado, varia entre 4,0€ e 8,8€ para um intervalo de espessuras entre 10 e 30 centímetros. A partir desses valores foram determinados, por interpolação, os preços de fresagem para as espessuras intermédias de cada solução de reabilitação. Importa salientar que os custos apresentados dizem respeito exclusivamente à execução da fresagem, não sendo contemplados os encargos com o transporte do material fresado até às unidades de tratamento ou reutilização, uma vez que não está definido o empreiteiro responsável pela realização da obra de reabilitação.

Uma das soluções de reabilitação propostas inclui a aplicação de uma membrana com a função de retardar a propagação de fendas do pavimento existente para as novas camadas. Este material colocado entre o pavimento existente e as novas camadas betuminosas apresenta um custo estimado de 10€/m², conforme as tendências observadas no mercado.

Apesar de terem resultado de uma pesquisa meticulosa de mercado, os custos apresentados são meramente estimativos, não devendo ser utilizados como valores de referência para qualquer outro projeto deste tipo, uma vez que os preços dos materiais utilizados têm uma variação temporal significativa, pois estão relacionados de perto com os preços dos combustíveis fósseis, os quais têm observado variações de custo consideráveis ao longo dos últimos anos.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos acompanhados da respetiva análise, discussão e propostas de solução, com base nas diferentes metodologias aplicadas.

Inicialmente são abordados os resultados dos trabalhos realizados em campo, incluindo a caracterização do tráfego e a avaliação do estado superficial do pavimento onde inclui a análise das principais patologias identificadas bem como a irregularidade longitudinal do pavimento. Adicionalmente, avaliou-se a capacidade de carga para identificar os trechos homogéneos em termos de comportamento estrutural.

Na fase subsequente são propostas e analisadas diferentes soluções de reabilitação, considerando critérios técnicos, económicos e de sustentabilidade, com o objetivo de determinar a intervenção mais eficiente e adequada às necessidades da via.

4.1. CONTAGENS DE TRÁFEGO

Conforme referido anteriormente, o método da contagem de tráfego teve por base imagens de vídeo realizadas em simultâneo em cada um dos quatro locais predefinidos. Os dados contabilizados indicam que 6,1% do tráfego corresponde a veículos pesados, sendo os restantes 93.9% veículos ligeiros.

Relativamente aos veículos pesados, os valores médios obtidos nos quatro pontos de contagem classificaram o trecho na categoria de tráfego T5, correspondente a um tráfego médio diário anual (TMDA) de veículos pesados entre 150 e 300 passagens por dia, e por sentido de circulação (JAE, 1995).

Quanto ao tráfego de projeto, a Tabela 6 apresenta as estimativas do número acumulado de eixos-padrão (NAEP) obtidas para um período de 20 anos em cada local de contagem.

Tabela 6 – Valores de NAEP (para 20 anos) dos locais de contagem

Local de contagem	Sentido	
	Norte/Sul	Sul/Norte
Barcelinhos	646 042	523 518
Góios - trecho Norte	979 722	1 006 548
Góios - trecho Sul	1 130 060	1 125 638
Macieira de Rates	1 070 432	1 074 577

Como se pode observar, os valores de tráfego de projeto obtidos para cada um dos postos de contagem são significativamente diferentes. Assim, o valor a considerar em cada trecho de comportamento homogéneo será definido em função do posto de contagem mais representativo para cada caso.

4.2. OBSERVAÇÃO DO ESTADO SUPERFICIAL

Como já foi referido, o registo das patologias foi realizado com base em métodos tradicionais de avaliação de infraestruturas rodoviárias. Este processo incluiu uma inspeção visual das degradações presentes na superfície do pavimento, complementada pela medição das deformações com recurso ao perfilómetro a laser. Essas abordagens permitiram identificar e caracterizar as degradações existentes à superfície do pavimento, para uma posterior avaliação do estado de conservação da estrada em causa.

Seguem-se exemplos de algumas degradações identificadas, de acordo com as suas tipologias e níveis de gravidade.

Na Figura 27 são apresentados diferentes tipos de fendilhamento observados na estrada em análise. Entre os tipos de fendas identificados, destacam-se as fendas longitudinais, frequentemente localizadas nas rodeiras ou próximas das bermas. Essas degradações podem resultar do início do processo de fadiga das camadas betuminosas ou estarem associadas ao débil sistema de drenagem de águas pluviais. Ainda dentro do fendilhamento temos a “pele de crocodilo”, característico do envelhecimento avançado e da progressiva fadiga estrutural do pavimento.

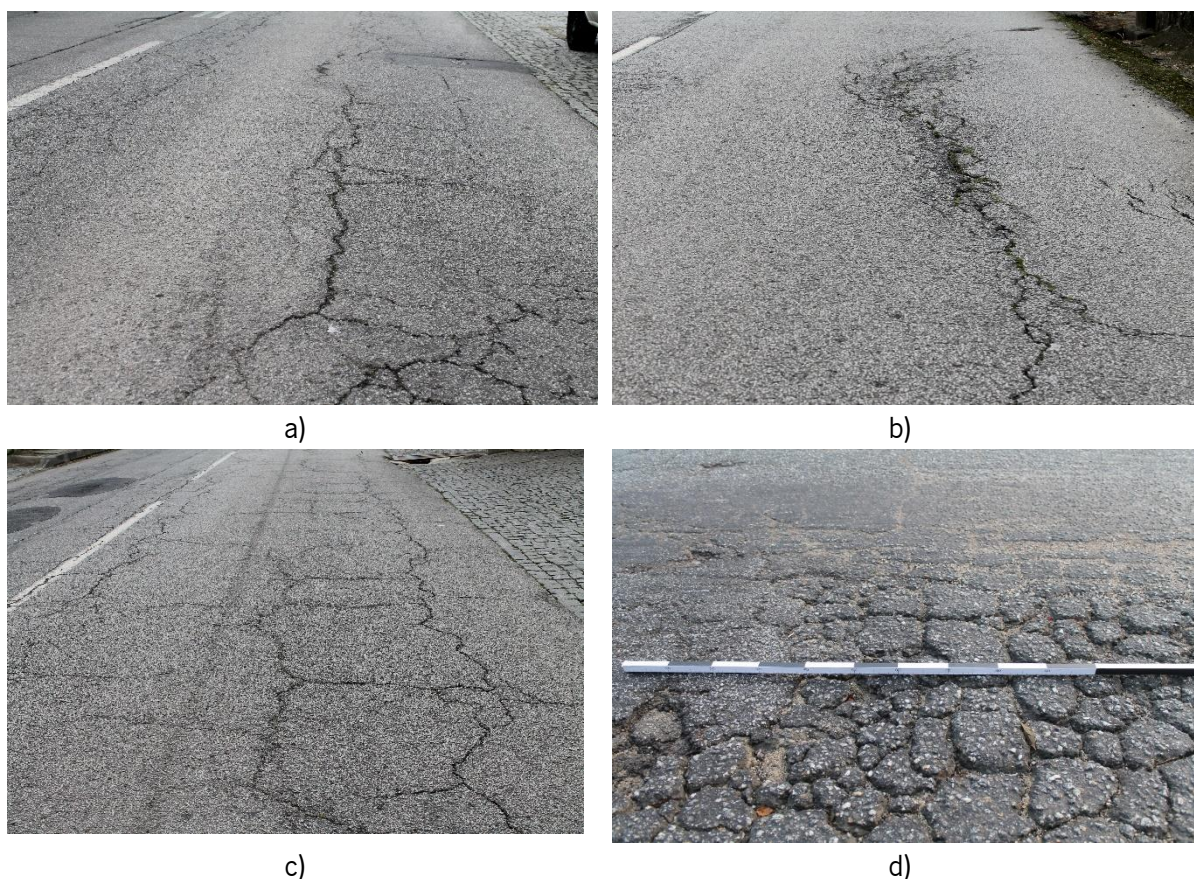


Figura 27 – Fendilhamento: a) fendas longitudinais - nível 2; b) fendas longitudinais - nível 3; c) pele de crocodilo - nível 1; d) pele de crocodilo - nível 3

Na Figura 28 são apresentados exemplos de deformações, incluindo deformações localizadas e rodeiras. As deformações localizadas podem estar associadas a falhas pontuais na compactação ou à presença de materiais inadequados, enquanto as rodeiras, formadas em zonas de passagem do tráfego, refletem um assentamento progressivo das camadas betuminosas e de base.



Figura 28 – Deformações: a) deformações localizadas - nível 3; b) rodeiras - nível 3

A Figura 29 apresenta exemplos de defeitos de superfície. Entre estes, destacam-se os ninhos e peladas, que poderão resultar de uma espessura insuficiente da camada de desgaste ou de uma falha de aderência entre esta camada e a camada subjacente. Além disso, é possível observar a desagregação superficial, cuja origem geralmente está associada à ação abrasiva do tráfego ou a falhas na aplicação ou qualidade dos materiais betuminosos.



Figura 29 – Defeitos de superfície: a) ninhos e peladas - nível 3; b) desagregação superficial - nível 3

A Figura 30 ilustra exemplos de reparações em estado de degradação considerável. Um dos casos observados mostra a selagem de covas em condições precárias, possivelmente causadas pelo estado avançado de ruína da área da intervenção. Outro exemplo são os remendos em mau estado, que poderão resultar de falhas na recomposição das estruturas do pavimento, durante os trabalhos de reparação.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos



Figura 30 – Reparações: a) tapagem de covas - nível 3; b) remendos - nível 3

A título de exemplo, a Figura 31 ilustra, quantifica e classifica os diferentes tipos de patologias identificadas ao longo de uma extensão de três quilómetros, em ambos os sentidos da estrada. A totalidade das degradações identificadas ao longo da extensão encontra-se representada nas Figuras A1 e A2 dos Anexos.

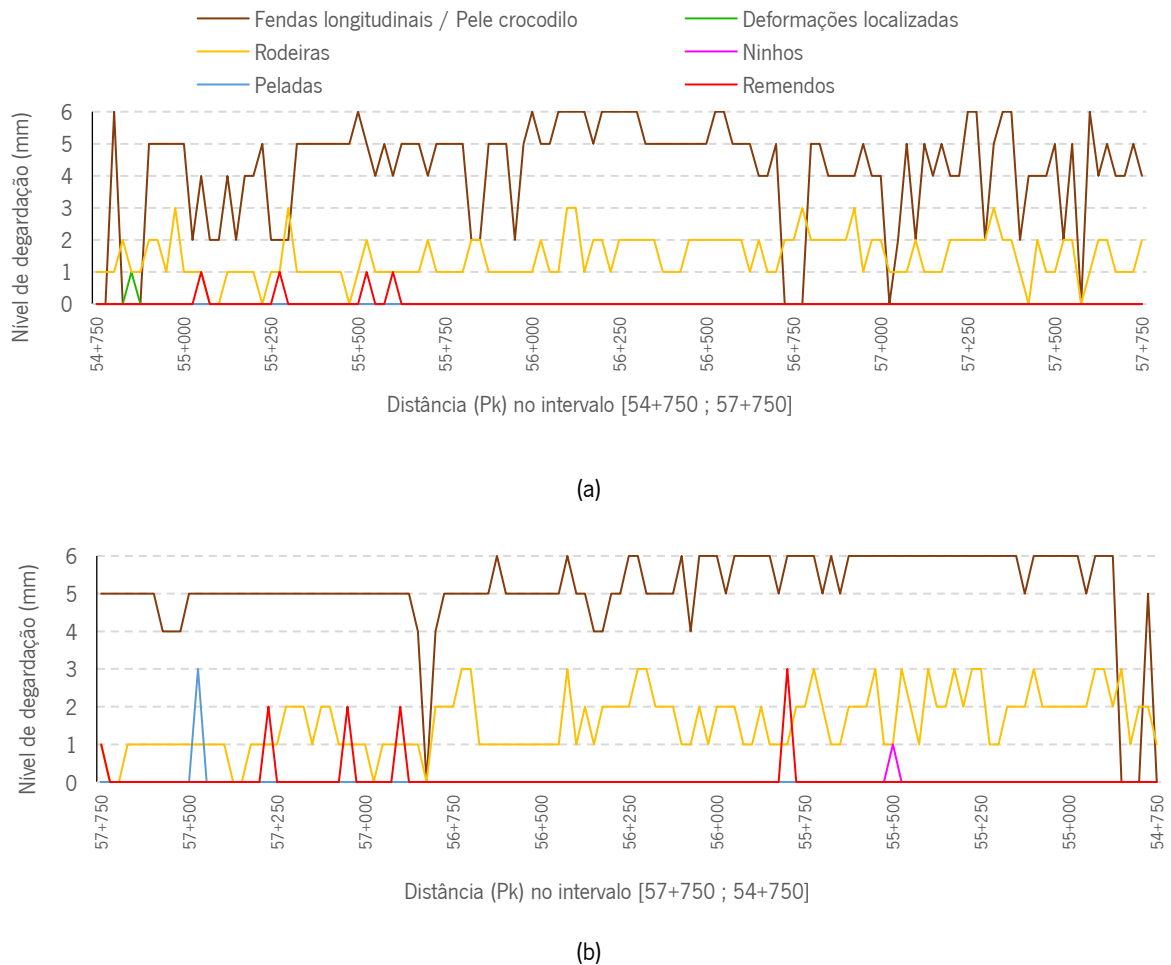


Figura 31 – Caracterização do estado superficial do pavimento:
a) trecho de 3 km no sentido Norte/Sul; b) trecho de 3 km no sentido Sul/Norte

Os resultados das patologias evidenciam a predominância expressiva de patologias do tipo "pele de crocodilo" avaliados a um nível máximo de degradação, o que reflete a fragilidade funcional e o avançado estado de fadiga do pavimento.

O levantamento revela um estado avançado de degradação na camada de desgaste, comprometendo tanto a funcionalidade como a segurança da estrada. O nível de degradação observado justifica a necessidade de uma intervenção urgente de repavimentação, de modo a garantir a integridade estrutural da estrada e a segurança aos seus utilizadores.

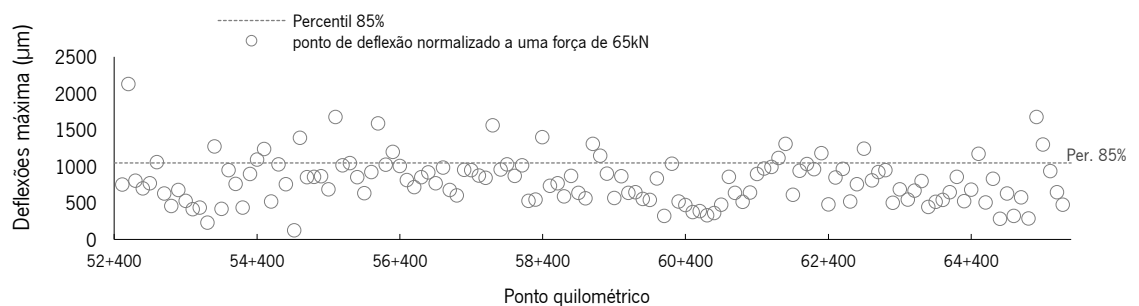
Relativamente às últimas operações de manutenção, em 2004, antes da sua transferência para gestão municipal (MOPTH e CMBarcelos, 2004), a Infraestruturas de Portugal realizou uma última intervenção nas camadas superficiais do troço em questão. Essa intervenção baseou-se na aplicação de uma camada de reforço na camada de desgaste do pavimento. Desde então, ao longo dos últimos vinte anos, as ações realizadas restringiram-se a intervenções pontuais, geralmente associadas ao fecho de valas para a instalação de infraestruturas de saneamento de águas residuais. Estas obras, executadas no âmbito de empreitadas municipais, resultaram em repavimentações localizadas, que, ao invés de mitigar os problemas estruturais, acabaram por contribuir para a degradação progressiva da superfície do pavimento. O estado de degradação atualmente observado reflete os impactos acumulados destas intervenções fragmentadas e da ausência de uma manutenção estruturada e abrangente ao longo do tempo.

4.3. CAPACIDADE DE CARGA DO PAVIMENTO

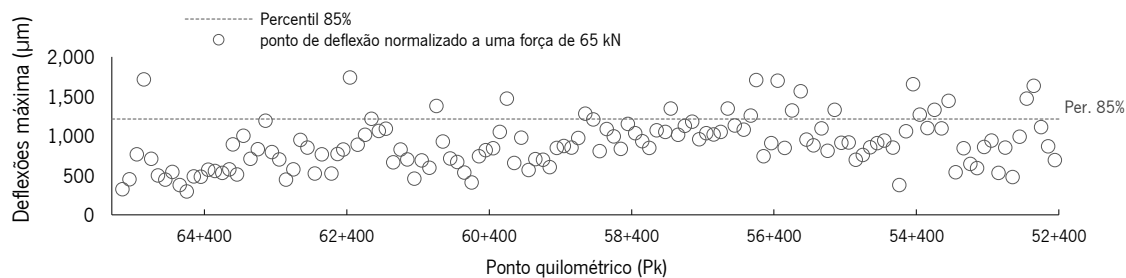
Nos gráficos da Figura 32 são apresentados os resultados dos ensaios de deflexão normalizados para a carga de 65 kN, distribuídos ao longo dos sentidos Norte/Sul e Sul/Norte da via. A divisão do pavimento em segmentos ou trechos de comportamento homogéneo foi realizada com base no método das diferenças acumuladas, em que os trechos são definidos a partir de cada mudança de inclinação dos valores das diferenças acumuladas, conforme se pode observar na Figura 33. Complementarmente, a Tabela 7 sintetiza a extensão e a deflexão característica (percentil 85%) de cada trecho homogéneo, destacando a heterogeneidade estrutural do pavimento.

De acordo com a metodologia adotada, foram definidos no sentido de norte para sul, sete segmentos com comportamento estrutural homogéneo. Em sentido oposto, de sul para norte, foram determinados oito trechos com as referidas propriedades. A localização dos trechos no local teve como referência os pontos quilométricos (Pk) da Estrada Nacional 306.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

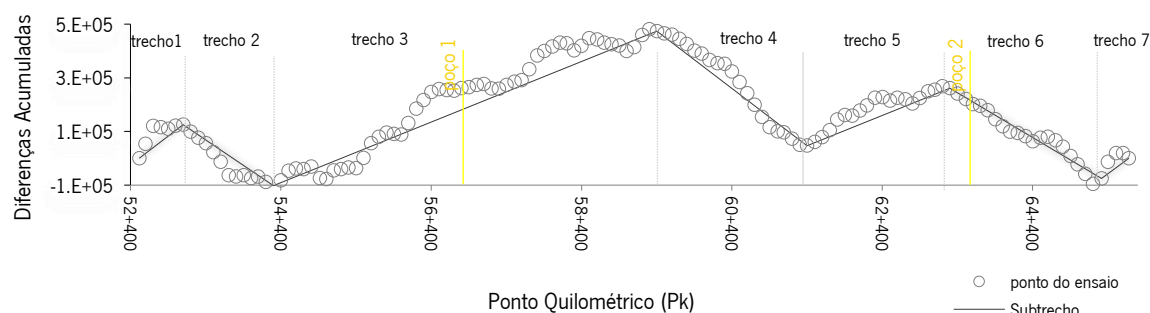


(a)

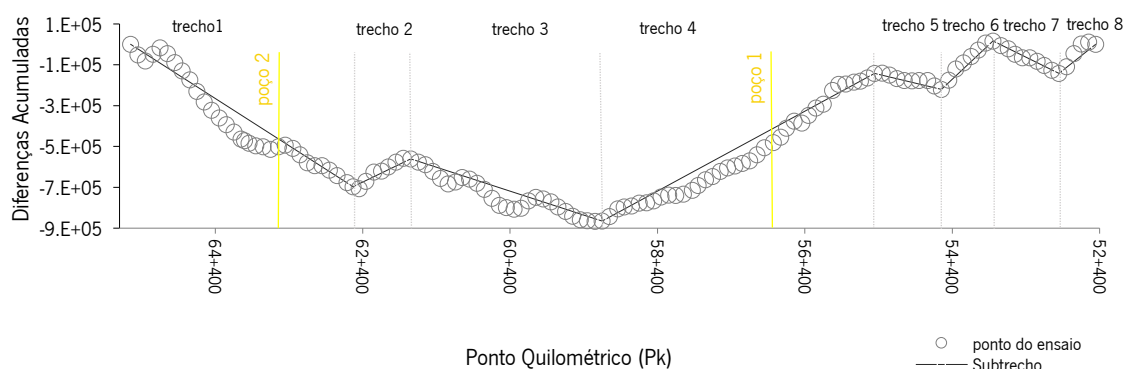


(b)

Figura 32 – Deflexões normalizadas para uma carga de 65kN: a) Sentido Norte/Sul; b) Sentido Sul/Norte



(a)



(b)

Figura 33 – Divisão do pavimento em trechos de comportamento homogêneo: a) sentido Norte/Sul; b) sentido Sul/Norte

Com base nos resultados anteriores foi possível identificar o início e fim de cada trecho, conforme se apresenta na Tabela 7.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Tabela 7 – Extensão e deflexão característica de cada trecho de comportamento homogéneo

Sentido	Trecho	Extensão (m)	Deflexão característica (μm)
Norte/Sul	1	579	1324
	2	1155	827
	3	5074	1172
	4	1979	839
	5	1879	1134
	6	2008	803
	7	474	1448
Sul/Norte	1	3057	873
	2	766	1212
	3	2586	942
	4	3691	1330
	5	865	919
	6	714	1468
	7	899	861
	8	572	1514

Na Figura 34 encontra-se a representação gráfica das localizações geográficas de cada um dos trechos de comportamento homogéneo.

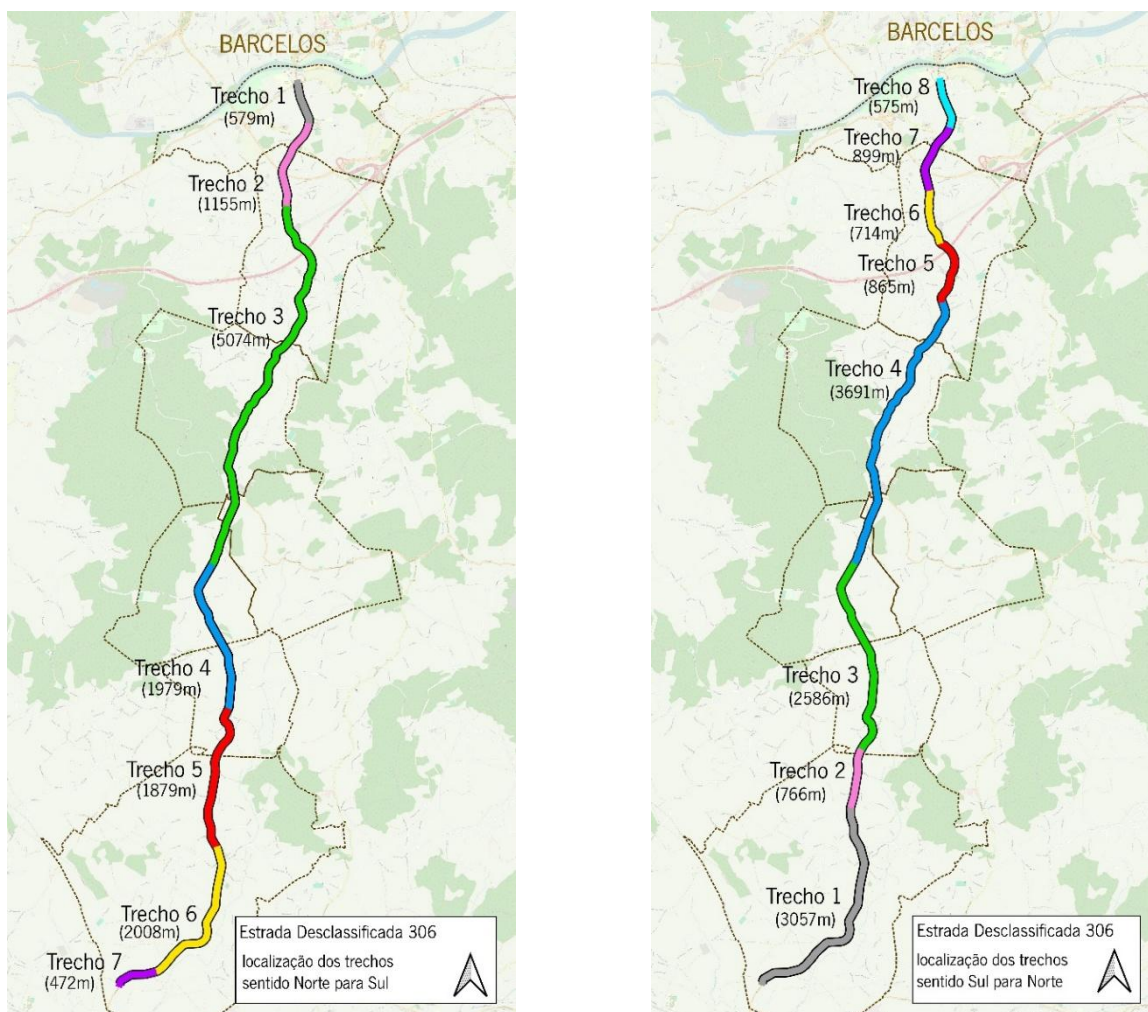


Figura 34 – Localização dos trechos de comportamento homogéneo

A análise dos dados permite identificar as características específicas de cada trecho com comportamento homogêneo, nomeadamente a sua localização, extensão e valores característicos de deflexão. Adicionalmente, ao considerar a localização dos trechos ilustrados na Figura 34 e os valores de deflexão apresentados na Tabela 7, foi possível estabelecer uma correspondência analógica entre trechos paralelos que se encontram em sentidos opostos.

4.4. IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO

Para o levantamento do IRI é recomendado que o veículo de transporte do equipamento de medição atinga uma velocidade constante de 80km/h. No entanto, dado o estado de degradação e a geometria sinuosa do traçado na secção em análise, agravado por condicionantes como cruzamentos, passadeiras sobrelevadas, tráfego local e limites de velocidade, não foi possível realizar os registos dos parâmetros do IRI à velocidade recomendada. Em consequência destas limitações, os registos foram efetuados a uma velocidade média de 40 km/h, com resultados representados na Figura 35.

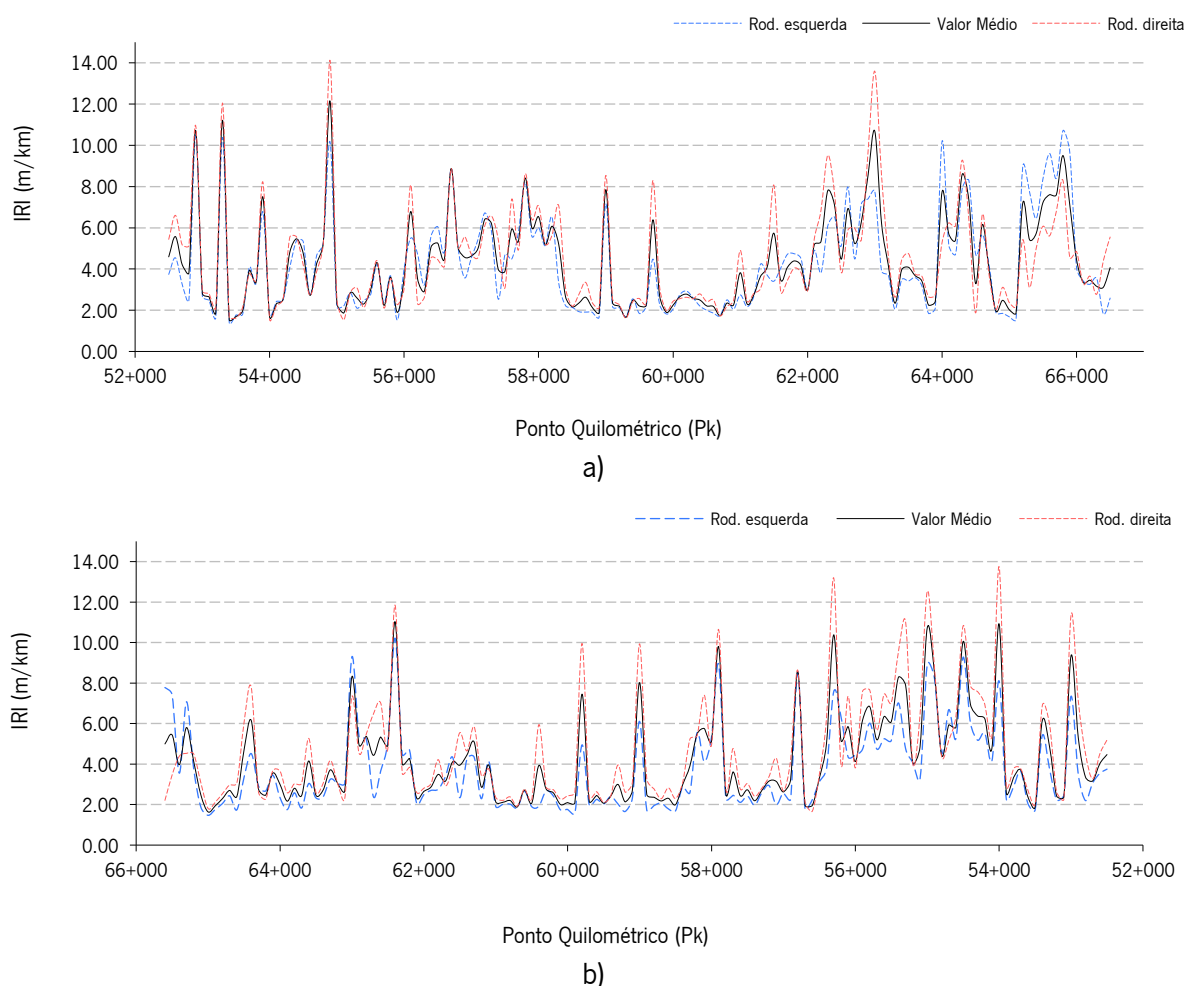


Figura 35 – Valores de IRI: a) no sentido Norte/Sul; b) no sentido Sul/Norte

A análise dos gráficos revela uma expressiva irregularidade do pavimento no rodado direito. Este comportamento poderá estar associado a uma maior concentração de degradações nessa área específica, possivelmente resultantes de cargas repetitivas mais intensas ou por uma deficiente drenagem das águas pluviais.

Comparando os resultados do levantamento com os valores de referência do Caderno de Encargos Tipo Obra para o IRI (Tabela 4), obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Percentagem de valores que cumprem os limites especificados			
Valores limites do IRI	2,0 (m/km)	3,0 (m/km)	3,5 (m/km)
Percentagem de valores de IRI medidos no sentido Norte/Sul	9.22%	37.59%	43.26%
Percentagem de valores de IRI medidos no sentido Sul/Norte	5.30%	41.67%	50.00%

De acordo com os valores percentuais do IRI apresentados na Tabela 8, registados em ambos os sentidos da estrada, conclui-se que o trecho em análise se enquadra na classificação de “Mau”, conforme definido pelo Caderno de Encargos Tipo Obra, representado na Tabela 3 do presente trabalho.

4.5. MODELOS ESTRUTURAIS DO PAVIMENTO

Como já foi oportuno referir, a localização para a abertura dos poços foi definida com base nos trechos onde os valores característicos de deflexão atingem os seus máximos e mínimos. Assim, o poço com o valor característico mais elevado de deflexão, registado em 1330 micrómetros, foi identificado no trecho 4, no sentido Sul-Norte, na localidade de Pereira, ao ponto quilométrico Pk 56+820. Por sua vez, o poço correspondente ao valor mínimo de deflexão, com uma magnitude de 803 micrómetros, foi observado no trecho 6, no sentido Norte-Sul, situado na localidade de Macieira de Rates, no ponto quilométrico Pk 63+566 (Figura 36).

As sondagens realizadas permitiram determinar as espessuras das diferentes camadas em cada poço, bem como recolher informações sobre as propriedades de cada camada existente. Estes dados foram posteriormente utilizados na fase da modelação das características mecânicas do pavimento existente, e no dimensionamento das soluções de reabilitação.

As imagens representadas na Figura 37 mostram as camadas estratificadas dos materiais betuminosos recolhidos em cada um dos poços de sondagem. De referir que estas imagens apresentam as lajetas retiradas do poço de sondagem invertidas em relação à sua posição original, pois foram pousadas na sua face plana (correspondendo à superfície do pavimento).

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

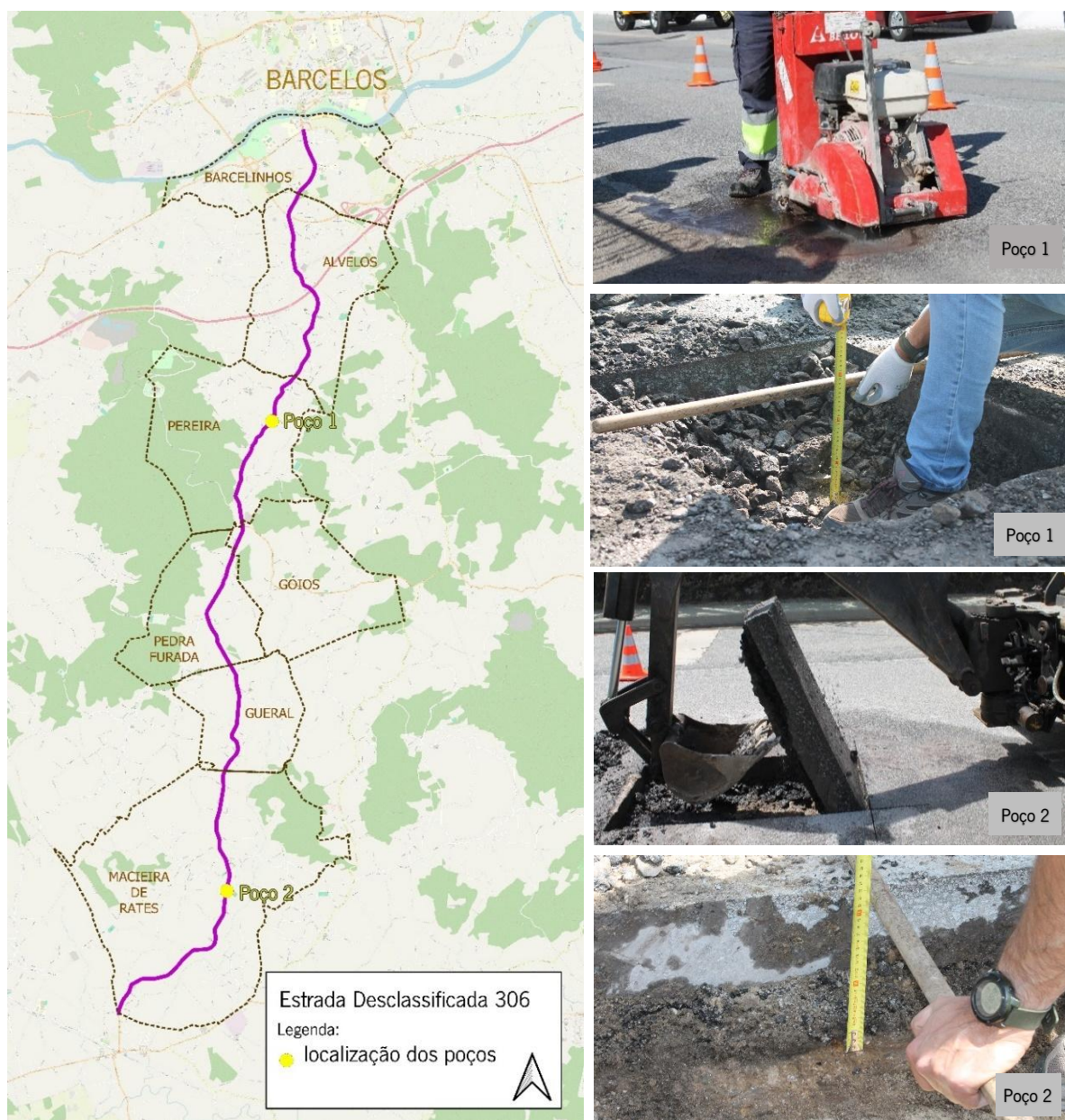


Figura 36 – Localização e processo de abertura dos dois poços de sondagem



Figura 37 – Amostra das camadas betuminosas extraídas dos poços de sondagem: a) poço 1; b) poço 2

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Nas imagens apresentadas nas Figuras 36 e 37 é possível identificar as diferentes camadas betuminosas que compõem a estrutura do pavimento, assim como os materiais utilizados e a respetiva espessura de cada camada.

Conforme ilustra a Figura 38, a abertura dos poços permitiu determinar as espessuras de cada camada existente até ao solo de fundação, identificar os diferentes tipos de materiais utilizados em cada camada e recolher amostras para posterior caracterização.

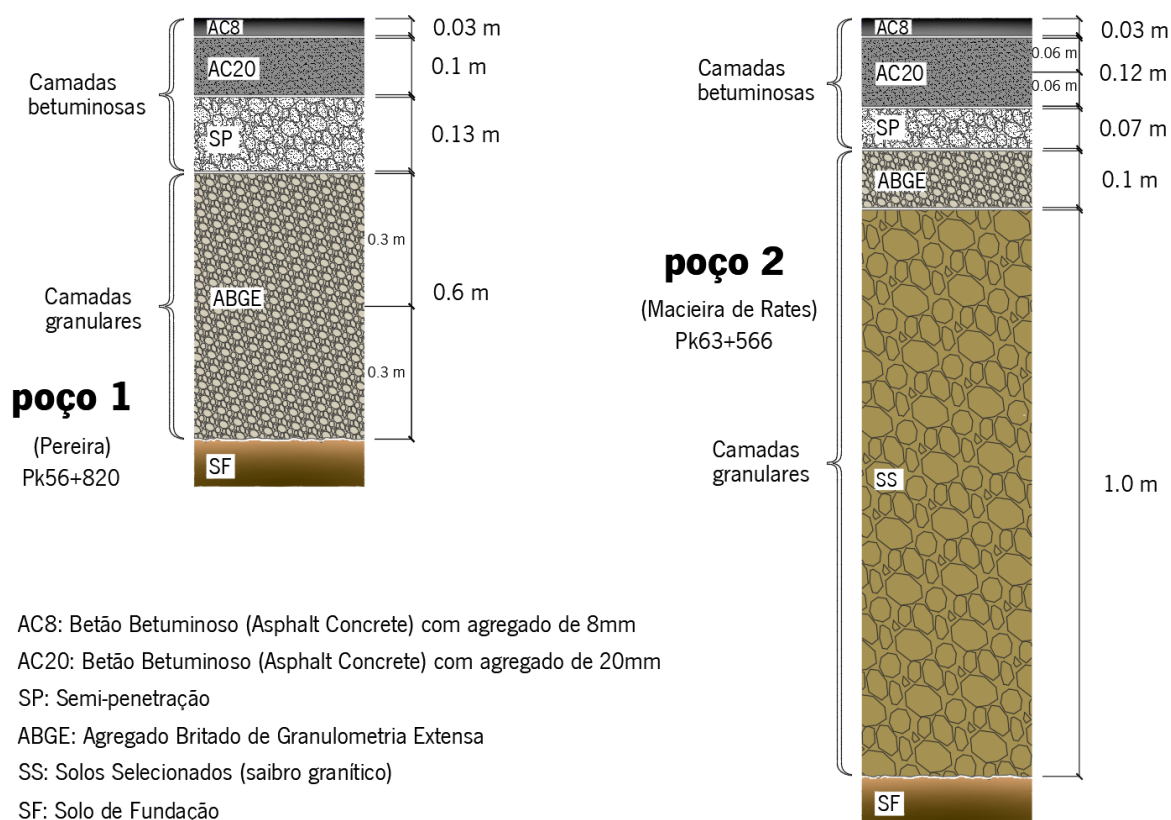


Figura 38 – Composição do pavimento estratificado em cada poço de sondagem

Em comparação com o poço 1, o poço 2 apresenta uma maior espessura de camadas granulares, enquanto as camadas betuminosas possuem menor espessura.

A Figura 39 apresenta o modelo estrutural das diferentes camadas de um determinado trecho, obtido no programa JPavBack. Por meio de um processo iterativo de cálculo usando este programa, foi possível ajustar a curva dos valores simulados à curva dos dados medidos em campo, permitindo a consequente redução do erro entre as deformações registadas e as calculadas. Considerou-se adequado um erro inferior a 10%, apesar de o exercício ter sido realizado de forma a reduzir o erro para valores significativamente inferiores a esse valor.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

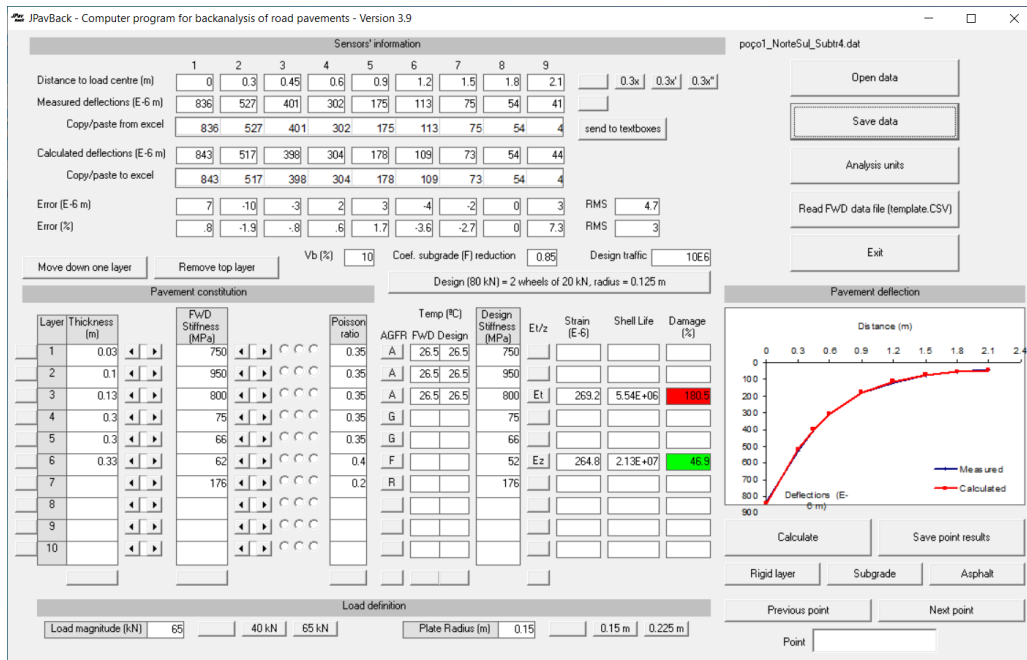


Figura 39 – Exemplo de modelação do pavimento no JPavBack

Na Tabela 9 encontram-se representados os resultados da modelação com as respetivas espessuras das camadas de cada trecho de comportamento homogéneo, e os correspondentes módulos de rigidez.

Tabela 9 – Representação do modelo estrutural de cada trecho

Norte/Sul	Trecho 1/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	1,53	
		rigidez (MPa)	490	700	640	77	66	45	66
	Trecho 2/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	0,45	
		rigidez (MPa)	830	1020	1100	90	70	45	130
	Trecho 3/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	0,45	
		rigidez (MPa)	470	650	770	80	40	20	130
	Trecho 4/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	0,33	
		rigidez (MPa)	750	950	800	75	66	62	176
	Trecho 5/poço 2	espessura (m)	0,03	0,12	0,07	0,1	0,5	0,5	0,26
		rigidez (MPa)	810	1050	550	83	48	46	37
	Trecho 6/poço 2	espessura (m)	0,03	0,12	0,07	0,1	0,5	0,5	0,32
		rigidez (MPa)	1150	1220	1190	128	89	53	37
Sul/Norte	Trecho 7/poço 2	espessura (m)	0,03	0,12	0,07	0,1	0,5	0,5	0,54
		rigidez (MPa)	890	990	930	62	57	44	20
	Trecho 1/poço 2	espessura (m)	0,03	0,12	0,07	0,1	0,5	0,5	0,3
		rigidez (MPa)	1700	1800	1200	152	76	38	20
	Trecho 2/poço 2	espessura (m)	0,03	0,12	0,07	0,1	0,5	0,5	0,4
		rigidez (MPa)	950	1000	550	120	60	30	17
	Trecho 3/poço 2	espessura (m)	0,03	0,12	0,07	0,1	0,5	0,5	0,96
		rigidez (MPa)	1000	1150	1050	167	78	50	29
	Trecho 4/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	0,4	
		rigidez (MPa)	855	1015	974	81	54	19	140
	Trecho 5/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	1,5	
		rigidez (MPa)	300	490	600	71	43	33	140
	Trecho 6/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	0,86	
		rigidez (MPa)	310	710	390	65	56	20	145
	Trecho 7/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	0,47	
		rigidez (MPa)	850	1100	650	90	76	64	127
	Trecho 8/poço 1	espessura (m)	0,03	0,1	0,13	0,3	0,3	0,53	
		rigidez (MPa)	690	850	400	60	45	21	78

A análise da Tabela 9 permite observar uma variação dos módulos de rigidez/deformabilidade ao longo do troço em estudo, evidenciando a heterogeneidade estrutural do pavimento e os diferentes estados de conservação em que a estrada se apresenta.

Ao analisar os resultados obtidos, para os diferentes trechos em ambos os sentidos da estrada, verifica-se uma proximidade nos valores entre trechos adjacentes, o que pode ser visto como um indicador da uniformidade estrutural entre secções confinantes. Apesar disso, convém referir que o número de poços de sondagem é relativamente limitado para o número de trechos considerado e para a extensão do pavimento em estudo, conforme já foi referido.

4.6. DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

No âmbito deste estudo de reabilitação, foram idealizadas três soluções distintas, cada uma com características específicas de intervenção nos trabalhos de repavimentação.

A primeira solução consiste no reforço do pavimento existente com a aplicação de novas camadas betuminosas sobre o atual pavimento. Conforme recomenda o Caderno de Encargos da IP, neste tipo de alternativa deve ser utilizada uma membrana com a função de retardar a propagação de fendas, a ser aplicada sobre o pavimento existente (EP, 2014).

A segunda solução prevê a fresagem integral das camadas betuminosas, incluindo a camada de semipenetração existente, seguida da reposição com novas camadas betuminosas, de modo a manter a cota original do pavimento.

Por fim, a terceira solução apresenta um cálculo otimizado para cada trecho/subtrecho do pavimento, com fresagem e reposição ajustadas às suas necessidades estruturais, mantendo a parte inferior da camada de semipenetração e preservando também a cota original do pavimento.

O dimensionamento das soluções foi realizado com o apoio do *software* JPav, cujo princípio de funcionamento é semelhante ao do JPavBack, permitindo obter os valores das extensões instaladas numa determinada estrutura de um pavimento. Esses valores foram utilizados no método empírico-mecanicista para determinar as espessuras das camadas, garantindo que os valores de extensão não ultrapassam os limites admissíveis definidos nas Lei de Fadiga da Shell.

A Figura 40 ilustra o *software* de cálculo JPav, utilizado no dimensionamento de uma das soluções de reabilitação. Esta solução em particular consiste na substituição das camadas betuminosas existentes.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

JPav - Computer program to design road pavements - Version 3.6

.poço2_NorteSul_Subtr7

Load definition

Number of loads: ☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 6

Magnitude of each load (kN):

Radius (m):

Wheel distance (m):

Axle distance (m):

Pressure (kPa) (100 psi = 690 kPa):

Gap (m):

Open data file

Save data file

Calculate

View results

Create CSV file

Run batch file

Exit

Traffic

Design traffic:

Years:

Grow rate (%):

Calculator

Fatigue laws

☒ Shell ☐ User ☐ FAA

View laws

Vb (%):

User

View laws

a: b:

c: d:

Cement

View laws

a (0.06 - 0.1):

Sigma r (MPa):

Pavement constitution

Layer	Thickness (m)	Stiffness (MPa)	Stiffness calculator	Poisson ratio	Interf stiff (GPa)
1	0.05	6494		0.35	
2	0.08	7016		0.35	
3	0.09	7560		0.35	
4	0.1	62		0.35	
5	0.5	57		0.35	
6	0.5	44		0.35	
7		20		0.4	
8					
9					
10					

Depths for calc

Top	Mid	Bot
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☒	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☒	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐

Profiles

Vertical # points:

Horiz: ☐

Pavement design

Layer	Et/z St	Strain (E-6) Stress (MPa)	Life	Damage (%)	Years
1					
2					
3	Et	133.16	3289605	32.5	61.4
4					
5					
6					
7	Ez	272.76	1896478	5.6	354.3
8					
9					
10					

calculated

Horizontal positions for calculation (m)

X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	0	0.0625	0.1875							
Y	0	0	0							

Horizontal profile

	Initial	Final	Incr.
X			
Y			

Results

Display result file: ☐ Yes ☒ No

File name:

Figura 40 – Exemplo de cálculo do novo do pavimento no JPav

Na análise apresentada na Figura 40, é evidente que a coluna relativa ao dano espectável do pavimento, no final de vida útil, mostra um valor significativamente inferior a 100%, resultando num claro sobredimensionamento estrutural. O mesmo se verifica na previsão da durabilidade da solução, que ultrapassa largamente os 20 anos originalmente definidos no projeto, tornando a solução economicamente desinteressante.

Contudo, estas diferenças nos resultados dizem respeito ao tipo de solução adotada, que difere consideravelmente entre as alternativas, como se poderá verificar mais adiante na análise de resultados.

4.6.1. Reforço com sobreposição de novas camadas

Nesta solução, novas camadas betuminosas são sobrepostas ao pavimento existente, sem remoção das camadas atuais. Os cálculos realizados indicam que as espessuras adicionais variam entre 8 e 13 centímetros, como apresentado na Figura 41a), para o sentido Norte-Sul, e na Figura 41b) para o sentido Sul-Norte. Esta variação é considerada adequada em transições longitudinais, assegurando uma adaptação suave e evitando inclinações excessivas.

No entanto, esta solução apresenta desafios no perfil transversal da estrada. A proximidade entre os dois segmentos de estrada dificulta a transição gradual entre cotas de superfícies, resultando num desnível ou "dente" que compromete a funcionalidade e segurança da via. Para mitigar este problema, optou-se

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

por harmonizar o nível do pavimento, adotando a cota mais elevada dos dois sentidos como referência, conforme ilustrado na Figura 41c). Este ajuste realizado em toda a faixa de rodagem diminui o número de trechos existentes ao longo do troço de estrada em estudo, de quinze para onze.

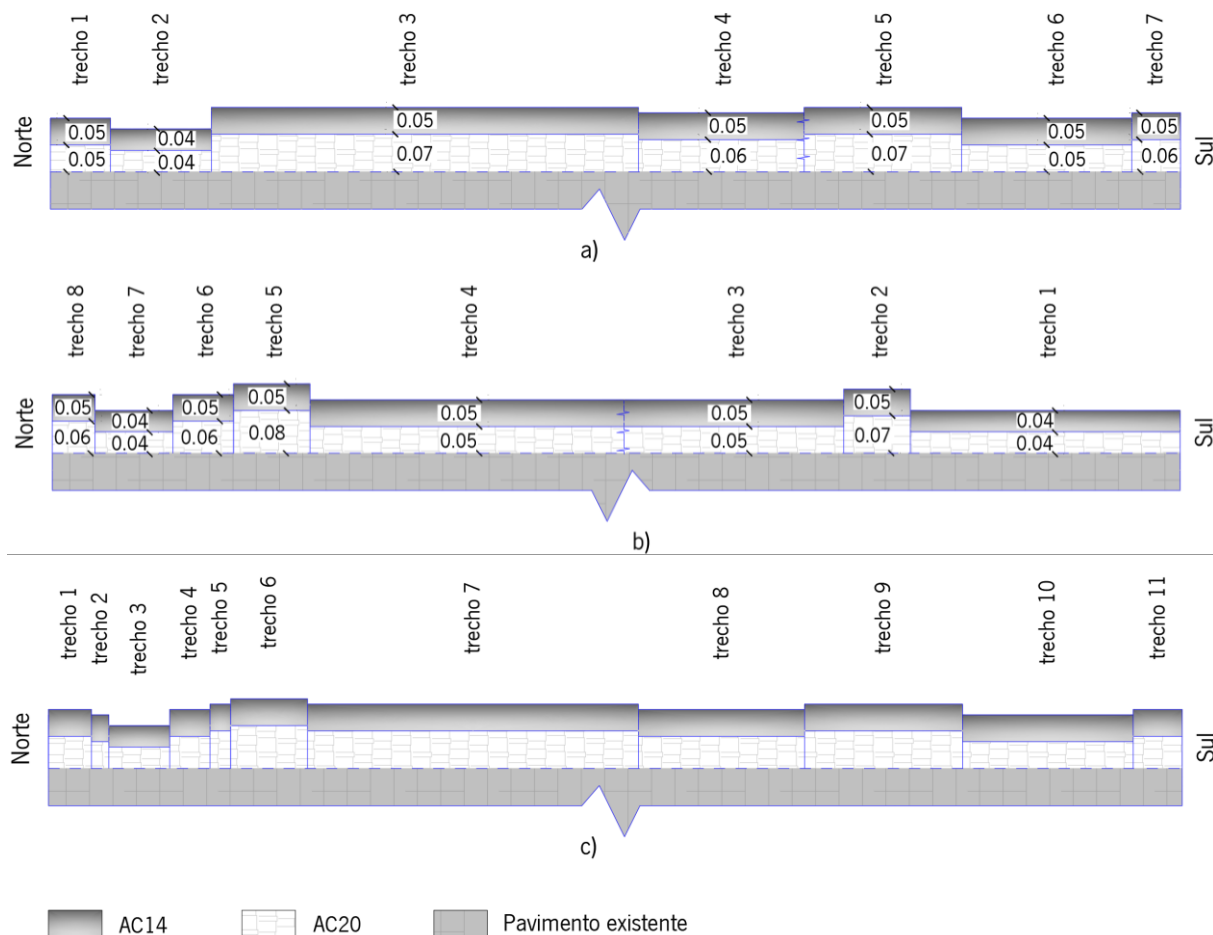


Figura 41 – Esquema em perfil longitudinal para a solução de reforço: a) 1ª proposta no sentido Norte/Sul; b) 1ª proposta no sentido Sul/Norte; c) 2ª proposta para ambos sentidos

Na Tabela 10, são apresentados os valores previstos de dano acumulado ao final do período de 20 anos, considerado no projeto de dimensionamento, bem como a estimativa da vida útil espectável até o pavimento atingir a ruína.

Tabela 10 – Estimativa do dano e vida útil para a solução de reforço do pavimento

Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Comprimento (m)	497	201	704	465	239	886	3823	1920	1926	1972	518
Camada de desgaste (cm)	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
Camada de base (cm)	6	5	4	6	7	8	7	6	7	5	6
Dano (%)	78,7	98,5	89,4	95,4	79,2	90,2	79,2	83,1	92,9	79,3	97,3
Vida útil (anos)	25,3	20,3	22,3	20,9	25,2	22,1	25,2	24	21,5	25,1	20,5

Esta abordagem apresenta uma solução conservadora que favorece a funcionalidade e longevidade da infraestrutura. Contudo, a necessidade de reajustar as infraestruturas existentes, como passeios, tampas

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

de saneamento, abastecimento de água e gás, sistemas de drenagem e acessos, dificulta a implementação da solução e poderá torná-la economicamente dispendiosa.

4.6.2. Substituição das camadas ligadas por materiais novos

Esta solução propõe a fresagem integral das camadas betuminosas existentes, seguida da reposição com novas camadas, mantendo a cota topográfica original do pavimento. As espessuras a fresar e repor, representadas na Figura 42, foram determinadas com base nas dimensões das camadas existentes, obtidas através das sondagens realizadas nos dois poços.

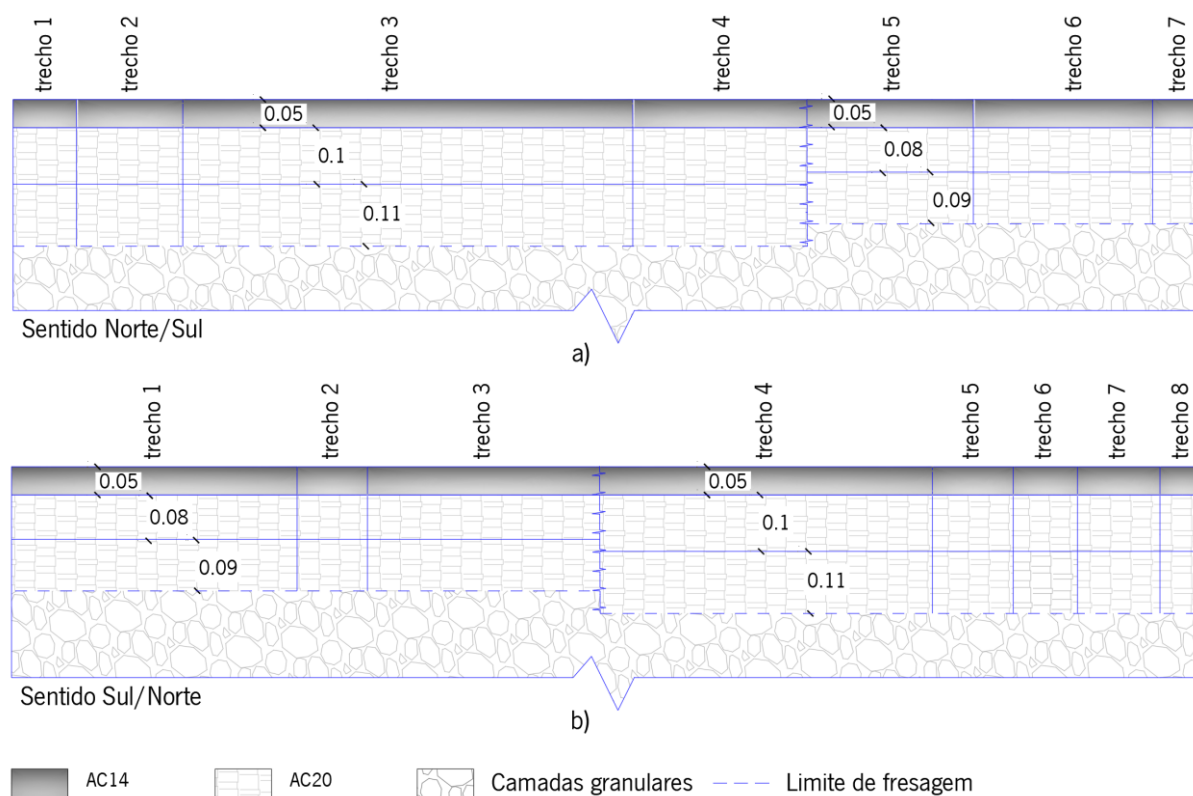


Figura 42 – Esquema em perfil longitudinal para a solução de substituição integral das camadas betuminosas existentes:
a) sentido Norte/Sul; b) sentido Sul/Norte

Para cada sentido de estrada, na Tabela 11 encontram-se os valores previstos de dano acumulado ao final dos 20 anos considerados no dimensionamento, e da estimativa da vida útil do pavimento até atingir o estado de ruína.

Tabela 11 – Estimativa do dano e vida útil para a solução de substituição integral das camadas betuminosas existentes

Trecho		1	2	3	4	5	6	7	8
Norte/Sul	Comprimento (m)	579	1155	5074	1979	1879	2008	472	
	Dano (%)	6,6	6,0	15,8	10,1	49,0	27,7	51,8	
	Vida útil (anos)	300,7	332,9	126,1	196,0	10,7	71,9	38,6	
Sul/Norte	Comprimento (m)	3057	766	2586	3691	865	714	899	575
	Dano (%)	35,6	45,3	29,5	15,4	13,3	8,5	4,1	9,0
	Vida útil (anos)	56,3	44,1	67,7	129,1	149,6	233,1	484,0	220,5

A substituição integral das camadas betuminosas por materiais novos demonstra uma divergência expressiva nos indicadores associados ao dano e à longevidade da infraestrutura, conforme se verifica na Tabela 11. A análise mostra um sobredimensionamento da solução, evidenciado pelos baixos níveis de dano acumulado em relação aos limites admissíveis. Com efeitos semelhantes, e em sentido oposto, esta solução mostra um aumento significativo do período estimado de vida útil do pavimento tendo em conta o período de 20 anos estabelecidos no projeto de dimensionamento.

Embora esta abordagem prolongue consideravelmente a vida útil do pavimento, a discrepância entre os indicadores de "vida útil" e "dano" compromete a sua viabilidade económica, sendo previsível um aumento considerável dos custos execução envolvidos, que se irá verificar na Secção 4.7.

4.6.3. Otimização das espessuras a reabilitar

À semelhança da solução anterior, a terceira solução representada na Figura 43 combina a fresagem e reposição das camadas betuminosas, mantendo a cota original do pavimento. No entanto, esta a solução visa otimizar os cálculos considerando as características estruturais de cada um dos trechos homogêneos. Este método faz uma análise individualizada de cada trecho, permitindo uma intervenção ajustada às necessidades identificadas, nomeadamente o tráfego de projeto, a constituição estrutural e os valores representativos da capacidade estrutural de cada um dos trechos.

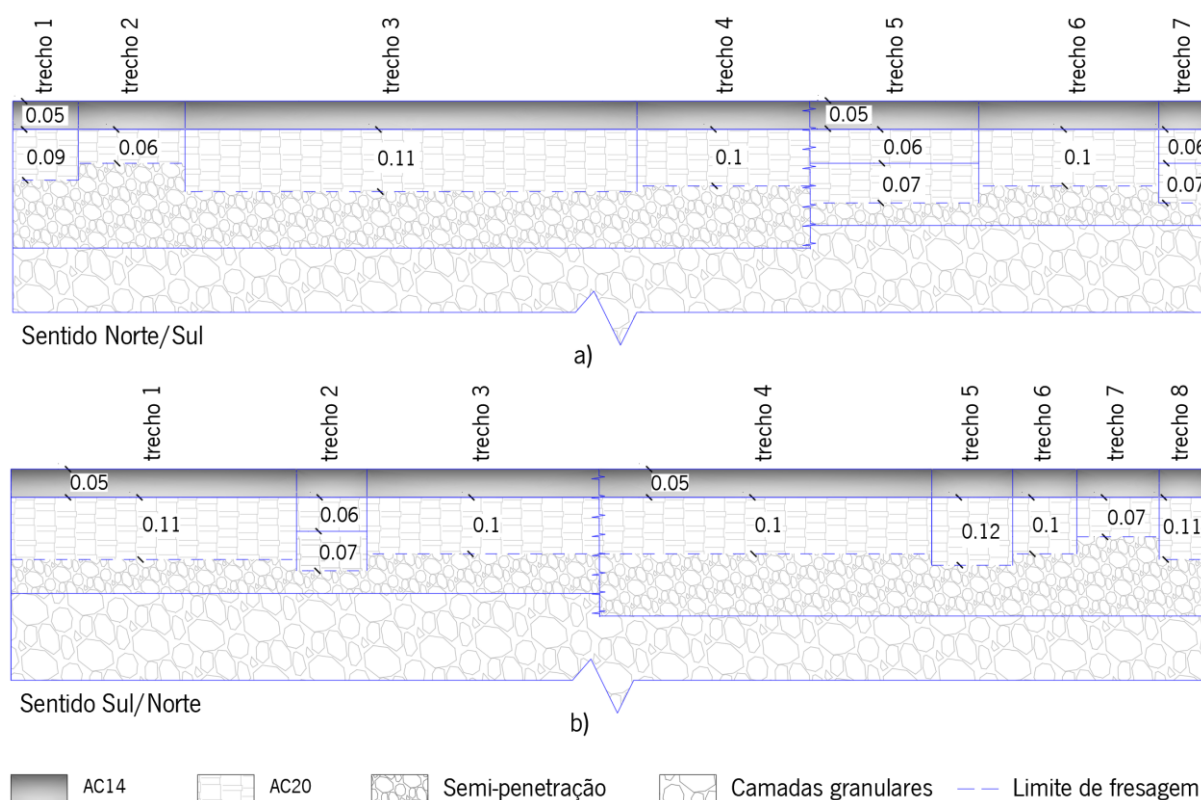


Figura 43 – Esquema em perfil longitudinal para a solução otimizada de substituição das camadas existentes: a) sentido Norte/Sul; b) sentido Sul/Norte

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

A Tabela 12 apresenta os valores estimados de dano acumulado ao final do período projetado de 20 anos, bem como a previsão da vida útil até o pavimento atingir o limite de desempenho.

Tabela 12 – Estimativa do dano e vida útil para a Solução 1 do novo pavimento

Trecho		1	2	3	4	5	6	7	8
Norte/Sul	Comprimento (m)	579	1155	5074	1979	1879	2008	472	
	Dano (%)	80,8	87,4	89,7	90,0	84,3	82,2	79,7	
	Vida útil (anos)	24,7	22,8	22,2	22,2	23,7	24,1	25,0	
Sul/Norte	Comprimento (m)	3057	766	2586	3691	865	714	899	575
	Dano (%)	87,3	81,0	92,8	90,5	78,7	94,6	86,7	78,1
	Vida útil (anos)	22,9	24,6	21,5	22,0	25,4	21,1	23,0	25,6

Os cálculos revelam que, ao intervir apenas nas espessuras necessárias para garantir uma vida útil de 20 anos, é possível reduzir significativamente os volumes de fresagem e o material novo a aplicar. Esta solução não só minimiza os custos diretos (fresagem, transporte, e fabrico de novas misturas), mas também reduz o tempo de execução e o impacte ambiental, apresentando-se como a abordagem mais eficiente e sustentável.

4.6.4. Análise comparativa das alternativas de reabilitação

A análise comparativa entre as três soluções de reabilitação revela diferenças consideráveis nos métodos de intervenção e nos resultados do dimensionamento estrutural do pavimento, sendo possível identificar as vantagens/desvantagens e especificações de cada abordagem.

No entanto, dos três métodos, destaca-se a solução de otimização das espessuras reabilitadas, como a abordagem mais eficiente. A partir do tráfego projeto, da constituição estrutural das camadas do pavimento e dos valores representativos da capacidade de carga em cada trecho, este método permite otimizar os volumes de fresagem assim como os volumes dos novos materiais a serem aplicados.

Ao garantir uma vida útil em linha com os valores de projeto, uma estimativa de dano ajustado ao tempo previsto de funcionamento da estrada, e uma otimização na execução da obra, a terceira solução consegue superar as limitações das outras duas propostas apresentadas.

4.7. AVALIAÇÃO ECONÓMICA DAS SOLUÇÕES

De seguida são apresentados os custos estimados para cada solução avaliada. Para cada alternativa determinaram-se os custos de duas soluções de pavimentação: (i) utilização de misturas betuminosas convencionais e (ii) utilização de misturas betuminosas recicladas com 50% de material fresado. Em função das características de cada alternativa, também foram estimados os custos referentes aos

trabalhos de fresagem do pavimento e de aplicação da membrana retardadora da propagação de fendas, quando aplicáveis.

Considerando a distância entre o local da obra e a central de produção de misturas betuminosas ou as unidades de triagem de resíduos de obra, é oportuno destacar que os custos de uma empreitada de repavimentação podem variar consideravelmente entre as propostas aqui apresentadas. Embora o custo das misturas betuminosas recicladas à “porta” da central de produção seja inferior ao das misturas convencionais, o fator “distância” entre a central e o local da obra pode justificar possíveis variações nos valores orçamentados pelos diferentes concorrentes à empreitada. Esta situação é particularmente relevante tendo em conta que, atualmente, apenas um número limitado de produtores está capacitado para fornecer misturas betuminosas com 50% de material fresado (a solução considerada mais sustentável).

4.7.1. Custos do reforço com sobreposição de novas camadas

Embora não esteja prevista a fresagem do pavimento e um consequente reaproveitamento do material antigo em novas camadas (50% de material reciclado), nesta primeira solução foi considerada a disponibilidade de material fresado proveniente de outras obras, que poderia ser utilizado na execução desta solução.

Tabela 13 – Estimativa de custo da solução de reforço com sobreposição de novas camadas

Mistura	Classificação	Custo individual	Custo das misturas	Custo da membrana	Custo total
Convencional	AC14	568 676 €	1 236 430 €	789 060 €	2 025 490 €
	AC20	667 754 €			
Reciclada (50% RAP)	AC14	458 610 €	985 784 €		1 774 844 €
	AC20	527 174 €			

Os custos desta solução, descritos na Tabela 13, encontram-se condicionados a trabalhos de acerto nas infraestruturas existentes, nomeadamente, no ajuste de cotas em tampas, válvulas, passeios e outros elementos que abrange esse tipo de tarefas. Em algumas situações esta alternativa poderá tornar-se tecnicamente inviável, como por exemplo no acesso a propriedades marginais.

4.7.2. Custos da substituição das camadas ligadas por materiais novos

Como foi possível averiguar previamente no dimensionamento das soluções, o sobredimensionamento desta segunda solução é evidente nos baixos níveis de dano acumulado, que permanecem abaixo dos limites admissíveis, e no aumento do período de vida útil do pavimento, em comparação com o horizonte

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

de projeto. Contudo, a sua aplicação poderia ser justificada pela necessidade de preservação das cotas originais do pavimento, de modo a garantir a funcionalidade da via.

Tabela 14 – Estimativa de custo da solução de substituição integral das camadas betuminosas existentes

Mistura	Classificação	Custo individual	Custo das misturas	Custo da fresagem	Custo total	
Convencional	AC14	574 765 €	2 621 013 €	585 926 €	3 206 939 €	
	AC20	2 046 248 €				
Reciclada (50% RAP)	AC14	463 520 €	2 078 979 €			2 664 905 €
	AC20	1 615 459 €				

De acordo com a análise da Tabela 14, o uso de misturas betuminosas recicladas apresenta custos mais competitivos, evidenciando uma opção mais sustentável e economicamente viável, tal como já se verificava na solução anterior. No entanto, os valores finais são bastante superiores, como resultado do sobredimensionamento observado.

4.7.3. Custos da solução de otimização das espessuras a reabilitar

Na terceira solução, a otimização dos cálculos para cada trecho traduz-se em menores volumes de fresagem e reposição de novos materiais, reduzindo custos associados ao transporte e materiais utilizados, como se pode analisar na Tabela 15. Além disso, o menor volume de trabalho irá contribuir para a redução do tempo de execução, diminuindo ao período do condicionamento da estrada.

Tabela 15 – Estimativa de custo da solução de otimização das espessuras a reabilitar

Mistura	Classificação	Custo individual	Custo das misturas	Custo da fresagem	Custo total	
Convencional	AC14	574 765 €	1 679 374 €	420 121 €	2 099 495 €	
	AC20	1 104 609 €				
Reciclada (50% RAP)	AC14	463 520 €	1 335 580 €			1 755 701 €
	AC20	872 060 €				

Entre as soluções avaliadas, esta última destaca-se pelo equilíbrio entre custo, funcionalidade e sustentabilidade, sendo uma escolha eficaz, em especial para as misturas recicladas.

4.7.4. Avaliação comparativa das soluções estudadas

Para avaliar de forma abrangente as alternativas em estudo, procedeu-se a uma análise multicritério, com os resultados consolidados no gráfico da Figura 44 e na Tabela 16.

Na análise comparativa dos custos estimativos da Figura 44, a solução de reforço com sobreposição de camadas, embora economicamente viável, apresenta limitações em cenários onde a elevação da cota do pavimento compromete reajuste das infraestruturas adjacentes. Entre as opções de reabilitação, destaca-se o uso de misturas recicladas, cujo custo é 16% inferior ao das misturas convencionais.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

Contudo, ressalva-se que a estimativa excluiu custos logísticos (transporte de materiais e fresado), fator que poderá influenciar os valores finais apresentados pelos empreiteiros.

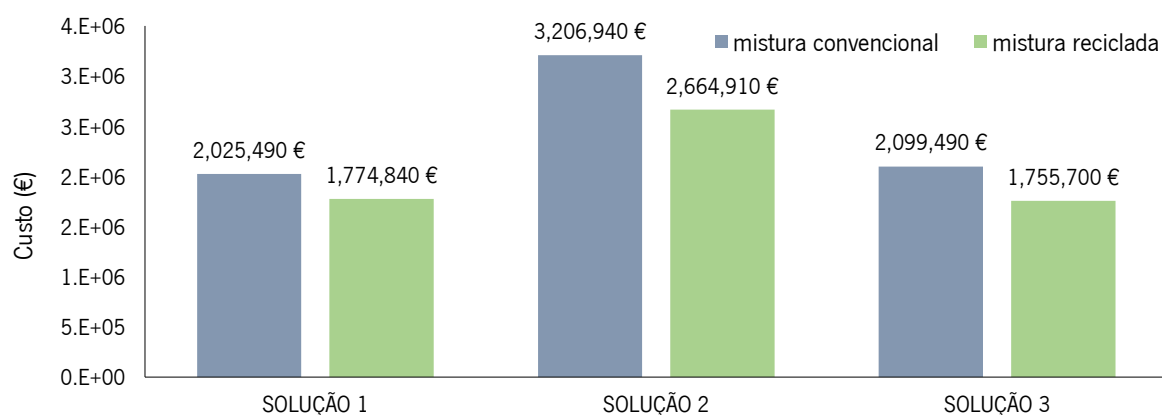


Figura 44 – Análise comparativa dos custos estimativos para cada solução

A comparação entre substituição total (Solução 2) e parcial (Solução 3) das camadas betuminosas revela que a última reduz os custos em 34%, aliando eficiência económica a menor produção de resíduos. Essa vantagem é reforçada pela avaliação multidimensional representada na Tabela 16.

Tabela 16 – Avaliação multidimensional das soluções

DIMENSÃO	CRITÉRIO	SOLUÇÃO 1	SOLUÇÃO 2	SOLUÇÃO 3
Desempenho Técnico e Estrutural	Capacidade estrutural	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★
	Viabilidade técnica	★	★ ★	★ ★ ★
	Projeção de vida útil	★	★ ★	★ ★ ★
Execução e Operacionalidade	Complexidade do projeto	★ ★ ★	★ ★	★
	Ajuste da cota de pavimento	★	★ ★ ★	★ ★ ★
Sustentabilidade e Impacto Ambiental	Produção de resíduos de construção	★ ★ ★	★	★ ★
	Impacto ambiental	★ ★	★	★ ★ ★
Custos e Viabilidade Económica	Custos de empreitada	★ ★ (*)	★	★ ★

(*) o arranjo das infraestruturas existentes encarece o custo da empreitada

Deste modo conclui-se que a Solução 3 equilibra desempenho técnico e viabilidade económica, posicionando-se como a alternativa mais adequada às necessidades do projeto. A estimativa de custos representados na Figura 44 confirma-o, evidenciando a sua competitividade frente às demais propostas.

4.8. IMPLICAÇÕES DA AUSÊNCIA DE CONSERVAÇÃO CORRENTE E PERIÓDICA NO DESEMPENHO DAS SOLUÇÕES ESTUDADAS

Este trabalho de Mestrado permitiu alcançar distintas conclusões sobre o estado atual de conservação do pavimento, destacando o desgaste pela ação contínua do tráfego, e das limitações funcionais no sistema de drenagem de águas pluviais. A última intervenção de fundo registada na camada de desgaste desta estrada aconteceu há mais de 20 anos, realizada pelo então Instituto das Estradas de Portugal, antes da transferência da gestão da estrada para o município (MOPTh e CMBarcelos, 2004).

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

A ausência de intervenções regulares ao longo deste período comprometeu progressivamente a integridade do pavimento. Este cenário revela a importância de um planeamento adequado de manutenções periódicas, cuja ausência permite que as degradações avancem de forma acelerada, afetando tanto as camadas superficiais como as camadas estruturais do pavimento.

As imagens apresentadas na Figura 45 evidenciam o impacto negativo na funcionalidade e desempenho da infraestrutura rodoviária, provocado pela falta de conservação.



Figura 45 – Degradações superficiais do pavimento provocadas por: a) problemas de drenagem; falta de conservação

Em fases avançadas de degradação da camada de desgaste, como ilustra as imagens da Figura 46, os danos propagam-se para as camadas granulares, até ao solo de fundação, de forma irreversível, exigindo intervenções profundas para a reabilitação estrutural do pavimento.



Figura 46 – Degradação superficial do pavimento: a) ninhos e peladas associadas a um elevado nível de fendilhamento do tipo “pele de corcodilo”; b) fendilhamento generalizado do pavimento

Em boa parte dos casos, a adoção de estratégias de manutenção corrente e preventiva poderia retardar o processo de degradação das camadas superficiais do pavimento, evitando que as estradas atingissem o seu estado crítico. Como se pode verificar nas imagens da Figura 47, a falta de manutenção do sistema

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

de drenagem provoca a acumulação de água na superfície do pavimento, o que reduz a sua capacidade de resistir às ações do tráfego, reduzindo o seu período de vida.



Figura 47 – Acumulação de água na superfície do pavimento por falta de conservação corrente

A falta de um sistema de drenagem de águas apropriado, ou falta de conservação dos sistemas de drenagem existentes é evidente em algumas situações, como mostram as imagens da Figura 48, podendo resultar na infiltração da água nas camadas inferiores do pavimento, o que reduz a capacidade de carga dessas camadas e leva à sua degradação precoce, e à deterioração das infraestruturas envolventes.



Figura 48 – Anomalias na drenagem de águas pluviais

Tendo em particular atenção a influência dos fatores climáticos na degradação dos pavimentos, na área científica da engenharia rodoviária, diversos estudos apontam a infiltração da água nas subcamadas do pavimento como um fator preponderante para a deterioração precoce das camadas estruturais.

Estudos conduzidos por Fernandes e Pais (2014, 2017) destacam a água como um dos principais agentes na degradação dos pavimentos betuminosos, ao comprometer a ligação entre o betume e os agregados assim como ao enfraquecer a estrutura com a migração da água para as subcamadas do pavimento. O aparecimento de fendas e deformações agravam o problema, permitindo a infiltração de água. A consequente permeabilidade nas camadas superiores do pavimento, traduz-se numa redução da capacidade de suporte e da vida útil da estrada.

Conforme descrito num estudo de Rokitowski *et al.* (2021), a água excessiva em pavimentos, combinada com um alto nível freático, contribui para a redução dos módulos de elasticidade das camadas inferiores do pavimento. A acumulação de água nas camadas de base compromete as camadas superiores, com o aparecimento de patologias como fendas e pele de crocodilo.

Ainda segundo Elseicy *et al.* (2022), a água provoca perda de aderência entre o betume e os agregados, dando origem à desagregação da camada superficial, evoluindo os níveis de degradação com o passar do tempo.

Em suma, o presente estudo reforça que a falta de intervenções de manutenção, tanto preventivas como corretivas, são fatores determinantes na degradação precoce e progressiva das camadas do pavimento, como se pode concluir pelos trabalhos citados.

A ausência de uma abordagem estratégica e proativa na gestão da conservação das infraestruturas rodoviárias reflete uma problemática comum no desenvolvimento de um território que se limita a responder às tendências e desafios com soluções ou medidas meramente passivas ou reativas. À semelhança dos conceitos descritos na obra "O Futuro das Cidades", esta postura não apenas condiciona a eficiência funcional do pavimento, mas também compromete o potencial de sustentabilidade e inovação no uso de recursos. A ausência de planos de manutenção das vias não só agrava os problemas estruturais das estradas, mas também apela à necessidade de ações que transcendam o meramente corretivo (Mendes, 2011).

Ainda no âmbito da conservação de estradas, neste trabalho, a viabilidade e durabilidade das soluções estudadas poderá ser condicionado por um sistema de drenagem inoperacional. A abordagem deste cenário obrigaria uma avaliação mais aprofundada do sistema de drenagem, que, embora fora do âmbito

desta dissertação, terá condicionado a evolução das degradações existentes no pavimento ao longo dos últimos anos, conforme evidenciam as imagens anteriores.

Em suma, este estudo académico procura divulgar conhecimento técnico no domínio dos pavimentos rodoviários, sublinhando a importância de práticas de reabilitação sustentáveis e estratégias de manutenção eficientes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Este estudo reforça a importância das infraestruturas rodoviárias para o desenvolvimento económico e social de um território, evidenciando os desafios da gestão da rede viária e a necessidade de estratégias sustentáveis para a reabilitação de pavimentos. A análise aprofundada realizada permitiu compreender a evolução da degradação de um troço específico da EN 306, destacando o impacto da ausência de intervenções regulares na integridade estrutural da via.

O trabalho incluiu a avaliação do estado atual do pavimento através de metodologias avançadas, com recurso a ensaios de campo e modelação estrutural. Foram identificadas degradações significativas decorrentes da ação do tráfego e das condições atmosféricas ao longo dos anos, tornando evidente a necessidade de adotar soluções eficazes de reabilitação.

De entre as alternativas estudadas, analisaram-se três abordagens: o reforço com sobreposição de novas camadas, a substituição integral das camadas betuminosas e a otimização das espessuras das camadas a intervir. Os resultados indicaram que a solução otimizada, que combina fresagem seletiva e reutilização de materiais reciclados, apresenta um melhor equilíbrio entre custo, eficiência técnica e impacto ambiental. O uso de misturas recicladas revelou-se economicamente mais vantajoso, reduzindo os custos em cerca de 16% face às misturas convencionais.

Para além da análise técnica e económica, este estudo enfatiza a necessidade de uma abordagem preventiva e proactiva na manutenção da infraestrutura rodoviária. A ausência de conservação periódica contribui significativamente para a aceleração dos danos, levando ao aumento de custos de reabilitação a longo prazo e à redução da funcionalidade da estrada.

Por fim, a dissertação evidencia a relevância da adoção de técnicas de reabilitação sustentáveis, que conciliem desempenho estrutural e eficiência económica com a preservação ambiental. Os resultados obtidos poderão servir de referência para futuras intervenções em infraestruturas viárias semelhantes, promovendo boas práticas na gestão e manutenção de pavimentos.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Apesar de se ter obtido resultados interessantes neste trabalho, há sempre a possibilidade de aprofundar alguns temas que podem servir como base para futuros estudos académicos. Desta forma propõe-se algumas abordagens que poderiam complementar este estudo.

Uma delas prende-se com a possibilidade de avaliar ou utilizar misturas betuminosas recicladas ou materiais estabilizados a frio em trabalhos de reabilitação. Esta técnica destaca-se pela capacidade de reduzir o consumo de energia durante a produção e permitir a reutilização total dos materiais reciclados. No entanto, é importante reforçar que este tipo de método não é apropriado para ser aplicado em camadas de desgaste.

Outro ponto relevante para trabalhos futuros seria o estudo da agressividade de maquinarias pesadas que não se enquadram nas tipologias de veículos pesados habitualmente considerados no dimensionamento de pavimentos, como os tratores agrícolas, no cálculo das cargas por eixo e do correspondente tráfego de dimensionamento. Nas contagens de tráfego, foram contabilizados números consideráveis de tratores agrícolas. No entanto, houve dificuldade em obter um fator de agressividade que refletisse as cargas aplicadas no pavimento, nomeadamente em termos de peso bruto e a área de contacto entre o pneu e o pavimento. Seria, assim, interessante estudar o impacto que esses tratores têm na transmissão das suas cargas para a superfície do pavimento, considerando a banda de rolamento do tipo de pneu especificamente utilizado neste tipo de veículos.

Seria igualmente pertinente explorar novas tecnologias para a monitorização do estado de conservação dos pavimentos. O recurso a ferramentas como sensores integrados e sistemas de deteção por imagem pode permitir identificar precocemente sinais de degradação, possibilitando intervenções de manutenção mais rápidas e eficazes. A aplicação destes sistemas poderá também ser testada em diferentes cenários práticos, incluindo técnicas de repavimentação e estudos científicos.

Por último, seria relevante investigar betumes sintéticos produzidos a partir de resíduos da indústria, nomeadamente óleos vegetais, plásticos reciclados ou outros materiais com potencial de valorização. Esta abordagem visa o desenvolvimento de soluções sustentáveis que possam representar uma alternativa viável aos betumes de origem petrolífera. A aplicação desses materiais não apenas contribui para a redução do impacto ambiental, mas também pode trazer benefícios económicos ao aproveitar resíduos industriais para a produção de betumes. Seria interessante analisar os custos de produção, a eficiência técnica e a durabilidade dos pavimentos construídos com esses betumes sintéticos. Esta

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada Desclassificada EN 306 em Barcelos

abordagem pode fornecer uma solução mais sustentável e economicamente viável para a indústria de pavimentação, promovendo o uso de recursos circulares com a reutilização, reciclagem e revalorização de materiais em fim de vida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGCO (2024). *Dados técnicos Fendt 900 Vario*, AGCO Corporation; https://api.fendt.com/techdata/BR/pt/1161092/Fendt-900-Vario?_gl=1*19jssak*_gcl_au*ODI3NjYzODkzLjE3MzQ0NjQyMzc; Acedido em 2024/12/18.
- Al-Assi, M., Kassem, E., Nielsen, R. (2020). Using Close-Range Photogrammetry to Measure Pavement Texture Characteristics and Predict Pavement Friction, *Transportation Research Record*, Vol. 2674 (10), pp. 794-805.
- Amaral, L. (2019). The Estado Novo Period After World War II: The Golden Age of Economic Growth, *The Modern Portuguese Economy in the Twentieth and Twenty-First Centuries*, p. 171-224, Springer International Publishing, Cham.
- Antunes, V., Marecos, V., Fontul, S., Freire, A. (2016). *Avaliação de propriedades de um pavimento rodoviário com recursos a ensaios não destrutivos*, 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Lisboa.
- Aurstad, J., Bergiers, A., Briessinck, M., Dabrowski, P., Ejsmont, S., Janku, M., Jones, M., Kamiya, K., Krafft, S., Leigri, M., Lima, H., Maeck, J., Moffatt, M., Nothard, B., Padure, F., Sjogren, L., Spielhofer, R., Stryk, J., Vaquero, J. (2019). *État de la technique dans le suivi de l'état des chaussées et l'interaction route/véhicule*, Comité Technique D.2: Chaussées. World Road Association (PIARC).
- Babashamsi, P., Md Yusoff, N.I., Ceylan, H., Md Nor, N.G., Salarzadeh Jenatabadi, H. (2016). Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 9 (4), pp. 241-254.
- Bairgi, B., Tarefder, R., Hasan, M.A., Hasan, M.M., Algburi, M., Khan, Z. (2022). Evaluation of Full-Depth Reclamation and Cold Central-Plant Recycling Mixtures for Laboratory Compaction, Mechanistic Response, and Performance Properties, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2676, pp. 036119812110705.
- Baptista, A.M.C. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: Contribuição para o seu estudo e aplicação*, Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Barcelos, C.M. (2024). *Revisão do Plano Diretor Municipal - Ano de 2024*, Câmara Municipal de Barcelos.
- Batista, F.A.B.A. (2004). *Novas técnicas de reabilitação de pavimentos : Misturas betuminosas densas a frio*, Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Bonnot, J., Domenichini, L., Herbst, G., Laclea, A., Mercer, J., Neussner, E., Verstraeten, J., Wilk, W. (1991). *Semi-Rigid Pavements*, Technical Committees on Concrete Roads and Flexible Roads, PIARC.
- Boulet, M., Robert, B., Delaval, E., Martin, J.M. (2009). *Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques - Exécution et exploitation des relevés profilométriques*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2016). *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra.
- Brna, M., Kováč, M., Pisca, P., Jandačka, D. (2023). Analysis of surface texture using photogrammetry, *Transportation Research Procedia*, Vol. 74, pp. 975-982.
- C. M. Barcelos (2010). *Revisão do Plano Director Municipal - 2002/2005*, Câmara Municipal de Barcelos.
- Castro, F., Carvalho, J., Henriques, G., Martins, A., Santos, J., Salvador, P., Almeida, J., Silva, H., Oliveira, J. (2024). Cold In-Plant Recycling with Foamed Bitumen for Road Rehabilitation: A Case Study on

- ER243 Road, *10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*, Guimarães, Portugal, pp. 12.
- CCE (1975). Diretiva do Conselho de 15 de julho de 1975 relativa aos resíduos (75/442/CEE). Conselho das Comunidades Europeias, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, Vol. 75/442/CEE, pp. 3.
- Čelko, J., Kováč, M., Kotek, P. (2016). Analysis of the Pavement Surface Texture by 3D Scanner, *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, pp. 2994-3003.
- CEN (2016). *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 5: Stone Mastic Asphalt*, EN 13108-5, Comité Européen de Normalisation, p. 45.
- Cruz, C.O. (2021). *Sistemas de transportes em Portugal*, Fundação Francisco Manuel dos Santos, Lisboa.
- Daimler Truck (2023). *Mitsubishi FUSO Canter - Fichas Técnicas*, Daimler Truck, AG; <https://www.fuso-trucks.com.pt/produtos/>; Acedido em 2024/12/29.
- Department of Defense (2021). *Standard Practice For Pavement Recycling*, NIBS, National Institute of Building Sciences, p. 167, MIL-STD 3007.
- Diefenderfer, B., Timm, D., Boz, I., Bowers, B. (2021). *Structural Study of Cold Central Plant Recycling Sections at the National Center for Asphalt Technology (NCAT) Test Track: Phase III*, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, USA.
- Diretiva 2008/98/CE (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance)*, Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, p. 20.
- DMU (2024). *Rede de Transportes Rodoviários da CMBarcelos*, Divisão de Mobilidade Urbana da Câmara Municipal de Barcelos.
- DPL, GCGSI (2011). *Relatório de Monitorização da Rede Rodoviária Nacional 2010*, Direcção de Planeamento, Gabinete de Controlo de Gestão e Sistemas de Informação, Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias (InIR), Lisboa.
- Dynatest (2020). *8000 Falling Weight Deflectometer (FWD)*, Dynatest Inc. US; https://dynatest.com/wp-content/uploads/2021/06/8000FWD_US.pdf; Acedido em 2024/12/28.
- Ebels, L.J., Lorio, R., Van der Merwe, C.P. (2004). The importance of compaction from an historical perspective, *23rd Southern African Transport Conference (SATC 2004)*, Pretoria, South Africa.
- Elseicy, A., Alonso-Díaz, A., Solla, M., Rasol, M., Santos-Assunção, S. (2022). Combined Use of GPR and Other NDTs for Road Pavement Assessment: An Overview, *Remote Sensing*, Vol. 14, pp. 4336.
- EP (2008). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários*, Gabinete de Gestão da Rede EP – Estradas de Portugal, S.A., Almada.
- EP (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra, 15.03 - Pavimentação - Métodos construtivos*, Estradas de Portugal S.A., Almada.
- ERF (2024). *About ERF*, European Union Road Federation; <https://erf.be/>; Acedido em 2024/04/01.
- Eurostat (2023). *Inland transport infrastructure at regional level*, 06-2023 ed, Eurostat; https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Inland_transport_infrastructure_at_regional_level; Acedido em 2024/04/25.
- Evdorides, H., Burrow, M., Nyoagbe, E. (2012). Strategies to clear road maintenance backlog, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, Vol. 165, Issue 4, pp. 205-213.

- FAE (2024). *Stone crushers RSH*, FAE, Group SpA; <https://www.fae-group.com/es/productos/land-clearing/cabecal-de-acople-de-fuerza-mecanica/trituradoras-de-piedras-para-tractores/rsh-hp>; Acedido em 2024/12/29.
- Farinha, L.M.P. (2021). Os planos rodoviários de 1945, 1985 e 1998. Uma análise a partir da lei, *Mobilidades: olhares transdisciplinares sobre um conceito global*, p. 387-405, CITCEM – Centro de Investigação Transdisciplinar Cultura, Espaço e Memória, Porto.
- Fernandes, F.M., Pais, J.C. (2014). Assessment of moisture in road pavements, *15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Brussels, Belgium.
- Fernandes, F.M., Pais, J.C. (2017). Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR, *Construction and Building Materials*, Vol. 154, pp. 1130-1138.
- Findlay Irvine (2024). *GripTester MK2 for Highways*; <https://www.findlayirvine.com/griptester-mk2>; Acedido em 2024/02/09.
- Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H.M.R.D.d., Oliveira, J., Abreu, L. (2013). Estudo de material fresado para incorporação em misturas betuminosas a quente com altas taxas de reciclagem, *7º Congresso Rodoviário Português*, Lisboa, pp. 11.
- Fraunhofer IPM (2018). *Top Score for Pavement Profile Scanner*, Press release / May 07, 2018, Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques; <https://www.ipm.fraunhofer.de/en/press-publications/press-releases/roadsurface-measurement-survey.html>; Acedido em 2024/02/02.
- Greenwood Engineering (2024). *Traffic Speed Deflectometer (TSD)*, Brøndby, Denmark; <https://greenwood.dk/road/tsd/>; Acedido em 2024/03/02.
- He, Y., Yang, X., Xiao, S., Liu, P., Lu, G., Xing, C., Fan, Z., Sheng, W., Wang, D. (2023). Experimental study on the high-speed frictional behavior between the tire and asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, Vol. 371, pp. 130782.
- Hun, C. (2002). *Exploitation de la texture d'images de speckle pour caractériser, de façon globale, l'état de surface des chaussées à l'échelle de microtexture*, Doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Université Louis Pasteur - Strasbourg I.
- Im, S., Zhou, F., Lee, R., Scullion, T. (2014). Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 53, pp. 596-603.
- INE (2021). *Recenseamento Agrícola - Análise dos principais resultados - 2019*, Instituto Nacional de Estatística; https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=437178558&PUBLICACOESmodo=2&xlang=pt; Acedido em 28/12/2024.
- InIR (2024). *Construção e reabilitação de pavimentos - Indicadores de estado de conservação dos pavimentos*, Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias (InIR), p. 30.
- IP (2021a). *Perifilómetro Laser (Laser Road Surface Tester)*, Infraestruturas de Portugal; https://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/styles/img_1150x550/public/2021-06/IMP%20%281%29.jpg?itok=cnQv8LPq; Acedido em 2025/01/16.
- IP (2021b). *Rede Rodoviária*, Infraestruturas de Portugal; <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/rede-rodoviaria-ip>; Acedido em 2024/01/07.

- IP (2021c). *Rede Rodoviária - Inspeção e diagnóstico*, Infraestruturas de Portugal; <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/inspecao-diagnostico-rodoviario>; Acedido em 2025/01/16.
- IRF (2021). *Rede Rodoviária Total*, International Road Federation; <https://datawarehouse.worldroadstatistics.org/dashboard/checksumgraph>; Acedido em 2024/04/01.
- ISO (2009). *Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 5: Determination of megatexture*, ISO 13473-5:2009, International Organization for Standardization, p. 29.
- Jacobson, T. (2002). Cold Recycling of Asphalt Pavement - mix in plant, *International Seminar on Road Pavement Recycling*, Warsaw (Poland), pp. 9.
- JAE (1950). *Mapa das Estradas Nacionais*, Junta Autónoma de Estradas, Ministério das Obras Públicas, Imp. Nacional, Lisboa.
- JAE (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.
- Jiménez, F.E.P. (2014). *Manual de Pavimentação*, 3ª edição, CEPISA, Espanha.
- Joint Departments of the Army and Air Force (1988). *Standard Practice for Pavement Recycling*, TM 5-822-10/AFM 88-6, Chapter 6, Departments of the Army, and the Air Force, USA.
- Kawakami, A., Kawashima, Y., Nitta, H., Yabu, M. (2019). An Examination of Property Changes of Repeatedly Recycled Asphalt Bitumen Using Rejuvenator with High Aromatic Content: Chemo-Mechanical Characterization of Bituminous Materials, *XXVII World Road Congress*, Prague, Czech Republic, pp. 189-194.
- LCPC (1998). *Catalogue des dégradations de surface des chaussées*, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris.
- LCPC, SETRA (1994). *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes Centre de la Sécurité et des Techniques Routières, Paris.
- Lei 34/2015 (2015). *Estatuto das estradas da Rede Rodoviária Nacional*, Lei nº 34/2015, de 27 de Abril, Diário da República, 1.ª série - N.º 81 - 27 de abril de 2015, p. 24, Portugal.
- Levenberg, E., Pettinari, M., Baltzer, S., Christensen, B.M.L. (2018). Comparing Traffic Speed Deflectometer and Falling Weight Deflectometer Data, *Transportation Research Record*, Vol. 2672 (40), pp. 22-31.
- Li, F., Feng, J., Li, Y., Zhou, S. (2021). In-Place Hot Recycling for Asphalt Pavement, *Preventive Maintenance Technology for Asphalt Pavement*, p. 129-132, Springer Singapore, Singapore.
- Martinho, F., Picado Santos, L., Pais, J. (2004). Reciclagem de Pavimentos Rodoviários - Seleção do Processo Construtivo, *3º Congresso Rodoviário Português*, Lisboa, Portugal, pp. 10.
- McAdam, J.L. (1827). *Remarks on the Present System of Road Making*, Printed for Longman, Hurst, Rees, Orme, Brown, and Green, Paternoster Row, London.
- McQuaid, G., Millar, P., Woodward, D. (2015). *Use of 3D modeling to assess pothole growth*, Proceedings of the 6th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, CRC Press, p. 161-166, Thessaloniki, Greece.

- Medeiros Jr, M., Babadopulos, L., Maia, R., Castelo Branco, V. (2023). 3D pavement macrotexture parameters from close range photogrammetry, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 24 (2), pp. 2020784.
- Mendes, J.F.G. (2011). *O Futuro das Cidades*, Edições Minerva, Coimbra.
- MEPAT (1998). *Plano Rodoviário Nacional (PRN 2000)*, Decreto-Lei n.º 222/98, Ministério do Equipamento do Planeamento e da Administração do Território, p. 11, Diário da República n.º 163/1998, Série I-A de 1998-07-17, páginas 3444 - 3454.
- MES (1985). *Plano Rodoviário Nacional 1985*, Decreto-Lei n.º 380/85, de 26 de setembro, Ministério do Equipamento Social, p. 9, Diário da República n.º 222/1985, Série I de 1985-09-26, páginas 3206 - 3214.
- Mohammad, L., Gaspard, K., Herath, A., Nazzal, M. (2007). *Comparative Evaluation of Subgrade Resilient Modulus from Non-destructive, In-situ, and Laboratory Methods*, Louisiana Transportation Research Center, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- MOPC (1945). *Plano Rodoviário 1945*, Decreto-Lei n.º 34:593, Sexta-feira 11 de Maio de 1945, Ministério das Obras Públicas e Comunicações
p. 22, Diário do Governo n.º 102/1945, 1.º Suplemento, Série I de 1945-05-11.
- MOPCT (2010). *Regulamento Que Estabelece o Quadro para a Homologação CE de Modelo de Automóveis e Reboques, Seus Sistemas, Componentes e Unidades Técnicas*, Diário da República, Decreto-Lei n.º 16/2010, de 12 de março, Ministério do Planeamento e das Infraestruturas.
- MOPHT, CMBarcelos (2004). *Auto de entrega à Câmara Municipal de Barcelos, do lanço da E.N.306, entre o km 40,200 e o km 63,800, na extensão de 23,600km*, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Habitação - Instituto das Estradas de Portugal, Direção de Estradas de Braga; Câmara Municipal de Barcelos, p. 2.
- MPI (2017). *Regulamento Que Fixa os Pesos e as Dimensões Máximos Autorizados para os Veículos em Circulação*, Diário da República, Decreto-Lei n.º 132/2017, de 11 de outubro, Ministério do Planeamento e das Infraestruturas.
- Nabizadeh, H., Haghshenas, H.F., Kim, Y.-R., Aragão, F.T.S. (2017). Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 152, pp. 65-73.
- NAMYSLO (2024). *Machines created with farmers*, NAMYSLO Agricultural Machinery; https://www-namyslo-pl.translate.goog/oferta/p/76.marracell.html? x_tr_sl=pl& x_tr_tl=pt& x_tr_hl=pt-PT& x_tr_pto=sc; Acedido em 2024/12/29.
- Nasimifar, M., Kamalizadeh, R., Heidary, B. (2022). The available approaches for using traffic speed Deflectometer data at network level pavement management system, *Measurement*, Vol. 202, pp. 111901.
- NHI (2024). *Concrete Pavement Preservation Series: Pavement Preservation Concepts*, FHWA-NHI-131126A, National Highway Institute; <https://www.nhi.fhwa.dot.gov/course-search?tab=0&key=Maintenance%20&cat=3&res=1>; Acedido em 2024/04/01.
- OECD (2024). *About OECD*, Organisation for Economic Co-operation and Development; <https://www.oecd.org/>; Acedido em 2024/04/01.
- Oliveira, J. (2003). *Reciclagem de Pavimentos Flexíveis - Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente*, Trabalho de Síntese apresentado no âmbito das provas de aptidão pedagógica e de capacidade científica, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

- Oliveira, J., Silva, H., Abreu, L., Pereira, P. (2012). Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 53, pp. 266–275.
- Oliveira, J., Silva, H., Martins, A., Correia, E., Pragosa, J., Mendes, P. (2023). A pavement full-depth reclamation case study using cold in situ recycling with foamed bitumen, *Transportation Research Procedia*, Vol. 72, pp. 4183-4190.
- Ongel, A., Hugener, M. (2015). Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 94, pp. 467-474.
- Oreto, C., Veropalumbo, R., Viscione, N., Biancardo, S.A., Russo, F. (2021). Investigating the environmental impacts and engineering performance of road asphalt pavement mixtures made up of jet grouting waste and reclaimed asphalt pavement, *Environmental Research*, Vol. 198, pp. 111277.
- Pacheco-Torgal, F., Amirkhanian, S. (2020). Introduction to eco-efficient pavement materials, *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, p. 1-10, Woodhead Publishing.
- Pacheco, E. (2001). *Alteração das acessibilidades e dinâmicas territoriais na Região Norte: expectativas, intervenções e resultantes*, Doutoramento em Geografia, Universidade do Porto.
- Pais, J., Pereira, P. (2016). The Effect of Traffic Overloads on Road Pavements, *Eighth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*, Singapura, pp. 309-318.
- Pais, J., Pereira, P., Minhoto, M., Baptista, A. (2008). Recycling of Asphalt Pavements with Asphalt Rubber, *3rd European Conference on Pavement and Asset Management*, Coimbra, Portugal.
- Pereira, P., Oliveira, J., Picado Santos, L. (2004). Mechanical Characterisation of Hot Mix Recycled Materials, *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 5, pp. 211-220.
- PIARC (2024). *About PIARC*, Permanent International Association of Road Congresses; <https://www.piarc.org/en/>; Acedido em 2024/04/01.
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review, *Construction and Building Materials*, Vol. 211, pp. 539-555.
- Plati, C., Georgiou, P., Loizos, A. (2014). Use of infrared thermography for assessing HMA paving and compaction, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 46, pp. 192-208.
- Pranjić, I., Deluka-Tibljaš, A., Cuculić, M., Šurdonja, S. (2020). Influence of pavement surface macrotexture on pavement skid resistance, *Transportation Research Procedia*, Vol. 45, pp. 747-754.
- Rangel de Lima, J.L.C. (1995). The Roads of Portugal - National Road Plan, *Routes/Roads*, Vol. I (236), pp. 4-39.
- Rathore, M., Zaumanis, M., Haritonovs, V. (2019). Asphalt Recycling Technologies: A Review on Limitations and Benefits, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 660 (1), pp. 012046.
- Rocha, B.T., Melo, P.C., Afonso, N., de Abreu e Silva, J. (2023). The local impacts of building a large motorway network: Urban growth, suburbanisation, and agglomeration, *Economics of Transportation*, Vol. 34, pp. 100302.
- Rodrigues, C., Capitão, S., Picado-Santos, L., Almeida, A. (2020). Full Recycling of Asphalt Concrete with Waste Cooking Oil as Rejuvenator and LDPE from Urban Waste as Binder Modifier, *Sustainability*, Vol. 12 (19).
- Rokitowski, P., Bzówka, J., Grygierek, M. (2021). Influence of high moisture content on road pavement structure: A Polish case study, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 15, pp. e00594.

- Rout, M.K.D., Biswas, S., Shubham, K., Sinha, A.K. (2023). A systematic review on performance of reclaimed asphalt pavement (RAP) as sustainable material in rigid pavement construction: Current status to future perspective, *Journal of Building Engineering*, Vol. 76, pp. 107253.
- SARSYS-ASFT (2024). *Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine - SCRIM*, SARSYS-ASFT Company; <https://www.sarsys-asft.com/products/scrim>; Acedido em 2024/02/11.
- Schenk, T. (2005). *Introduction to photogrammetry*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University.
- SET (2023). *Portable Skid Resistance Tester*, Zurich, Switzerland, Screening Eagle Technologies; <https://www.screeningeagle.com/en/products/proceq-srt5800>; Acedido em 2025/01/16.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60, pp. 38-48.
- Slabonski, P., Stankiewicz, B., Beben, D. (2021). Influence of a Rejuvenator on Homogenization of an Asphalt Mixture with Increased Content of Reclaimed Asphalt Pavement in Lowered Technological Temperatures, *Materials (Basel)*, Vol. 14 (10).
- Solanki, P., Zaman, M. (2017). Design of semi-rigid type of flexible pavements, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 10 (2), pp. 99-111.
- Sousa, J., Fernandes, A., Galiau, S., Estêvão, M., Antunes, G. (2011). *A Evolução dos Transportes e Acessibilidades e as Transformações na Organização do Território*, Instituto de Dinâmica do Espaço, Lisboa.
- Sulandari, E., Subagio, B.S., Rahman, H., Maha, I. (2023). Analysis of Aggregate Types with Micro-texture and Macro-texture Characteristics of Asphalt Mixture in Indonesia, *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 17.
- Tabaković, A., McNally, C., Fallon, E. (2016). Specification development for cold in-situ recycling of asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 102, pp. 318-328.
- TII (2020). *Pavement Assessment, Repair and Renewal Principles*, Transport Infrastructure Ireland, Dublin, TII Publications.
- Unger Filho, W., Gutierrez Klinsky, L., Motta, R., Bernucci, L. (2020). Cold Recycled Asphalt Mixture using 100% RAP with Emulsified Asphalt-Recycling Agent as a New Pavement Base Course, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2020, pp. 1-11.
- Vyas, V., Patil, V.J., Singh, A.P., Anshuman (2020). Debonding detection in asphalt pavements using infrared thermography, *Transportation Research Procedia*, Vol. 48, pp. 3850-3859.
- Wacker, B., Kalantari, M., Diekmann, M. (2020). Cold Recycling in Germany—Current Experiences and Future Projects, *9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*, Dübendorf, Switzerland, pp. 813-823.
- WIRTGEN (2016). *The hot recycling process - animation*, WIRTGEN GmbH; <https://www.youtube.com/watch?v=0GLWpcT4Odc>; Acedido em 2025/01/08.
- WIRTGEN (2024). *Cold-recycling in-situ*, Wirtgen Group; <https://www.wirtgen-group.com/en-ie/applications/road-construction/road-rehabilitation/cold-in-situ-recycling/>; Acedido em 2024/04/28.
- Woodward, D., Millar, P., McQuaid, G. (2014). Use of 3D modelling techniques to better understand road surface textures, *4th International Safer Roads Conference*, Cheltenham, UK, pp. 12.

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada
Desclassificada EN 306 em Barcelos

- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 92, pp. 230-245.
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R. (2016). 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits, *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, pp. 3493-3502.

ANEXOS

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada
Desclassificada EN 306 em Barcelos

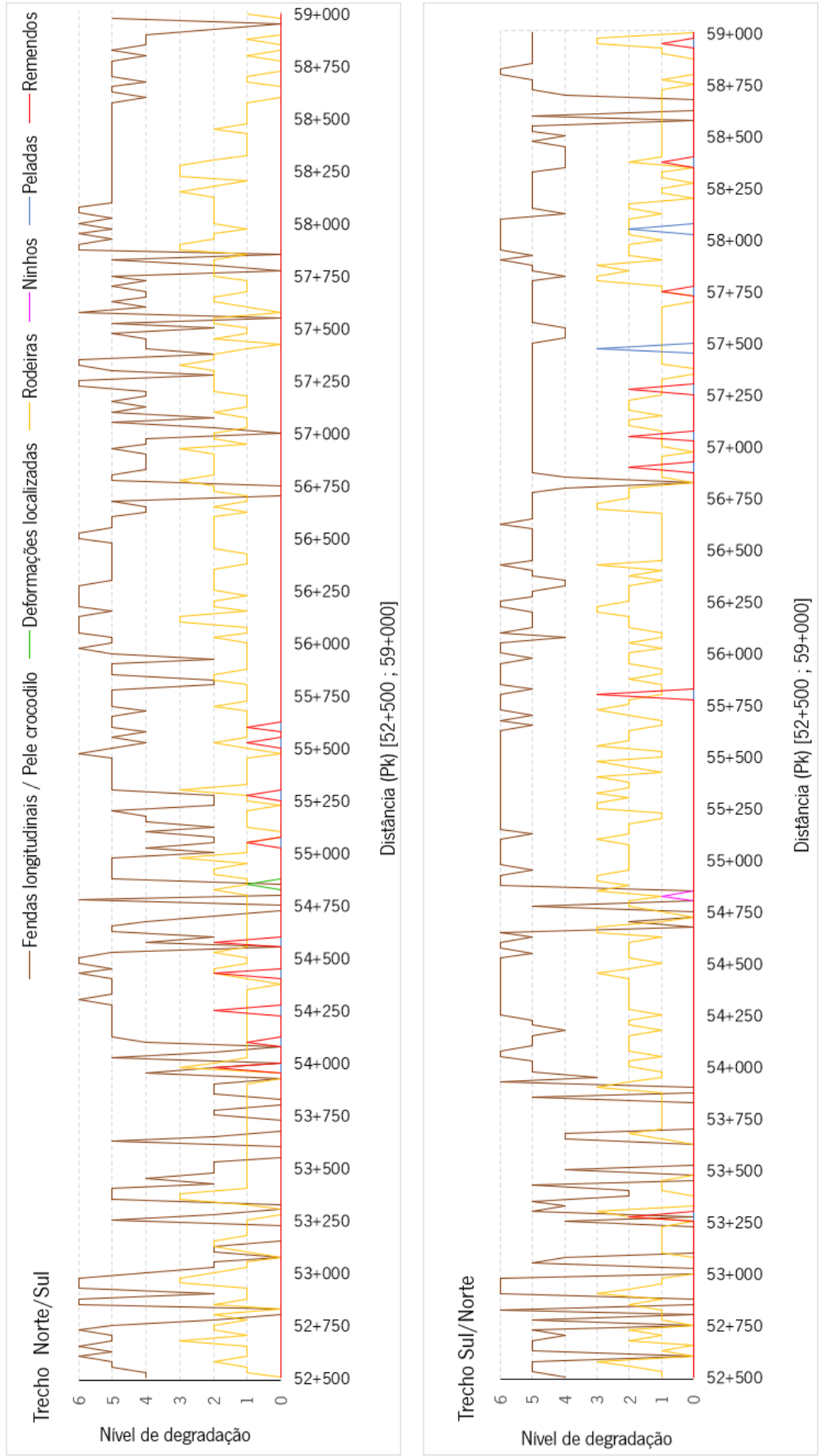


Figura A1 – Registo das degradações superficiais (entre os Pk 52+500 e 59+000)

Desenvolvimento de uma Solução de Reabilitação Sustentável para o Pavimento da Estrada
Desclassificada EN 306 em Barcelos

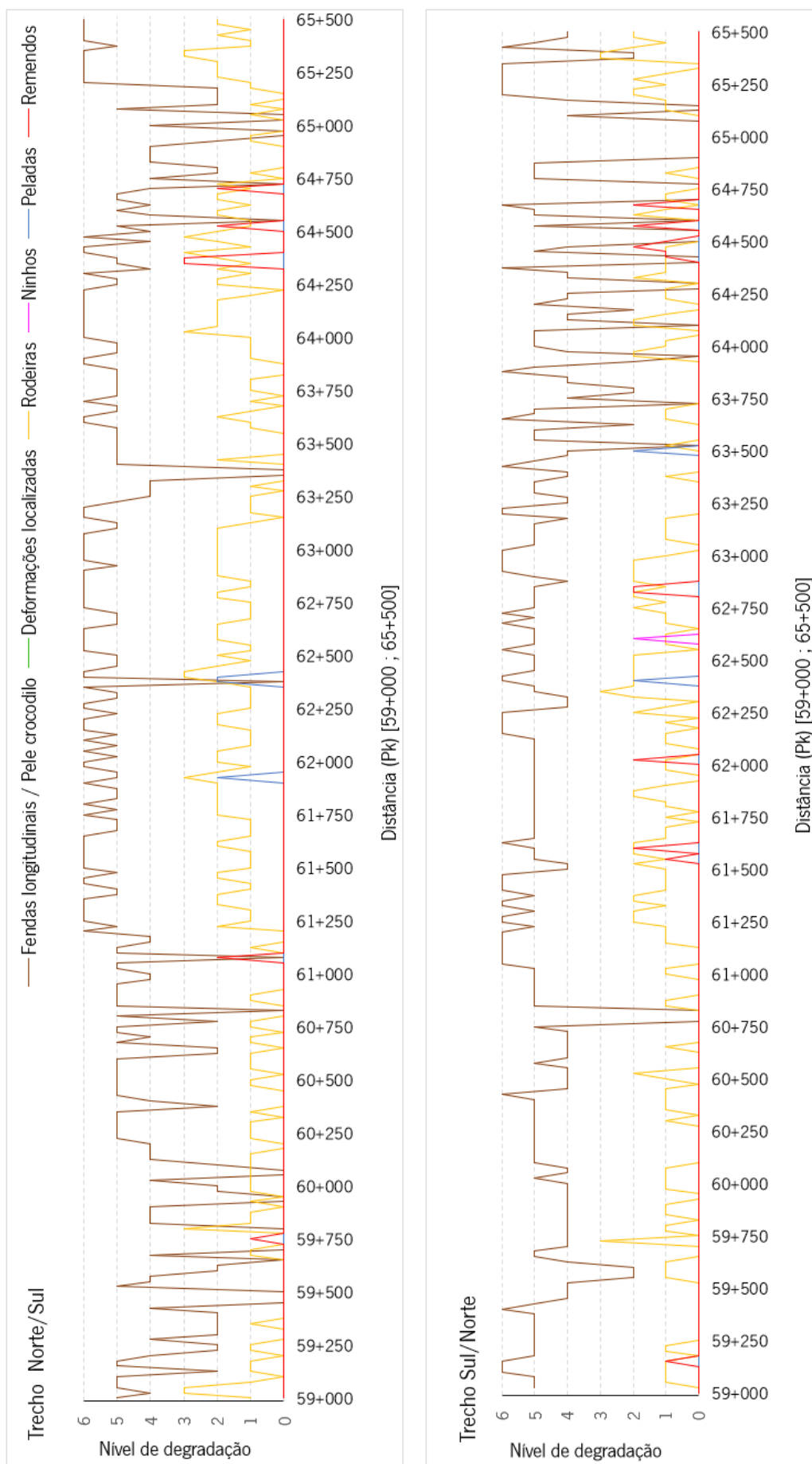


Figura A2 – Registo das degradações superficiais (entre os Pk 59+000 e 65+500)