



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Nunes Barrote

**Caraterização de misturas betuminosas
aplicadas no parque de estacionamento de
uma plataforma logística**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

João Pedro Nunes Barrote

**Caraterização de misturas betuminosas
aplicadas no parque de estacionamento de
uma plataforma logística**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de

Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

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 contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial
CC BY-NC

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado na Universidade do Minho sob orientação do Doutor Hugo Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

A concretização deste trabalho só foi possível com as condições e meios dispostos pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sobretudo por toda a equipa do Laboratório de Pavimentos Rodoviários que foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho, a quem desejo expressar o meu sincero agradecimento.

Ao Doutor Hugo Silva agradeço pela orientação, esclarecimentos prestados e incentivo na realização deste trabalho. Deste modo, quero demonstrar a minha gratidão por toda ajuda e disponibilidade demonstrada ao longo do decurso deste projeto.

Gostaria de expressar meu mais profundo agradecimento à minha esposa, cujo amor, apoio e compreensão foram fundamentais durante todo o período em que estive envolvido neste projeto de mestrado.

Quero também manifestar o um reconhecimento especial à minha família, por apoiar-me sempre e incondicionalmente, em todas as minhas decisões académicas e pessoais.

Por fim, agradeço aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado nesta jornada, e partilharam as alegrias e os momentos mais difíceis deste desafio.

A todos, muito obrigado!

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.

CARATERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS APLICADAS NO PARQUE DE ESTACIONAMENTO DE UMA PLATAFORMA LOGÍSTICA

RESUMO

A logística, associada ao transporte de bens, tem uma importância vital numa Sociedade global. Neste contexto, os centros de logística são essenciais para assegurar a disponibilidade de produtos e materiais nos mercados e pontos de consumo, em qualquer parte do globo, com a máxima eficiência, rapidez, qualidade e a custos controlados. Para evitar perturbações no funcionamento dos centros de logística, entre outros aspetos, é necessário que os pavimentos industriais assegurem uma elevada durabilidade, e não apresentem problemas construtivos que comprometam o seu normal funcionamento.

Assim, o presente trabalho apresenta um estudo de caso para caraterização das misturas betuminosas aplicadas num parque de estacionamento de uma plataforma logística em Portugal. O principal objetivo foi compreender se o aspeto superficial com textura mais aberta verificado em determinados locais desse parque de estacionamento (zona 1), por comparação com a generalidade do pavimento (zona 2), poderá ter resultado de problemas de composição das misturas betuminosas e dar origem a uma variação significativa do seu comportamento mecânico que possa comprometer a durabilidade do pavimento.

O estudo foi realizado em duas fases. Na primeira fase foi feita a observação do estado superficial *in situ* e recolheu-se amostras de material através de sondagens à rotação. Na segunda fase do trabalho, realizada em laboratório, procedeu-se à caracterização volumétrica e mecânica das misturas betuminosas recolhidas para analisar se poderia haver uma variabilidade seu comportamento futuro.

Em conclusão, este estudo demonstrou que a camada de desgaste da zona 1 do pavimento apresenta problemas devido à sua maior porosidade, reduzida resistência à tração e maior suscetibilidade à água, que podem contribuir para uma degradação precoce (e.g., desagregação). Esses problemas não terão resultado de uma inadequada composição da mistura (i.e., percentagem de betume e granulometria), apesar da aparente má adesividade entre o betume e os agregados. Assim, considera-se que alguns dos motivos do problema identificado nessa zona do pavimento surgiram na fase de construção, com uma possível

distribuição e compactação menos eficazes nas áreas distantes do centro da pavimentadora, ou pela ocorrência de menores temperaturas de compactação das misturas betuminosas.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos industriais, Misturas betuminosas, Camada de desgaste, Porosidade, Desempenho mecânico.

CHARACTERISATION OF ASPHALT MIXTURES APPLIED IN A TRUCK PARKING AREA ON A LOGISTICS PLATFORM

ABSTRACT

Logistics, associated with the transport of goods, is of vital importance in a global Society. In this context, logistics centers are essential for ensuring the availability of products and materials in markets and points of consumption worldwide, with maximum efficiency, speed, quality, and at controlled costs. Among other things, industrial pavements need to be highly durable and free from construction problems that compromise their regular operation to avoid disruptions to the process of logistics centers.

This work presents a case study to characterize the asphalt mixtures applied to a truck parking area on a logistics platform in Portugal. The main objective was to understand whether the more open-textured surface appearance found in certain parts of the truck parking area (zone 1), compared to the general pavement (zone 2), could have resulted from problems in the composition of the asphalt mixtures and could lead to a significant variation in their mechanical behavior that could compromise the durability of the pavement.

The study was carried out in two phases. In the first phase, the surface condition was observed *in situ*, and material samples were taken through rotary drilling. In the second phase of the work, carried out in the laboratory, the volumetric and mechanical characterization of the asphalt mixtures collected was carried out to analyze whether there could be any variability in their future behavior.

In conclusion, this study has shown that the surface layer of the pavement presents problems in zone 1 due to its higher air voids content, reduced tensile strength, and greater susceptibility to water, which can contribute to early distress (e.g., raveling). These problems are not due to an inadequate mix composition (i.e., asphalt binder content and grading curve) despite the apparent poor adhesion between the bitumen and the aggregates. Therefore, it is thought that some of the reasons for the problem identified in that zone of the pavement arose during the construction phase, with a possible less effective distribution and compaction in areas far from the center of the paver or due to the event of lower compaction temperatures of the asphalt mixtures.

KEYWORDS: Industrial pavements, Asphalt mixtures, Surface layer, Air voids content, Mechanical performance.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodologia de investigação	4
2. ESTADO DA ARTE SOBRE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS.....	5
2.1. Resumo histórico sobre pavimentos.....	5
2.2. Composição dos pavimentos	7
2.2.1. Pavimentos rígidos.....	8
2.2.2. Pavimentos flexíveis.....	10
2.2.3. Pavimentos semirrígidos.....	13
2.3. Desempenho e patologias dos pavimentos flexíveis	14
2.3.1. Desempenho dos pavimentos flexíveis	15
2.3.2. Patologias dos pavimentos flexíveis	17
2.4. Pavimentos de parques industriais	18
2.4.1. Constituição de pavimentos térreos industriais.....	19
2.4.2. Classificação e tipificação de pavimentos térreos industriais	20
2.5. Patologias pavimentos industriais	23
3. CASO DE ESTUDO, MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. Caso de estudo e trabalhos realizados <i>in situ</i>	26
3.1.1. Descrição do caso de estudo	26
3.1.2. Outros trabalhos realizados <i>in situ</i>	30
3.2. Caracterização visual dos carotes e provetes de ensaio.....	33
3.3. Caracterização laboratorial das misturas betuminosas.....	33
3.3.1. Baridade aparente dos provetes de mistura betuminosa.....	34
3.3.2. Baridade máxima da mistura betuminosa.....	34
3.3.3. Determinação do volume de vazios.....	35
3.3.4. Determinação da percentagem de betume	35
3.3.5. Análise granulométrica	36
3.3.6. Sensibilidade à água.....	37
3.3.7. Determinação da resistência à tração indireta.....	37

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	39
4.1. Caracterização visual dos carotes extraídos do pavimento.....	39
4.2. Caracterização e comparação da mistura betuminosa aplicada nas duas zonas distintas (zonas 1 e 2) da camada de desgaste	44
4.2.1. Baridade e volume de vazios das misturas betuminosas nas zonas 1 e 2	44
4.2.2. Percentagem de betume e análise granulométrica das misturas betuminosas nas zonas 1 e 2	46
4.2.3. Resistência à tração indireta e sensibilidade à água das misturas nas zonas 1 e 2	48
4.3. Caracterização da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação	53
4.3.1. Baridade e volume de vazios da mistura betuminosa.....	53
4.3.2. Percentagem de betume e análise granulométrica da mistura betuminosa	55
4.3.3. Resistência à tração indireta e sensibilidade à água da mistura betuminosa	57
5. CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Designação das camadas de um pavimento flexível (Balbo, 2015).....	12
Tabela 2 – Classificação dos pavimentos de acordo com a utilização segundo a ANAPRE (Cristelli, 2010)	21
Tabela 3 – Espessuras dos carotes extraídos da zona 1 do pavimento em estudo	42
Tabela 4 – Espessuras dos carotes extraídos da zona 2 do pavimento em estudo	43
Tabela 5 – Propriedades físicas dos provetes da camada de desgaste	45
Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta (ITS) na camada de desgaste.....	49
Tabela 7 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água das misturas na camada de desgaste.....	50
Tabela 8 – Caraterísticas volumétricas dos provetes da camada de ligação.....	54
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta (ITS) na camada de ligação.....	57
Tabela 10 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura aplicada na camada de ligação	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas constituintes das primeiras estradas romanas (Maré, 2011).....	6
Figura 2 – Comparação entre camadas constituintes de um pavimento flexível e de um pavimento rígido (adaptado de Bernucci <i>et al.</i> , 2010)	8
Figura 3 – Exemplo de um pavimento rígido durante a sua construção (Hamakareem, 2023).....	9
Figura 4 – Representação das cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis (Araújo <i>et al.</i> , 2016).....	9
Figura 5 – Exemplo de um pavimento flexível em serviço (Bernardes, 2021).....	11
Figura 6 – Exemplo de um pavimento semirrígido (adaptado de Walbeck e Horan, 2019).....	14
Figura 7 – Constituição dos pavimentos térreos industriais (Hulett e Clarke, 2003)	20
Figura 8 – Aspeto visual do pavimento na plataforma logística	27
Figura 9 – Efeito da aplicação de esforços de torção com veículos pesados na zona 1 do pavimento com maior porosidade	28
Figura 10 – Efeito da aplicação de esforços de torção com veículos pesados num local onde ocorreu um derrame de óleo no pavimento	29
Figura 11 – Representação esquemática da localização dos carotes extraídos do pavimento.....	31
Figura 12 – Fase de extração de um carote (9) da zona 1 do pavimento na plataforma	32
Figura 13 – Carotes extraídos da zona 1 (9) e da zona 2 (8) do pavimento na plataforma	32
Figura 14 – Ensaio tração indireta: (a) rotura de um provete e (b) provetes após rotura	38
Figura 15 – Conjunto de carotes extraídos da zona 1 do pavimento em estudo	39
Figura 16 – Conjunto de carotes extraídos da zona 2 do pavimento em estudo	41
Figura 17 – Exemplo dos cortes realizados a um carote para obtenção de provetes	42
Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados das misturas aplicadas nas zonas 1 e 2 da camada de desgaste e respetivo fuso especificado para a mistura betuminosa.....	48
Figura 19 – Relação entre o ITS e o volume de vazios na camada de desgaste obtidos na zona 1 (azul) e na zona 2 (vermelho)	51

Figura 20 – Curva granulométrica dos agregados da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação e fusos especificados em cadernos de encargos.....	56
Figura 21 – Relação entre o ITS e o volume de vazios na camada de ligação	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

A logística associada ao transporte de bens tem ganho uma importância crescente numa Sociedade cada vez mais global, que procura facilitar a aquisição de bens a partir de qualquer local do Mundo de forma simples e rápida. Neste contexto, os centros de logística têm um papel essencial para assegurar que os produtos seguem as rotas desejadas sem que ocorram atrasos que comprometam as expectativas dos consumidores individuais ou das grandes superfícies de revenda.

Para que não haja perturbações no funcionamento dos centros de logística, entre muitos outros aspetos, é necessário que os pavimentos industriais assegurem uma elevada durabilidade, e não apresentem problemas construtivos que possam comprometer o normal funcionamento destes importantes pontos de origem e destino do transporte de bens (Spadoni *et al.*, 2022). Assim, justifica-se um estudo mais aprofundado sobre os pavimentos industriais que podem ser utilizados nestes locais.

Em simultâneo, os centros de logística também precisam de espaços significativos de parque de estacionamento para os veículos pesados que efetuam os transportes de bens de e para o centro de logística. As grandes áreas ocupadas por estes parques podem dificultar a construção do pavimento e originar zonas de qualidade diferenciada que podem comprometer a sua durabilidade, acelerando a ocorrência de patologias, em especial quando estes parques podem estar sujeitos a elevadas cargas dos veículos pesados. Aliás, a parte experimental deste trabalho procura dar resposta a um problema na superfície de um parque de estacionamento de veículos pesados, identificado por uma empresa que gere um centro de logística, para compreender as possíveis consequências que o mesmo pode trazer.

Relativamente aos pavimentos industriais, estes são frequentemente projetados para suportar cargas elevadas, concentradas em áreas relativamente pequenas. Antigamente, o armazenamento de materiais era realizado manualmente, mas atualmente existem sistemas que possibilitam o manuseamento de cargas em alturas muito maiores, o que aumentou bastante o valor das cargas estáticas aplicadas em cada ponto do pavimento. Além disso, para

viabilizar essa operação de armazenamento, tornou-se necessário utilizar veículos adequados para lidar com essas cargas. Dessa forma, todo pavimento industrial deve ser projetado para resistir aos esforços exercidos pelas cargas estáticas e por esses veículos de transporte (Lopes Neto, 2016).

Habitualmente, esse tipo de pavimentos industriais contém uma quantidade significativa de betão na construção de lajes térreas para garantir a resistência necessária. No entanto, devido à negligência comum em relação a essa tipologia de estruturas e, conseqüentemente, à ocorrência frequente de patologias, a construção e estudos sobre esse tipo de pavimento deve ser tratada com especial cuidado (Peixoto, 2022).

Além das soluções com pavimentos rígidos, também se podem construir pavimentos industriais com misturas betuminosas, mas é essencial que estes pavimentos tenham uma elevada resistência às deformações permanentes devido aos elevados esforços estáticos ou às cargas lentas e pesadas a que estes estão submetidos. A influência de vários fatores no pavimento, tanto ambientais como das cargas aplicadas, bem como o tempo, o uso e a frequência, além do envelhecimento do betume, tornam a caracterização das misturas betuminosas aplicadas nos pavimentos uma tarefa complexa (Nogueira, 2008). Para o utilizador, a parte mais relevante do pavimento é o estado da sua superfície, os defeitos e irregularidades, pois é o que afeta o seu conforto. Quando esse conforto é prejudicado, é provável que o veículo também sofra as conseqüências dos defeitos, o que resulta em um aumento nos custos com combustível, pneus e manutenções precoces (Bernucci *et al.*, 2010).

À medida que a deterioração de um pavimento progride e atinge um estado em que as condições de uso não são mais aceitáveis, torna-se necessário tomar medidas para manutenção ou conservação do seu estado. A natureza e o planeamento dessas intervenções dependem do estado do pavimento e do nível de qualidade desejado. Para tomar a decisão adequada sobre o tipo de intervenção a ser realizada e para estabelecer um plano de manutenção apropriado, é essencial ter um entendimento atualizado do estado de degradação do pavimento (Fonseca, 2011).

Portanto, a caracterização das misturas betuminosas pode fornecer informações importantes sobre a composição dos materiais utilizados num pavimento, o que ajuda a estimar a sua durabilidade, bem como a sua resistência e capacidade de suportar cargas. Dessa forma, a investigação e análise dos pavimentos em parques industriais ou em parques de estacionamento de veículos pesados têm o potencial de impulsionar o desenvolvimento de soluções mais adequadas e personalizadas às circunstâncias específicas, o que possibilita a compreensão de informações que podem ser empregues para aprimorar a qualidade, durabilidade e eficiência dos pavimentos nesses ambientes industriais.

1.2. Objetivos

O presente trabalho apresenta um estudo de caso, executado primeiramente *in situ*, e numa segunda fase em laboratório, onde se procedeu à caraterização das misturas betuminosas aplicadas em diferentes zonas de um parque de estacionamento de uma plataforma logística localizada no Norte de Portugal.

O principal objetivo deste trabalho foi compreender se o aspeto superficial diferenciado, verificado em duas zonas do pavimento anteriormente referido, resulta de problemas de composição das misturas betuminosas ou pode resultar numa variação significativa do comportamento mecânico que possa comprometer a durabilidade do pavimento na zona com uma textura superficial mais aberta.

Para se atingir o objetivo específico deste trabalho, considerou-se necessário realizar as tarefas que se enumeram em seguida:

- Observar o estado superficial do pavimento e recolher carotes para uma caracterização visual;
- Verificar as espessuras das camadas betuminosas dos carotes recolhidos;
- Caraterizar a mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste em duas zonas distintas do pavimento estudado;
- Caraterizar a mistura betuminosa aplicada na camada de ligação.

O presente trabalho pretende ser um contributo para o conhecimento sobre pavimentos industriais e pavimentos de parques de estacionamento de veículos pesados, ao fornecer dados e informações que podem ser utilizados para melhorar a sua qualidade, durabilidade e desempenho, bem como ao contribuir para a compreensão mais ampla da caracterização de misturas betuminosas em aplicações mais gerais em pavimentos.

1.3. Metodologia de investigação

A metodologia de investigação adotada neste estudo foi baseada essencialmente em trabalho experimental. Nesse sentido, inicialmente foram realizados trabalhos *in situ*, incluindo inspeção visual do pavimento e recolha de carotes de duas zonas distintas do mesmo que apresentavam características superficiais diferenciadas.

Em laboratório, os carotes foram analisados visualmente e cortados para obtenção de provetes utilizados em ensaios posteriores. A caracterização laboratorial das misturas incluiu diversos ensaios, como baridade aparente, baridade máxima, percentagem de betume, análise granulométrica, sensibilidade à água, e resistência à tração indireta. Os resultados obtidos permitiram avaliar as características físicas e mecânicas das misturas betuminosas utilizadas no pavimento flexível da plataforma logística.

2. ESTADO DA ARTE SOBRE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS

Tendo em mente o objetivo desta dissertação de caraterizar as misturas betuminosas aplicadas no parque de estacionamento de uma plataforma logística, este trabalho proporciona uma visão completa sobre pavimentação, incluindo aspetos históricos, tecnológicos e práticos em ambientes rodoviários e industriais. Primeiramente, é abordada a evolução histórica dos pavimentos em diversos contextos, como estradas e pavimentos industriais. Nesse particular, destaca-se o papel fundamental das estradas na evolução das sociedades e a importância da pavimentação para melhorar o tráfego e a segurança. Em seguida são apresentados os diferentes tipos de pavimentos, suas características e aplicações recomendadas, assim como as patologias que afetam os pavimentos flexíveis. Além disso, são identificados os principais tipos de pavimentos industriais, seus materiais e condições especiais de construção, juntamente com classificações e tipificações específicas.

2.1. Resumo histórico sobre pavimentos

As estradas desempenham um papel vital na evolução das sociedades e a pavimentação é um meio eficaz de melhorar as condições de tráfego, tornando-o confortável e seguro. Isso é conseguido através da utilização de estruturas e materiais robustos que possam suportar os impactos do tráfego, assim como os efeitos adversos do clima (Brilhante, 2020).

Durante a República Romana deu-se o início à construção generalizada de estradas. As estradas começaram por ser construídas em segmentos retos e planos, com o objetivo de precaver os cruzamentos com terrenos pantanosos e muito acidentados. Era executada uma escavação que formava um leito, com uma largura que permitisse o cruzamento entre duas carruagens. Em 450 a.C. já existiam especificações sobre a largura das vias, através da lei das doze tábuas (8 pés em linha reta e 16 pés em curva). Também já se distinguiam as várias camadas constituintes da estrutura das primeiras estradas romanas, tal como se pode observar na Figura 1. A primeira camada tinha pedras de maiores dimensões e apresentava espessuras entre 30 e 60 cm, sendo esta a fração mais importante, pois seria sobre ela que se construiria a via. Sobre esta primeira camada existia uma camada com cerca de 20 cm de areia e gravilha, e por cima desta era construída outra de igual espessura com pedra triturada

misturada com cal. Sobre esta última, surge a camada superior constituída por lajes devidamente ajustadas, de basalto ou granito, consoante a natureza das pedreiras do local. Com isto nasce a pavimentação do tipo *stratae*, mais conhecida hoje em dia pela palavra estrada (Maré, 2011).

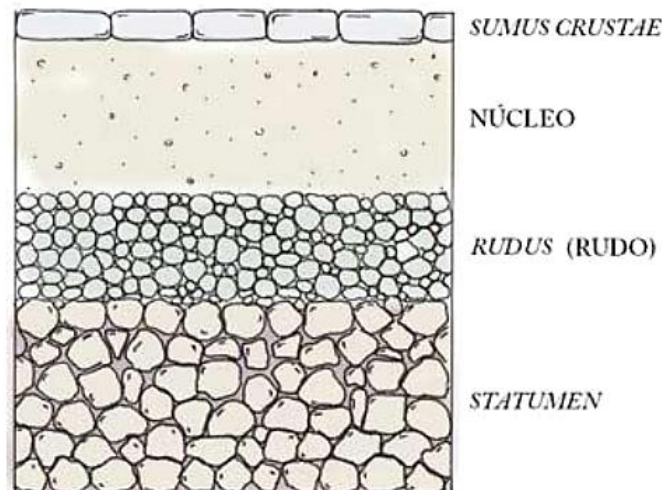


Figura 1 – Camadas constituintes das primeiras estradas romanas (Maré, 2011)

Muito mais tarde, no século XIX, apareceu o método *Mac-Adam* que foi sendo aplicado na construção das estradas em todo o Mundo, e também em Portugal. Este método foi criado e desenvolvido pelo engenheiro escocês John Loudon McAdam, no ano de 1820, e consistia em aplicar três camadas de brita numa fundação do pavimento, com diferentes dimensões, e possuía também valas nas suas laterais para o escoamento das águas pluviais. Entre as camadas existiam os vazios que eram preenchidos com aplicação de saibro. Estas camadas eram depois comprimidas com um rolo pesado, para que se encaixassem umas nas outras e melhorassem a sua capacidade de carga. Era necessário muito trabalho manual, mas este processo formava um pavimento forte e drenado, com o nome de macadame hidráulico (Lay *et al.*, 2020).

Entretanto, de acordo com Maré (2011), em 1930 já eram utilizados pavimentos flexíveis com ligantes betuminosos em países como França e Portugal, similares aos pavimentos flexíveis atuais.

A tecnologia envolvida na pavimentação evoluiu, na medida em que aumentava o volume de tráfego e a magnitude das cargas dos veículos, desde os procedimentos baseados em tentativa erro, anteriores a 1920, até se efetuar a integração de todas as atividades envolvidas na administração de uma malha viária (ou seja, planeamento, projeto, construção, manutenção, monitorização e investigação) dentro do moderno conceito de sistema de gestão de pavimentos. Esta evolução acompanhou o desenvolvimento dos pavimentos rodoviários, com o objetivo de oferecer maior durabilidade, funcionalidade, segurança e conforto, promovendo assim uma utilização com menos custos ao gerir e utilizar de forma mais adequada os recursos disponíveis (Gonçalves, 1999).

2.2. Composição dos pavimentos

Atualmente, os pavimentos são estruturas duráveis e resistentes, embora não inextinguíveis. Os pavimentos são compostos por várias camadas sobrepostas entre si, e por diferentes materiais que, depois de compactados, conferem as características estruturais e funcionais necessárias para garantir a operacionalidade do tráfego. Na pavimentação são considerados também os aspetos económicos, tais como os custos de construção e diferentes tipos de manutenção, preventiva, corretiva e de reconstrução. Como a pavimentação tem como objetivo principal promover a circulação do tráfego com segurança e conforto, para isso é necessário utilizar materiais resistentes com capacidade de suportar todos os esforços provenientes da ação do tráfego, mas também as condições do clima, procurando sempre que possível materiais provenientes do local da obra, conseguindo assim uma redução de custos de construção (Balbo, 2015).

As diferentes camadas do pavimento são concebidas para suportar, em conjunto, o estado de tensão provocado pelo tráfego e pelas condições ambientais. As camadas de base e sub-base têm a responsabilidade de reduzir a intensidade da carga a um nível aceitável sobre o suporte ou fundação, que pode ser terreno natural de base ou uma camada de leito de pavimento (Quintero, 2012).

Para dimensionar qualquer tipo de pavimento, antes demais terão de ser realizados estudos aprofundados de tráfego, para se obter resultados competentes. Depois disso, no

dimensionamento das camadas tem que se garantir a sua estabilidade e a compatibilidade com o modelo comportamento do pavimento exigido em cada caso específico, durante a sua vida útil, sem esquecer a parte económica (Carvalho *et al.*, 2022).

Consoante o tipo de material utilizado nos pavimentos, que afeta diretamente a sua rigidez e as deformações consentidas sob o efeito do tráfego, há duas formas principais dos mesmos serem classificados (Bernucci *et al.*, 2010). As diferenças desses dois tipos de pavimentos podem ser observadas na Figura 2. Assim, são classificados como flexíveis todos os pavimentos em que é utilizada uma ou mais camadas de mistura betuminosa que garantem o principal contributo estrutural. No entanto, quando é utilizado betão de cimento tipo Portland na camada de desgaste, e sendo esta a principal contribuinte para a capacidade de carga, diz-se que o pavimento é rígido. As camadas superiores do pavimento têm um papel essencial pois recebem todas as cargas oriundas do tráfego, que consequentemente transmitem para as camadas mais profundas (Azevedo, 2022).

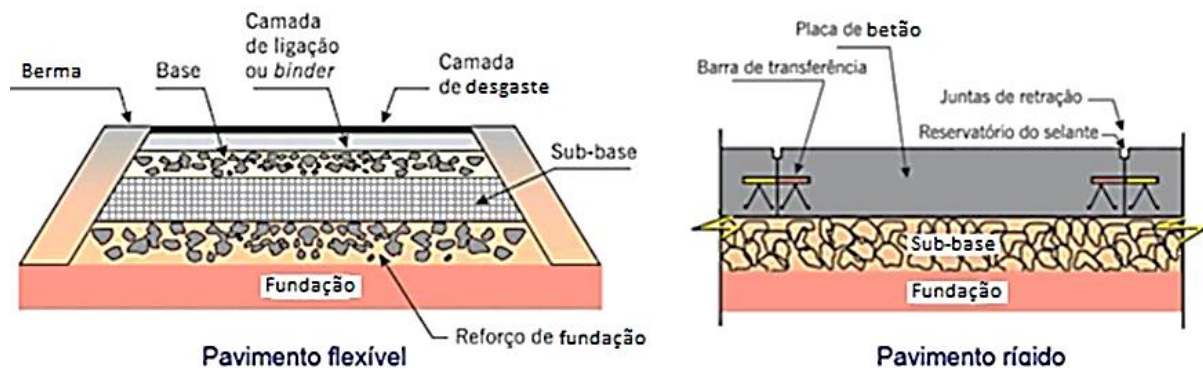


Figura 2 – Comparação entre camadas constituintes de um pavimento flexível e de um pavimento rígido (adaptado de Bernucci *et al.*, 2010)

2.2.1. Pavimentos rígidos

Rodrigues (2011) define os pavimentos rígidos (Figura 3) como sendo aqueles que são compostos por uma camada, geralmente uma laje de betão de cimento Portland, que trabalha simultaneamente como camada de base e desgaste. O mesmo autor destaca ainda que a elevada rigidez e a boa resistência à flexão do betão de cimento, faz com que o pavimento não sofra elevadas deformações, mesmo quando submetido a tráfego pesado e intenso e

sobre solos de fundação com baixa capacidade de suporte, desde que devidamente dimensionado para suportar essas condições.



Figura 3 – Exemplo de um pavimento rígido durante a sua construção (Hamakareem, 2023)

De acordo com Araújo *et al.* (2016), o pavimento rígido tem uma vida útil mais longa e possui uma estrutura mais simples em comparação com o pavimento flexível. Os autores também observam que, dentro de certos limites, o betão de cimento Portland é capaz de absorver a maioria das tensões e distribuí-las numa área mais ampla do que no pavimento betuminoso. Para exemplificar esta vantagem dos pavimentos rígidos, uma representação esquemática da distribuição das cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis é apresentada na Figura 4.

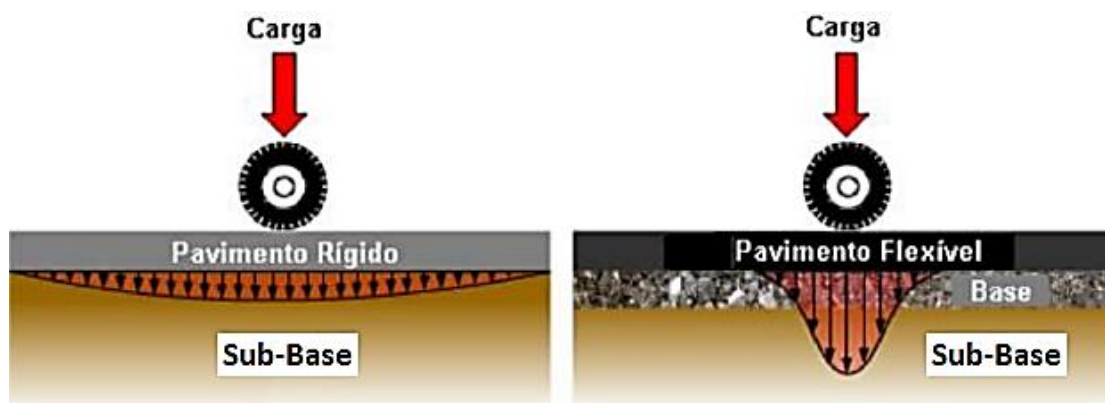


Figura 4 – Representação das cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis (Araújo *et al.*, 2016)

A qualidade da fundação tem menos influência no comportamento estrutural do que no pavimento flexível, e por isso a maioria dos problemas dos pavimentos rígidos decorre de erros na execução ou do uso de materiais inadequados, implicando, portanto, um maior controlo de qualidade durante a sua construção. Os autores concluem que os pavimentos rígidos são a opção mais recomendada para estradas com alto volume de tráfego, mas que a análise económica deve sempre ser considerada, tendo em conta a grande variedade de condições climáticas (Araújo *et al.*, 2016).

2.2.2. Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis são compostos por várias camadas, sendo as camadas superiores betuminosas, onde se inclui necessariamente a camada de desgaste, material granular de melhor qualidade nas camadas de base, e outro material granular de pior qualidade ou o próprio solo na fundação ou leito de pavimento (Balbo, 2015). A disposição deste tipo de pavimento é projetada para receber e transmitir todas as cargas do tráfego e das ações atmosféricas de modo a aliviar as tensões nas suas camadas inferiores. Para isso, são empregues grandes espessuras de materiais mais deformáveis do que nos pavimentos rígidos quando sujeitos a cargas elevadas. Estas espessuras garantem que a tensão aplicada na fundação do pavimento é menor que sua tensão resistente (Pinto, 2003). Na Figura 5 apresenta-se um exemplo de um pavimento flexível.



Figura 5 – Exemplo de um pavimento flexível em serviço (Bernardes, 2021)

Em pavimentos flexíveis, a distribuição de carga muda de uma camada para outra devido à diferença na rigidez de cada camada. As camadas betuminosas superiores são feitas com materiais mais rígidos (menos deformável) e as camadas granulares inferiores com material mais deformável. Isso ocorre porque a carga da roda é aplicada em uma área pequena na superfície, o que resulta em altos níveis de tensão, enquanto mais fundo no pavimento, a carga da roda é distribuída em uma área maior, resultando em níveis de tensão mais baixos, o que permite o uso de materiais menos resistentes (Bittencourt, 1958).

A flexibilidade na construção de um pavimento flexível permite definir o número de camadas e materiais a serem usados com base nas solicitações do tráfego, clima e disponibilidade de materiais na região, o que pode resultar em economia nos custos da obra. As camadas superiores do pavimento, compostas por misturas betuminosas, são as menos espessas e possuem resistência à compressão e tração. Essas camadas podem ser divididas em três tipos: camada de desgaste, camada de ligação e camada de base. As camadas inferiores consistem em materiais granulares mecanicamente estabilizados, sendo mais espessas em comparação às camadas superiores. Sua principal função é resistir à compressão, visto que não têm resistência à tração. Essas camadas podem ser compostas por uma camada de base e uma camada de sub-base. Essa estrutura ajuda a reduzir as cargas transmitidas, o que mantém as

tensões na fundação do pavimento dentro de limites admissíveis (Santos, 2009). As definições das camadas constituintes de um pavimento flexível estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Designação das camadas de um pavimento flexível (Balbo, 2015)

Designação da camada	Definição
Camada de desgaste	É a camada superficial do pavimento que se encontra em contacto constante com o efeito das cargas dos veículos e as condições ambientais
Camada de ligação	É uma camada intermédia, em mistura betuminosa, entre a camada de desgaste e a base do pavimento
Camada de base	É a última camada, em mistura betuminosa, que existe apenas nos pavimentos que suportam tráfego mais elevado
Camada de regularização	Normalmente é a primeira camada de mistura betuminosa aplicada em execução de reforços, em que a sua função é corrigir os desníveis existentes, buracos localizados, etc. O seu objetivo é nivelar o perfil, para permitir a execução de uma nova camada de desgaste
Camada de reforço	Nova camada de desgaste em betão betuminoso, aplicada após anos de uso do pavimento. Pode ser executada como manutenção da via por razões funcionais e estruturais

Nos pavimentos flexíveis existem certos limites de extensão admissível sob aplicação das cargas para os quais é possível estimar que não haja danos significativos no pavimento durante o seu período de vida. Os fatores de dimensionamento considerados são a tração por flexão das camadas ligadas e a compressão da fundação do pavimento, normalmente provocados por deformações causadas pelas cargas dos veículos (Pereira e Pais, 2017). A ocorrência de extensões superiores às admissíveis pode levar a deformações permanentes ou ao fendilhamento por fadiga (Senço, 2008).

O principal tipo de material usado nas camadas superiores dos pavimentos flexíveis é mistura betuminosa produzida a quente, embora possam ser utilizados materiais alternativos que podem ser produzidos a menores temperaturas. Ainda sobre os materiais mais utilizados, os agregados representam cerca de 90% a 95% da mistura betuminosa, em peso, e resistem ao desgaste e às cargas impostas pelos veículos. Os ligantes betuminosos representam cerca de

5% a 10% da mistura betuminosa, em peso, apresentando funções de aglutinação e de impermeabilização do pavimento (Bernucci *et al.*, 2010).

2.2.3. Pavimentos semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos ocupam uma posição intermédia entre os pavimentos rígidos e flexíveis, e são definidos como tal devido à presença de uma base ligada com cimento sob uma camada superior em betão betuminoso. Alguns exemplos de pavimentos semirrígidos incluem misturas como solo-cimento e solo-cal, que apresentam uma elevada rigidez e resistência à tração (Pellegrin *et al.*, 2022), sobrepostos com camadas betuminosas flexíveis.

Os pavimentos semirrígidos também podem resultar da aplicação de camadas betuminosas sobre pavimentos rígidos, embora essa solução possa originar reflexão de fendas (Figura 6). No entanto, a camada de betão a reabilitar pode ser desagregada por vibração/fricção (*rubblization*) em pequenos pedaços, normalmente de 5 a 15 centímetros, para se converter num material de base interligado, mas flexível, que deve ser compactado antes de se aplicarem as camadas betuminosas de reabilitação desse pavimento. Esse processo elimina os movimentos da laje de betão e quase suprime a ocorrência de fendas de reflexão, aumentando a vida útil do reforço e melhorando o conforto para os condutores (Walbeck e Horan, 2019).



Figura 6 – Exemplo de um pavimento semirrígido (adaptado de Walbeck e Horan, 2019)

De acordo com Balbo (2015), os pavimentos semirrígidos são compostos por camadas de base estabilizadas quimicamente ou com um material aglutinante com propriedades cimentícias, formando uma camada do tipo solo-cimento, considerada rígida, e por camadas superiores de desgaste flexíveis do tipo betão betuminoso, que asseguram uma circulação mais confortável.

2.3. Desempenho e patologias dos pavimentos flexíveis

Um pavimento flexível é geralmente composto por várias camadas, incluindo o leito de pavimento, as camadas granulares de sub-base e de base, e as camadas betuminosas de base, ligação e desgaste. Estas camadas trabalham juntas para formar a superfície do pavimento e garantir um desempenho adequado com segurança e conforto para os utilizadores. No entanto, quando alguma dessas camadas apresenta problemas ou não se comporta de acordo com o esperado, surgem patologias nos pavimentos (Araújo, 2019).

2.3.1. Desempenho dos pavimentos flexíveis

Em Portugal, a maior parte da aplicação de misturas betuminosas é realizada a quente, independentemente do tipo de mistura, que pode ter diferentes granulometrias e tipos de agregados e betume (Branco, 2013). Dependendo da camada a ser construída, pode ser necessário priorizar as propriedades mecânicas ou o conforto e segurança para o utilizador. Em todos os casos, é importante assegurar critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução. As misturas betuminosas devem apresentar as seguintes características: estabilidade, longevidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e boa trabalhabilidade (Branco *et al.*, 2005).

O desempenho ideal de um pavimento é determinado pela capacidade de suporte e durabilidade, que devem estar de acordo com as especificações da obra e as necessidades do tráfego. Além disso, um pavimento de qualidade deve proporcionar conforto e segurança para os utilizadores. Assim, o objetivo principal do projeto de um pavimento é fornecer uma solução de engenharia que atenda às necessidades estruturais e funcionais de maneira económica (Bernucci *et al.*, 2010).

Contudo, todos os materiais de construção, incluindo os usados em pavimentos, sofrem danos e degradação ao longo do tempo. Estes processos afetam as suas propriedades mecânicas, que são responsáveis pela sua resposta às cargas. A degradação dos materiais das várias camadas dos pavimentos é principalmente causada pelas cargas dos veículos, mas também por outros fatores como a humidade e temperatura (Balbo, 2015).

O tráfego é o principal fator que influencia o desempenho do pavimento, e a degradação causada pela passagem de veículos ao longo da vida expectável do pavimento é avaliado tendo por base o dano que se admite que pode ser causado pela passagem de um eixo padrão. Nessa avaliação, o número de repetições de carga e a configuração dos veículos também são consideradas, pois afetam o desempenho do pavimento. O dimensionamento do pavimento é realizado para que o mesmo possa suportar um certo número de repetições de carga do eixo padrão de modo a evitar o aparecimento de degradações no pavimento, o que é verificado pela aplicação de leis de fadiga que permitem definir extensões máximas

admissíveis para prevenir a ocorrência de fendilhamento e deformações permanentes antes do final do período de vida definido em projeto (Oliveira *et al.*, 2014).

No trabalho de Albano (2005) foi referido que a vida útil do pavimento diminui drasticamente com o excesso de carga que sobre ele atua, caso a mesma seja excedente da previsto em projeto. De acordo com esse autor, essa situação acontece constantemente nas estradas, bem como em plataformas logísticas, de todo o mundo, principalmente devido às empresas transportadoras, que têm interesse em transportar o máximo peso possível, reduzindo assim o número de viagens necessárias para, conseqüentemente, maximizar os lucros.

Ao considerar a natureza viscoelástica das misturas betuminosas, pode-se afirmar que a velocidade com que a carga é aplicada também tem um impacto significativo no comportamento mecânico desses materiais. Quando submetida a um carregamento rápido, a mistura betuminosa exibe um comportamento quase elástico. Por outro lado, quando os carregamentos são aplicados lentamente, a mistura tende a mostrar um comportamento predominantemente viscoso (Clara, 2020).

A sobrecarga nos pavimentos rodoviários pode causar a sua degradação acelerada, causando problemas tais como fendilhamento generalizado ou isolado, deformações permanentes, diferentes tipos de desagregação, entre outros. Isso gera um aumento no custo de manutenção dos pavimentos ao longo de sua vida útil e, em termos públicos, cria um déficit financeiro que poderia ser destinado a outras áreas consideradas mais prioritárias (Carvalho *et al.*, 2022).

As condições climáticas ao longo do tempo também têm um grande impacto na durabilidade dos pavimentos. A avaliação funcional é uma análise inicial das características de desgaste e deformação superficial do pavimento, que afetam o conforto e a segurança dos utilizadores da estrada. Deformações permanentes, como desvios longitudinais ou transversais, podem causar desconforto e aumentar os custos operacionais dos veículos. Vários fatores, como tráfego, temperatura, presença de água e qualidade da construção, podem agravar essas irregularidades ao longo do tempo. Assim, é crucial garantir um controlo adequado durante a construção e utilização de novos pavimentos (Fernandes, 2019).

Portanto, a avaliação do funcionamento de um pavimento flexível é realizada observando as condições em que o mesmo se encontra durante a sua utilização, bem como a sua evolução com o passar do tempo. Conforme estudo apresentado por Mattos (2014), existem várias formas de prever o desempenho de um pavimento flexível, por isso é essencial estabelecer os critérios do projeto baseando-se em modelos de previsão do comportamento.

2.3.2. Patologias dos pavimentos flexíveis

O estudo das patologias na construção funciona de forma equivalente à medicina, pois é uma área da engenharia que investiga os sintomas, modos de aparecimento, causas e efeitos nas estruturas (Rocha e Costa, 2009). As patologias que afetam os pavimentos flexíveis podem ser consideradas problemáticas quando causam impactos significativos na qualidade de condução, segurança e conforto, tendo em conta os defeitos estruturais que possam surgir no sistema construtivo, impedindo o pavimento de suportar de forma adequada as cargas do tráfego (Gonçalves *et al.*, 2022).

Com o passar do tempo, é natural que pavimentos precisem de manutenção e reparações com mais frequência. Portanto, torna-se fundamental identificar quaisquer problemas ou falhas que possam ter surgido para que se possa determinar e aplicar as técnicas corretas para a sua reparação. Para encontrar as soluções mais adequadas, é crucial realizar uma avaliação da condição atual do pavimento. Esta avaliação inclui uma análise ao desempenho funcional e estrutural, que fornecem informações sobre a superfície e a estrutura do pavimento, permitindo que sejam escolhidos os mecanismos corretos para a manutenção de um nível de serviço ou qualidade adequados (Brilhante, 2020).

Ao longo do período de vida do pavimento, devido a várias condições influenciadoras, podem surgir deformações permanentes, que é um dos defeitos estruturais em pavimentos flexíveis. Este é um dos problemas frequentes que podem surgir nos pavimentos, em particular em climas mais quentes ou quando se usam betumes mais moles. As deformações permanentes nos pavimentos são classificadas em três categorias distintas: deformação permanente devido à compactação insuficiente, deformação permanente por fluência e deformação permanente estrutural (Persike, 2023).

De acordo com Silva (2008), as patologias que podem acontecer nos pavimentos flexíveis são deformações causadas pelas cargas, deslizamento das camadas, desgaste do material betuminoso e fendilhamento que aparece por fadiga devido à repetição de cargas ou por ações térmicas, especialmente para locais com temperaturas muito baixas.

Outros exemplos de patologias que podem surgir nos pavimentos flexíveis incluem sulcos, afundamentos, exsudações, fendilhamento, desagregações, ninhos, peladas, buracos e remendos. De qualquer forma, a patologia mais comum é o fendilhamento, que é um sinal precoce de perda de qualidade da estrutura do pavimento (Fontes, 2009).

Silva (2008) ainda refere que as patologias dos pavimentos flexíveis podem ser apresentadas como estruturais e/ou funcionais. As primeiras consistem na redução da capacidade de suporte do pavimento perante as cargas provocadas pelos veículos, originando o aparecimento de fissuras transversais, longitudinais ou até mesmo pele de crocodilo nas camadas betuminosas, ou deformações que podem surgir por falta de capacidade da fundação. As patologias do tipo funcionais são aquelas que condicionam a segurança e as condições de condução da via, das quais são exemplos, a falta de rugosidade ou atrito, o ruído e o aumento da irregularidade da superfície do pavimento.

2.4. Pavimentos de parques industriais

O conceito de pavimentos industriais está associado ao surgimento das primeiras indústrias, ocorrido durante a Revolução Industrial no fim do século XVIII. A indústria têxtil foi uma das primeiras a desenvolver-se nesse período, e para atender às suas necessidades, o piso das instalações foi feito de materiais como madeira e cerâmica, com uma estrutura simples. Ao longo do tempo, outras indústrias surgiram, como a metalomecânica e siderurgia, que têm exigências mais específicas para seus equipamentos, incluindo características funcionais como resistência mecânica, resistência à abrasão e ao choque (Resende de Sá, 2009).

Um piso industrial de qualidade é influenciado por diversos fatores que estão interconectados, entre os quais se podem enumerar: i) o projeto estrutural; ii) a qualidade dos materiais; iii) a execução adequada; iv) a gestão de qualidade; v) a proteção adequada, e; vi) a manutenção e

conservação. Garantir a integridade desses elementos ao longo do tempo é fundamental para assegurar a durabilidade e o desempenho do pavimento industrial, atendendo às necessidades específicas do ambiente industrial em questão (Garcia e Brito, 2005).

A construção de um edifício industrial é uma tarefa complexa, e o pavimento térreo é uma parte importante da estrutura que requer atenção especial durante a fase de planeamento e construção. O pavimento térreo é considerado um dos três componentes principais de um edifício, sendo os outros dois os seguintes: cobertura e paredes externas. O pavimento térreo consiste em uma laje horizontal apoiada diretamente no solo. Este elemento construtivo, além de ser importante do ponto de vista funcional, também representa uma grande parte do investimento total na construção do edifício, podendo chegar a mais de 50% (Pacheco, 2015).

2.4.1. Constituição de pavimentos térreos industriais

Num piso térreo industrial, geralmente encontramos as seguintes camadas:

- Subleito de fundação: camada localizada abaixo do pavimento que serve como base para suportar a estrutura (Pacheco, 2015).
- Sub-base e/ou base: camada localizada acima do subleito, que pode consistir em materiais como agregados ou misturas de solo estabilizado, fornecendo suporte adicional e nivelamento (Rodrigues e Hovaghimian, 2008, Society, 2003).
- Barreira de vapor: camada projetada para evitar a passagem de vapor de água do solo para o pavimento, geralmente feita de materiais impermeáveis (Rodrigues e Hovaghimian, 2008).
- Laje de betão: camada de betão que serve como base sólida para o pavimento, oferecendo resistência estrutural (Rodrigues e Hovaghimian, 2008, Sousa *et al.*, 2007).
- Superfície de proteção e desgaste: camada superior do pavimento, que pode ser composta por materiais como betuminoso, betão poroso ou revestimentos especiais, destinados a proteger o pavimento contra desgaste e proporcionar uma superfície adequada para o tráfego (Nascimento, 1985).

As camadas que normalmente compõem um pavimento industrial podem ser verificadas na Figura 7. A sub-base ou base, assim como a camada de betão, são extremamente importantes, pois têm uma função estrutural, absorvendo e dispersando as cargas estáticas e dinâmicas transmitidas ao piso. Além disso, a superfície de proteção e desgaste é importante por proteger o piso de agentes físicos e químicos agressivos, além de ter uma forte componente estética (Resende de Sá, 2009).

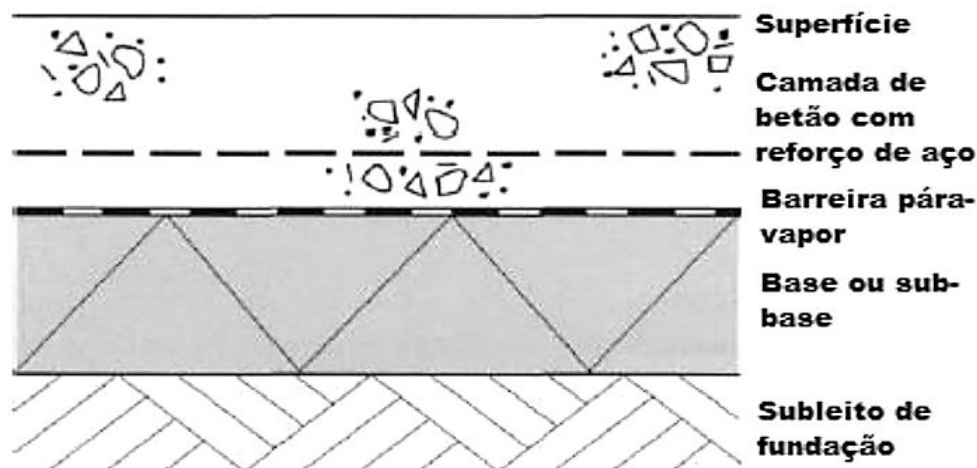


Figura 7 – Constituição dos pavimentos térreos industriais (Hulett e Clarke, 2003)

A construção de um pavimento térreo deve atender a várias diretrizes e cumprir certos critérios de dimensionamento. As exigências funcionais são influenciadas por diversos fatores, principalmente pelo tipo de uso previsto para o edifício. Isso afeta todos os componentes do pavimento, incluindo sua fundação e estrutura, bem como o revestimento ou acabamento final. Infelizmente, devido à necessidade de rigor na execução dos pavimentos térreos, são comuns casos de patologias e anomalias causadas pela falta de atendimento aos requisitos exigidos. Além disso, os pavimentos térreos industriais são uma das obras de engenharia civil onde as patologias ao longo do tempo mais afetam o uso da construção e as reparações podem ser extremamente caras, às vezes até resultando na necessidade de demolir e reconstruir o pavimento (Antunes e Barros, 2003).

2.4.2. Classificação e tipificação de pavimentos térreos industriais

Pacheco (2015) refere que os pavimentos térreos industriais podem ser classificados de acordo com a finalidade de uso do edifício, com duas classificações distintas: a classificação

segundo a ANAPRE (Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho) e a classificação segundo a ACI (*American Concrete Institute*). A título de exemplo, na Tabela 2, é apresentada a classificação de pavimentos industriais segundo a ANAPRE.

Tabela 2 – Classificação dos pavimentos de acordo com a utilização segundo a ANAPRE
(Cristelli, 2010)

Zonas/pavimentos	Características
Zonas industriais	<p>O pavimento e suas condições desempenham um papel fundamental na garantia de uma produção satisfatória.</p> <p>O pavimento precisa suportar cargas provenientes de diferentes infraestruturas, o que dificulta a implementação de certas soluções.</p> <p>Na fase de projeto é necessário tomar precauções especiais com mudanças na organização espacial devido à introdução de novos equipamentos.</p> <p>O uso de revestimentos de alto desempenho (RAD) proporciona proteção contra agentes agressivos, facilidade de limpeza e higiene, considerações técnicas e sinalização para controlo de fluxos.</p>
Zonas de armazenagem	<p>O pavimento deve ser considerado como um equipamento de produção, pois tem um impacto direto na produtividade dos centros de distribuição.</p> <p>O pavimento ideal deve ser composto por placas de grandes dimensões, com um número reduzido de juntas, utilizando lajes de betão armado convencional, com adição de fibras ou pós-tensionado, a fim de evitar problemas nas juntas e minimizar a ocorrência de patologias.</p> <p>Utilizar endurecedores de superfície para garantir uma elevada resistência à abrasão da superfície, devido às intensas solicitações de esforços abrasivos.</p>
Pavimentos de betão e redes viárias	<p>As vias de comunicação são referências indispensáveis para o funcionamento de indústrias, áreas de estacionamento e outros espaços. Desempenham um papel crucial na conectividade e acessibilidade, permitindo o fluxo eficiente de pessoas, veículos e mercadorias.</p> <p>Quando o pavimento é reforçado, é possível que ele apresente espessuras superiores a 14 cm.</p> <p>O pavimento exposto ao ar livre está sujeito a cargas e tensões térmicas extremamente altas.</p>

Zonas de estacionamento	<p>Os pavimentos apresentam maior resistência ao desgaste, ataques químicos e têm uma durabilidade maior. Além disso, os custos de manutenção são menores em comparação com pavimentos betuminosos.</p> <p>Ao utilizar equipamentos menores, a execução do pavimento torna-se mais viável em locais fechados e pisos subterrâneos, o que proporciona uma melhor logística de trabalho.</p>
Pavimentos destinados a comércio	<p>O pavimento apresenta flexibilidade como elemento de fundação para paredes e mezaninos, permitindo uma adaptação eficiente às necessidades de estruturas adicionais.</p> <p>É possível aplicar endurecedores de superfície com pigmentação adequada, o que permite obter um acabamento estético e personalizado no pavimento.</p>

A classificação segundo o ACI (*American Concrete Institute*) é um sistema utilizado para categorizar e identificar as características e desempenho de diferentes tipos de pavimentos. Esse sistema considera diversos fatores, como resistência à compressão, tipo de agregados utilizados, presença de aditivos e outros elementos que influenciam nas propriedades e na qualidade do betão. Essa classificação considera o tipo de tráfego, a utilização, as condições especiais e o acabamento final dos pavimentos. Para pavimentos industriais submetidos a veículos com rodas pneumáticas e rígidas, as condições especiais incluem um solo uniforme e bem executado, a instalação de juntas essenciais, garantia de resistência à abrasão e tempo adequado de cura. Para veículos com rodas rígidas, é recomendada a aplicação de endurecedores de superfície. A preparação da superfície para todas as operações de acabamento e a utilização intensiva de talocha mecânica também são consideradas para garantir um pavimento durável. Para veículos industriais pesados com rodas rígidas, é necessária uma camada de betão uniforme e bem executada, com reforço e juntas adequadas. A aplicação de endurecedor de superfície e condições de cura corretas também são importantes para obter um acabamento adequado (Cristelli, 2010).

Adicionalmente, os pavimentos térreos industriais também podem ser classificados quanto ao tipo de revestimento, de acordo com a classificação UPEC que foi desenvolvida para oferecer soluções eficientes de revestimento de pavimentos, considerando a natureza e as necessidades dos espaços onde serão instalados. Em 2004, o *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB) fez uma revisão a essa classificação, para adaptá-la às mais recentes

exigências funcionais e às novas opções de materiais disponíveis no mercado (Martins, 2012). Embora os critérios da classificação UPEC tenham sido estabelecidos com base na realidade francesa, acredita-se que eles podem ser aplicados em Portugal sem problemas significativos, uma vez que as condições de uso dos espaços em ambos os países não diferem de forma significativa (Nascimento, 1991).

Em condições normais, espera-se que os revestimentos tenham uma boa durabilidade, com uma vida útil de pelo menos uma década, sem grandes deteriorações e alterações significativas em relação às condições iniciais. No entanto, é importante destacar que essa classificação tem um caráter apenas indicativo para alguns espaços comerciais, onde a escolha do revestimento muitas vezes é condicionada por fatores além da durabilidade, como a aparência decorativa, o conforto ou as tendências da moda (Silva *et al.*, 2007).

De acordo com a classificação UPEC, a caracterização de um local de aplicação ou de um revestimento é expressa por meio da combinação de quatro letras:

- U: Índice de resistência à abrasão, representando a capacidade do revestimento de resistir ao desgaste causado pelo tráfego e movimentação de objetos.
- P: Índice de resistência à perfuração, indicando a capacidade do revestimento de resistir a danos causados por objetos pontiagudos.
- E: Índice de resistência à água e humidade, avaliando a capacidade do revestimento de resistir à penetração de água e à humidade.
- C: Índice de resistência a produtos químicos, representando a capacidade do revestimento de resistir a danos causados por substâncias químicas.

Esses índices são atribuídos como letras individuais ou combinadas para caracterizar a resistência do revestimento em relação a cada um desses fatores (Abrantes, 2004).

2.5. Patologias pavimentos industriais

As falhas nos pavimentos industriais são principalmente causadas por erros no projeto, na execução e pelo uso inadequado do piso, o que acarreta sérias consequências para as

operações industriais, tais como o aumento dos custos de manutenção dos equipamentos, a redução da produção e a restrição no transporte de cargas, além de possíveis contaminações. Além disso, os processos de recuperação costumam ser dispendiosos, podendo, em alguns casos, igualar-se aos custos de produção de um novo pavimento. O fator chave para evitar tais patologias é a execução controlada do pavimento, com base em um projeto especializado e com respeito às limitações impostas pelo sistema adotado (Cristelli, 2010).

A maioria das anomalias e patologias nos pavimentos industriais aparecem na superfície do pavimento. Por isso, a escolha do revestimento do piso e dos acabamentos é fundamental para garantir um pavimento adequado ao uso previsto para o edifício. A tecnologia de revestimento de pisos tem evoluído e a quantidade de novos materiais disponíveis tem aumentado. Para obter uma solução ideal de revestimento de piso, é importante levar em consideração as exigências do local, o tipo de uso futuro do edifício e manter os custos iniciais e de manutenção os mais baixos possíveis (Pacheco, 2015).

Seguindo a mesma linha de pensamento acerca dos processos construtivos, Gaspareto *et al.* (2006) concluíram que a utilização inadequada de ferro na construção, a execução de acabamentos superficiais e a cura do betão de forma incorreta, assim como o atraso no corte e tratamento de juntas, contribuem significativamente para o aparecimento de patologias.

Contudo, o aparecimento de patologias em pavimentos industriais pode também decorrer do seu mau uso e da exposição a agentes que aceleram o seu desgaste, conforme descrito por Cristelli (2010). Este autor menciona o uso de cargas excessivas, sejam elas dinâmicas ou estáticas, bem como impactos mecânicos e a utilização de equipamentos com rodas de aço que danificam diretamente a estrutura. O uso de produtos inadequados para a limpeza do piso também pode contribuir para o aparecimento de patologias. Como resultado, podem ocorrer manifestações patológicas que afetam o desenvolvimento das operações, levando a uma diminuição na produção, limitações no transporte de cargas e afetando a estética do espaço.

No que diz respeito à mão-de-obra envolvida na execução, Chodounsky e Viecili (2007) afirmaram que todos os profissionais envolvidos na construção do pavimento podem ser

responsáveis pelo surgimento de patologias, incluindo a equipa laboratorial que procede à caracterização dos solos, a equipa de terraplanagem responsável pela preparação do subleito e da base, o projetista estrutural, o responsável pelo controlo tecnológico do betão e o executor do projeto. Em geral, a descoberta da causa pode demorar um tempo relativamente longo e o processo de fendilhamento do pavimento pode evoluir rapidamente, especialmente em áreas com tráfego intenso.

Conforme Helene (1993) salienta, é de extrema importância considerar o ambiente em que a estrutura é construída, pois a avaliação da agressividade do meio possibilita estimar a durabilidade do material. A presença de manifestações patológicas pode comprometer os requisitos de desempenho da construção ou de um elemento, afetando sua capacidade de resistência mecânica, funcionalidade, uso e estética. Tais manifestações podem incluir deformações excessivas, fendilhamento e destacamentos. Assim, é essencial sempre avaliar o comportamento da estrutura em relação ao ambiente onde ela está localizada (Isaia, 2005).

3. CASO DE ESTUDO, MATERIAIS E MÉTODOS

O caso de estudo descrito neste trabalho resultou da identificação de um problema na pavimentação do parque de estacionamento de veículos pesados por parte de uma empresa gestora de uma plataforma logística, tal como se irá descrever em seguida. O estudo de caracterização apresentado neste trabalho pretende compreender melhor as causas desse problema, e analisar se o mesmo poderá reduzir a durabilidade do pavimento ou originar o aparecimento precoce de patologias nas zonas em estudo.

O estudo foi realizado essencialmente em duas fases. Numa primeira fase foi feita a observação do estado superficial *in situ* (no parque de estacionamento da plataforma logística) e, simultaneamente, procedeu-se à recolha de amostras de material através de sondagens à rotação para posterior caracterização. A segunda fase do trabalho foi realizada no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde se procedeu à caracterização volumétrica e mecânica das misturas betuminosas recolhidas anteriormente para compreender se poderia haver uma variabilidade seu comportamento futuro. Todos os valores encontrados nesse estudo foram comparados com o Caderno de Encargos utilizado na realização da obra, fornecido pela entidade gestora da plataforma logística, ou com outras normas e especificações vigentes em Portugal.

3.1. Caso de estudo e trabalhos realizados *in situ*

3.1.1. Descrição do caso de estudo

Para fazer uma correta avaliação do estado superficial do pavimento e das condições do local, de modo a definir os possíveis ensaios a realizar às misturas betuminosas, foram realizadas visitas à plataforma logística do parque de estacionamento.

Estas visitas permitiram realizar uma inspeção visual ao pavimento, na qual se identificou um conjunto de locais onde as características superficiais do pavimento eram distintas da generalidade da área pavimentada, pois indiciavam ter uma porosidade mais elevada (zona 1) do que a maioria da mistura betuminosa (zona 2) aplicada na camada de desgaste, tal como

se identifica na Figura 8. Ao observar a superfície do pavimento é notório que as zonas de maior porosidade (zona 1) tinham um padrão de ocorrência que parecia corresponder às extremidades da largura de pavimentação com a mesa vibratória de compactação da pavimentadora.



Figura 8 – Aspeto visual do pavimento na plataforma logística

A utilização de pavimentadoras com mesas de compactação telescópicas (que permitem alterar a largura de pavimentação) poderá ter facilitado a ocorrência deste aspeto superficial, em especial se a temperatura de compactação não tiver sido suficientemente alta para assegurar uma adequada distribuição lateral da mistura pelo sem-fim helicoidal da pavimentadora até às zonas mais distantes da mesa telescópica, ou se o nível de compactação assegurado pela mesa vibratória não tiver sido suficientemente alto na zona onde se aumentou a largura de pavimentação.

Como não era possível identificar se as situações anteriormente descritas tinham acontecido durante a fase de aplicação, o foco deste trabalho foi identificar se estes locais com maior porosidade (zona 1) poderiam facilitar a ocorrência de degradações prematuras no

pavimento. Esta avaliação tornava-se ainda mais importante pelo facto deste pavimento ser utilizado por veículo pesados, numa zona de parque de estacionamento, onde é normal haver uma combinação de cargas muito elevadas e lentas que podem originar deformações permanentes, além de elevados esforços de torção (Figura 9) em zonas de viragem que podem causar desagregação da mistura betuminosa. Por último, nestes locais é mais provável a ocorrência de fugas de óleo ou outros lubrificantes (Figura 10) que aumentam o potencial de desagregação da camada de desgaste, em especial se esta for mais porosa.



Figura 9 – Efeito da aplicação de esforços de torção com veículos pesados na zona 1 do pavimento com maior porosidade



Figura 10 – Efeito da aplicação de esforços de torção com veículos pesados num local onde ocorreu um derrame de óleo no pavimento

A aplicação de elevados esforços de torção apenas foi possível pela disponibilidade que a entidade gestora da plataforma logística teve para realizar estes testes em condições reais com um veículo pesado da sua frota. Nesse sentido, um veículo pesado, que estava carregado, efetuou manobras nas zonas do pavimento a avaliar com raios de curvatura muito reduzidos (que podem acontecer, por exemplo, ao efetuar estacionamento), de modo a aumentar os esforços de torção, como se pode verificar pelas marcas de borracha deixadas pelos pneus do veículo devido ao aumento significativo do atrito entre o pneu e o pavimento para assegurar a força de tração exigida pelo veículo para manter o seu movimento.

A aplicação destes elevados esforços de torção não originou nenhum sinal evidente de desagregação da mistura betuminosa na zona 1, com maior porosidade, por comparação com as restantes zonas do pavimento (zona 2). No entanto, a marca deixada pela borracha dos pneus na zona 1 aparenta ser mais visível do que no restante pavimento, o que pode significar que existe uma maior força de atrito entre o pneu e o pavimento na zona 1, o que a longo prazo pode originar uma desagregação superficial mais rápida desta zona após a aplicação continuada de esforços de torção.

Quando se aplicaram esforços de torção num local onde tinha havido um derrame de óleo, os sinais de desagregação já se tornaram evidentes logo após o primeiro teste. Isto aconteceu porque os lubrificantes funcionam com um solvente do betume, exponenciando a desagregação de misturas betuminosas expostas a estes agentes. Por esse motivo, são visíveis sinais de desagregação quer na zona 1, quer na zona 2, mas facilmente se observou que o pavimento apresentou maior suscetibilidade à desagregação na zona 1 com maior porosidade.

Estes testes realizados *in situ* permitiram compreender, de forma visual, que a zona 1 poderia potenciar uma desagregação mais rápida da mistura betuminosa. No entanto, para compreender melhor as diferenças de comportamento entre a mistura betuminosa aplicada na zona 1 e no restante pavimento (zona 2) considerou-se essencial proceder à realização de ensaios de laboratório adicionais.

3.1.2. Outros trabalhos realizados *in situ*

De modo a avaliar se os locais do pavimento com maior porosidade poderiam vir a apresentar algum tipo de patologia precoce, foi decidido realizar uma campanha de extração de carotes do pavimento nas duas zonas já identificadas (zona 1 representa os locais onde se verificou visualmente uma superfície com maior porosidade e a zona 2 representa a generalidade da área do pavimento). Os carotes extraídos foram utilizados para uma avaliação laboratorial das suas características, permitindo comparar a sua composição e comportamento mecânico entre os dois locais.

Tendo por base a avaliação visual da superfície do pavimento, definiu-se um número adequado de carotes para ambas as zonas que permitisse avaliar globalmente as misturas betuminosas aplicadas na camada de desgaste e na camada de ligação subjacente. Deste modo, foram realizadas dezasseis extrações de carotes do pavimento da plataforma logística de acordo com o esquema representado na Figura 11, na qual se identificam os carotes extraídos das zonas 1 (cinzentas) e das zonas 2 (brancas).

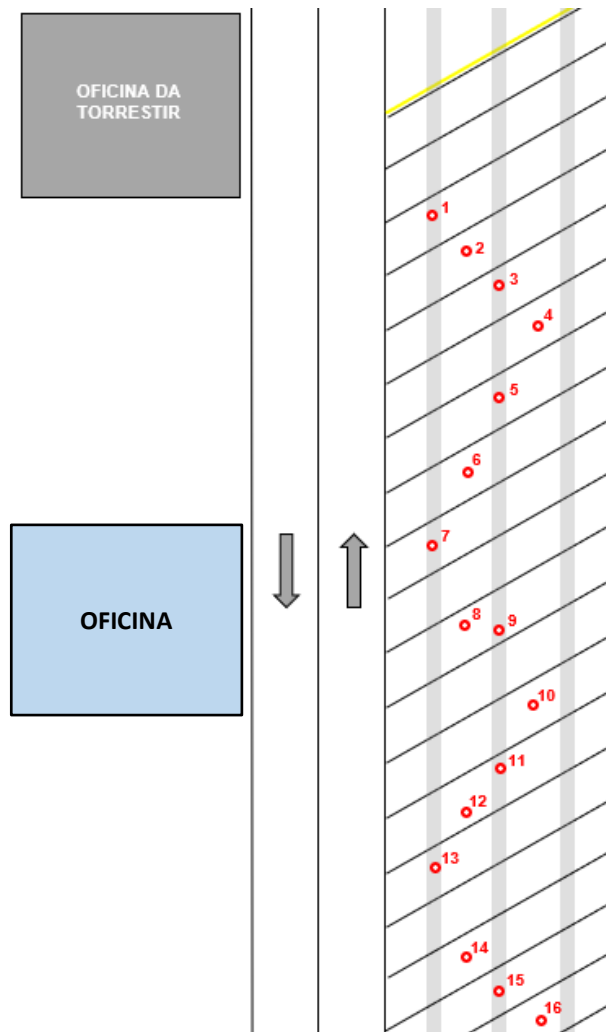


Figura 11 – Representação esquemática da localização dos carotes extraídos do pavimento

Como se pode observar, os carotes foram extraídos alternadamente na zona 1 e 2 ao longo do parque de estacionamento, procurando que os mesmos representassem adequadamente as zonas em questão em todo o parque e não apenas numa zona pontual. Os locais para realização dos carotes ainda foram seleccionados de modo a evitar locais de circulação dos veículos pesados. Na Figura 12 apresenta-se o momento de extração do carote 9 da zona 1 do pavimento a estudar, com a caroteadora ainda em funcionamento. Na mesma figura ainda é possível observar a sondagem à rotação correspondente ao carote 8 que já tinha sido finalizada da zona 2 do pavimento.



Figura 12 – Fase de extração de um carote (9) da zona 1 do pavimento na plataforma

Depois de concluídas as sondagens, os carotes foram retirados do pavimento. A título de exemplo, a Figura 13 apresenta um carote da zona 1 (9), com superfície mais porosa, e outro da zona 2 (8).



Figura 13 – Carotes extraídos da zona 1 (9) e da zona 2 (8) do pavimento na plataforma

Logo após a extração dos carotes foi possível verificar que não havia diferenças significativas no aspeto geral das misturas extraídas das zonas 1 e 2 em profundidade, mas era fundamental comprovar esta análise visual através de ensaios de caracterização laboratorial, que se

apresentam em seguida. Entretanto, os negativos dos carotes extraídos foram preenchidos com mistura betuminosa a frio e compactados para terminar os trabalhos realizados *in situ*.

3.2. Caracterização visual dos carotes e provetes de ensaio

A caraterização visual realizada em laboratório teve como objetivo avaliar os carotes extraídos do pavimento quanto ao número de camadas e as respetivas espessuras. Em seguida, realizou-se o corte dos carotes na interface das camadas, resultando num conjunto de provetes que foram utilizados nos ensaios laboratoriais posteriores. A espessura (em centímetros) desses provetes após o corte também foi avaliada, por ser um dado a utilizar na determinação das suas características físicas e mecânicas. As amostras provenientes da camada de desgaste receberam um código adicional com a letra “d” e as amostras da camada de ligação (denominada de *binder* em terminologia anglo-saxónica) subjacente receberam um código com a letra “b”.

3.3. Caracterização laboratorial das misturas betuminosas

As misturas betuminosas da camada de desgaste aplicadas no pavimento da plataforma logística foram caracterizadas de acordo com os seguintes ensaios baseados no Caderno de Encargos Tipo Obra Português (Infraestruturas de Portugal, 2014):

1. Baridade aparente (Norma Europeia EN 12697-6);
2. Baridade máxima (Norma Europeia EN 12697-5);
3. Determinação da percentagem em betume (Norma Europeia EN 12697-39);
4. Análise granulométrica (E233 – Especificação do LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil);
5. Sensibilidade à água (Norma Europeia EN 12697-12);
6. Determinação da resistência à tração Indireta – ITS (Norma Europeia EN 12697-23).

A metodologia adotada para caraterizar a mistura betuminosa da camada de ligação, vulgarmente também designada de camada de “binder” (TTb), teve em consideração os mesmos ensaios realizados à mistura da camada de desgaste. No entanto, neste caso não se

realizou a divisão dos provetes por zonas, uma vez que a razão que levou a essa divisão na camada de desgaste foi a observação visual da superfície, onde se conseguiu identificar duas zonas distintas. Na impossibilidade de confirmar se tal situação também ocorreu na camada de ligação, considerou-se que a mistura de ligação seria a mesma em toda a área de pavimentação.

3.3.1. Baridade aparente dos provetes de mistura betuminosa

A baridade aparente foi calculada pelo Método A da norma europeia EN 12697-6. Esta abordagem envolveu a medição do peso dos provetes em estado seco, seguida por uma nova medição com os mesmos provetes submersos em água. As Equações 1 e 2 apresentadas em seguida foram utilizadas para os cálculos da baridade aparente de cada provete.

$$\rho_w = 1000,3 + 0,0076 \times T - 0,0053 \times T^2 \quad (1)$$

$$BA = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (2)$$

Onde: ρ_w refere-se à massa volúmica da água onde o provete é submerso (kg/m^3);

T refere-se a temperatura da água onde o provete é submerso ($^{\circ}\text{C}$);

BA é a baridade aparente do provete de mistura betuminosa seco (kg/m^3);

m_1 é a massa do provete de mistura betuminosa seco (g);

m_2 é a massa do provete de mistura betuminosa submerso em água (g).

3.3.2. Baridade máxima da mistura betuminosa

Para determinar a baridade máxima das misturas betuminosas foram desagregadas amostras retiradas do pavimento com aproximadamente 2000 g. De acordo com a norma EN 12697-5, o procedimento de determinação da baridade máxima foi feito com o auxílio de um picnómetro limpo.

A amostra foi colocada no picnómetro juntamente com água destilada, preenchendo-o até cerca de 3 cm abaixo do topo. De seguida, o picnómetro foi colocado em uma mesa vibratória e conectado a uma bomba de vácuo por um período de 15 minutos. Após esse tempo, o

picnómetro foi preenchido até o topo e submerso num banho de água por um período entre 30 e 180 minutos. Posteriormente, o picnómetro foi retirado da água, limpo e pesado imediatamente. Os cálculos para determinação da baridade máxima foram realizados com base na Equação 3.

$$BM = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (3)$$

Onde: BM refere-se a baridade máxima da mistura betuminosa (kg/m³);

m_1 refere-se a massa do picnómetro com a tampa (g);

m_2 refere-se a massa do picnómetro com a tampa e a amostra de mistura betuminosa (g);

m_3 refere-se à massa do picnómetro com a tampa, amostra de mistura e a água (g);

V_p refere-se ao volume do picnómetro, cheio até à marca de referência (m³);

ρ_w refere-se à massa volúmica da água utilizada para encher o picnómetro (kg/m³).

3.3.3. Determinação do volume de vazios

Para a determinação do volume de vazios (V_v) de uma mistura betuminosa compactada, recorrendo à Equação 4 apresentada em seguida, é necessário conhecer a baridade aparente (BA) dos provetes e a baridade máxima (BM) da mistura betuminosa.

$$V_v = \frac{BM - BA}{BM} \quad (4)$$

3.3.4. Determinação da percentagem de betume

Para calcular a percentagem de betume das amostras das misturas betuminosas empregou-se o procedimento estipulado na norma EN 12697-39, que envolve a incineração do ligante betuminoso contido nas mesmas.

Os provetes das amostras foram pesados e depois colocados na mufla para iniciar o processo de ignição. Quando a balança interna da mufla registou três leituras consecutivas de massa

constante, o ensaio foi concluído. Após a ignição, os pesos dos provetes secos foram registados, e a percentagem de betume foi determinada utilizando a Equação 5.

$$B = \frac{W_s - W_a}{W_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde: B corresponde à percentagem de betume das amostras de mistura betuminosa (%);

W_s é a massa da amostra de mistura betuminosa antes da ignição (g);

W_a é massa remanescente após ignição da amostra de mistura betuminosa (g).

3.3.5. Análise granulométrica

A caracterização das misturas pela análise granulométrica das amostras foi realizada segundo a Especificação LNEC-E233, visto que era esse o método referido no caderno de encargos utilizado para realização do pavimento em estudo. As amostras secas foram separadas através de um conjunto de peneiros com aberturas de tamanhos diferentes que variaram de 0,075 mm a 20 mm. Os peneiros foram empilhados em ordem decrescente de abertura, de cima para baixo. De seguida as amostras foram agitadas mecanicamente para que as partículas fossem separadas de acordo com seus tamanhos e ficassem retidas nos peneiros correspondentes. As massas das partículas retidas em cada peneiro foram registadas e utilizadas para calcular a percentagens acumuladas e as percentagens retidas em cada intervalo de tamanho para a construção de uma curva granulométrica, que ilustra a distribuição de tamanhos das partículas na amostra. A percentagem de partículas retidas em cada peneiro foi determinada a partir da Equação 6 apresentada em seguida.

$$G = \frac{W_t - W_p}{W_t} \times 100 \quad (6)$$

Onde: G corresponde à percentagem de partículas retidas em cada peneiro (%);

W_t é a massa da amostra seca total (g);

W_p é massa remanescente após passar pelos diferentes peneiros (g).

3.3.6. Sensibilidade à água

Para realizar o ensaio de sensibilidade à água, foram necessários seis provetes com dimensões iguais, sendo que três foram ensaiados húmidos e os outros três secos. Aliás, foi devido a este ensaio que se decidiu extrair pelo menos seis carotes de cada zona do pavimento em estudo. Todos os provetes devem ser semelhantes em relação à baridade aparente e altura, com valores muito próximos em termos médios.

De acordo com a norma EN 12697-12, o grupo de provetes secos foi mantido à temperatura ambiente (± 25 °C), enquanto o outro grupo foi imerso em água a uma temperatura de 40 °C, por um período mínimo de 68 horas e máximo de 72 horas. Antes disso, o grupo de provetes imersos foi submetido a vácuo por 40 minutos para remover todo o ar, utilizando uma mesa vibratória. De seguida, os provetes ficaram em repouso na água por 30 minutos antes do acondicionamento. Após 68 a 72 horas, a temperatura da água foi reduzida para 15 °C, e os provetes secos foram colocados em um frigorífico a 15 °C por duas horas. Após esse período, os provetes foram submetidos ao ensaio de tração indireta, como se descreve em seguida, para finalmente se determinar a resistência conservada em tração indireta (ITSR) que avalia a sensibilidade à água das misturas.

3.3.7. Determinação da resistência à tração indireta

Para determinar a sensibilidade à água foi necessário proceder ao ensaio de tração indireta, de acordo com a norma EN 12697-23. Para esse procedimento foram utilizados uma prensa de compressão universal e um sistema normalizado de aplicação de carga com bandas. Foram efetuados dois ensaios de tração indireta a 15 °C à mistura betuminosa das camadas estudadas, para avaliar o efeito que a água tem na redução do valor de ITS: o primeiro sem condicionamento dos provetes em água (ITS_d), e o segundo após condicionamento dos provetes em água (ITS_w). Ao ocorrer a rotura do provete, a máquina de compressão regista os resultados da carga aplicada nos provetes secos e húmidos. Na Figura 14a pode observar-se o ensaio de ITS no momento de rotura do provete e na Figura 14b apresentam-se os provetes da camada de desgaste da zona 1 após a rotura.

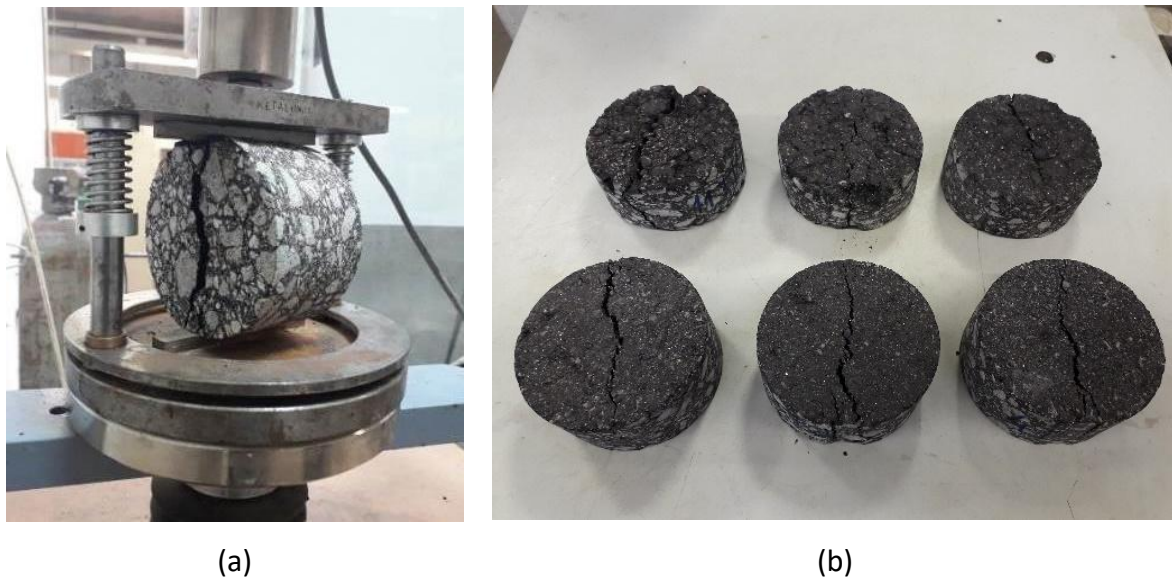


Figura 14 – Ensaio tração indireta: (a) rotura de um provete e (b) provetes após rotura

A partir dos dados recolhidos nesses ensaios foi possível calcular a resistência à tração indireta (ITS) e a sensibilidade à água, através da resistência conservada em tração indireta (ITSR), de acordo com as Equações 7 e 8.

$$ITS = \frac{2 \times p}{\pi \times d \times h} \times 10^6 \quad (7)$$

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad (8)$$

Onde: ITS corresponde a resistência à tração indireta (kPa);

p corresponde a carga máxima aplicada no ensaio de tração indireta (kN);

d corresponde ao diâmetro do provete (mm);

h corresponde a altura do provete (mm);

$ITSR$ corresponde a resistência conservada em tração indireta (%);

ITS_w é a média da resistência à tração indireta dos provetes condicionados em água (kPa);

ITS_d corresponde a média da resistência à tração indireta dos provetes secos (kPa).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Caracterização visual dos carotes extraídos do pavimento

Inicialmente procedeu-se à análise visual dos oito carotes extraídos na fase anterior do trabalho de cada uma das duas zonas do pavimento em estudo. Por conveniência, os carotes apresentados em seguida estão posicionados de forma invertida, com a superfície da camada de desgaste pousada sobre uma superfície plana.

Os carotes extraídos da zona 1, onde a textura superficial era mais aberta do que na generalidade do pavimento em estudo, são apresentados na Figura 15.

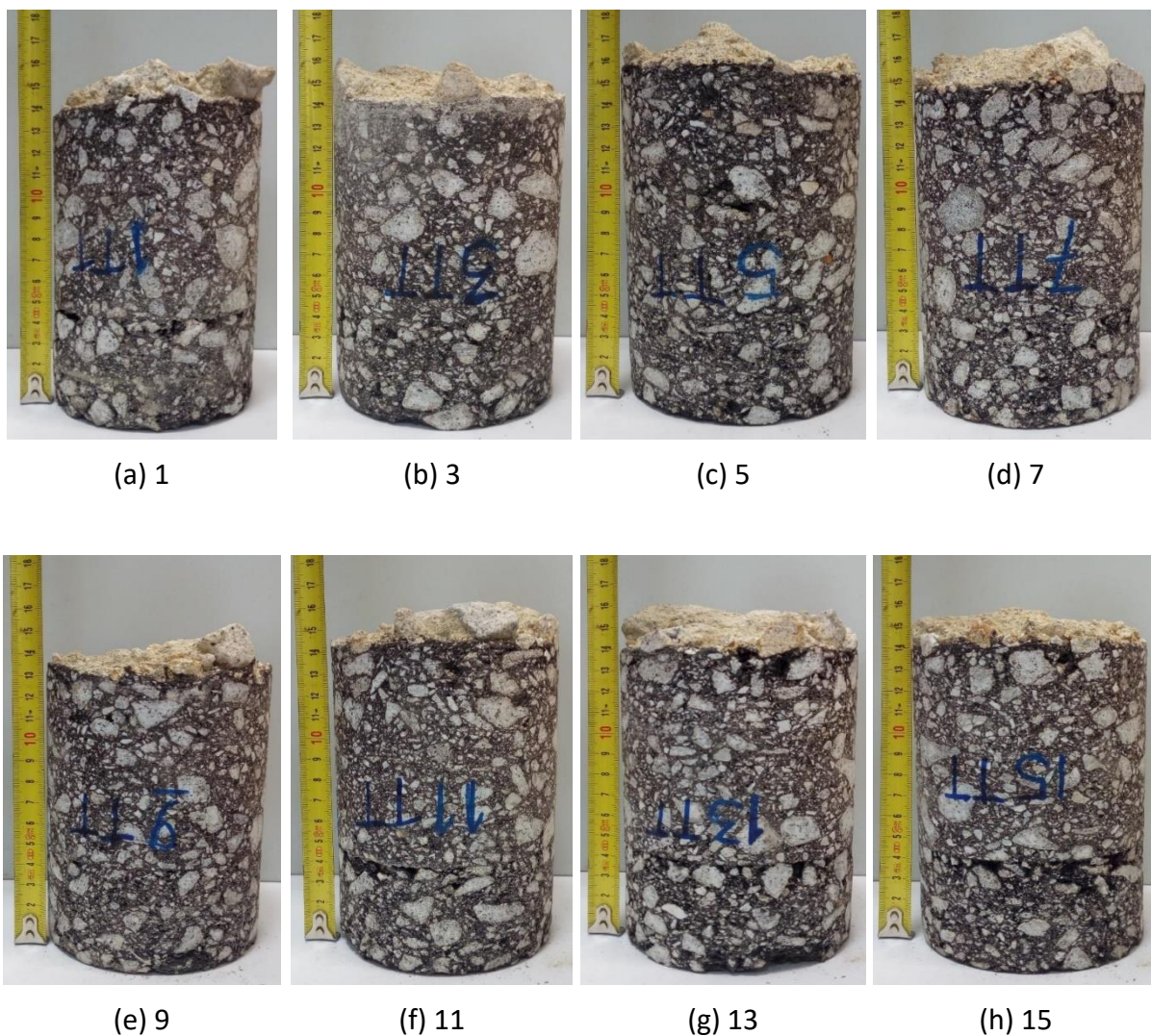


Figura 15 – Conjunto de carotes extraídos da zona 1 do pavimento em estudo

Alguns dos carotes recolhidos na zona 1 (por exemplo, o 1, 11, 13 e 15) permitem observar, de forma evidente, que a textura mais aberta visível na superfície do pavimento *in situ* também corresponde a uma maior porosidade em toda a espessura da camada de desgaste, problema este que ainda é mais evidente na parte inferior da camada na interface com a camada de ligação. Esta situação pode evoluir posteriormente para uma descolamento entre as duas camadas, o que pode acelerar a degradação do pavimento nestas zonas. Entretanto, não se observaram problemas na camada de ligação, na espessura das duas camadas ou no aspeto geral das misturas betuminosas (por exemplo, quantidade de betume ou dimensão dos agregados).

Já os carotes extraídos da zona 2, que representam as condições superficiais verificadas na generalidade do pavimento em estudo, são apresentados na Figura 16.

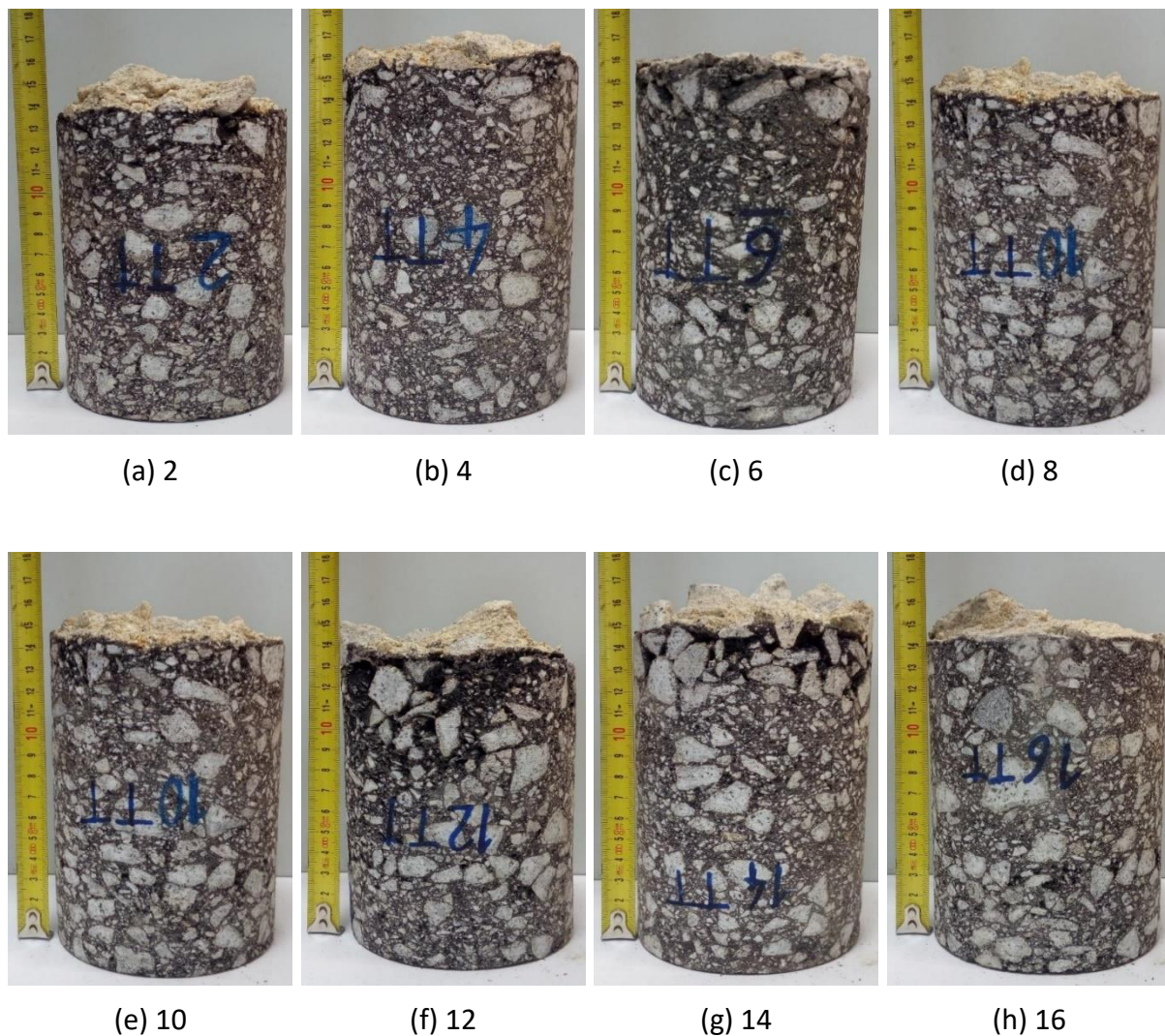


Figura 16 – Conjunto de carotes extraídos da zona 2 do pavimento em estudo

A generalidade dos carotes extraídos da zona 2 do pavimento (generalidade do pavimento) já não aparentam ter problemas associados a uma porosidade elevada, mesmo na zona inferior da camada de desgaste. O aspeto geral das misturas betuminosas de desgaste e ligação não apresentou problemas evidentes e a espessura das duas camadas foi bastante uniforme. No entanto, nos carotes 12 e 14 parece ter havido alguma segregação do material, em especial na mistura de ligação, que aumentou a porosidade em algumas partes dessas misturas.

Em seguida, a partir de cada um dos carotes extraídos na duas zonas do pavimento em estudo, foram cortados provetes de cada uma das duas camadas que o constituem (desgaste e ligação) para posterior caracterização volumétrica e do seu desempenho mecânico.

A Figura 17 exemplifica os cortes realizados ao carote 3 para obter os provetes 3d (desgaste) e 3b (ligação). Convém referir que a espessura dos provetes da camada de desgaste esteve condicionada pela máxima espessura útil dessa camada. O corte dos provetes da camada de ligação teve em consideração as recomendações da norma do ensaio de tração indireta, que serviu de base à definição da altura do provete (ou seja, cerca de 6,3 cm).

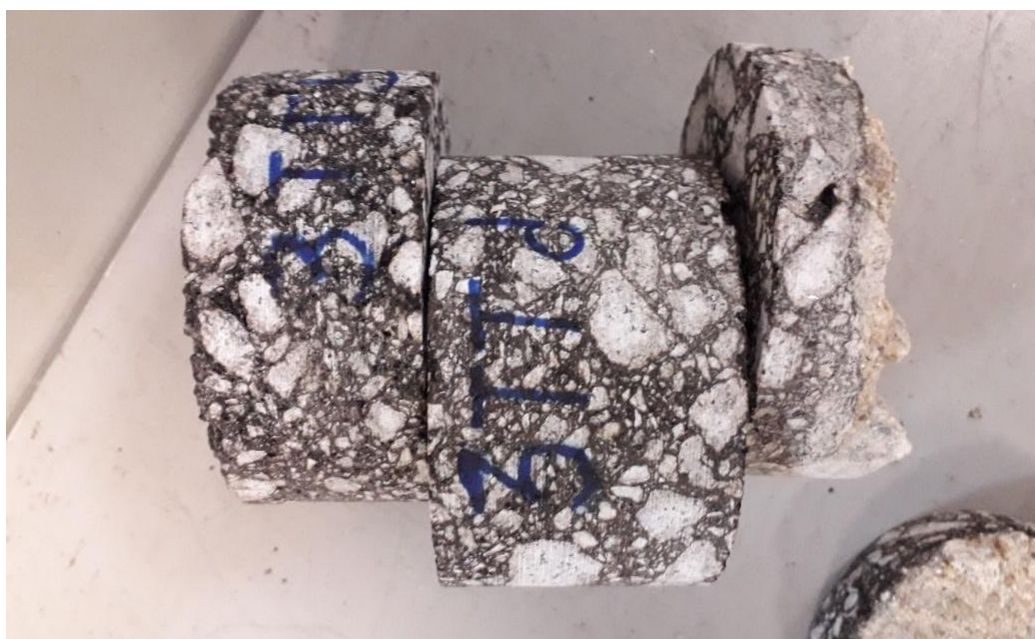


Figura 17 – Exemplo dos cortes realizados a um carote para obtenção de provetes

Um resumo das espessuras dos vários carotes e provetes analisados neste trabalho é apresentado nas Tabelas 3 e 4, respetivamente para os carotes extraídos nas zonas 1 e 2 do pavimento.

Tabela 3 – Espessuras dos carotes extraídos da zona 1 do pavimento em estudo

Carote	Espessura (cm)			Espessura após corte pela interface das camadas (cm)	
	Camada de desgaste	Camada de ligação	Total	Camada de desgaste	Camada de ligação
1	5,0	9,0	14,0	4,55	6,28
3	5,0	9,0	14,0	4,59	6,28
5	5,0	10,0	15,0	4,50	6,31
7	4,8	9,5	14,3	4,47	6,33

9	5,0	8,0	13,0	4,56	6,12
11	5,0	9,5	14,5	4,75	6,32
13	5,0	9,0	14,0	4,64	6,26
15	5,0	9,0	14,0	4,75	6,14
Média	5,0	9,1	14,1	4,60	6,26

Tabela 4 – Espessuras dos carotes extraídos da zona 2 do pavimento em estudo

Carote	Espessura (cm)			Espessura após corte pela interface das camadas (cm)	
	Camada de desgaste	Camada de ligação	Total	Camada de desgaste	Camada de ligação
2	4,8	9,0	13,8	4,43	6,27
4	5,0	10,0	15,0	4,93	6,15
6	5,5	10,0	15,5	5,50	6,28
8	5,0	9,0	14,0	4,69	6,27
10	5,0	8,5	13,5	4,83	6,20
12	5,3	8,0	13,3	4,86	6,33
14	5,2	9,0	14,2	5,04	6,27
16	5,2	9,0	14,2	4,70	6,30
Média	5,1	9,1	14,2	4,87	6,26

Com base nas espessuras medidas nos carotes, verificou-se que as camadas de desgaste e ligação têm espessuras médias de 5,05 e 9,10 cm, respetivamente. A espessura total dos carotes apresentou um valor médio de 14,15 cm. Tendo por base o mapa de quantidades que foi fornecido pela equipa projetista, verifica-se que estes valores estão próximos do expectável (6 cm na camada de desgaste e 9 cm na camada de ligação), embora a camada de desgaste apresente uma espessura ligeiramente inferior para todos os provetes recolhidos, mas que se enquadra nos intervalos aceitáveis de variação da espessura.

Estes resultados demonstram que as espessuras médias nas zonas 1 e 2 são praticamente iguais, razão pela qual este parâmetro não será diferenciador relativamente ao comportamento do pavimento expectável em ambas as zonas. Importa salientar ainda a

menor espessura dos provetes da camada de desgaste obtidos na zona 1, devido à maior dificuldade no corte da interface que era mais porosa.

4.2. Caracterização e comparação da mistura betuminosa aplicada nas duas zonas distintas (zonas 1 e 2) da camada de desgaste

A camada de desgaste é a camada superior do pavimento que tem um contato direto com as cargas do tráfego e com os agentes atmosféricos. Assim, deve apresentar uma superfície suave, regular e que não provoque derrapagens, além de ser resistente ao desgaste constante causado pelo tráfego. Também é responsável por minimizar o ruído e permitir um rápido escoamento da água em dias chuvosos, proporcionando segurança, conforto e eficiência aos utilizadores. A nível estrutural, a camada de desgaste desempenha um papel crucial na capacidade global do pavimento, distribuindo as cargas aplicadas pelas rodas dos veículos. Além disso, deve ser impermeável para proteger as camadas inferiores de possíveis infiltrações (Fonseca, 2011).

Em seguida apresentam-se as propriedades da camada de desgaste medidas em laboratório a partir dos provetes recolhidos nas zonas 1 e 2 do pavimento estudado, para compreender se existem diferenças na composição (que justifiquem o problema identificado na zona 1) e no comportamento mecânico das misturas aplicadas na zona 1 que possam reduzir a durabilidade do pavimento.

4.2.1. Baridade e volume de vazios das misturas betuminosas nas zonas 1 e 2

Na Tabela 5 apresenta-se o volume de vazios dos vários provetes da camada de desgaste, calculado com base na baridade aparente de cada provete e na baridade máxima das misturas betuminosas dessa camada determinada para cada uma das zonas em estudo. Assim, para identificação das misturas betuminosas obtidas a partir dos provetes de cada uma dessas zonas, adotou-se a designação de d1 para a mistura recolhida da camada de desgaste na zona 1, e a designação de d2 para a mistura recolhida da camada de desgaste na zona 2.

Tabela 5 – Propriedades físicas dos provetes da camada de desgaste

Zona	Provete	Baridade máxima (kg/m ³)	Baridade aparente (kg/m ³)	Volume de vazios (%)	
				Individual	Médio
1	1d1	2467	2168	12,1	12,4
	3d1		2155	12,6	
	5d1		2180	11,7	
	7d1		2184	11,5	
	9d1		2170	12,0	
	11d1		2133	13,5	
	13d1		2174	11,9	
	15d1		2116	14,2	
	2		2d2	2469	
4d2		2293	7,1		
6d2		2342	5,2		
8d2		2327	5,8		
10d2		2265	8,3		
12d2		2283	7,5		
14d2		2343	5,1		
16d2		2297	7,0		

Os resultados obtidos demonstram de forma clara que os valores de volumes de vazios (porosidade) obtidos para os provetes da camada de desgaste da zona 1 são significativamente superiores aos dos provetes da zona 2, o que vem confirmar a hipótese inicialmente apresentada sobre a porosidade. Por comparação com os valores especificados no Caderno de Encargos desta obra, conclui-se que a porosidade da mistura betuminosa aplicada em camada de desgaste na zona 1 não está conforme as especificações, enquanto a mistura aplicada na mesma camada para a generalidade do pavimento (zona 2) tem valores médios de porosidade próximos do limite superior do intervalo especificado.

Uma possível causa para as diferenças observadas é a utilização de uma largura de pavimentação significativa, com uma redução da qualidade do espalhamento e do nível de compactação nas zonas mais afastadas do alinhamento central da mesa da pavimentadora. Como consequência da maior porosidade existente na zona 1, poderá ocorrer algum fenómeno de desagregação precoce nestes locais, em especial se a mistura apresentar uma

reduzida resistência à tração e uma elevada sensibilidade à água, o que será discutido em seguida.

As deformações permanentes ou rodeiras que ocorrem nas misturas betuminosas estão ligadas à diminuição da porosidade devido à pós-compactação provocada pelo tráfego pesado. Daí a necessidade de manter um determinado volume de vazios na composição da mistura betuminosa (Fonseca, 2011). Por outro lado, no trabalho de Kandhal e Koehler (1984) foi observado que as seções do pavimento que manifestavam maior desagregação apresentavam um volume de vazios superior a 8% e que a gravidade das degradações estava ligada à porosidade da mistura. Os mesmos autores afirmam que as misturas betuminosas de um pavimento flexível projetado e construído de maneira adequada devem possuir entre 6% e 8% de vazios imediatamente após a construção, e cerca de 4% após 2 a 3 anos de utilização. Estes valores enquadram de forma adequada a porosidade observada na zona 2 do pavimento em estudo, ou seja, a generalidade do pavimento construído.

4.2.2. Percentagem de betume e análise granulométrica das misturas betuminosas nas zonas 1 e 2

Os provetes foram desagregados para determinar, pelo método de ignição, as percentagens de betume da mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste, nas zonas 1 e 2 do pavimento. As percentagens de betume obtidas foram de 5,3% e 5,4%, respetivamente, para as misturas da zona 1 (d1) e 2 (d2). Estes valores são usuais em misturas betuminosas do tipo betão betuminoso e são superiores ao mínimo de 4,0% especificado para este tipo de misturas no caderno de encargos.

Além disso, não existe uma diferença significativa na percentagem de betume das misturas extraídas das zonas 1 e 2, não havendo por isso uma relação evidente deste parâmetro com o aumento da porosidade observado na zona 1. No entanto, é possível correlacionar as percentagens de betume e os volumes de vazios obtidos nas duas zonas, visto que a zona com um maior porosidade (zona 1) apresentou uma percentagem de betume ligeiramente menor do que a zona 2. Tal relação entre as duas variáveis está de acordo com outros trabalhos encontrados na literatura (Antunes *et al.*, 2022).

O valor da baridade máxima, que se assume ser a densidade da mistura betuminosa sem vazios, determinada de forma experimental ou analítica, também tende a diminuir à medida que se aumenta a percentagem de betume na mistura betuminosa, visto que este é menos denso do que os agregados (Pimentel, 2013). Contudo, tal correlação não se verificou neste estudo entre as duas zonas investigadas, visto que a zona 1 revelou uma baridade máxima menor do que a zona 2, quando tinha uma maior percentagem de betume. No entanto, este resultado é compreensível quando as percentagens de betume e as baridades máximas apresentaram valores bastante similares entre as duas zonas em estudo.

A utilização de uma quantidade menor de betume resulta em uma maior presença de filer no mástique que compõe a matriz da mistura betuminosa, levando a um aumento da sua consistência ou resistência à deformação, mas, por outro lado, a uma redução na capacidade do ligante ter uma boa adesividade aos agregados (Silva, 2006). Em simultâneo, a falta de betume na mistura ou a utilização de temperaturas de produção inferiores ao desejável (que eram referidas no caderno de encargos) também pode diminuir a trabalhabilidade da mistura durante a fase de aplicação, e originar um aumento da porosidade similar ao observado na zona 1 do pavimento em estudo.

A análise granulométrica dos agregados foi realizada após determinar a percentagem de betume das misturas betuminosas para cada uma das zonas avaliadas. As curvas granulométricas dos betões betuminosos aplicados no pavimento em estudo devem ser contínuas, pois é necessário que os agregados sejam bem distribuídos para formar uma estrutura mineral com poucos espaços vazios, que são preenchidos por partículas finas. A presença de partículas finas contribui para fortalecer a estrutura mineral, o que aumenta o contato entre os agregados de maior tamanho (Gameiro, 2013).

Na Figura 18 é possível verificar a curva granulométrica das misturas recolhidas nas duas zonas em estudo, d_1 na zona 1 e d_2 na zona 2, bem como os limites do fuso granulométrico especificado no caderno de encargos.

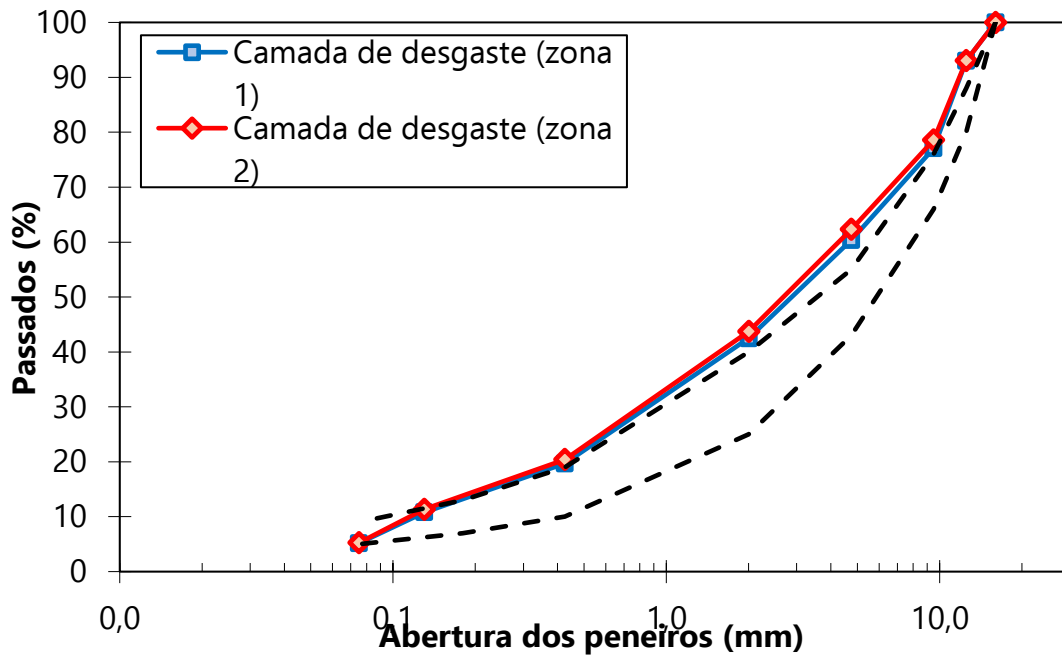


Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados das misturas aplicadas nas zonas 1 e 2 da camada de desgaste e respetivo fuso especificado para a mistura betuminosa

Pela análise dos resultados obtidos confirma-se que as curvas granulométricas das misturas betuminosas recolhidas nas duas zonas em estudo são contínuas e idênticas entre si, situando-se perto do limite superior do fuso granulométrico, o que denota alguma falta de agregados grossos e um excesso de agregados finos. De qualquer forma, com base na análise das curvas granulométricas das misturas aplicadas nas zonas 1 e 2 do pavimento, não é possível concluir que haja uma relação entre os valores distintos de porosidade observados em cada zona e a distribuição granulométrica muito similar dos agregados utilizados nas misturas betuminosas correspondentes.

4.2.3. Resistência à tração indireta e sensibilidade à água das misturas nas zonas 1 e 2

Em geral, a avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas é feita por meio de ensaios de resistência mecânica em dois grupos de amostras com características idênticas. Essas amostras são previamente submetidas a diferentes condições, sendo que um grupo é exposto a condições mais severas em relação à ação da água e vácuo. O valor resultante da divisão entre a resistência média das amostras do grupo mais severamente condicionado e a resistência média das amostras do grupo menos severamente condicionado fornece um

indicador do “desempenho conservado” e é utilizado para avaliar a sensibilidade à água (Silva *et al.*, 2009).

Inicialmente determinou-se a resistência à tração indireta (ITS) e os valores da deformação na rotura dos provetes de mistura betuminosa de desgaste que não foram condicionados em água, para servirem de referência relativamente ao desempenho mecânico nas zonas 1 e 2 do pavimento, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta (ITS) na camada de desgaste

Zona	Provete	Deformação (mm)		ITS (kPa)	
		Individual	Média	Individual	Média
1	7d	2,2		1239	
	9d	2,1	2,17	1377	1277
	13d	2,2		1215	
2	8d	2,3		2310	
	10d	2,3	2,41	2247	2485
	14d	2,6		2897	

De acordo com os resultados apresentados verifica-se que, apesar da deformação dos provetes na rotura ser semelhante para as duas zonas (sendo até ligeiramente superior na zona 2), o valor de resistência à tração indireta (a 15 °C) obtido para cada uma dessas zonas é significativamente diferente, o que se relaciona com a porosidade muito díspar das misturas betuminosas nos dois locais. A resistência mais elevada na zona 2 demonstra que a generalidade do pavimento tem uma elevada capacidade de resistir às cargas dos veículos pesados que vão utilizar o parque de estacionamento, enquanto a zona 1 (mais porosa) será mais propensa a ter degradações prematuras devido à sua menor resistência mecânica.

De modo a avaliar a durabilidade das misturas nas duas zonas, em condições atmosféricas mais severas, determinou-se em seguida a sua sensibilidade à água. Na Tabela 7 é possível relacionar o ITSR, que é o rácio da resistência à tração indireta dos provetes condicionados (ITS_w) e não condicionados (ITS_d), e principal medida da sensibilidade à água, com a média do volume de vazios dos provetes utilizados no ensaio. Os resultados de ITS representam a média

dos valores obtidos em três provetes e salienta-se que na realização deste ensaio a altura dos provetes foi limitada pela espessura da camada em análise.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água das misturas na camada de desgaste

Mistura	Ensaio	ITS (kPa)	Deformação (mm)	Vv (%)	ITSR (%)
d1 (zona 1)	IST _d	1277	2,17	12,0	73
	IST _w	935	2,28		
d2 (zona 2)	IST _d	2485	2,41	6,1	78
	IST _w	1929	2,10		

Genericamente, constatou-se que o volume de vazios exerce uma influência muito significativa na resistência das misturas betuminosas quando submetidas a tração indireta. Isso acontece porque a resistência mecânica tende a diminuir conforme os provetes apresentam um maior volume de vazios, pois estes locais fragilizam a mistura quando se ultrapassam os limites aceitáveis para este parâmetro. Tal cenário pode afetar adversamente o desempenho da mistura de desgaste, especialmente na região correspondente à zona 1 do pavimento.

Numa mistura betuminosa, o volume de vazios do esqueleto mineral (VMA) representa o espaço disponível entre os agregados numa mistura compactada, ou seja, é o espaço ocupado pelos vazios e pelo ligante betuminoso (Bastos, 2017). Nesse sentido, quanto maior a quantidade de betume, menor será a porosidade. A redução do volume de vazios, resultante do aumento da percentagem de betume, indica que os vazios estão a ser preenchidos pelo betume. De facto, o betume funciona como um lubrificante entre as partículas de agregados, antes separadas por uma rede muito densa de vazios. Apesar desse aumento da quantidade de betume poder proteger a mistura betuminosa do efeito da água, ao reduzir a sua porosidade, também a torna mais propensa a deformações permanentes (Mahboub e Little, 1988).

Com base nos resultados de ITSr apresentados, verifica-se que a mistura de desgaste é mais sensível à água na zona 1. No entanto, e apesar da diferença significativa no volume de vazios

dos provetes obtidos de cada zona, os valores de ITSR são relativamente próximos nas duas zonas, que possuem a mesma mistura apresentando uma sensibilidade a presença de água similar. No entanto, convém lembrar que os valores de resistência à tração obtidos na zona 1 são consideravelmente inferiores, o que pode estar a condicionar os resultados de ITSR obtidos em cada zona. De salientar ainda que os valores de ITSR são inferiores a 80% nas zonas 1 e 2, o que demonstra que toda a camada de desgaste é relativamente sensível à água, o que sugere que deveria ter sido aplicado um aditivo promotor da adesividade aquando da produção das misturas.

Para uma melhor compreensão da influência da porosidade das misturas betuminosas na resistência à tração indireta, na Figura 19 apresenta-se um gráfico que relaciona o valor de resistência à tração indireta (ITS) com o volume de vazios de cada provete.

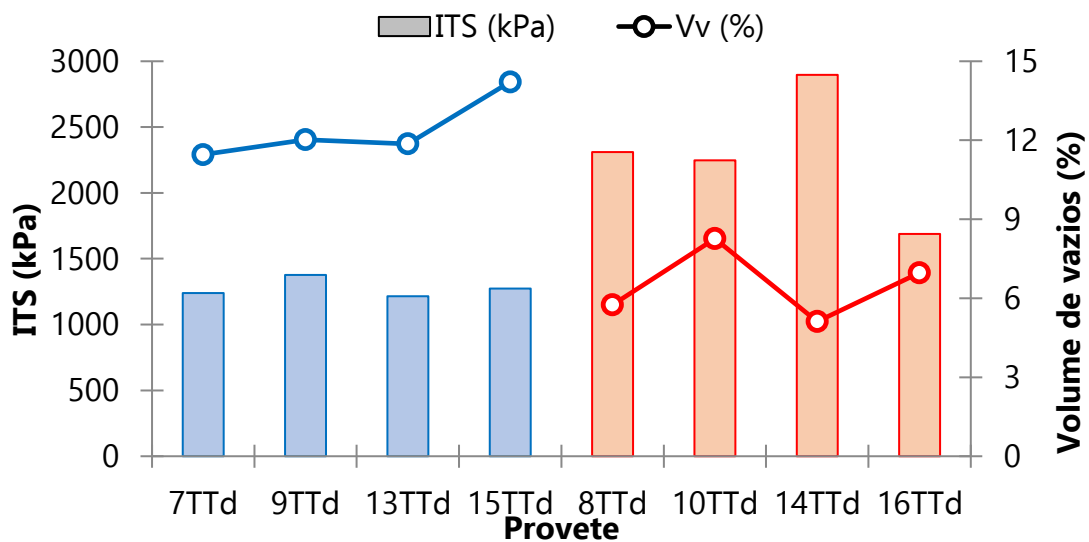


Figura 19 – Relação entre o ITS e o volume de vazios na camada de desgaste obtidos na zona 1 (azul) e na zona 2 (vermelho)

De um modo geral, verifica-se uma tendência do aumento do valor de ITS com a diminuição do volume de vazios entre os provetes de cada uma das zonas identificadas. A redução da resistência à tração indireta (ITS) na zona 1, como consequência da maior porosidade da mistura betuminosa nesta zona do pavimento, confirma que esta zona tem uma menor capacidade de resistir à desagregação do que a generalidade do pavimento (zona 2). Portanto, a maior porosidade presente na zona 1 reforça a possibilidade de que a diferença observada

entre as duas zonas possa ser atribuída ao uso de uma largura de pavimentação significativa, que levou a uma diminuição na qualidade da distribuição e compactação nas áreas mais distantes do centro da pavimentadora. Consequentemente, observou-se a ocorrência de desagregação precoce no local, principalmente na zona 1. Esta zona, de facto, exibiu uma reduzida resistência à tração indireta e uma maior sensibilidade à água.

Um dos parâmetros de elevada relevância para aplicação de misturas betuminosas é a temperatura de compactação. Este fator tem uma influência considerável na baridade aparente das misturas betuminosas e, consequentemente, na sua porosidade. É importante notar que quanto mais baixa for a temperatura de compactação, menor será a baridade aparente e maior será a porosidade das misturas, resultando em uma redução do módulo de rigidez e um aumento da sensibilidade à água (Pais, 2013). Assim, a ocorrência de baixas temperaturas de compactação, principalmente nas zonas mais limítrofes da pavimentadora, também pode ter sido a causa do problema observado na zona 1 do pavimento em estudo, pois este apresentou uma menor baridade aparente, maior porosidade, menor resistência à tração indireta e maior sensibilidade à água. Portanto, a temperatura de compactação da mistura betuminosa mostra-se como um fator importante quando se analisa a qualidade do material utilizado na pavimentação da plataforma logística estudada.

A temperatura é um fator que influencia o comportamento viscoelástico das misturas betuminosas, pois estas herdam as características viscoelásticas do ligante betuminoso que contêm, tornando-se materiais termicamente suscetíveis, cujas propriedades variam de acordo com a temperatura. Para temperaturas muito baixas, as misturas sujeitas ao tráfego normal tendem a tornar-se rígidas e praticamente elásticas, o que pode levar à fragilização do material, em especial se as misturas forem muito porosas, o que pode levar a um endurecimento excessivo do ligante betuminoso por oxidação (La Roche, 1996).

De acordo com a pesquisa realizada por Fernandes (2023), que avaliou a variabilidade dos fatores de obra e seu impacto no comportamento estrutural de um pavimento flexível, os principais responsáveis pela deterioração e subsequente colapso do pavimento foram identificados como sendo os fatores ligados ao processo de construção, tais como o grau de compactação e a espessura da camada.

4.3. Caracterização da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação

As características a serem alcançadas pelas misturas betuminosas variam conforme o tipo de pavimento, o tipo de camada e até mesmo o método de formulação empregado. Portanto, as misturas betuminosas aplicadas nas camadas de pavimentos podem apresentar variações nos tipos de agregados, na sua distribuição granulométrica, no tipo e quantidade de ligante, no uso de aditivos ou substâncias que alteram as propriedades do betume, bem como na composição volumétrica (Pimentel, 2013).

Nos pavimentos com mais do que uma camada betuminosa, a camada de ligação situa-se diretamente abaixo da camada de desgaste. Essa camada tem como propósito criar uma superfície nivelada, de forma que a camada de desgaste possa ser posteriormente aplicada sem dificuldades. Além disso, essa camada é responsável por suportar as cargas provenientes do tráfego, e distribuir as tensões para, em seguida, transmiti-las para a camada de base betuminosa ou granular (Fonseca, 2011).

Em seguida apresentam-se as propriedades da camada de ligação medidas em laboratório a partir de todos os provetes recolhidos no pavimento estudado, visto que não houve evidências de diferenças nesta camada entre as zonas 1 e 2 anteriormente referidas. Esta parte do estudo procurou avaliar se a composição e o comportamento mecânico da mistura aplicada na camada de ligação poderão ter contribuído para o problema observado na camada de desgaste ou para uma eventual redução na durabilidade do pavimento.

4.3.1. Baridade e volume de vazios da mistura betuminosa

Na Tabela 8 apresentam-se os volumes de vazios obtidos a partir dos valores de baridade aparente dos diversos provetes obtidos a partir da camada de ligação do pavimento em estudo e da baridade máxima dessa mistura betuminosa determinada após desagregação dos provetes.

Como se pode observar, os resultados de volume de vazios desta camada estão genericamente de acordo ou relativamente próximos dos limites especificados no Caderno de Encargos (4% a 6%), apesar de haver alguns resultados que ultrapassam o limite superior, o

que resultou num valor médio de porosidade igual a 7,0%. Estes valores um pouco mais elevados do volume de vazios poderão estar associados a uma maior dificuldade em compactar a mistura betuminosa de ligação sobre um suporte menos rígido (camadas granulares), o que pode acontecer pontualmente numa vasta área a pavimentar.

Tabela 8 – Caraterísticas volumétricas dos provetes da camada de ligação

Provete	Baridade máxima (kg/m ³)	Baridade aparente (kg/m ³)	Volume de vazios (%)	
			Individual	Médio
1b		2337	6,0	
2b		2269	8,7	
3b		2355	5,3	
4b		2341	5,8	
5b		2324	6,5	
6b		2222	10,6	
7b		2359	5,1	
8b	2486	2298	7,6	7,0
9b		2336	6,0	
10b		2339	5,9	
11b		2320	6,7	
12b		2137	14,0	
13b		2353	5,4	
14b		2306	7,2	
15b		2335	6,1	
16b		2351	5,4	

O valor um pouco mais elevado de porosidade da camada de ligação confirma a análise visual feita anteriormente aos carotes, onde se notou alguma segregação das misturas de ligação, que aumentaram a sua porosidade. Por exemplo, o elevados valores de porosidade dos provetes 12b e 14b confirmam as observações anteriores, mesmo após os carotes serem serrados para obter os provetes.

4.3.2. Percentagem de betume e análise granulométrica da mistura betuminosa

No que se refere à percentagem em betume da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação, o valor obtido através do ensaios de ignição foi de 5,1%, valor esse considerado usual e acima do limite mínimo de 4,0% especificado no caderno de encargos para a generalidade dos betões betuminosos a aplicar em camada de ligação. Ao comparar as percentagens de betume utilizadas nas misturas das camadas de desgaste e ligação, nota-se que o valor foi mais elevado na camada de desgaste, como é habitual. Essa diferença pode ser atribuída à necessidade de utilizar mais betume e uma maior quantidade de material fino na mistura betuminosa de desgaste, para assegurar uma maior regularidade e impermeabilidade, visto que essa mistura é aplicada na superfície do pavimento (Silva, 2006).

Uma mistura ideal de agregados para uma mistura betuminosa ocorrerá quando as proporções obtidas desses materiais estiverem o mais próximo possível da granulometria ideal, que é determinada a partir de um perfil granulométrico predefinido em cadernos de encargos (Pimentel, 2013).

Ao analisar o caderno de encargos relativo ao pavimento em análise, que foi fornecido pela empresa gestora da plataforma logística, verificou-se que o mesmo especifica uma curva granulométrica idêntica para as misturas de desgaste e de ligação, o que não é prática corrente ao aplicar misturas betuminosas com espessuras distintas. Como é possível observar na Figura 20, a curva granulométrica dos agregados desta mistura betuminosa da camada de ligação não se encontra dentro dos limites especificados nesse documento, tendo desvios significativos em especial nos peneiros de 2 mm e 4 mm.

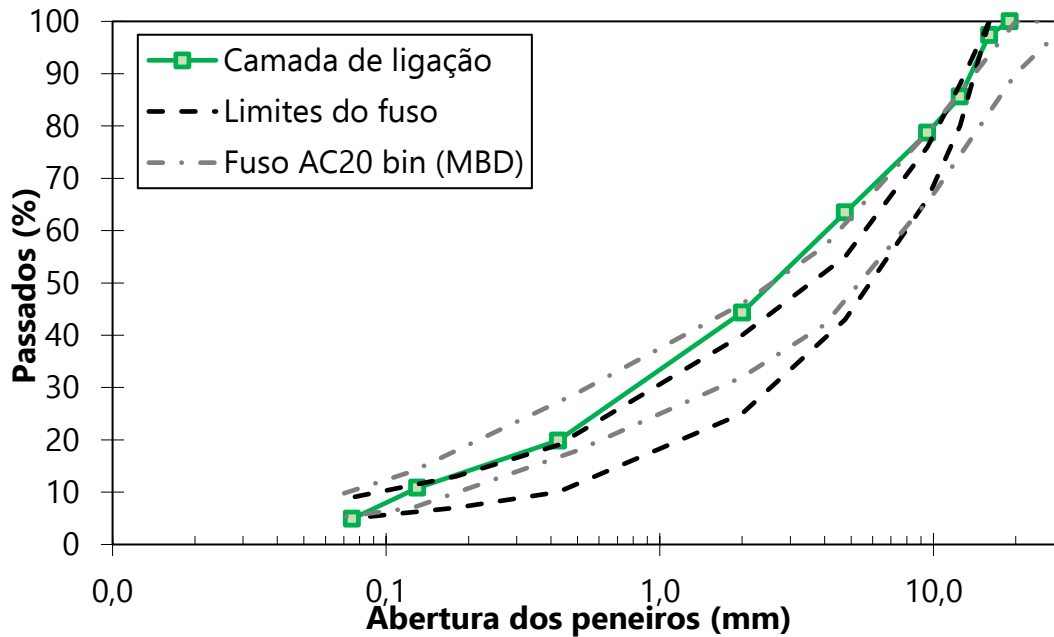


Figura 20 – Curva granulométrica dos agregados da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação e fusos especificados em cadernos de encargos

No entanto, se for considerado o fuso granulométrico dos agregados de uma mistura betuminosa do tipo AC 20 bin (MBD) definido no caderno de encargos da Infraestruturas de Portugal (2014), habitualmente utilizado em camadas de ligação de pavimentos flexíveis, os resultados obtidos neste estudo já se encontram dentro do expectável, ainda que próximo do limite superior desse fuso. Caso o empreiteiro tenha aplicado uma mistura deste tipo na camada de ligação, por ser uma prática habitual em obras de pavimentação, essa opção poderá ser considerada válida e não terá contribuído negativamente para uma maior porosidade da mistura ou para um comportamento inadequado do pavimento.

A interação entre o desempenho das misturas betuminosas e suas características granulométricas é crucial. Se a composição da mistura for mal projetada, essas características granulométricas podem ter um impacto negativo nas propriedades funcionais e estruturais do pavimento, causando problemas como deformações permanentes, fluência excessiva, exsudação, desagregação, textura superficial inadequada e até mesmo fadiga prematura (Lima, 2016).

4.3.3. Resistência à tração indireta e sensibilidade à água da mistura betuminosa

Os resultados de resistência à tração indireta (ITS) e de deformação na rotura de um conjunto de provetes da mistura betuminosa aplicada na camada de ligação são apresentados na Tabela 9, os quais também deram origem ao gráfico da Figura 21. Estes provetes não foram condicionados em água para servirem de referência relativamente ao desempenho mecânico desta mistura.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta (ITS) na camada de ligação

Provete	Deformação (mm)	ITS (kPa)
7b	2,0	2370
9b	2,1	2567
13b	2,2	2662
15b	2,2	2468
Média	2,1	2517

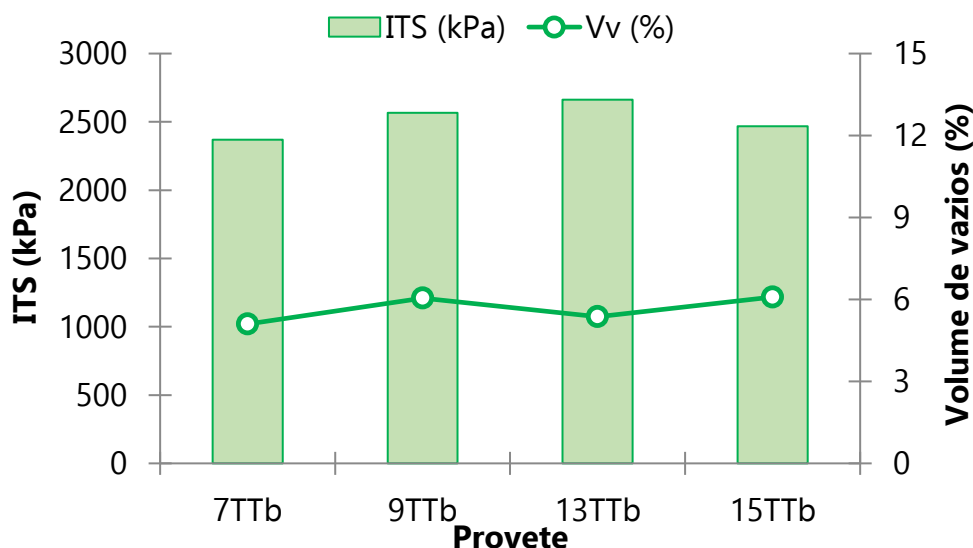


Figura 21 – Relação entre o ITS e o volume de vazios na camada de ligação

Os resultados obtidos no ensaio de tração indireta permitem concluir que não existe uma variação significativa da resistência e da deformação entre os diferentes provetes ensaiados, o que significa que haverá uma elevada homogeneidade no comportamento da camada de

ligação. Os valores médios da resistência à tração indireta (ITS) e da deformação na rotura são adequados para este tipo de mistura, o que é consistente com o cumprimento genérico dos vários parâmetros de composição desta mistura avaliados anteriormente (ou seja, porosidade, percentagem de betume e granulometria).

Verifica-se que houve um ligeiro aumento da resistência (ITS) e uma diminuição da deformação desta camada de ligação por comparação com a camada de desgaste aplicada na zona 2 (generalidade do pavimento), o que se compreende devido à menor percentagem de betume utilizada nesta mistura betuminosa e ao ligeiro aumento da porosidade.

Finalmente avaliou-se a durabilidade da mistura aplicada na camada de ligação, quando submetida a condições atmosféricas mais severas. Os resultados de sensibilidade à água dessa mistura betuminosa são apresentados na Tabela 10, bem como a média do volume de vazios dos provetes utilizados no ensaio, salientando-se o valor de ITSR, que é o rácio da resistência à tração indireta dos provetes condicionados (ITS_w) e não condicionados (ITS_d), por ser a principal medida da sensibilidade à água.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura aplicada na camada de ligação

Mistura	Ensaio	ITS (kPa)	Deformação (mm)	Vv (%)	ITSR (%)
b	IST _d	2533	2,11	5,7	70
	IST _w	1767	2,02		

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que a mistura aplicada na camada de ligação é mais sensível à água do que as misturas aplicadas na camada de desgaste, visto que obteve um valor de ITSR ligeiramente inferior aos determinados na camada de desgaste (mesmo em comparação com a zona 1).

Este resultado parece contrariar a lógica de que as misturas betuminosas com menor porosidade são, em princípio, menos sensíveis à ação negativa da água. No entanto, é importante relembrar que a mistura aplicada na camada de ligação tem uma menor

percentagem de betume, que desempenha um papel fulcral na proteção dos agregados relativamente à ação da água. Em termos práticos é possível utilizar uma menor percentagem de betume na camada de ligação porque este material não se encontra sujeito à ação direta das condições atmosféricas, e por isso não se considera fundamental que o mesmo apresente valores de resistência conservada (ITSR) tão elevados como os exigidos às misturas aplicadas na camada de desgaste.

Independentemente desta camada de ligação ser menos sujeita à ação da água, verifica-se mais uma vez que o valor de ITSR é inferior a 80%, o que demonstra que esta mistura é relativamente sensível à água. Este resultado reforça a observação anterior sobre as vantagens que teriam existido no comportamento destas misturas caso se tivesse aplicado um aditivo promotor da adesividade aquando da produção das misturas. Esse aditivo iria solucionar o aparente problema de adesividade entre o betume e os agregados utilizados nas várias misturas betuminosas estudadas.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo de caso onde se procedeu à caraterização das misturas betuminosas aplicadas em diferentes zonas de um parque de estacionamento de uma plataforma logística localizada no Norte de Portugal.

O principal objetivo deste trabalho foi compreender se o aspeto superficial diferenciado, verificado em duas zonas do pavimento desse parque de estacionamento, poderá ter resultado de problemas de composição das misturas betuminosas e dar origem a uma variação significativa do comportamento mecânico que possa comprometer a durabilidade do pavimento na zona com uma textura superficial mais aberta (zona 1) por comparação com a generalidade do pavimento (zona 2).

A observação direta dos carotes recolhidos na zona 1 permitiu concluir que a textura mais aberta visível na superfície do pavimento *in situ* também corresponde a uma maior porosidade em toda a espessura da camada de desgaste, problema este que ainda é mais evidente na parte inferior da camada na interface com a camada de ligação. Esta situação pode evoluir posteriormente para um descolamento entre as duas camadas, o que pode acelerar a degradação do pavimento nestas zonas.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que as espessuras médias das camadas medidas nos carotes extraídos do pavimento são de 5,05 cm para a camada de desgaste e de 9,10 cm para a camada de ligação, totalizando uma espessura cujo valor médio é da ordem dos 14,15 cm. Tendo por base o mapa de quantidades que a equipa projetista forneceu, verifica-se que estes valores estão próximos do expectável (6 cm + 9 cm), embora a camada de desgaste apresente uma espessura média ligeiramente inferior nos provetes recolhidos. Estes resultados demonstram ainda que as espessuras médias nas zonas 1 e 2 são praticamente iguais, razão pela qual este parâmetro não será diferenciador relativamente ao comportamento do pavimento expectável em ambas as zonas.

Este trabalho também permitiu verificar que existem diferenças significativas nos resultados de volume de vazios (ou porosidade) da mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste nas duas zonas identificadas e nas quais foram recolhidos carotes para ensaios laboratoriais.

Assim, os provetes extraídos dos carotes da zona 1 apresentam uma porosidade compreendida entre 11,5% e 14,2%, enquanto na zona 2 estes valores variam entre 5,1% e 8,3%. Relativamente a este parâmetro, o caderno de encargos estabelecia valores de porosidade compreendidos entre 4% e 6% para este tipo de mistura, o que permite concluir que os provetes extraídos da zona 1 não cumprem o estipulado nesse documento, ao contrário dos provetes extraídos da generalidade do pavimento (zona 2) que cumprem globalmente os limites, salvo algumas exceções que estão um pouco acima do limite superior.

De uma forma geral, verificou-se que o volume de vazios apresenta uma influência elevada na resistência das misturas à tração indireta (ITS), uma vez que esta propriedade diminui com o aumento do volume de vazios dos provetes, o que poderá comprometer o desempenho da mistura na zona 1. Assim, o problema identificado pode acelerar a degradação do pavimento nessa zona, em especial quando este pavimento pode estar sujeito a elevados esforços de torção devido às manobras de estacionamento realizadas pelos veículos pesados.

No que se refere à percentagem de betume, para a mistura aplicada na camada de ligação obteve-se o valor de 5,1%, enquanto para a mistura aplicada na camada de desgaste os valores obtidos estão compreendidos entre 5,3% e 5,4%. Na ausência de um documento referente à formulação das misturas aplicadas, não é possível concluir se os valores cumprem com o especificado em fase de construção, embora cumpram o valor mínimo geral utilizado para estudos de formulação (4,0%). Apesar disso, os valores obtidos podem ser considerados normais para os tipos de misturas betuminosas identificados nesta obra (ou seja, betões betuminosos), e não terão contribuído para o problema da zona 1.

No que diz respeito à granulometria dos agregados utilizados em cada mistura, a análise às curvas da mistura de agregados mostra que estas não cumprem de forma integral o fuso granulométrico indicado no caderno de encargos, apesar de se verificar que estão próximas do limite superior do mesmo. Também se verificou que a curva granulométrica da mistura aplicada na camada de desgaste é idêntica para as zonas 1 e 2, o que significa que as diferenças volumétricas observadas (nomeadamente, a porosidade) não deverá estar relacionada com diferenças na composição das misturas.

Os resultados de resistência conservada obtidos no ensaio de sensibilidade à água (ITSR) para a mistura aplicada em camada de desgaste foram de 73% e 78%, respetivamente, para as zonas 1 e 2, enquanto na mistura aplicada em camada de ligação se obteve um valor de 70%. Desta forma, verificou-se que os resultados observados na mistura aplicada em camada de desgaste são relativamente próximos para ambas as zonas em estudo, apesar da zona 1 apresentar valores ligeiramente inferiores, o que poderá resultar no aparecimento de alguma desagregação precoce da mistura nessa zona, nomeadamente, se houver a conjugação de esforços de tração ou de torção significativos aplicados pelos veículos pesados com a presença de água nos vazios da mistura betuminosa. Salienta-se ainda que todos os valores de ITSR obtidos neste estudo são inferiores a 80%, o que demonstra que estas misturas são relativamente sensíveis à água. Este resultado demonstra que haveria vantagem em aplicar um aditivo promotor da adesividade aquando da produção das misturas. Esse aditivo iria solucionar o aparente problema de adesividade entre o betume e os agregados utilizados nas várias misturas betuminosas estudadas.

Em resumo, conclui-se que a camada de desgaste da zona 1 do pavimento apresenta problemas devido à sua maior porosidade, reduzida resistência à tração e maior suscetibilidade à água. Aparentemente, esses problemas não foram causados por uma inadequada composição da mistura (i.e., percentagem de betume e granulometria), apesar da adesividade entre o betume e os agregados não parecer ser a mais adequada. Assim, considera-se que alguns dos motivos que podem ter contribuído para o problema identificado na zona 1 do pavimento podem ser atribuídos à fase de construção, com uma possível distribuição e compactação menos eficazes nas áreas distantes do centro da pavimentadora (por exemplo, ao utilizar mesas telescópicas para assegurar uma maior largura de pavimentação), ou pela ocorrência de menores temperaturas de compactação das misturas betuminosas. Ambos os fenómenos podem ter influenciado as características do pavimento na zona 1 do parque de estacionamento da plataforma logística e contribuir para uma desagregação precoce na zona estudada.

Como perspetivas futuras, a observação do estado de conservação do pavimento após alguns anos seria crucial para validar as conclusões desta dissertação. Este acompanhamento a longo prazo permitiria avaliar o desempenho do pavimento ao longo do tempo e confirmar se as

anomalias observadas nas zonas 1 e 2 persistem ou evoluem. Além disso, diversos trabalhos futuros podem aprimorar a compreensão do problema, incluindo análises mais aprofundadas sobre o tráfego na área de estacionamento, estudos específicos sobre a adesividade entre o betume e os agregados, investigações detalhadas sobre os métodos de construção utilizados, considerações climáticas durante a execução da obra, avaliação de alternativas de misturas betuminosas, validação das especificações do caderno de encargos, análise econômica das melhorias propostas, desenvolvimento de estratégias de manutenção preventiva e acompanhamento contínuo de avanços em pesquisas relacionadas às misturas betuminosas e tecnologias de pavimentação. Esses trabalhos futuros podem contribuir para uma gestão mais eficiente e duradoura da infraestrutura do pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrantes, V. (2004). *Pavimentos*, Apontamentos da disciplina de Tecnologia das Construções, Secção de Construções Civas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Albano, J.F. (2005). *Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos*, Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Antunes, J., Barros, J.A. (2003). Juntas em pavimentos de edifícios industriais, *Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras de aço*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Antunes, V., Neves, J., Freire, A.C. (2022). Avaliação da multi-reciclagem de misturas betuminosas recuperadas para incorporação com elevadas taxas em camadas de desgaste de pavimentos rodoviários, *10º Congresso Rodoferroviário Português*, Lisboa, Portugal.
- Araújo, M.A., Santos, M., Pinheiro, H., Cruz, Z. (2016). Análise comparativa de métodos de pavimentação – Pavimento rígido (concreto) x flexível (asfalto), *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento*, Vol. 10 (11), pp. 187-196.
- Araújo, S.A.P. (2019). *Fendilhamento em pavimento flexível*, Monografia para Conclusão de Curso, Centro Universitário Atenas, Paracatu, Brasil.
- Azevedo, J.V.B. (2022). *Revisão e comparação de métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil e em outros países*, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
- Balbo, J.T. (2015). *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração*, Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.
- Bastos, J.B.S. (2017). *Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico*, Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.
- Bernardes, P.H.S. (2021). *Equipamentos de pavimentação asfáltica*, Monografia de Conclusão de Curso, Academia Militar das Agulhas Negras, Resende, Brasil.
- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G., Ceratti, J.A.P., Soares, J.B. (2010). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*, PETROBRÁS (Petróleo Brasileiro, SA) e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto), Rio de Janeiro, Brasil.
- Bittencourt, E.R. (1958). *Caminhos e estradas na geografia dos transportes*, Editora Rodovia, Rio de Janeiro, Brasil.

- Branco, D.T.F. (2013). *Estudo de misturas betuminosas semi-temperadas por injeção de água*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2005). *Pavimentos rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra, Portugal.
- Brilhante, T.S. (2020). *Patologia e técnicas de restauração de pavimento flexível: um estudo de caso de um trecho na rodovia CE-138*, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Brasil.
- Carvalho, D.C., Silva Souza, R., Oliveira Mota, R., Barbosa, V.G. (2022). Avaliação da sobrecarga na vida útil de pavimento flexível – Estudo de caso em veículos de usina sucroalcooleira, *Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability*, Vol. 4 (1), pp. 81-94.
- Chodounsky, M.A., Viecili, F.A. (2007). *Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e executivos*, Reggenza, São Paulo, Brasil.
- Clara, E. (2020). *Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Costa, L.M.B., Silva, H.M.R.D., Peralta, J., Oliveira, J.R.M. (2019). Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment, *Construction and Building Materials*, Vol. 198, pp. 237-244.
- Cristelli, R. (2010). *Pavimentos industriais de concreto: análise do sistema construtivo*, Monografia de Especialização, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Dhandapani, B.P., Mullapudi, R.S. (2023). Design and performance characteristics of cement grouted bituminous mixtures - a review, *Construction and Building Materials*, Vol. 369, pp. 130586.
- Fernandes, J.A. (2019). *Proposta de conceção e conservação de pavimentos para a rede rodoviária de São Tomé e Príncipe*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Fernandes, J.M.G. (2023). *Fatores de erro no processo de dimensionamento de pavimentos flexíveis*, Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal.
- Fonseca, P.M.L. (2011). *Propriedades volumétricas de misturas betuminosas (com e sem fibras)*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Fontes, L.P. (2009). *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Gameiro, A.F.R. (2013). *Produção de misturas betuminosas com betumes modificados: compactabilidade e comportamento mecânico*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal.
- Garcia, J., Brito, J. (2005). Sistema de inspeção e diagnóstico de revestimentos epóxicos em pisos industriais, *1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, Lisboa, Portugal.
- Gaspareto, W., Rodrigues, P., Botacini, S. (2006). *Manual Gerdau de pisos industriais*, Pini, São Paulo, Brasil.
- Gonçalves, F.P. (1999). *O desempenho dos pavimentos flexíveis*, Documento de apoio às aulas de Seminário II de Doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Gonçalves, L.D., Davi Netto, J., Silva, L.F. (2022). *Patologias em pavimento flexível: estudo de caso*, Projeto de Conclusão de Curso, Centro Universitário UNA, Belo Horizonte, Brasil.
- Hamakareem, M.I. (2023). *Types of concrete pavements - Construction details and applications*, Concrete technology, The Constructor; <https://theconstructor.org/concrete/types-concrete-pavements-construction-applications/17182/>; Acedido em 12/09/2023.
- Helene, P.R.L. (1993). *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*, Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Hulett, T., Clarke, J. (2003). *Concrete industrial ground floors: A guide to design and construction*, The Concrete Society, Surrey, United Kingdom.
- Infraestruturas de Portugal (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra. Volume 03 - Pavimentação - Capítulo 14.03 Características dos materiais*, Lisboa, Portugal.
- Isaia, G.C. (2005). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, Brasil.
- Kandhal, P.S., Koehler, W.C. (1984). *Pennsylvania's experience in the compaction of asphalt pavements. ASTM Special Technical Publication 829*, ASTM International, Philadelphia, United States.
- La Roche, C. (1996). *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux: expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse*, PhD Thesis, Châtenay-Malabry, Ecole Centrale de Paris, Paris, France.

- Lay, M., Metcalf, J., Sharp, K. (2020). *Paving our ways: a history of the world's roads and pavements*, CRC Press.
- Lee, H.J., Lee, J.H., Park, H.M. (2007). Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (5), pp. 1079-1087.
- Lima, C. (2016). *Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Lopes Neto, F.J. (2016). *Projeto e execução de pisos industriais*, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco Recife, Brasil.
- Lv, S., Yuan, J., Peng, X., Zhang, N., Liu, H., Luo, X. (2021). A structural design for semi-rigid base asphalt pavement based on modulus optimization, *Construction and Building Materials*, Vol. 302, pp. 124216.
- Mahboub, K., Little, D. (1988). *Improved asphalt concrete design procedure. Research Report 474-1F*, Texas State Department of Highways and Public Transportation, Austin, United States.
- Maré, F.L. (2011). *História das infra-estruturas rodoviárias*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Martins, A.J.G. (2012). *Estudo da durabilidade dos revestimentos de piso*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Mattos, J.R.G. (2014). *Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Nascimento, J.M. (1985). *Exigências funcionais de revestimentos de piso*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Nascimento, J.M. (1991). *Classificação funcional dos revestimentos de piso e dos locais: classificação "UPEC" e "Gws"*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Nogueira, M.G. (2008). *Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Oliveira, D.D., Andrade, G.S., Laperche, L.A. (2014). *Estudo comparativo de concreto betuminoso usinado a quente com diferentes tipos de ligante na região metropolitana de Goiânia*, Trabalho de Conclusão de Curso, Goiânia, Brasil.

- Oliveira, J.R., Thom, N.H., Zoorob, S.E. (2008). Design of pavements incorporating grouted macadams, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 134 (1), pp. 7-14.
- Pacheco, R.H.T. (2015). *Pavimentos térreos industriais. Tipificação de soluções construtivas e acabamentos*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Pais, A.R.F. (2013). *Misturas betuminosas recicladas temperadas*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- Peixoto, F.P.A.M. (2022). *Desenvolvimento de soluções para aplicação em pavimentos industriais com recurso à incorporação de fibras recicladas*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Pellegrin, A., Paulino, A., Leite, A., Luz, J.P. (2022). *Alterações e problemas em pavimentos flexíveis: estudo de caso: rodovia Fernão Dias–BR 381*, Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário UNA, Belo Horizonte, Brasil.
- Pereira, P., Pais, J. (2017). Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Vol. 4 (4), pp. 316-346.
- Persike, T. (2023). *Avaliação da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas com incorporação de resíduos de construção e demolição*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Pimentel, C.A.A. (2013). *Formulação de misturas betuminosas a quente: contribuição para um novo método de formulação*, Dissertação de Mestrado, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, Portugal.
- Pinto, J.I.B.R. (2003). *Caracterização superficial de pavimentos rodoviários*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Quintero, C.F.Q. (2012). *Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada: formulação e comportamento mecânico*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Resende de Sá, R. (2009). *Pisos industriais de concreto. Informativo Técnico Realmix nº 3*, Realmix, Goiânia, Brasil.
- Rocha, R.S., Costa, E.A.L. (2009). *Patologias de pavimentos asfálticos e suas recuperações— estudo de caso da avenida pinto de aguiar*, Universidade Católica de Salvador, Salvador, Brasil.
- Rodrigues, J.L.A. (2011). *Conceção de pavimentos rígidos*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Rodrigues, P., Hovaghimian, L.H. (2008). *O sistema pavimento industrial. Coletânea de artigos técnicos*, Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE), São Paulo, Brasil.
- Santos, A. (2009). *Bases granulares de agregados reciclados*, Dissertação de Mestrado Universidade de Aveiro Aveiro, Portugal.
- Senço, W. (2008). *Manual de técnicas de projetos rodoviários*, 2ª ed, Pini, São Paulo, Brasil.
- Silva, G.F., Brito, J., Branco, F. (2007). Exigências funcionais de pavimentos comerciais e industriais, *Congresso Construção 2007 - 3º Congresso Nacional*, Coimbra, Portugal.
- Silva, H.M.R.D. (2006). *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique: Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Silva, H.M.R.D., Sousa, R., Oliveira, J. (2009). Fabrico de misturas betuminosas de alto módulo a menores temperaturas com betume 35/50 e parafinas, *XV Congreso Ibero-Latino Americano do Asfalto*, Lisboa, Portugal.
- Silva, P.F.A. (2008). *Manual de patologia e manutenção de pavimentos*, Pini, São Paulo, Brasil.
- Society, C. (2003). *Concrete industrial ground floors: A guide to design and construction*, Concrete Society, Crowthorne, United Kingdom.
- Sousa, A., Brito, J., Branco, F. (2007). Requisitos dos produtos e materiais utilizados em reparações de revestimentos de piso, *3º Congresso Nacional da Construção*, Coimbra, Portugal.
- Spadoni, S., Graziani, A., Canestrari, F. (2022). Laboratory and field investigation of grouted macadam for semi-flexible pavements, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 16, pp. e00853.
- Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Kleizienė, R., Šernas, O., Gražulytė, J. (2017). Modified asphalt mixtures for heavy duty pavement wearing layers, *Construction and Building Materials*, Vol. 131, pp. 503-511.
- Walbeck, T., Horan, R. (2019). Rubblizing to rehabilitate existing pavements, *Asphalt*, Vol. 34 (2).