

Desenvolvimento de Mistura Betuminosa a Frio com Agregados Grauvagues para Reparações Rápidas de Pavimentos Rodoviários

(Versão final após defesa)

Paula Cristina Fernandes Leal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

2º ciclo de estudos

Orientadora: Prof.^a Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida

julho de 2025

Declaração de Integridade

Eu Paula Cristina Fernandes Leal, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M13104 de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o Código de Integridades da Universidade da Beira Interior.

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

Universidade da Beira Interior, Covilhã 16/07/2025

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, nomeadamente ao meu marido e às minhas filhas, sem a sua compreensão, apoio, carinho e paciência, nada disto seria possível.

Agradecimentos

A concretização deste trabalho resulta da conjugação de diversos meios e vontades que o tornaram possível. Não posso, por isso, deixar de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização.

À Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida, pela abertura no acolhimento do tema desta dissertação, pela inestimável orientação científica, pela paciência e insistência, que demonstrou durante a realização desta dissertação, no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, com gratidão profunda e sincera, dedico esta tese àqueles que, com sabedoria, rigor e humanidade, contribuíram para o meu percurso académico e pessoal. Esta obra reflete não apenas o esforço individual, mas também o legado de todos os ensinamentos que recebi ao longo destes anos. A cada palavra escrita, subjaz a marca indelével dos mestres que tive o privilégio de encontrar. Muito obrigado por fazerem da UBI um lugar de excelência, reflexão e transformação.

Ao Sr. Félix pela colaboração, amizade e coragem sempre demonstradas.

Ao Senhor Presidente da Câmara Municipal da Covilhã, Sr. Dr. Vítor Pereira, pela autorização do meu ingresso no 2º Ciclo de Estudos, para obtenção do Grau de Mestre na UBI.

Agradecer ao Engenheiro Jorge Vieira, Diretor do Departamento de Obras e Planeamento e ao Engenheiro Joaquim Carrilho, Chefe da Divisão de Obras da Câmara Municipal da Covilhã, pela compreensão e flexibilidade na articulação das minhas atividades laborais com a frequência das atividades académicas.

À minha amiga Marisa Duarte, que caminhou comigo neste percurso, por vezes sinuoso, no entanto a dedicação e companheirismo foi fundamental para concluirmos mais uma etapa. Agradeço a tua presença nesta etapa!

À minha família que amo muito! Grata pelo apoio, compreensão e paciência, quando estive menos presente ao longo deste percurso académico.

Por fim, e só porque os últimos são os primeiros, ao meu marido Vítor e às minhas filhas Maria Inês e Matilde, um agradecimento especial, por estarem sempre ao meu lado.

E por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e avaliação de misturas betuminosas a frio para manutenção de pavimentos rodoviários, especialmente em intervenções localizadas como o tapamento de covas, utilizando resíduos industriais como as Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) e resíduos da mina da Panasqueira (agregados grauvaques). Esta abordagem visa promover soluções sustentáveis e de baixo custo para a manutenção rodoviária, especialmente em intervenções de caráter urgente.

A metodologia adotada neste estudo envolveu a caracterização física e mecânica dos materiais constituintes (análise granulométrica, massa volúmica, índice de achatamento, resistência à fragmentação e propriedades do ligante envelhecido) confirmando a sua aptidão para utilização em misturas betuminosas. Foram formuladas e estudadas três misturas distintas (MBF1, MBF2 e MBF3), combinando diferentes proporções de agregados, ligantes e aditivos.

As misturas foram sujeitas a ensaios laboratoriais para avaliar o seu desempenho mecânico, nomeadamente a realização dos ensaios Cântabro, Marshall, módulo de rigidez e sensibilidade à água. A mistura MBF3, composta exclusivamente por MBR e aditivo Iterbflux Cold, destacou-se pelo seu baixo desgaste (1%) e menor porosidade (19,9%), evidenciando boa trabalhabilidade e flexibilidade. Por outro lado, MBF1 e MBF2 apresentaram maior rigidez e estabilidade, mas verificou-se a importância da utilização de um aditivo, promotor de adesividade entre agregado e emulsão, para garantir coesão e compactação adequadas.

Os resultados demonstram que é possível produzir misturas de reparação a frio com desempenho satisfatório a partir de resíduos industriais, desde que a formulação seja cuidadosamente ajustada. Este estudo contribui para o avanço de soluções mais ecológicas e eficientes na conservação das infraestruturas viárias, reforçando o potencial do uso de resíduos em aplicações de Engenharia Civil.

Palavras-chave

Conservação de emergência; Mistura betuminosa a frio; Mistura betuminosa recuperada (MBR); Resíduos de exploração mineira; Tapamento de covas

Abstract

This study aimed to develop and evaluate cold bituminous mixtures for road pavement maintenance, particularly for localised interventions such as pothole patching, using industrial by-products including Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and waste materials from the Panasqueira mine (greywacke aggregates). This approach seeks to promote sustainable and low-cost solutions for road maintenance, especially in urgent repair scenarios.

The methodology adopted in this research involved the physical and mechanical characterisation of the constituent materials (particle size distribution, bulk density, flakiness index, resistance to fragmentation, and aged binder properties), confirming their suitability for use in bituminous mixtures. Three distinct formulations (MBF1, MBF2, and MBF3) were designed and investigated, combining different proportions of aggregates, binders, and additives.

The mixtures were subjected to laboratory tests to assess their mechanical performance, including the Cantabro test, Marshall stability, stiffness modulus, and water sensitivity tests. The MBF3 mixture, composed exclusively of RAP and the Iterbflux Cold additive, stood out due to its low particle loss (1%) and reduced air void content (19.9%), demonstrating good workability and flexibility. On the other hand, MBF1 and MBF2 exhibited higher stiffness and stability, highlighting the importance of using an adhesion-promoting additive to ensure proper cohesion and compaction.

The results demonstrate that it is possible to produce cold bituminous mixtures for rapid repairs with satisfactory performance using industrial waste materials, provided that the design is carefully optimised. This study contributes to the advancement of more environmentally friendly and efficient solutions for road infrastructure maintenance, reinforcing the potential of waste utilisation in Civil Engineering applications.

Keywords

Emergency maintenance; Cold bituminous mixture; Reclaimed Asphalt Pavement (RAP); Mining waste; Pothole repair

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Problemática e relevância do tema.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 - Incorporação de resíduos na reparação de pavimentos.....	5
2.1 Enquadramento	5
2.2 Resíduos sólidos utilizados em reparação de pavimentos	6
2.2.1 Resíduos de polietileno tereftalato (PET)	7
2.2.2 Resíduos de pneus de borracha.....	8
2.2.3 Escória de siderurgias.....	9
2.2.4 Resíduos de vidro	10
2.2.5 Resíduos de construção e demolição	11
2.2.6 Misturas betuminosas recuperadas	13
2.2.7 Resíduos de mina de carvão	15
2.2.8 Resíduos de cinzas volantes	15
2.2.9 Resíduos dos fornos de cimento.....	16
2.2.10 Resíduos de exploração mineira.....	16
2.2.11 Utilização de bio-óleos.....	17
2.2.12 Incineração de cinzas de fundo.....	18
2.3 Análise ambiental e económica	19
Capítulo 3 - Conservação de emergência de pavimentos rodoviários	23
3.1 Enquadramento	23
3.2 Tipos de conservação de emergência.....	24
3.2.1 Fissuração e fendas.....	26
3.2.2 Preenchimento de rodeiras.....	26
3.2.3 Abatimento longitudinal ou transversal	27

3.2.4 Ondulações	28
3.2.5 Valas para instalação de infraestruturas	29
3.2.6 Covas ou ninhos	30
Capítulo 4 – Propriedades das misturas betuminosas de reparação rápida a frio	33
4.1 Enquadramento	33
4.2 Caraterísticas fundamentais	33
4.2.1 Estabilidade	33
4.2.2 Durabilidade	33
4.2.3 Resistência à ação da água.....	34
4.2.4 Adesividade ao pavimento existente.....	34
4.2.5 Período de armazenamento.....	34
4.2.6 Compactação	34
4.2.7 Trabalhabilidade	35
4.2.8 Misturas betuminosas para reparação rápida disponíveis no mercado.....	35
4.3 Materiais e métodos	36
4.3.1 Agregados e MBR	36
4.3.2 Formulação das misturas betuminosas	40
4.3.3 Características das misturas.....	42
4.3.4 Ensaios de desempenho das misturas	44
Capítulo 5 – Resultados e discussão	49
5.1 Enquadramento	49
5.2 Caracterização dos materiais.....	49
5.2.1 Agregados e MBR.....	49
5.2.2 Ligantes.....	54
5.2.4 Aditivos	55
5.3 Formulação das misturas.....	56
5.3.1 Composição granulométrica das misturas.....	56
5.3.2 Teor inicial de ligante.....	57
5.3.3 Produção das misturas e compactação de provetes	58

5.3.4 Teor ótimo de ligante - Ensaio de Cântabro	59
5.4 Características da mistura	60
5.4.1 Baridade máxima teórica	60
5.4.2 Baridade	60
5.4.3 Porosidade	61
5.4.4 Vazios na mistura de agregados	61
5.4.5 Vazios preenchidos com betume	61
5.5 Ensaio de desempenho das misturas	62
5.5.1 Ensaio de Marshall	62
5.5.2 Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta	62
5.5.3 Ensaio de sensibilidade à água	63
Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros.....	65
6.1 Conclusões.....	65
6.2 Trabalhos futuros	66
Referencias bibliográficas.....	69

Lista de Figuras

Figura 1 -Triturador de pneus de borracha (UTEF, 2025).....	9
Figura 2 – Fresagem de pavimentos para reutilização, Covilhã	13
Figura 3 – Valores de reutilização e reciclagem de MBR na Europa em 2023 (adaptado de EAPA, 2023).....	14
Figura 4 - Modelo gráfico da economia linear (a); modelo gráfico da economia circular (b) (adaptado de Parlamento Europeu, 2018)	20
Figura 5- Grupos de mecanismos de degradação de pavimentos (adaptado de Domingos, 2009).....	25
Figura 6- Fissura transversal.....	26
Figura 7- Pele de crocodilo	26
Figura 8 – Rodeira de pequeno raio (adaptado de Santucci, 2001).....	27
Figura 9 – Rodeira de grande raio (adaptado de Santucci, 2001).....	27
Figura 10 – Abatimento longitudinal da berma.....	27
Figura 11 – Ondulação no pavimento	29
Figura 12 – Vala de infraestruturas	29
Figura 13 - Camadas de preenchimento das valas, adaptado de (SÉTRA/LCPC, 2005).....	30
Figura 14 – Cova.....	31
Figura 15 - a) Compactação; b) Desmolde.....	41
Figura 16 – Sistema de pesagem dos provetes, secos imersos e húmidos	43
Figura 17 – a) Provetes no banho maria b) Equipamento para o ensaio Marshall (DECA-UBI).....	45
Figura 18 – Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta.....	45
Figura 19 – Grupo imerso em recipiente de vácuo.	46
Figura 20 – Roturas por tração indireta através de compressão diametral:	47
Figura 21 – (a) Estufa para secagem, (b) Peneiros (c) Pesagem dos peneiros.....	50
Figura 22 – Curva granulométrica dos agregados grauaques pó e brita 2/12.5 e MBR	50
Figura 23 – (a) Balança; (b) AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer	51

Figura 24 – (a) Fração granulométrica 6,3/8 (b) Fração granulométrica 4/5	52
Figura 25 – Máquina de Los Angeles.....	53
Figura 26 – Ensaio de dosagem ótima do ligante IterBflux Cold: a) 4,0%; b) 4,5% ..	54
Figura 27 – Ensaio de aderência do ligante agregado graúvaque com a aplicação de diferentes aditivos: a) Sem aditivo – 70% de recobrimento; b) Com 0,3% de Interlene PE-31/F – 85% de recobrimento; c) Com 0,1% de Interlene SL/100-P – 100% de recobrimento	55
Figura 28 – Curvas granulométricas e fuso das misturas	57
Figura 29 – Provede sem coesão após 2 horas de cura	58
Figura 30 - a) Provedes com cintas de papel; b) Provedes MBF1 após 72 horas de cura	59
Figura 31 - Provedes após o ensaio de Cântabro: a) MBF1 b) MBF2 c) MBF3	59
Figura 32 - Resultados do ensaio de Cântabro	59
Figura 33 – Provedes após compressão apresentando rotura do tipo C.....	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Utilização do plástico como agente modificador de materiais de pavimentação (adaptado de Noor & Muhammad, 2022)	8
Tabela 2 - RCD valorizáveis agrupados e o seu destino (adaptado APA, 2019)	12
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens ambientais da utilização de materiais residuais selecionados na construção de estradas (adaptado de Source: Balaguera <i>et al.</i> , 2018; Adiansyah, <i>et al.</i> , 2017).....	21
Tabela 4 – Características das misturas betuminosas a frio prontas disponíveis no mercado (Fernandes, 2017).....	35
Tabela 5– Carga abrasiva nos ensaios de Los Angeles	39
Tabela 6- Análise granulométrica dos materiais utilizados	50
Tabela 7 - Massa volúmica dos materiais utilizados.....	51
Tabela 8- Fração granulométrica e respetiva largura dos peneiros de barras.....	52
Tabela 9–Índice de achatamento do resíduo de grauaque.....	52
Tabela 10– Resultados do ensaio de fragmentação	53
Tabela 11 - Características do ligante envelhecido extraído da MBR	53
Tabela 12- Características da Emulsão Betuminosa C67BF3.....	54
Tabela 13 - Composição das misturas betuminosas produzidas.	56
Tabela 14 – Granulometria das misturas betuminosas.....	56
Tabela 15 - Quantidade ótima de emulsão calculada.....	57
Tabela 16 - Quantidade ótima de emulsão [%]	60
Tabela 17 - Baridade Máxima Teórica [kg/m ³].....	60
Tabela 18 - Baridade das misturas [kg/m ³]	60
Tabela 19 - Porosidade das misturas.....	61
Tabela 20 - Vazios na Mistura de Agregados	61
Tabela 21 - Vazios preenchidos com betume.....	62
Tabela 22 - Estabilidade e deformação das misturas MBF1, MBF2 e MBF3 (Média 3 valores).....	62
Tabela 23 - Módulo de Rigidez (Média 5 valores)	62

Tabela 24 - Resistência à tração indireta e resistência conservada da tração indireta
(Média 3 valores) 63

Lista de Siglas e Acrónimos

CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EPA	Environmental Protection Technology
ITS	Resistência à tração indireta
ITSM	Módulo de resistência à tração indireta
ITSR	Resistência conservada da tração indireta
LA	Coefficiente de Los Angeles
LER	Lista Europeia de Resíduos
MBF	Mistura betuminosa a frio
MBR	Mistura betuminosa recuperada
NP	Norma Portuguesa
NP EN	Norma Portuguesa baseada na Norma Europeia
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Polietileno de tereftalato
RCD	Resíduos de construção e demolição
RPM	Rotações por minuto
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UBI	Universidade da Beira Interior
UE	União Europeia
UTEP	Usina de Tratamento Ecológico de Pneus
VMA	Vazios na mistura de agregados

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente, a Engenharia desempenha um papel fundamental na investigação de alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a construção e manutenção das vias rodoviárias. Perante os desafios ambientais e a necessidade de otimização de recursos, torna-se necessário adotar soluções que minimizem os impactos ambientais e promovam a reutilização de resíduos industriais.

Os pavimentos flexíveis são compostos por diversas camadas estruturais, sendo que, de acordo com a Norma Portuguesa EN 13108-1, uma camada é definida como um “elemento de um pavimento aplicado numa única operação”. Estas podem ser classificadas conforme a sua posição na estrutura: as camadas inferiores, geralmente constituídas por materiais granulares compactados com humidade controlada; e as camadas superiores, em que os materiais se encontram ligados por ligantes betuminosos.

Os pavimentos rodoviários estão sujeitos a diversas solicitações permanentes, como o tráfego e as condições climáticas, que contribuem progressivamente para a sua degradação. Esse processo resulta na redução da qualidade funcional e estrutural das vias, comprometendo o nível de serviço oferecido aos seus utilizadores. As patologias que afetam os pavimentos desenvolvem-se de forma contínua e interligada, seguindo um “princípio da cadeia de consequências”, no qual uma degradação tende a originar outras, geralmente mais severas. Diante dessa realidade, é fundamental adotar metodologias de reparação adequadas ao tipo de dano identificado, com o objetivo de interromper esse ciclo degenerativo e prolongar a vida útil do pavimento (Branco et al., 2011).

As restrições orçamentais que afetam tanto administrações rodoviárias como autarquias têm limitado os investimentos em reabilitação e manutenção de pavimentos. Essa limitação impõe a necessidade de adiar intervenções mais dispendiosas, priorizando técnicas de conservação com custos reduzidos e boa durabilidade, de modo a preservar, mesmo que temporariamente, o nível de serviço exigido nas redes rodoviárias (Figueiredo, 2011). Neste contexto, destacam-se as misturas betuminosas de reparação rápida a frio, devido à sua aplicabilidade em diversas condições climáticas, facilidade de manuseamento e baixos custos de implementação.

Em Portugal, com a vasta rede de estradas de hierarquias distintas já construídas, a prioridade atual passa pela conservação das infraestruturas existentes. Os municípios para efetuarem a conservação dos pavimentos rodoviários na sua área de jurisdição optam maioritariamente pela colocação de uma camada de desgaste em toda a área da via, ou

ainda, se os pavimentos existentes apenas apresentem micro- fissuração, pela aplicação de leitadas betuminosas (slurry seal).

O tapamento de covas em pavimentos betuminosos é uma técnica essencial para a manutenção da infraestrutura viária, garantindo a segurança dos usuários e prolongando a vida útil do pavimento. Esse processo pode ser realizado de diferentes maneiras, dependendo da gravidade dos danos, das condições climáticas e intensidade de tráfego.

1.2 Problemática e relevância do tema

A conservação de emergência é executada quando ocorrem patologias que necessitam de uma reparação rápida pelos prejuízos e desconforto que possam causar aos utentes da estrada. É necessária quando as administrações rodoviárias adotam uma política de conservação inadequada. Nesses casos as ações de conservação preventiva e corretiva não são realizadas atempadamente, o que leva ao aparecimento de patologias mais graves. Aqui estão incluídas as intervenções temporárias realizadas para tornar possível a utilização do pavimento (Figueiredo, 2011).

Apesar da sua importância, a questão do tapamento rápido de covas em pavimentos betuminosos continua pouco discutida no seio técnico das entidades responsáveis. Dada a urgência associada a estas intervenções, frequentemente recorre-se a misturas a frio prontas disponíveis no mercado, muitas das quais com composições pouco distintas das tradicionais. A escassez de documentação técnica e a falta de confiança na produção local destas misturas — sobretudo a nível municipal — limitam a sua utilização em estaleiro, mesmo quando existe potencial técnico para tal. Além disso, muitos dos produtos comercializados não são acompanhados por estudos de desempenho publicados, o que contribui para a hesitação na sua adoção.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de misturas betuminosas a frio para o tapamento de covas em pavimentos rodoviários, com a particularidade de incorporar resíduos industriais, promovendo a sustentabilidade e a economia circular no setor da construção. Pretende-se, ainda, realizar uma análise comparativa entre o desempenho dessas misturas produzidas em laboratório e os valores de referência disponíveis na literatura e no mercado, de modo a validar a sua viabilidade técnica e funcional.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 6 capítulos, cujos conteúdos se descrevem de seguida.

No capítulo 1 – Introdução, apresenta-se o enquadramento do tema da dissertação, os objetivos e a metodologia de trabalho para os atingir, bem como uma breve descrição da estrutura do trabalho.

O capítulo 2 – Incorporação de resíduos na reparação de pavimentos, concentra-se na investigação de vários resíduos sólidos utilizados na reparação de pavimentos, com especial ênfase nos resíduos das explorações mineiras e Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR). Este capítulo revisa análises anteriores realizadas por outros investigadores, abordando aspetos como as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, sua origem, pontos de interesse, ensaios realizados, conceitos-chave, bem como os resultados obtidos dos diferentes ensaios de laboratório. Além disso, são explorados os benefícios ambientais e económicos da utilização de RCD, tendo em consideração que os agregados naturais são constantemente esgotados devido ao uso extensivo em projetos de construção, resultando em danos significativos do ecossistema.

No capítulo 3 – Conservação de emergência de pavimentos rodoviários, é efetuada uma breve descrição das estratégias de conservação pavimentos rodoviários. São descritas as diferentes patologias dos pavimentos e onde são aplicáveis as técnicas de conservação de pavimentos, por fim são abordados aspetos relacionados com o comportamento dos pavimentos mediante determinadas solicitações, e quais as degradações que podem ser reparadas pela aplicação das misturas betuminosas de reparação rápida a frio.

No capítulo 4 – Propriedades das misturas betuminosas de reparação rápida a frio, neste capítulo foram analisadas as principais características das misturas betuminosas de reparação rápida a frio, com o objetivo de compreender os seus constituintes fundamentais e a forma como estes influenciam o desempenho e o comportamento final do material. O estudo focou-se na composição das misturas, destacando o papel do ligante betuminoso, dos agregados e dos aditivos, bem como na interação entre esses elementos. Avaliaram-se ainda propriedades como a trabalhabilidade, adesividade, resistência mecânica e durabilidade, e de que modo estes influenciam o seu comportamento final.

No capítulo 5 – Resultados e discussão – Este capítulo apresenta o estudo desenvolvido sobre misturas betuminosas a frio destinadas ao tapamento de covas, com base numa abordagem experimental conduzida na Universidade da Beira Interior (UBI). Inicialmente, é descrita a formulação de três diferentes misturas, detalhando-se os materiais selecionados, incluindo os tipos de agregados, ligantes e eventuais aditivos incorporados.

Os ensaios foram conduzidos segundo normas técnicas relevantes, permitindo uma análise comparativa dos resultados obtidos.

No capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos futuros, discute-se o comportamento observado em cada uma das formulações, destacando-se as vantagens e limitações de cada mistura em termos de aplicabilidade prática, durabilidade e eficácia na reparação de pavimentos rodoviários degradados. Apesar dos avanços obtidos, o estudo abre espaço para trabalhos complementares que permitam aprofundar e alargar o conhecimento sobre este tipo de misturas.

Capítulo 2 - Incorporação de resíduos na reparação de pavimentos

2.1 Enquadramento

A construção civil é um setor vital para o desenvolvimento e progresso das cidades e da sociedade como um todo. Nos últimos anos, tem sido registado um crescimento significativo e esse crescimento vem acompanhado de uma preocupação ambiental cada vez mais urgente devido à produção excessiva de resíduos (Abreu,2020).

O setor da construção é um dos maiores produtores de resíduos sólidos no mundo, contribuindo significativamente para a poluição do meio ambiente e a ocupação de aterros sanitários. A grande parte dos materiais utilizados na construção, como betão, madeira, plástico e metais, são descartados após a conclusão das obras, sem ser dada a devida consideração sobre a sua reutilização ou reciclagem.

Diante dos desafios enfrentados, uma visão otimista começa com a economia de reutilização na construção civil. Essa metodologia procura estabelecer um ciclo produtivo que envolve a fabricação, o uso e a revalorização de materiais, permitindo que os resíduos gerados nas obras sejam reaproveitados como matéria-prima em novas edificações ou em diferentes áreas (CONAMA, 2002; Gramacho *et al.*, 2013).

O conceito de "resíduo zero" é a essência dessa economia. O objetivo é reduzir a quantidade de resíduos depositados nos aterros sanitários ou descartados de forma inadequada, valorizando e reintegrando os materiais no processo produtivo. Dessa forma, procura-se minimizar o impacto ambiental da construção civil, conservar recursos naturais e diminuir a emissão de gases de efeito estufa associados à produção de materiais virgens.

Para alcançar esta meta é necessário haver mudanças significativas nas várias etapas do ciclo de vida dos materiais utilizados na construção. Isso inclui a triagem seletiva de materiais, dando prioridade aos materiais reciclados ou reutilizáveis, o que abre portas ao desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas mais sustentáveis. É um estímulo à criação de políticas públicas que incentivam a reciclagem e a reutilização de resíduos, sendo, no entanto, necessário consciencializar e aliciar os intervenientes no setor, desde os responsáveis pelos investimentos até aos consumidores finais (Dantas, 2024).

A construção de estradas requer enormes recursos e consumo de energia, incluindo recursos não renováveis, como agregados e asfalto, bem como consumo de energia durante a mineração, produção e transporte.

Nas últimas décadas, a pesquisa por alternativas aos recursos naturais tem impulsionado estudos sobre a incorporação de resíduos sólidos na construção e manutenção de diversos componentes, como pavimentos, pontes, túneis e estruturas acessórias.

Na reparação das infraestruturas viárias, nomeadamente na manutenção e reparação dos pavimentos betuminosos, um dos processos de remoção das camadas é muitas vezes a fresagem. Este processo envolve a fragmentação do pavimento betuminoso, em inúmeras partículas com granulometria variada, influenciando significativamente a sua reciclagem (Liu *et al*, 2024).

De seguida identificam-se alguns resíduos sólidos utilizados nas misturas betuminosas para reparação de pavimentos rodoviários.

2.2 Resíduos sólidos utilizados em reparação de pavimentos

A necessidade de diversificação dos materiais deve-se à necessidade crescente de durabilidade, aumento do desempenho e redução dos custos de manutenção e construção nos pavimentos rodoviários, especialmente nos países em desenvolvimento (Sojobi *et al.*, 2016). O rápido aumento da população provoca um aumento do tráfego de veículos e das cargas por eixo, resultando em falhas nos troços rodoviários (Ede, 2014). Estas falhas ocorrem principalmente na parte inferior da camada de sobreposição (fadiga e fissuração devido à tensão entre camadas).

Na reparação de pavimentos rodoviários, como o tapamento de covas, é passível de incorporar resíduos sólidos apresentando-se como uma solução sustentável. Os principais tipos de resíduos que podem ser incorporados nessas soluções são classificados como Resíduos sólidos industriais, Resíduos de construção e demolição e Resíduos sólidos urbanos.

Os Resíduos sólidos industriais geralmente incluem resíduos de polietileno tereftalato (PET), resíduos de pneus de borracha, escórias de siderurgias, cinzas volantes, resíduos de exploração mineira, etc.. Os Resíduos de construção e demolição consistem, principalmente, em misturas betuminosas recuperadas e betão reciclado. Os resíduos sólidos urbanos incluem os resíduos de vidro, resíduos eletrónicos, resíduos plásticos e resíduos de borracha (Zhao *et al*, 2025).

2.2.1 Resíduos de polietileno tereftalato (PET)

O uso de plásticos tornou-se uma prática comum em muitas atividades humanas diárias. O plástico pode existir em duas formas (Claisse, 2016): termoplástico que amolece quando aquecido e endurece quando arrefecido e plástico termoendurecível que polimeriza e endurece quando misturado com endurecedor e não amolece quando aquecido. Os termoplásticos constituem a maior proporção dos resíduos plásticos e também são facilmente recicláveis. Os tipos de termoplásticos amplamente utilizados incluem polietileno de alta densidade (PEAD), cloreto de polivinila (PVC) e polietileno de tereftalato (PET) (Hassan *et al.*, 2004). Entre os plásticos de uso único, os resíduos de embalagens de PET foram identificados como um dos poluentes mais comuns. De acordo com a ONU (ONU Meio Ambiente, 2018), cerca de 1 milhão de garrafas plásticas são compradas a cada minuto e cerca de 5 trilhões de sacos plástico são usados globalmente a cada ano. Isso deve-se às suas inegáveis vantagens de facilidade de uso, leveza e durabilidade (Perera *et al.*, 2019).

Nos últimos tempos foi dada prioridade ao fabrico de plásticos duráveis em detrimento de plásticos descartáveis leves. Cerca de 99% dos plásticos são feitos de produtos químicos derivados de petróleo, gás natural, carvão e óleos. Com a tendência atual, projeta-se que até 2050, a indústria de PET pode ser responsável por 20% do consumo global de petróleo. Atualmente, apenas 9% de todos os resíduos de PET já gerados foram reciclados, cerca de 12% foram incinerados, deixando cerca de 79% para acumular em aterros sanitários, poluindo assim o meio ambiente (ONU Meio Ambiente, 2018). Estes resíduos plásticos mostraram potencial para serem utilizados na construção de estradas, nomeadamente, no uso de geogrelhas, geotexteis, sistemas de estabilização de solos, agregados rodoviários, agregados leves e ligante asfáltico (Hassan *et al.*, 2004).

A incorporação dos resíduos plásticos nas misturas betuminosas, dividem-se em duas categorias principais: processo húmido e processo seco. No processo húmido, o betume é modificado com resíduos plásticos, enquanto no processo seco os resíduos plásticos são utilizados para substituir uma parte dos agregados da mistura betuminosa. É importante salientar que as partículas de plástico devem ser semelhantes às partículas dos agregados (Santos, *et al.*, 2020). A eficácia na escolha e na utilização do plástico reciclado assim como a tecnologia aplicada é de grande importância para a durabilidade e desempenho do pavimento. Estes ajustes requerem um estudo aprofundado das propriedades termomecânicas das misturas betuminosas. A escolha do material ideal baseia-se na disponibilidade de equipamentos de produção, indicadores de desempenho dos materiais, os tipos de resíduos plásticos utilizáveis e a mistura betuminosa específica que se pretende produzir, entre diferentes parâmetros que devem ser considerados, tais como, condições

climáticas, tipo de plástico utilizado, tamanho e forma dos resíduos, tipo de betume, temperatura de mistura, custo, etc. (Noor & Muhammad, 2022). Na Tabela 1 apresenta-se um resumo das diferentes aplicações do plástico como agente modificador de materiais de pavimentação.

Tabela 1 - Utilização do plástico como agente modificador de materiais de pavimentação (adaptado de Noor & Muhammad, 2022)

Ano	Autor	Descrição	Referência
1843	D.C. Thompson & A.J. Hoiberg	Obteve a primeira patente para uso de polímero virgem como modificador de betume	(Yildirim, 2007)
1993	Flynn, L	Usou polipropileno (PP) e polietileno (PE) reciclados separadamente como modificadores no betume, usando o processo húmido	(Flynn., 1993)
2002	O. Gonzalez	Explorou a interação entre polímero e betume para compreender a melhoria nas propriedades do ligante	(Gonzalez, <i>et al.</i> , 2022)
2006	R. Vasudevan	Usou plástico para formar um revestimento em agregados para melhorar a capacidade de ligação, usando o processo seco	(Vasudevan, <i>et al.</i> , 2002)
2011	E. Ahmadinia <i>et al.</i>	Modificaram o processo convencional para obter melhor desempenho após a integração do plástico nas misturas betuminosas	(Ahmadinia E. , <i>et al.</i> , 2011)
2016	J. Jafar	Abordou a questão da má adesão entre a superfície plástica e o betume com o objetivo de facilitar a substituição parcial de agregados nas misturas betuminosas	(Jafar, 2016)
2018	Z. Leng <i>et al.</i>	Foi introduzida MBR juntamente com plástico para substituir uma grande parte do ligante betuminoso	(Leng, <i>et al.</i> , 2018)
2019	D. M. Quesada <i>et al.</i>	Usaram uma combinação de vários tipos de plástico reciclado como aditivo para melhorar a mistura betuminosa	(Movilla - Quesada, <i>et al.</i> , 2019)
2020	S. Haider <i>et al.</i>	Investigaram o impacto de vários modificadores plásticos na mistura betuminosa com o objetivo de identificar a propriedade influenciada por cada modificador específico	(Haider, <i>et al.</i> , 2020)
2021	G. B. Melkamu <i>et al.</i>	Ajustaram os parâmetros de modificação de forma ideal para um caso específico, procurando tornar a modificação prática e eficaz para as condições específicas de uma estrada em particular	(Birlie, <i>et al.</i> , 2023)
2022	Linyi Yao <i>et al.</i>	Analisaram os aspetos económicos e ambientais relacionados com a modificação do betume através da inclusão do plástico reciclado	(Linyi, <i>et al.</i> , 2022)

2.2.2 Resíduos de pneus de borracha

Os resíduos de borracha de pneus usados, também conhecidos como pneus em fim de vida ou estireno-butadieno-estireno, são classificados como materiais não biodegradáveis, pois

foram projetados para durabilidade sob condições climáticas críticas (Sugiyanto, 2017). Possuem excelente resistência a ácidos e água, alta resistência a impactos e propriedades de isolamento acústico/térmico (Saberian *et al.*, 2019). Ao longo dos anos, os pneus usados tornaram-se um grande problema ambiental em muitos países.

A rejeição de pneus usados para aterro não é permitida, pois representa riscos ao meio ambiente e à saúde humana (Arulrajah *et al.*, 2019). A maioria dos países promulgou leis para garantir a reutilização de pneus usados. Weber e Kroll (2019) relataram que em 2017, cerca de 300 milhões de pneus foram triturados nos EUA, gerando cerca de 4 milhões de toneladas de pneus inservíveis, dos quais cerca de 3,4 milhões de toneladas voltaram ao mercado, resultando numa taxa de reutilização de mais de 81%, a quantidade em aterro foi de cerca de 16,15%. Da fração reutilizada, quase 45% foi usada como combustível derivado de borracha em instalações de produção de celulose e papel, fornos de cimento e caldeiras industriais, 25% foi triturado para soluções de borracha moída, 8% foi utilizado para obras de infraestrutura de engenharia civil e 3% exportado. Os resíduos de borracha de pneus usados são agora um dos polímeros mais comumente usados para modificação de betume (Fernandes *et al.*, 2019). Em 2016, a situação mostrou que 117.000 toneladas foram usadas na indústria da construção (Weber e Kroll, 2019). A Figura 1 mostra um triturador de pneus vertical automático típico.



Figura 1 -Triturador de pneus de borracha (UTEP, 2025)

Os resíduos de borracha foram avaliados para uso em revestimentos de superfícies de estradas, superfícies desportivas ou de segurança, podendo também ser utilizados na construção de aterros, substitutos de agregados, modificadores de betume, muros de contenção, drenagem, aterros e isolamento térmico (Hassan *et al.*, 2004).

2.2.3 Escória de siderurgias

Durante a produção de aço, todos os elementos e impurezas indesejados são expelidos como “escória” para garantir a recuperação máxima de ferro (Government of India – Ministry of

Steel , 2019). Os resíduos de escória de aço têm sido depositados há muitos anos em locais de armazenamento, terras agrícolas e cursos de água superficiais (Günay *et al.*, 2004).

No Reino Unido, a escória de aço tem sido usada como agregados na produção de cimento e misturas betuminosas (Huang *et al.*, 2007).

De acordo com o estudo realizado por Krayushkina, *et al.* (2012), este material utilizado na construção de estradas tem proporcionado grandes benefícios, como resistência à humidade e resistência ao deslizamento. No entanto, o uso deste material tem gerado alguma preocupação devido à sua propriedade de expansão. Outros estudos indicaram que o uso de escória de aço em misturas betuminosas a quente aumenta a durabilidade das mesmas. Os ensaios de resistência à fadiga em vários ciclos de carga apresentaram resultados positivos, melhorando a resistência com o aumento do uso de escória de aço na mistura betuminosa até um valor máximo de 75% deste material (Huang *et al.*, 2007). Na Turquia, foram realizadas análises de escória de aço classificada granulometricamente como material grosseiro. Os resultados indicaram que este material melhorou todas as propriedades mecânicas nessas misturas betuminosas (Ahmedzade & Sengoz, 2009).

Em suma, a escória de aço, mostra ser um material vantajoso com benefícios ambientais e económicos, o seu uso na construção de estradas, na estabilização de solos e em outras aplicações destaca a sua versatilidade.

2.2.4 Resíduos de vidro

O vidro é vulgarmente usado diariamente sendo por isso encontrado facilmente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). O vidro é produzido a partir do processamento de areia, soda e calcário ou de matéria-prima de resíduos de vidro. Mais de 80% da massa total de vidro produzida no mundo está na forma de embalagens de alimentos e produtos farmacêuticos ou vidro plano para construção de automóveis e edifícios (Butler e Hooper, 2019).

Em função do método de processamento utilizado para trituração, o vidro reciclado pode adotar três apresentações diferentes: grossa, intermédia e fina. Embora o vidro na apresentação grossa raramente seja utilizado na construção de estradas, as suas variantes intermédia e fina são amplamente utilizadas para esse fim. Geometricamente, quanto mais grossas forem as partículas de vidro, mais irregulares e angulares serão, enquanto sua apresentação fina visualmente se assemelha a um agregado natural como o pó de pedra (Disfani, *et al.*, 2012). Pesquisas e ensaios laboratoriais revelaram que o uso deste resíduo numa fração fina é eficaz na melhoria das propriedades mecânicas em misturas betuminosas quentes. Para classificar esses materiais em fração fina, média ou grossa, as partículas de vidro triturado têm 4,75, 9,50 e 19,00 mm, respetivamente (Anupiya, *et al.*,

2021). Além disso, tem sido reconhecido como uma boa alternativa econômica na composição de materiais para sub-base (Alam, *et al.*, 2012). A literatura destaca que a incorporação limitada de vidro reciclado em misturas rodoviárias se deve à falta de compreensão do comportamento que esse material tem em diferentes aplicações no pavimento (Yonus Ali, *et al.*, 2011). No entanto, resultados favoráveis foram obtidos ao empregar este material na camada de desgaste numa proporção de 10 a 15%, desde que não ultrapasse os 4,75 mm de tamanho das partículas, para garantir a segurança dos usuários e veículos (Huang, *et al.*, 2007). A inclusão de vidro no pavimento registou várias vantagens com melhorias na segurança viária, como consequência do aumento da resistência ao deslizamento, devido à força de abrasão, que expõe as partículas de vidro à superfície. Além disso, foi destacado que durante a noite as partículas de vidro refletem luz proporcionando benefícios adicionais para a segurança viária. Resultados positivos foram obtidos com base num estudo realizado durante um ano, que avaliou o desempenho de uma mistura contendo 10% de vidro revelando que a superfície do pavimento não apresentou sinais de deformação, exceto pelo aparecimento de pequenas fissuras (Su & Chen, 2002).

2.2.5 Resíduos de construção e demolição

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são materiais provenientes da construção, reabilitação, demolição e desmantelamento de estruturas. Os materiais que podem ser reciclados incluem betão, tijolos, vidro, plástico, entre outros componentes de construção. Com base em diversos estudos (Moschen-Schimek, *et al.*, 2023) materiais como betão, telhas, cerâmicos, plásticos, madeira, vidro, metais, misturas betuminosas e até mesmo solo são parte integrante dos resíduos de construção e demolição, que podem ser agrupados.

O processamento dos resíduos de construção e demolição pode ter lugar em centrais fixas ou em centrais moveis e inclui habitualmente quatro operações principais: triagem, redução primária, britagem e peneiração. A triagem destina-se a eliminar os componentes indesejáveis, que prejudicam as características técnicas e ambientais do produto reciclado. Na operação seguinte, redução primária, os escombros sofrem uma redução das suas dimensões e procede-se à remoção dos materiais metálicos ainda existentes, ou outros indesejáveis. A britagem pode desenvolver-se em duas fases com redução progressiva das dimensões dos resíduos. Finalmente, com a peneiração obtém-se um material classificado em diferentes granulometrias, de modo a contemplar as diversas necessidades de aplicação.

A Tabela 2 apresenta as quantidades encaminhadas para os diversos destinos dos grupos de RCD valorizáveis.

Tabela 2 - RCD valorizáveis agrupados e o seu destino (adaptado APA, 2019)

Designação	Códigos da Lista			
	Europeia de Resíduos (LER)	Eliminação (Ton.)	Valorização (Ton.)	Total Geral (Ton.)
Betão, tijolos e ladrilhos	170101, 170102, 170103	1 748	94 814	125 148
Madeira, plástico e vidro	170201, 170202, 170203	495	40 937	52 891
Misturas betuminosas e alcatrão	170302	656	338 502	382 964
Metais e cabos não contendo substâncias perigosas	170401, 170402, 170403, 170404, 170405, 170406, 170407, 170411	15	99 443	127 867
Balastros de linhas de caminho de ferro não contendo substâncias perigosas	170508	-	24	4 554
Materiais de isolamento não perigosos	170604	2 167	1 872	5 861
Gesso	170802	561	2 719	5 255
Misturas de RCD	170107, 170904	72 686	1 117 607	1 462 983
Total Geral	393 277 (18%)	78 328 (4%)	1 695 918 (78%)	2 167 522 (100%)

Em 2018 foram recolhidas 2 529 899 toneladas de RCD em Portugal. Destas, 75 868 toneladas dizem respeito a RCD de origem perigosa. Considerando apenas a parcela valorizável, foram geradas 2 167 522 toneladas de RCD, das quais 1 695 918 toneladas foram efetivamente encaminhadas para valorização (APA, 2019).

A quantidade de RCD gerados tem aumentado significativamente nas últimas décadas, à medida que muitas infraestruturas e edifícios se aproximam do fim de sua vida útil e/ou são danificados por conflitos e desastres naturais. Os RCD são normalmente produzidos durante a construção, renovação, manutenção e destruição de estruturas como edifícios, estradas e pontes.

Em termos de produção de RCD, a União Europeia gerou aproximadamente 333 milhões de toneladas de RCD em 2020. Este valor representa cerca de 25% a 30% de todos os resíduos gerados. Os Estados Unidos geraram 484 milhões de toneladas métricas de RCD em 2014, de acordo com a Agência de Proteção Ambiental (EPA, 2015; USEPA, 2016). Na China, os RCD representam 30–40% do total de resíduos municipais, com uma taxa de reciclagem muito baixa de cerca de 5% (Huang *et al.*, 2018). Na França, o departamento de construção e obras públicas registou cerca de 227,5 milhões toneladas de RCD gerados em 2014 (Mazhoud *et al.*, 2022). A Índia gerou 530 milhões de toneladas de RCD em 2013, de acordo com o Centro de Ciência e Tecnologia, Nova Déli, Índia (Shiva Bhushan *et al.*, 2019). A taxa de reciclagem de RCD é relatada como 70–95% em países desenvolvidos, como Dinamarca, Holanda, Singapura e Estados Unidos (Huang *et al.*, 2018). Os dados mais

recentes disponíveis sobre RCD em Portugal referem-se a 2021. Nesse ano, a taxa de preparação para reutilização, reciclagem e valorização dos RCD atingiu 89%, superando a meta estabelecida de 70% (APA, 2021).

A gestão eficaz de RCD é fundamental para reduzir seu impacto ambiental, incentivando a reciclagem e a reutilização desses materiais, contribuindo para a economia circular. A União Europeia tem implementado diversas políticas e regulamentos para promover a reutilização e reduzir os resíduos em aterros.

2.2.6 Misturas betuminosas recuperadas

Na década de 70 do século XX, viveu-se uma das maiores crises petrolíferas, o que levou a um maior estímulo à reciclagem e reutilização das Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) com o objetivo melhorar a sustentabilidade através da redução da produção de resíduos e do consumo de recursos naturais. A reutilização de MBR é a operação onde o material fresado é incorporado no processo de fabrico de novas misturas betuminosas, onde os agregados e o ligante betuminoso envelhecido desempenham a mesma função da mistura original (Antunes, 2014). A reciclagem de MBR é a operação pela qual o material fresado é usado como fundação, aterro ou material de estrada, com o agregado e o betume envelhecido desempenhando uma função menos relevante que a aplicação original. Quando aplicados para a estabilização de solos é adicionado cimento ou pó de pedra, em camadas de base granulares substituem directamente o tout-venant. As MBR, independentemente da técnica de reciclagem ou reutilização usada, podem ser aplicadas na obra de onde provêm ou noutra (Martinho, 2014; Reyes-Ortiz *et al.*, 2012).

Na Figura 2 apresenta-se a remoção de camada de desgaste em mistura betuminosas através do processo fresagem.



Figura 2 – Fresagem de pavimentos para reutilização, Covilhã

Na Europa, a cada ano são produzidas cerca de 50 milhões de toneladas de MBR, que podem ser reutilizadas na produção de novas misturas betuminosas. A Bélgica, Hungria e Suíça são

os países da Europa que incorporam as maiores percentagens de MBR na produção de misturas betuminosas quentes (EAPA, 2023).

De acordo com a Figura 3, no ano de 2023 foram reutilizadas 76% e recicladas 20% das MBR produzidas, apenas 4% foram depositadas em aterro ou tiveram outro destino.

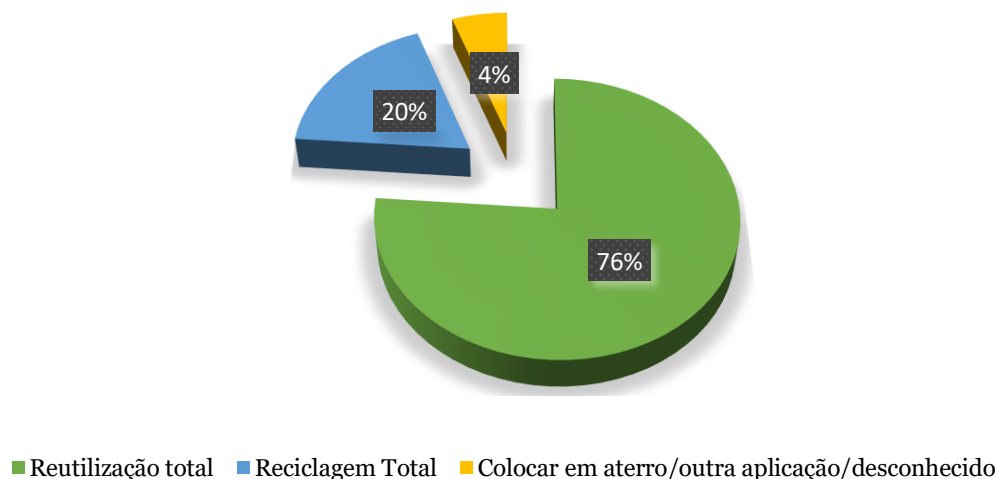


Figura 3 – Valores de reutilização e reciclagem de MBR na Europa em 2023 (adaptado de EAPA, 2023)

A produção de misturas betuminosas a quente é responsável por um grande consumo de energia devido ao aquecimento de seus componentes (agregados e ligante). Essa energia é gasta na queima de combustíveis fósseis e nas consequentes emissões de gases de efeito estufa (Carvalho e Barreno, 2013; Park *et al.*, 2003; Rubio *et al.*, 2013). A implementação das decisões do Acordo de Paris em 2015, e mais recentemente reforçadas pelo COP28 realizada no Dubai em 2023, visa o compromisso dos vários países participantes na redução das emissões de modo a conter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2°C. Assim, novas técnicas de fabricação de misturas foram desenvolvidas, e a diminuição da temperatura de fabricação desempenha um papel importante no que diz respeito ao alcance dessas metas.

As misturas betuminosas temperadas permitem uma redução da temperatura de produção entre 30 a 50°C, face aos $\pm 120^{\circ}\text{C}$ habitualmente aplicados para as misturas a quente (Lopes, 2015). Relativamente às misturas semitemperadas estas apresentam temperaturas de fabrico e de aplicação ainda mais reduzidas, situando-se entre 80°C e 100°C para o seu fabrico, e os 60°C temperatura de colocação em obra (Videira, 2014). As misturas betuminosas a frio destacam-se pelo facto de serem fabricadas, espalhadas, compactadas e armazenadas à temperatura ambiente, apresentando desde logo menores custos energéticos associados à sua aplicação e fabrico, evidenciando também uma maior rapidez de aplicação.

2.2.7 Resíduos de mina de carvão

O processo de extração de carvão da terra é denominado mineração de carvão . O carvão é a segunda fonte de energia mais usada no mundo, em 2015, cerca de 70% do carvão extraído foi usado na geração de eletricidade (Suescum-Morales *et al.*, 2019). Aproximadamente 38% da eletricidade total gerada em 2018 foi gerada de combustíveis de carvão (BP Statistical Review of World Energy, 2019).

Os resíduos de minas de carvão são gerados na superfície fora das minas de carvão durante a extração de carvão, sendo compostos de porções erráticas de carvão, rochas, minerais e outros detritos das operações de mineração (Kokh *et al.*, 2015). Os resíduos de carvão podem ser amontoados em volumes muito grandes. De acordo com Donnelly e Bell (2011) , o volume total de resíduos de minas de carvão de Yorkshire, no norte da Inglaterra, é de cerca de 4 milhões m³. As pilhas de resíduos de minas de carvão são altamente suscetíveis à queima e isso causa poluição atmosférica e outros riscos ambientais que, ao longo do tempo, ameaçam a saúde da população ao redor das minas de carvão (Silva e Oliveira, 2014). Com o tempo, têm sido detetados escoamentos ácidos em campos de resíduos de minas de carvão devido à presença de pirita. O Catálogo Europeu de Resíduos classificou estes resíduos como perigosos e potencialmente perigosos (Ghataora *et al.*, 2015).

O uso de resíduos de minas de carvão foi adotado na construção de subcamadas para estruturas de pavimentação rodoviária (Modarres e Ayar, 2014).

2.2.8 Resíduos de cinzas volantes

As cinzas volantes são um subproduto da combustão de carvão (Heidrich *et al.*, 2013). Em 2012, centrais de energia elétrica movidas a carvão no Reino Unido produziram cerca de 6 milhões de toneladas de cinzas volantes, cerca de 50% desses resíduos foram usados no setor de construção, enquanto a outra metade foi descartada em aterros sanitários (American Coal Ash Association, 2018). Na Índia, foi relatado por Bakare *et al.* (2019) que cerca de 196 milhões de toneladas de cinzas volantes foram produzidas anualmente desde 2017 com uma taxa de utilização de quase 70%.

Para reduzir a deposição de cinzas volantes em aterros sanitários, medidas de reutilização têm sido amplamente incentivadas, especialmente na indústria de construção de estradas (Kumar e Panwar, 2019). Hoy *et al.* (2016) estudaram a aplicação de cinzas volantes na produção de geopolímeros de camada base de pavimentação de estradas. Li *et al.* (2019) e várias outras pesquisas usaram cinzas volantes como um material alternativo na modificação de agregados convencionais. O Reino Unido reduziu o uso de combustíveis de carvão para produção de energia. Apenas 1,6 milhões de toneladas de cinzas volantes foram geradas no Reino Unido em 2016, o que representa um decréscimo de 70% em relação ao

que foi gerado em 2012. Em 2017, apenas 2% da energia total consumida era de carvão. Apesar dos esforços, 30%–50% de cinzas volantes ainda era depositado em aterros sanitários. Projeta-se que até 2025, o uso de carvão no Reino Unido terá cessado (American Coal Ash Association, 2018).

2.2.9 Resíduos dos fornos de cimento

Os resíduos dos fornos de cimento são triados como resíduos das operações de fabricação de cimento (Seo *et al.*, 2019). É geralmente classificado como resíduo industrial especial (Center for Health Environment and Justice, 2011). O pó dos fornos de cimento é composto de sólidos finos de partículas altamente alcalinas com aparência semelhante ao cimento Portland (UNEP, 2018). Em 2017, a taxa global de produção de cimento foi registrada em cerca de 5 bilhões de toneladas por ano. A taxa de geração de pó de forno de cimento variou entre 54 e 200 kg por tonelada de cimento (Seo *et al.*, 2019). Nas últimas duas décadas, a geração de pó de forno de cimento atingiu 2,7 milhões de toneladas no Egito (Abdel-Ghani *et al.*, 2018).

Vários estudos foram feitos para integrar o pó de forno de cimento como um material alternativo na produção de betão para edifícios e estruturas de pavimentação de estradas (Vijayakumar *et al.*, 2019) e na modificação das propriedades de solos de alta plasticidade para construção de estradas (Jala e Sharma, 2019).

2.2.10 Resíduos de exploração mineira

Os resíduos da exploração mineira, são materiais residuais que permanecem após o processamento e a separação das frações valiosas de um minério. A prática da mineração é de grande importância para a economia global, mas, devido ao facto de ser uma das principais fontes de poluição no planeta, é importante procurar uma perspectiva mais ecológica. A reutilização dos resíduos obtidos pela exploração mineira, servem para conservar os recursos naturais e diminuir os impactos ambientais (Segui, *et al.*, 2023). As propriedades mecânicas e químicas desses materiais dependem de vários fatores, como o tipo de rocha no local da escavação mineira, o tipo de processo de extração e os locais de depósito (Segui, *et al.*, 2023). Os resíduos rochosos das explorações mineiras são considerados substitutos adequados para uso e construção de estradas, pois não passaram por nenhum tipo de procedimento químico ou físico na mina, além da própria escavação. Os resíduos mineiros, geralmente depositados a céu aberto, são divididos em grão grosso, com tamanho superior a 2 mm, e grão fino, com tamanho entre 0,063 mm e 2 mm (Blight, 2011).

Vários estudos de caracterização das propriedades físicas e mecânicas das partículas dos resíduos rochosos têm sido realizados, tais como, absorção de água, ensaios de consistência

e ensaios de impacto (Taha, *et al.*, 2021). Com base na análise granulométrica, após remover todas as partículas maiores que 20 mm, obtém-se uma distribuição de partículas adequada para as camadas de desgaste, base e sub-base do pavimento. Por outro lado, o material analisado mostrou-se impermeável, com apenas uma taxa de absorção de água de 0,39%. É importante considerar que as propriedades e granulometria das partículas dependem diretamente do tipo de rocha, devendo sempre ser realizado um estudo prévio. O tungstênio é um tipo de metal que pode ser encontrado em diferentes minerais na natureza e pode ser obtido de minas de volfrâmio. Este material tem uma excelente resistência à corrosão. O uso deste material na construção de pavimentos betuminosos pode melhorar a durabilidade e a segurança da estrada.

Uma das minas mais importantes produtoras de volfrâmio, não apenas na Europa mas também a nível mundial, é a Mina de Panasqueira em Portugal. O Couto Mineiro da Panasqueira situa-se na Beira Baixa, localizando-se nos concelhos da Covilhã, Fundão e Pampilhosa da Serra. O depósito mineral desta mina abrange uma grande quantidade de quartzo e uma rica concentração de tungstênio, conhecidos pela sua excelente qualidade e tamanho. Esta mina conseguiu fazer parte do museu nacional de história natural e ciência (Museu Nacional de História Natural e da Ciência, 2004). O Couto Mineiro da Panasqueira está situado em pleno Maciço Hespérico, com formação rochosa que apresenta uma sequência tipo flysch, de xistos, arcoses e grauvaques chamada “complexo das Beiras” ou “complexo xisto grauváquico” pertencente à Zona Centro-Ibérica (ZCI) (Antão, 2001). O resíduo da Mina Panasqueira é assim constituído essencialmente por partículas de quartzo e grauvaque. O resíduo da exploração mineira da Panasqueira foi utilizado no estudo experimental para produção de misturas betuminosas apresentado nos capítulos seguintes.

2.2.11 Utilização de bio-óleos

A crescente procura por produtos à base de petróleo, juntamente com a redução das reservas de petróleo bruto levaram aumento do preço por barril e do betume, e consequentemente, o custo energético da mistura betuminosa (Abdel Raouf e Williams, 2010 ; Abdul Rahman *et al.* 2015; Tayh *et al.*, 2014). A adoção de ligantes alternativos oferece sustentabilidade em termos do impacto ambiental do ciclo de vida do material. Os bio-óleos são fontes de energia renováveis obtidos da conversão de biomassas (resíduos agrícolas e outros resíduos orgânicos), que podem ser incorporados em misturas betuminosas como um modificador na produção de bio-asfalto (Raman *et al.*, 2015).

O bio-óleo é um fluido escuro acastanhado, extraído da pirólise rápida da biomassa. Tem componentes diferentes em comparação aos aditivos derivados do petróleo. O arranjo desses componentes difere, sujeito ao tipo de biomassa, bem como ao grau de calor envolvido no processo. A biomassa serve como a principal fonte de energia em vários países

do mundo, auxiliando cerca de 78% do fornecimento básico de energia desses países (Situmorang *et al.*, 2020). As fontes de biomassa incluem resíduos de madeira, bagaço, resíduos agrícolas e industriais, resíduos de papel, resíduos sólidos urbanos, serradura, bio sólidos, resíduos de alimentos processados, resíduos animais, plantas aquáticas e algas (Okolie *et al.*, 2020). O principal constituinte do bio-óleo é a água. Os seus componentes adicionais incluem hidroxil aldeídos, hidroxil cetonas, açúcares, ácidos carboxílicos e fenóis (Chen *et al.*, 2019). De acordo com alguns autores (Nie *et al.*, 2020), o bio-óleo exibe constituintes semelhantes ao ligante asfáltico obtido do petróleo bruto, que pode ser categorizado como asfaltenos, polares, aromáticos e saturados. No entanto, devido ao alto teor de presença de oxigênio no bio-óleo, os seus elementos primários também variam do asfalto (Lozano *et al.*, 2020).

Podem enumerar-se várias vantagens dos bioasfaltos sobre os asfaltos tradicionais: estes serem renováveis, ecológicos, oferecerem economia de energia e fornecerem várias oportunidades económicas (Tayh *et al.*, 2014). Assim, podemos resumir os seus benefícios da seguinte forma (Vignesh *et al.*, 2013):

- Redução na pegada de carbono;
- Potência para atuar como um modificador ou extensor e substituir diretamente os asfaltos liquefeitos à base de petróleo;
- Redução da temperatura durante a produção e conseqüente redução de custos de até 20%;
- Menor taxa de emissão de gases de efeito estufa (até 30%) devido ao menor uso de energia;
- Aumento potencial na capacidade de manutenção do pavimento resultante do efeito antioxidante;
- Potencial para estender a gama de qualidades de betume;
- Redução da importação de petróleo.

2.2.12 Incineração de cinzas de fundo

A incineração de resíduos sólidos em alta temperatura resulta na produção de gases ou cinzas estáveis (Luo *et al.*, 2017). O tratamento de resíduos pelo método de incineração tem-se mostrado eficaz para a redução de resíduos sólidos urbanos em até 90% em volume e produção de energia (Toraldó *et al.*, 2013). A presença de materiais não combustíveis ou não queimados provenientes da incineração de resíduos sólidos e as qualidades das cinzas dependem da tecnologia de incineração (Astrup *et al.*, 2016). As duas categorias de constituintes das cinzas de fundo são os produtos de fusão (vidros, minerais de silicato e minerais de óxido) e materiais incombustíveis (resíduos de vidro, minerais do solo, metais e ligas). As preocupações com o uso de cinzas de fundo surgiram da tentativa de encontrar

uma alternativa de descarte deste material devido à escassez de aterros sanitários (Alhassan *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2017). As opções disponíveis para a aplicação de cinzas de fundo de incineração nas indústrias de construção incluem-se nos agregados para betão, agregado em mistura betuminosa e mistura pozolânica (Astrup *et al.*, 2016).

2.3 Análise ambiental e económica

De acordo com o relatório das Nações Unidas publicado em 2019, a população global está a aumentar rapidamente e deve atingir 9,7 bilhões até 2050 (Nações Unidas, 2019). As previsões de crescimento atuais indicam que 70% da população total, viverá nas cidades em 2050 (Gürdür Broo *et al.*, 2021). Isso pode resultar num aumento do congestionamento do tráfego, necessidades de energia e consumo de agregados naturais (Cantero *et al.*, 2022). De acordo com a avaliação da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), o uso de recursos naturais brutos (particularmente minerais não metálicos e metálicos) aumentará para cerca de 167 Gt até 2060 (Bamigboye *et al.*, 2021). Os agregados naturais são um material constituinte importante e têm sido constantemente esgotados devido ao uso extensivo em projetos de construção, resultando em danos significativos do ecossistema (Chowdhury *et al.*, 2010 , McGinnis *et al.*, 2017). Além disso, a exploração de recursos naturais, processamento e operações de transporte consomem uma enorme quantidade de energia. A extração de agregados naturais tem impactos negativos no meio ambiente e também afeta os leitos dos rios (Kumar, 2017 , McGinnis *et al.*, 2017).

O sistema económico, apresentado na Figura 4a, é geralmente associado aos inúmeros impactos ambientais que ocorrem no planeta, pois esse sistema baseia-se numa linearidade de extração, produção, consumo e rejeição. Porém, devido à escassez de recursos, somada com espaços limitados para acondicionar resíduos, reconsidera-se mudar o paradigma económico linear para uma economia mais sustentável. Esse modelo, apresentado na Figura 4b, é caracterizado pela circularidade no fluxo de materiais, ou seja, em vez de o resíduo ser depositado em aterro, ele é incorporado em fluxos anteriores, evitando a extração de novos materiais e a geração de novos resíduos (MacArthur, 2013).



Figura 4 - Modelo gráfico da economia linear (a); modelo gráfico da economia circular (b) (adaptado de Parlamento Europeu, 2018)

A Economia Circular (EC) apresenta-se como uma solução para os problemas de uma economia apoiada na exploração de recursos naturais de forma exacerbada, que potencializa os efeitos de mudança climática e poluição do meio ambiente. O paradigma da economia linear é o de ampliar a eficácia da extração de recursos com uma rápida utilização, a fim de manter o crescimento. Já o paradigma da Economia Circular tem o objetivo de que a economia seja alcançada para assegurar uma maior e melhor qualidade de vida e menor degradação do meio ambiente (Temesgen *et al.*, 2019).

Na Tabela 3 são apresentadas as vantagens e desvantagens da incorporação de diferentes resíduos na construção de estradas.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens ambientais da utilização de materiais residuais selecionados na construção de estradas (adaptado de Source: Balaguera *et al.*, 2018; Adiansyah, *et al.*, 2017).

Material	Vantagens	Desvantagens
PET Pneu de borracha	<ul style="list-style-type: none"> - Redução na emissão de gases durante - Redução do uso de matérias-primas naturais. - Redução da quantidade depositada em aterro. - Disponibilidade em grande quantidade para uso em massa. 	<ul style="list-style-type: none"> - As misturas com incorporação destes resíduos têm maior custo, uma vez que é comercializado a preços mais elevados. - Requer mais recursos para a sua conversão em material adequado para a mistura asfáltica.
Resíduos de vidro	<ul style="list-style-type: none"> - Reduz os efeitos adversos da reciclagem de novos produtos de vidro no ambiente. - Redução do uso de materiais naturais. 	<ul style="list-style-type: none"> - A utilização do vidro como agregado alternativo requer energia adicional, pelo que é emitido mais CO₂ em comparação com a deposição em aterro.
RCD	<ul style="list-style-type: none"> - Reduz a exploração de materiais naturais e a eliminação indiscriminada em aterro. - Potencial de aquecimento global e diminuição do consumo de energia 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de contaminação do solo por lixiviação poluente de pavimentos asfálticos. - Alta tendência de ocorrência de fissuras em climas muito frios.
Escórias de siderurgia	<ul style="list-style-type: none"> - Redução da poluição ambiental como material de aterro 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da energia necessária no processo de esmagamento.
Cinzas volantes	<ul style="list-style-type: none"> - Efeito reduzido no PAG e menor potência de acidificação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incerteza na caracterização e concentração da emissão de lixiviados.
Resíduos sólidos industriais	<ul style="list-style-type: none"> - Reduz o consumo de agregados naturais; - Reduz custos no processamento e acumulação em aterros sanitários e cursos de água. 	-
Resíduos de exploração mineira	<ul style="list-style-type: none"> - Reduz a exploração de materiais naturais e o descarte indiscriminado em aterros sanitários. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contaminação dos solos e da água, destruição dos habitats

Capítulo 3 - Conservação de emergência de pavimentos rodoviários

3.1 Enquadramento

O pavimento é uma das partes da obra rodoviária sujeita a ações agressivas, é também aquela que está sujeita a sofrer degradações, as quais devem ser evitadas ou rapidamente reparadas (Branco *et al*, 2011).

Entende-se por conservação de pavimentos, qualquer intervenção que permita manter ou recuperar a qualidade funcional e estrutural com que foi projetado um pavimento, de modo a garantir boas condições de circulação ao longo da sua vida útil. Para cumprir este objetivo, segundo o Manual de Conservação Rodoviária (DNIT, 2005), é possível considerar cinco estratégias diferentes de conservação:

- Conservação corrente;
- Conservação periódica;
- Conservação de emergência;
- Reconstrução;
- Melhoramento.

No caso da reconstrução e melhoramento são intervenções pontuais que podem ser enquadrados na conservação periódica.

A conservação corrente engloba trabalhos de melhoria dos sistemas de drenagem das vias, conservação de pontes e viadutos, reposição e adequação da sinalização e outros equipamentos de proteção e segurança rodoviária, estabilização de taludes e limpeza de bermas e dos terrenos adjacentes à estrada. A gestão da vegetação na envolvente das vias rodoviárias, de modo a garantir a segurança da circulação e a prevenção dos fogos rurais (Infraestruturas de Portuga, 2025).

A conservação periódica consiste na definição de um plano estratégico de intervenções de conservação com determinada periodicidade (de 5 em 5, ou de 10 em 10 anos), de modo a prevenir a evolução das degradações. O objetivo é a reposição das condições iniciais de resistência e capacidade de suporte da infraestrutura, correspondendo, em muitos casos, à reconstrução total ou parcial. Este tipo de conservação pode organizar-se num conjunto de programas de intervenções em vias, que inclui pavimentos, vertente geotécnica e obras de arte, e em segurança rodoviária.

A conservação de emergência ou intervenção de carácter urgente, corresponde ao conjunto de operações que visam reparar, repor, reconstruir ou restaurar troços ou estruturas da via que tenham sido seccionados, obstruídos ou danificados por um evento extraordinário. É exemplo a limpeza de órgãos de drenagem, sinalização de guardas de segurança danificadas, limpeza de estrada após condições climatéricas adversas, limpeza de neve e eliminação de gelo, desobstrução de via e tapagem de covas (Infraestruturas de Portugal, 2025).

Existem várias técnicas de conservação de emergência de pavimentos, as quais devem ser escolhidas consoante o nível de degradação dos mesmos. Algumas aplicam-se em ações de conservação parciais e outras em intervenções contínuas, descrevendo-se neste capítulo as mais utilizadas.

3.2 Tipos de conservação de emergência

Os esforços instalados ao nível das diferentes camadas determinam, em geral, uma evolução típica dos pavimentos flexíveis, em direção a dois estados últimos, a ruína e a fissuração das camadas betuminosas e a deformação permanente das camadas em geral (Branco et al, 2011).

As degradações são geralmente consequência de uma inadequação do material ao uso, podendo este fenómeno ter origem, entre outros, em deficiências de projeto, drenagem mal concebida, materiais de qualidade duvidosa, colocação em obra deficiente. O desenvolvimento precoce de degradações é um indicador de deficiência no processo construtivo, embora com o aumento do tempo em serviço seja de esperar a ocorrência de patologias (Ferreira, 2007).

O processo de evolução das degradações apoia-se numa cadeia de consequências. Uma degradação evolui ou dá origem a novos tipos de degradações, as quais, por sua vez, interferem com as características das degradações iniciais, aumentando a percentagem de patologias existentes, tanto em extensão como em gravidade.

A abordagem das degradações existentes nos pavimentos flexíveis é um tema recorrente em diversos elementos bibliográficos consultados. Procurou-se sintetizar ao máximo estes conceitos, sendo os principais critérios para esta classificação a simplicidade e a associação das deformações de acordo com a morfologia. Com base nestes critérios, podemos formar quatro grupos de deformações: deformação, fissuração, desagregação e movimento de material (Domingos, 2009). Na Figura 5 apresenta-se a identificação de grupos de degradações.



Figura 5- Grupos de mecanismos de degradação de pavimentos (adaptado de Domingos, 2009)

Com base nas deformações dos pavimentos, planeia-se a intervenção para cada grupo, a realização de um estudo dos fatores condicionantes torna-se muito importante antes de tomar uma decisão, sobre qual a melhor solução a adotar na reparação. Esse estudo pode condicionar a intervenção prevista ou tornar necessária a implementação de diversas medidas corretivas de forma que a mesma se realize, sem causar danos ou lesar pessoas e bens.

Ao analisar um caso específico, deve-se ter em atenção toda a envolvente física e a realidade na qual está integrado o troço em estudo, considerando todos os impactos, que a intervenção terá no quotidiano da zona a afetar.

Para além destes impactos diretos e imediatos que decorrem de uma intervenção num troço de via, as implicações económicas que decorrem da restrição ou interdição da passagem dos veículos aquando da intervenção, devem ser estudadas e fundamentadas.

Em meio urbano surge uma questão que muitas vezes é crucial para o sucesso da intervenção: a existência de caminhos alternativos viáveis, tanto para veículos privados como para transportes públicos.

Como algumas intervenções têm impreterivelmente de ser efetuadas, a solução passa pela articulação de tarefas em obra, de forma a permitir a passagem dos veículos mesmo enquanto se realiza a intervenção. Normalmente, restringe-se o tráfego num sentido, colocando um sistema de regulação de passagem de veículos em cada extremo do troço em causa. A passagem nos dois sentidos faz-se então, independentemente do sentido, sempre pela mesma via. Este sistema traz o inconveniente de dificultar o escoamento do tráfego, principalmente se o tráfego original da via for intenso.

Na conservação de emergência inserem-se as intervenções de tapamento de covas, correção de rodeiras, abatimentos, ondulações e abertura de valas para instalação de infraestruturas.

3.2.1 Fissuração e fendas

A fissuração ou abertura de fendas pode resultar devido à repetição de esforços de tração nas camadas betuminosas, diminuindo a qualidade estrutural do pavimento. Nesta família de patologias integram-se as fendas longitudinais, as fendas transversais e a pele de crocodilo. As duas últimas apresentam-se na Figura 6 e 7.



Figura 6- Fissura transversal



Figura 7- Pele de crocodilo

Vários autores (Beskou *et al.*, 2016) afirmam que a fissuração é a forma de degradação mais frequente nos pavimentos flexíveis, devido à tração por flexão dessas camadas de forma repetida com a passagem de carga dos veículos. Como consequência do seu desenvolvimento refere-se o aumento da abertura e da ramificação das fendas, a desagregação dos seus bordos, a formação de desagregações, ninhos e peladas, e a subida de finos das camadas inferiores constituídas por materiais não tratados, provocada pela entrada de água e que é acelerada pela ação do tráfego (Eugénio, 2008).

Um exemplo para resolver a patologia de fendas, no caso de fendas pequenas, seria a utilização de selante de fissuras. No entanto, se se tratar de uma região onde há um grande índice de tráfego, o ideal seria fresar e repor a camada de desgaste. Para as fendas tipo pele de crocodilo, o ideal seria fresar toda área afetada, analisar o estado da base e regularizá-la, e aplicar o revestimento betuminoso para finalizar.

3.2.2 Preenchimento de rodeiras

As rodeiras podem dividir-se em dois grupos, as rodeiras de pequeno raio e rodeiras de grande raio, apresentadas na Figura 8 e 9, respetivamente. As rodeiras de grande raio são deformações transversais que se desenvolvem longitudinalmente na banda de ação dos rodados dos veículos pesados. As rodeiras de pequeno raio apresentam visualmente uma deformação transversal ao eixo da via.

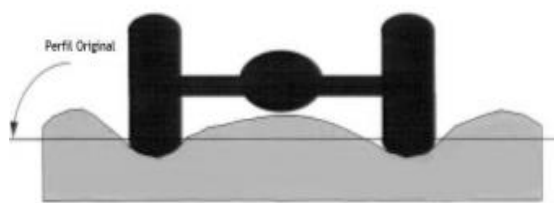


Figura 8 – Rodeira de pequeno raio (adaptado de Santucci, 2001)

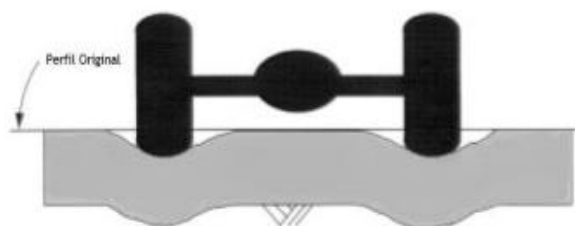


Figura 9 – Rodeira de grande raio (adaptado de Santucci, 2001)

O preenchimento de rodeiras é normalmente realizado quando a depressão assume dimensões que permitem a formação de poças de água de dimensão considerável e torna perigosa a mudança de direção, sendo que a rodeira funciona como um “carril”. O preenchimento da rodeira é também realizado na ocorrência de fissuração e desagregação associada à depressão da rodeira. Esta degradação é muito comum e tem como inconvenientes principais a infiltração de água para as camadas internas do pavimento.

3.2.3 Abatimento longitudinal ou transversal

O abatimento é uma deformação com uma extensão significativa, podendo apresentar-se ao longo do pavimento (abatimento longitudinal) ou na direção transversal (abatimento transversal). A localização do abatimento longitudinal pode ser junto das bermas, apresentado na Figura 10, derivado da redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, pela entrada de água nas bermas ou na zona de interface berma/pavimento.



Figura 10 – Abatimento longitudinal da berma

Quando o abatimento se localiza junto do eixo do pavimento pode ser devido à fendilhação ao longo desse eixo, o qual permite a passagem da água através do pavimento para camadas granulares e solo de fundação, reduzindo assim a capacidade de suporte. Quanto ao

abatimento transversal, este tem uma localização que depende das patologias nas camadas inferiores, principalmente no solo de fundação. A deformação localizada ocorre numa pequena área do pavimento e normalmente origina rotura do pavimento (Branco *et al.*, 2005).

O preenchimento do abatimento longitudinal é realizado na ocorrência de fissuração e desagregação associada à depressão da berma, deve ser efetuado o saneamento do pavimento existente área afetada, deverão ser repostas e retificadas as cotas das camadas granulares na base do pavimento, para posterior pavimentação.

3.2.4 Ondulações

Ondulação é um tipo de deformação que se desenvolve longitudinalmente e que pode ocorrer com uma dada frequência ao longo de um segmento do pavimento. Uma das causas mais frequentes para esta patologia reside na deficiente compactação dos aterros realizados para a construção do pavimento, gerando assim fenómenos de assentamento. A ondulação pode ocorrer de forma expressiva na camada de desgaste por diversos fatores. Podem existir deficiências e distribuição heterogénea de aglutinante nas camadas betuminosas. Por ação do tráfego, pode-se verificar a deformação plástica da camada de desgaste em zonas de impacto preferencial dos rodados, ocorrendo o arrastamento da mistura betuminosa no sentido das solicitações. Quando existe uma ondulação suave do pavimento, ela deve-se normalmente à deformação da fundação do pavimento ou das camadas granulares. Por falta de capacidade de carga registam alteração da sua estrutura interna. Estes movimentos internos são devidos, na maior parte das situações, a uma deficiente compactação ou presença de água nestas camadas.

Esta patologia, apresentada na Figura 11, acarreta para os utilizadores da via uma redução simultânea dos níveis de conforto e de segurança, enquanto provoca um desgaste acrescido dos veículos, ao nível das suspensões e pneumáticos.

A reparação das ondulações, passa pela remoção da camada de desgaste na área afetada, reposição e retificação das cotas das camadas granulares na base do pavimento, para posterior pavimentação.



Figura 11 – Ondulação no pavimento

3.2.5 Valas para instalação de infraestruturas

A necessidade de construção de infraestruturas de distribuição de água, eletricidade, gás, telecomunicações, entre outros, origina a necessidade de abertura de valas para a passagem de novas condutas, ou reparação/substituição de condutas existentes, e posterior tapamento. Este processo nem sempre é executado de maneira correta, levando à degradação dos pavimentos, originando, por exemplo, assentamentos e fissuração, como se apresenta na Figura 12.



Figura 12 – Vala de infraestruturas

Cada entidade responsável pelas infraestruturas subterrâneas define condições gerais de execução (geometria da vala, segurança, altura de aterro, etc.), como fazem os Municípios nos seus regulamentos. Porém, os materiais usados no aterro e os parâmetros que influenciam a compactação (tipo de solo, teor de água, vibração, etc.) são muitas vezes ignorados, apesar da sua importância. A abertura das valas é essencial para a correta reposição do pavimento. Em pavimentos flexíveis, o corte das camadas betuminosas deve ser feito com serras mecânicas para evitar danos. Os bordos do corte devem ser oblíquos ou

verticais para melhorar a compactação. A remoção pode ser feita por fresagem. Após a escavação, realiza-se a instalação da tubagem e o aterro. A norma francesa NF P 98-331:2005 (SÉTRA/LCPC, 2005) define os materiais adequados para cada camada da vala, apresentados na Figura 13. As camadas finais sobre a vala devem ter propriedades iguais às do pavimento original, garantindo resistência ao tráfego e impermeabilidade (Capitão, 2014).

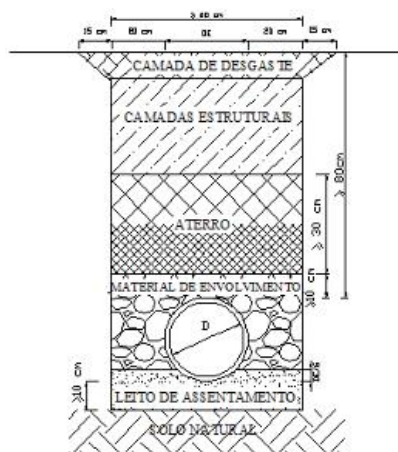


Figura 13 - Camadas de preenchimento das valas, adaptado de (SÉTRA/LCPC, 2005)

3.2.6 Covas ou ninhos

As covas ou ninhos são um estado mais avançado de degradação que decorrem da existência de fendilhação e arranque de materiais. A falta de qualidade ou conjugação inadequada dos próprios materiais constituintes da mistura betuminosa (agregados e betume) podem originar este tipo de degradação. Se os agregados contiverem mais água intersticial ou humidade à superfície, porventura devido a um processo de secagem deficiente ou a exposição a ambientes demasiado húmidos antes da sua incorporação na mistura betuminosa, podem verificar-se zonas em que a adesividade entre materiais seja menor. Por fim, o facto de se verificarem temperaturas muito baixas aquando da pavimentação, pode condicionar a capacidade resistente da camada, assim como a sua resiliência, uma vez que as peladas ocorrem principalmente em situações em que a viscosidade dos materiais ligantes é demasiado elevada.

As covas inserem-se no grupo das depressões da superfície, têm forma por vezes arredondada localizadas na camada de desgaste, como se apresenta na Figura 14, podendo prosseguir para camadas inferiores.



Figura 14 – Cova

O tapamento de covas é uma operação que usualmente tem lugar após períodos de grande pluviosidade, quando o estado de degradação e de irregularidade do pavimento de uma via coloca em perigo a segurança de quem aí circula. Muitas vezes a existência de depressões muito pronunciadas é suscetível de causar danos nos veículos, podendo ser a causa de rebentamento de pneus e danos em elementos constituintes da superfície inferior dos veículos ou até de desvios involuntários de trajetória. Este tipo de intervenção é muitas vezes efetuado sob pressão e tendo como preocupação central a regularização da superfície de forma a não condicionar a circulação rodoviária. Neste ambiente de urgência e com a necessidade de tomar uma atitude prontamente, a correção destas degradações é realizada deixando muitas vezes ao critério de quem a executa, o método e a seleção do material a empregar.

Estes materiais são depositados na depressão a corrigir, sendo posteriormente efetuada uma compactação grosseira dos mesmos e sobreposta uma camada de mistura betuminosa. Esta mistura betuminosa é muitas vezes inapropriada para o fim a que se destina, e um fator agravante consiste na não especificação da sua natureza e composição.

A adicionar a este problema, e dado que a circulação é frequentemente retomada sem que o tempo de cura do material betuminoso seja respeitado, é executada uma “bossa” com o material betuminoso de forma a compensar assentamentos e migrações do material que durante o tempo de cura poderia originar novas depressões (devido à pressão exercida pela passagem de rodados). Como resultado deste tipo de ações, nos pontos onde se faz a intervenção voltam a verificar-se deficiências a curto prazo e o estado de degradação do pavimento não é corrigido.

Capítulo 4 – Propriedades das misturas betuminosas de reparação rápida a frio

4.1 Enquadramento

A utilização de misturas betuminosas a frio permite intervenções rápidas, económicas e eficazes em condições climáticas adversas, restabelecendo as funções do pavimento. Este capítulo visa caracterizar os componentes da mistura e explicar o papel de cada um nas propriedades desejadas.

4.2 Características fundamentais

As misturas de reparação rápida a frio são compostas por agregados (naturais, reciclados ou reutilizados), aditivos e um ligante em quantidade previamente determinada. Após misturados, são armazenados, transportados, aplicados e compactados, integrando-se na estrutura do pavimento. Estas misturas devem garantir estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga, flexibilidade, aderência, impermeabilidade e boa trabalhabilidade (Freire, 2002).

4.2.1 Estabilidade

A estabilidade relaciona-se com a resistência à ação repetida dos veículos, resultando em mínimas deformações. Depende da fricção interna e da coesão dos materiais. A fricção é influenciada pela textura, granulometria, forma das partículas e densidade; já a coesão está ligada ao tipo e quantidade de ligante. Uma percentagem adequada de betume maximiza a ligação entre partículas, mas quantidades excessivas reduzem a estabilidade (Pereira, 2009).

Inicialmente, a estabilidade decorre da fricção e imbricamento entre os agregados, já que a coesão é baixa antes da cura. Maior rugosidade e melhor forma das partículas aumentam a estabilidade. Misturas densas favorecem o suporte do material, mas é necessário manter boa trabalhabilidade e permitir a evaporação de voláteis. O excesso de ligante reduz o atrito e favorece deformações como assentamentos e ondulações (Proweel *et al*, 1995).

4.2.2 Durabilidade

A durabilidade refere-se à resistência à água, temperatura e tráfego (Branco *et al*, 2005). O betume tem papel essencial: maior teor de ligante retarda o envelhecimento e reduz os efeitos de oxidação e entrada de água e ar, melhorando a coesão. Contudo, excesso de ligante compromete a estabilidade. Assim, deve-se encontrar um ponto ótimo entre estabilidade e durabilidade.

A utilização de materiais de granulometria contínua, bem compactados, beneficia o aumento da durabilidade, uma vez que dá a origem a misturas mais impermeáveis, dificultando a entrada de água para o interior da mesma.

Os problemas de durabilidade geralmente aparecem devido à perda progressiva de agregado a partir da superfície da reparação (desagregação).

4.2.3 Resistência à ação da água

Devido à aplicação das misturas em épocas chuvosas, é essencial garantir elevada resistência à água para assegurar a durabilidade. A presença de água compromete a adesividade entre betume e agregado, reduzindo estabilidade e durabilidade (Furlan *et al.*, 2004). A adesividade é a energia necessária para separar betume e agregado, enquanto a coesão é a força que mantém a integridade da mistura (Pereira, 2009).

A água provoca perda de coesão devido à redução da ligação betume-agregado, aumento da deformação permanente, envelhecimento do mástique e retenção de humidade. Como é inevitável a penetração de água, é fundamental adotar características que minimizem os seus efeitos. As misturas devem também resistir aos ciclos gelo-degelo, embora esse fenómeno seja pouco relevante em Portugal.

4.2.4 Adesividade ao pavimento existente

As misturas betuminosas de reparação rápida a frio devem aderir bem ao pavimento e às suas laterais. O tipo e a quantidade de ligante são determinantes para esta adesividade (Biswas, 2016). Contudo, a aplicação é por vezes comprometida por superfícies mal preparadas ou molhadas. Nessas situações, o aumento do ligante pode melhorar a ligação entre a mistura e o pavimento existente.

4.2.5 Período de armazenamento

A resistência ao armazenamento é crucial para garantir disponibilidade em situações de emergência. A validade da mistura depende do tipo de ligante e de aditivos utilizados, sendo necessário armazená-la em condições adequadas — evitando calor e vedando bem as embalagens — para manter a sua aplicabilidade até à data limite.

4.2.6 Compactação

A compactação influencia diretamente a estabilidade e durabilidade. Reduz os vazios, aumenta o atrito entre partículas e melhora a ligação entre betume e agregado. Um excesso de porosidade leva à deformação sob tráfego; por outro lado, porosidade muito baixa dificulta a cura e pode prejudicar o desempenho (Freire, 2002).

Para garantir o equilíbrio, a mistura deve evitar ser demasiado permeável ou demasiado densa (Ling *et al.*, 2016). O tipo de compactação influencia bastante o desempenho da mistura até à sua cura, sendo recomendável adotar métodos eficazes e não depender apenas da ação do tráfego (Díaz, 2016).

4.2.7 Trabalhabilidade

A mistura deve ser facilmente transportada, aplicada e compactada, mesmo após armazenamento. A trabalhabilidade está ligada à viscosidade do ligante, que por sua vez depende da temperatura. Em climas frios, podem ser usados aditivos para reduzir a viscosidade e facilitar a aplicação (Pimentel, 2007).

Contudo, há um conflito entre trabalhabilidade e durabilidade: boas condições de manuseio exigem granulometria uniforme e ligante mais fluido, enquanto maior durabilidade requer granulometria densa e ligante mais viscoso (Kubanek, 2013).

4.2.8 Misturas betuminosas para reparação rápida disponíveis no mercado

No mercado estão disponíveis várias misturas betuminosas a frio para aplicação e reparação rápida de pavimentos. De acordo com estudo de Fernandes (2017), foram obtidos os parâmetros base para comparação entre quatro amostras de misturas prontas disponíveis no mercado. Essas amostras permitiram avaliar diferentes características de desempenho, nomeadamente teor de ligante, sensibilidade à água, desgaste, estabilidade e deformação. O estudo visou determinar quais as misturas que apresentavam melhor desempenho em condições reais de aplicação. O autor identificou as amostras por ordem aleatória, de forma a garantir a confidencialidade.

Na Tabela 4 apresentam-se os principais resultados deste estudo que servirão de comparação com as misturas produzidas em laboratório e apresentadas na secção seguinte.

Tabela 4 – Características das misturas betuminosas a frio prontas disponíveis no mercado (Fernandes, 2017)

Mistura	Ligante [%]	Resistência ao desgaste [%]	ITS [kPa]		ITSR [%]	Estabilidade [kN]	Deformação [mm]
			Seco	Imerso			
MBF1	6,0	15,51	380	170	170	5,3	2,0
MBF2	5,5-7	19,13	50	30	30	2,5	2,2
MBF4	5	74	320	130	130	4,3	1,5
MBF5	5,8	25,62	40	10	10	3,3	2,0

4.3 Materiais e métodos

Para garantir as propriedades anteriormente mencionadas e assegurar o bom desempenho das misturas betuminosas de reparação rápida a frio, a seleção e dosagem adequadas dos materiais constituintes são fatores determinantes. Assim, é fundamental dar particular atenção à escolha dos agregados, do ligante e dos aditivos, de forma a assegurar as características desejáveis da mistura.

Contudo, o Caderno de Encargo da Tipo Obra (EP, 2014), posteriormente designado por CETO, não apresenta qualquer especificação técnica relativa às exigências para os materiais utilizados na produção deste tipo específico de misturas. Perante essa ausência normativa, serão adotados como valores de referência aqueles definidos para misturas abertas a frio, aplicadas em trabalhos de conservação corrente com espessuras inferiores a 4 cm.

Neste estudo experimental foram estudadas 3 misturas betuminosas distintas para tapamento de covas. A primeira, designada MBF1, constituída essencialmente por resíduos da exploração mineira da Panasqueira e MBR. A segunda designada MBF2, constituída exclusivamente com resíduos de exploração mineira da Panasqueira. Por fim, a terceira mistura, designada MBF3, constituída exclusivamente por MBR.

4.3.1 Agregados e MBR

Segundo a norma NP EN 13043:2010, os agregados utilizados em misturas betuminosas devem possuir boa forma e elevada resistência à rotura, abrasão e fragmentação provocadas pelo tráfego.

A incorporação de um determinado material granular numa mistura betuminosa exige o cumprimento de requisitos fundamentais, nomeadamente no que se refere à sua granulometria, resistência mecânica, forma e limpeza das partículas, bem como à afinidade e adesividade entre o agregado e o ligante. Estes parâmetros são determinantes para o desempenho e durabilidade da mistura.

Os materiais utilizados na produção das misturas betuminosas a frio foram os agregados grauvaques, resíduos da Mina da Panasqueira (descritos na secção 2.2.10), a mistura betuminosa recuperada proveniente da camada de desgaste da autoestrada A23, localizada em Castelo Branco – Portugal e a cal hidráulica. A cal hidráulica que se utilizou no trabalho experimental tem a designação comercial de Martigança HL5 da empresa SECIL.

Análise granulométrica

A granulometria é crucial para caracterizar a dimensão e distribuição das partículas de um agregado. Uma curva granulométrica adequada promove um bom imbricamento entre

partículas, formando um esqueleto resistente à ação do tráfego. A sua análise é realizada segundo a EN 933-1: 2012, sendo ajustada conforme o tipo de mistura e a espessura da camada, que, no caso das misturas de reparação rápida, tem como valores de referência aqueles definidos para misturas abertas a frio, aplicadas em trabalhos de conservação corrente com espessuras inferiores a 4 cm (EP, 2014).

Contudo, estas misturas têm uma granulometria uniforme, com partículas de tamanho semelhante, o que gera maior volume de vazios. Devido ao fraco imbricamento dos agregados uniformes, o ligante torna-se essencial para garantir a coesão da mistura (Kubanek, 2013). Segundo Proweel *et al.* (1995), recomenda-se uma dimensão máxima de 9,5 mm e menos de 2% de finos (passados na malha de 0,075 mm) para uma boa estabilidade.

De acordo com a norma EN 933-1: 2012, os agregados devem ser previamente secos em estufa e, posteriormente, o material é passado por uma série de peneiros de abertura progressivamente decrescente, determinando a massa das partículas que vão ficando retidas, e consequente percentagem relativamente à massa total.

Forma das partículas

A forma das partículas dos agregados afeta diretamente a trabalhabilidade e durabilidade das misturas betuminosas. Devem ter forma cúbica, evitando-se partículas lamelares ou alongadas, mais frágeis e suscetíveis à fragmentação, aumentando os vazios na mistura (Branco *et al.*, 2005).

A angularidade também é relevante: agregados angulosos e rugosos aumentam o atrito interno e a estabilidade, embora reduzam a trabalhabilidade. Já os arredondados melhoram a aplicação, mas reduzem a durabilidade (Munyagi, 2006). Cantos muito agudos podem danificar a película de betume e facilitar a entrada de água, comprometendo a mistura.

A combinação de agregados arredondados e angulosos é recomendada para equilibrar desempenho e aplicação (Munyagi, 2006). Em granulometrias uniformes, agregados cúbicos e angulosos são ideais, pois a uniformidade reduz o impacto da angularidade na trabalhabilidade.

A forma das partículas foi avaliada pelo índice de achatamento (FI), segundo a norma NP EN 933-3: 2011. O ensaio consiste em duas operações de peneiração nas quais a amostra é separada em várias frações granulométricas. São utilizados peneiros de barras com ranhuras paralelas de largura $D_i/2$, sendo D_i a fração do agregado que passa no peneiro de maior abertura.

O índice de achatamento corresponde à massa total das partículas que passam nos peneiros de barras, expressa em percentagem da massa total seca de partículas ensaiadas.

Procedimento deste ensaio:

1. Fazer a peneiração dos provetes;
2. Pesar e rejeitar as partículas > 80 mm e < 4 mm;
3. Pesar e reter separadamente todas as partículas de cada fração granulométrica entre 4 mm e 80 mm;
4. Pesar o material de cada fração granulométrica que passa pelo peneiro de barras correspondente;
5. Calcular o índice de achatamento (FI) a partir da expressão (1)

$$FI = \frac{M2}{M1} * 100 \quad (1)$$

Onde: M1 é a soma das massas (g) das partículas de cada uma das frações granulométricas; M2 é a soma das massas (g) das partículas de cada uma das frações granulométricas que passe no peneiro de barras com ranhura de largura Di/2.

6. Calcular o índice de achatamento de cada fração granulométrica (FI) através da expressão (2)

$$FI = \frac{mi}{Ri} * 100 \quad (2)$$

Onde: mi é a soma das massas (g) das partículas de cada uma das frações granulométricas que passa no peneiro de barras com ranhura de largura Di/2 ; Ri é a massa (g) de cada fração granulométrica di/Di

7. Por último fazer um cálculo de verificação através da expressão (3)

$$100 * \frac{M0 + \Sigma(\text{massa rejeitada})}{M0} \leq 1 \% \quad (3)$$

Na verificação efetuada o resultado é inferior a 1%, logo não é necessário repetir o ensaio.

Resistência à fragmentação

Os agregados são constantemente sujeitos a fortes solicitações, sobretudo durante a fase de produção das misturas, e de aplicação, sendo expostas a elevadas temperaturas e elevadas ações mecânicas. No entanto, depois de aplicadas continuam a ser muito solicitadas principalmente devido à ação do tráfego.

A determinação da resistência à fragmentação das partículas de agregados é conseguida através da realização do ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles, de acordo com a norma NP EN 1097-2:2011. A amostra deve ter no mínimo 15 kg, a fração granulométrica de 10 mm a 14 mm (10/14) é reduzida a 5 kg, após a pesagem da massa necessária, é preciso lavar a amostra de cada fração (10 mm a 14 mm) separadamente e pôr a secar a 110 ± 5 ° C, durante 24 horas.

Depois de seca a amostra misturam-se as duas frações para obter uma amostra laboratorial modificada de 10 a 14 mm com:

- 60 a 70% passados em #12,5
- 30 a 40% passados em #11,2

A Tabela 11 representa o princípio básico deste ensaio, consistindo no correlacionamento de um número de esferas de aço e a massa da carga da amostra.

Tabela 5– Carga abrasiva nos ensaios de Los Angeles

Número de esferas	Massa da carga [g]
12	5000 ±50
11	4484 ±50
8	3330 ±50
6	2500±25

Para determinar a resistência à fragmentação, foi utilizada amostra de 2500 g de agregado e a carga abrasiva de 6 esferas. O procedimento deste ensaio consistiu em colocar as esferas e o provete no tambor, aplicando 500 voltas de 31 a 33 rpm. No final do ensaio, para a determinação do coeficiente de Los Angeles utiliza-se a expressão (4).

$$LA = \frac{2500-m}{2500} \quad (4)$$

Onde: m é a massa (g) retida no peneiro de 1,6 mm

Afinidade dos agregados ao ligante

A afinidade dos agregados aos ligantes betuminosos é umas das propriedades essenciais de ser avaliada nas misturas betuminosas de reparação rápida a frio, permitindo conhecer o grau de eficiência da ligação entre o agregado e o ligante, ou seja, o grau de adesão entre ambos perante o efeito da água.

A determinação da afinidade do agregado ao ligante foi realizada de acordo com a norma EN 12697-11, parte C. A afinidade entre o agregado e o ligante é determinada pelo registo visual do nível de recobrimento do betume nos agregados, após a agitação mecânica da mistura betuminosa na presença de água a uma velocidade de rotação de 60 rpm, à temperatura ambiente. A determinação da afinidade do agregado ao ligante é analisada em função da dificuldade com que a água separa o betume em contacto com os agregados, através da inspeção visual do agregado revestido com ligante, constatando-se qual a percentagem de material sem revestimento após determinadas condições de ensaio.

Esta propriedade assume-se com elevada importância, devido ao facto das misturas betuminosas de reparação rápida a frio serem sobretudo aplicadas na presença de água (inverno e primavera) e da água ser um elemento que potencia o desenvolvimento de degradações nos pavimentos.

De forma a melhorar algumas características essenciais nas misturas betuminosas de reparação rápida a frio, optou-se por utilizar alguns aditivos. A empresa Interchimica, de acordo com o estudo realizado, indicou a incorporação do aditivo Interlene SL/100P com o objetivo de promover a ligação entre a emulsão e os agregados aumentando a sua adesividade em qualquer condição de aplicação, permitindo aumentar o recobrimento da emulsão no agregado, melhorando a trabalhabilidade durante o ciclo de produção.

4.3.2 Formulação das misturas betuminosas

Na formulação de misturas betuminosas visa-se obter a percentagem de materiais (agregados, cal hidráulica e MBR) que se ajuste ao fuso granulométrico das misturas utilizadas nos trabalhos de conservação corrente com espessuras inferiores a 4 cm, conforme especificado no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014).

A determinação da percentagem inicial de emulsão betuminosas (E) em relação ao peso total da mistura de agregados, considerando a sua superfície específica, foi realizada através da aplicação das expressões empíricas (5), (6) e (7).

$$Pb = K * \alpha * \sqrt[5]{\Sigma} \quad (5)$$

Pb - Percentagem de betume em relação ao peso total da mistura;

K - Módulo de riqueza em betume;

ρ_a - Massa volúmica da mistura de agregados

$\alpha = 2,65 / \rho_a$

$$\Sigma = \frac{1}{100} * (0,25G + 2,3S + 12s + 135f) \quad (6)$$

Σ - Superfície específica

G - Proporção ponderal dos elementos superiores a 6,3 mm

S - Proporção ponderal dos elementos compreendidos entre 6,3 e 0,315 mm.

s - Proporção ponderal dos elementos compreendidos entre 0,315 e 0,063 mm.

f - Proporção ponderal dos elementos inferiores a 0,063 mm

$$E = \frac{Pb}{A} * 100 \quad (7)$$

Onde A é a quantidade de betume residual da emulsão.

Na preparação dos provetes foi seguido o protocolo estabelecido pela norma EN 12697 – 35:2004. Para garantir condições ótimas, os agregados de resíduos da exploração mineira, a cal hidráulica e a MBR foram previamente secos a uma temperatura de $100^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ na estufa com ventilação por um período de 24 horas.

Para determinação do teor ótimo de ligante produziram-se 3 misturas com teores de ligante diferentes: uma com o teor inicial de ligante e mais duas, uma 0,5% abaixo e outra 0,5% acima.

Posteriormente, procedeu-se à compactação das misturas de acordo com o estabelecido na norma EN 12697–30. A mistura foi colocada no molde, previamente untado com óleo e colocado um filtro de papel na base. De seguida foi efetuada compactação ligeira de modo a obter uma distribuição uniforme da mistura no molde. Uma vez colocada a mistura no molde foi compactada no compactador de impacto apresentado na Figura 15 a). Durante este processo, aplicaram-se 50 pancadas em cada face do provete. Após um período de 2 horas, os provetes foram desmoldados como apresentado na Figura 15b).

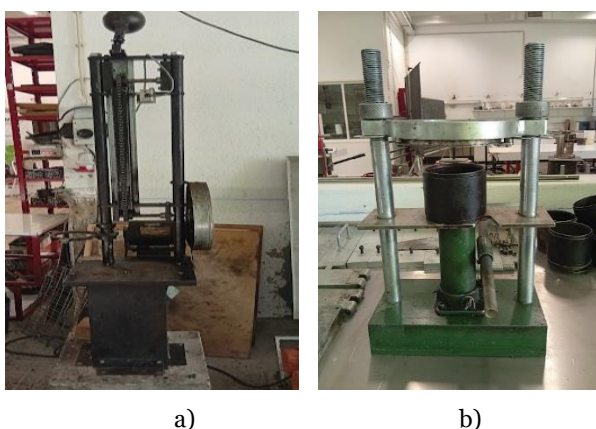


Figura 15 - a) Compactação; b) Desmolde

De forma a caracterizar o comportamento das misturas betuminosas de reparação rápida a frio, recorre-se ao fabrico de provetes representativos da mistura curada e com compacidade superiores às iniciais, representativas das compacidades resultantes da ação do tráfego. Deste modo, surgiu a necessidade de desenvolver um processo de cura acelerado, optando-se pelo procedimento descrito por Baptista, A. (2006):

- 2 horas no molde;
- 24 horas ao ar, à temperatura ambiente;
- 72 horas em estufa a 60°C .

Teor ótimo de ligante - Ensaio Cântabro

Para determinação do teor ótimo de emulsão em misturas betuminosas a frio utilizou-se o ensaio de Cântabro de acordo com a EN 12697-17:2004. Moldam-se provetes Marshall com 50 pancadas em cada face das diferentes misturas e com 3 teores diferentes de emulsão: Teor inicial, Teor inicial + 0,5% e teor inicial – 0,5%. Em geral a temperatura de ensaio está compreendida entre 15 e 30° C. Determina-se a massa de cada provete e anota-se o valor (P1). Colocam-se os provetes individualmente no tambor da máquina de Los Angeles sem as bolas e aplicam-se 300 voltas com uma rotação de 30 a 33 rpm. No final do ensaio, tira-se o provete do tambor e pesa-se novamente anotando-se o valor (P2). Para cada provete é determinada a perda por desgaste (P) através da expressão (8)

$$P = \frac{P1-P2}{P2} * 100 \quad (8)$$

4.3.3 Características das misturas

Baridade máxima teórica

A determinação da baridade máxima teórica das misturas betuminosas produzidas realizou-se de acordo com a norma EN 12697-5:2002, Procedimento C. Este cálculo é feito com base na massa volúmica e na percentagem dos agregados e do betume utilizados nas misturas usando a expressão (9)

$$\rho_{Max} = \frac{100}{\left(\frac{Pb}{\rho_b} + \sum_{i=1}^N \frac{Pi}{\rho_i}\right)} \quad (9)$$

Onde,

ρ_{Max} - Baridade Máxima Teórica [kg/m³];

Pb - Percentagem de betume [%];

ρ_b - Massa volúmica do betume [kg/m³];

Pi - Percentagem do agregado em função do peso total da mistura i [%];

ρ_i - Massa volúmica do agregado i [kg/m³]

Baridade

A determinação da baridade dos provetes compactados é realizada seguindo as diretrizes estabelecidas na norma NP EN 12697-6:2003, pelo procedimento B. Este processo é realizado obtendo os valores dos pesos dos provetes em três condições: secos, saturados com a superfície seca e submersos em água, como ilustrado na Figura 16.



Figura 16 – Sistema de pesagem dos provetes, secos imersos e húmidos

Segundo a norma, a temperatura da água durante a imersão dos provetes deve ser registada, influenciando o valor da massa volúmica da mesma. A baridade máxima teórica é calculada através da expressão (10).

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad (10)$$

Onde,

ρ_{bssd} - Baridade do provete saturado com superfície seca [kg/m^3];

m_1 - Massa do provete seco [kg];

m_2 - Massa do provete saturado imerso [kg];

m_3 - Massa do provete saturado com a superfície seca [kg];

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m^3].

Porosidade

O cálculo da porosidade é realizado de acordo com a norma NP EN 12697-8. Esta propriedade define a quantidade de espaços vazios dentro da mistura betuminosa, sendo esta análise de suma importância para a avaliação do comportamento das misturas betuminosas na presença de água. A porosidade da mistura determina-se de acordo com a expressão (11).

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100 \quad (11)$$

Onde,

V_m - Porosidade da mistura [%];

ρ_m - Baridade máxima teórica da mistura [kg/m^3];

ρ_b - Baridade da mistura [kg/m^3].

Vazios na mistura de agregados

O cálculo dos vazios na mistura de agregados é realizado de acordo com a norma NP EN 12697-8, a partir da expressão (12)

$$VMA = Vm + B * \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad (12)$$

Onde,

VMA = Percentagem de vazios na mistura de agregados [%];

Vm = Porosidade da mistura [%];

B = Percentagem de betume [%];

ρ_b = Baridade da mistura [kg/m^3];

ρ_B = Massa volúmica do betume [kg/m^3].

Vazios preenchidos com betume

O cálculo dos Vazios preenchidos com betume, é realizado de acordo com a norma NP EN 12697-8, a partir da expressão (13)

$$VFB = \frac{B * \frac{\rho_b}{\rho_B}}{VMA} * 100 \quad (13)$$

Onde,

VFB - Percentagem de vazios preenchidos com betume [%];

VMA - Percentagem de vazios na mistura de agregados [%];

B - Percentagem de betume [%];

ρ_b - Baridade da mistura [kg/m^3];

ρ_B - Massa volúmica do betume [kg/m^3].

4.3.4 Ensaios de desempenho das misturas

Ensaio de Marshall

A norma NP EN 12697-34 define um método de ensaio para determinação da estabilidade, deformação e quociente Marshall de provetes de misturas betuminosas.

Este ensaio tem como princípio a preparação dos provetes Marshall compactados em conformidade com a norma NP EN12697-30, com aplicação de 50 pancadas em cada face do provete com o compactador Marshall. Posteriormente, os provetes são sujeitos a uma cura acelerada, de acordo com as condições que serão apresentadas na secção 5.3.3.

Depois devem ser colocados num banho-maria, como apresentado na Figura 17.a), durante pelo menos 40 minutos e não excedendo os 60 minutos, manter a temperatura da água a 35 ± 1 °C (Fernandes, 2017). De seguida, o provete de ensaio é colocado no estabilómetro

Marshall e o conjunto é colocado no centro da máquina de ensaio, como apresentado na Figura 17.b), aplicando-se a carga ao provete a uma velocidade de 50 ± 2 mm/min.

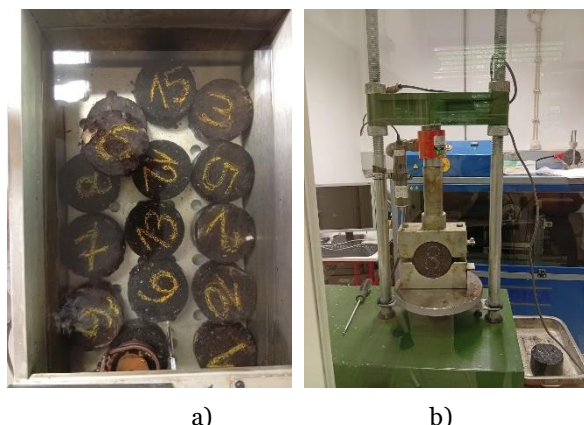


Figura 17 – a) Provetes no banho maria b) Equipamento para o ensaio Marshall (DECA-UBI)

Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta

O ensaio do módulo de rigidez por tração indireta foi realizado de acordo com a norma NP EN 12697-26:2004, Anexo C, conforme apresentado na Figura 18. Foram ensaiados cinco provetes de cada mistura betuminosa, MBF1, MBF2 e MBF3 com o teor ótimo de betume, ao longo de duas direções diametralmente opostas.



Figura 18 – Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta.

A norma estabelece vários parâmetros que devem ser cumpridos, tais como a temperatura de ensaio de 20° C, o coeficiente de Poisson de 0,35, um tempo de crescimento de carga de 124 milissegundos, uma deformação horizontal máxima de $5 \mu\text{m}$. O módulo de rigidez é determinado com base na aplicação de 5 cargas repetidas, antecedidas de um pré-carregamento que tem como objetivo o ajuste do sistema de carga ao tipo de mistura do provete. Em relação às dimensões dos provetes, foi seguido o procedimento estabelecido na NP EN 12697-29, que determina o processo para obter a altura e o diâmetro médios.

Ensaio de sensibilidade à água

O ensaio de sensibilidade à água realizou-se de acordo com a NP EN 12687-12. A realização deste ensaio é fundamental para avaliar como a saturação e o condicionamento acelerado em água afetam a resistência à tração indireta das misturas betuminosas, ajudando a compreender e antecipar as consequências da exposição à água dessas misturas, garantindo assim a sua durabilidade e desempenho.

Assim, para a avaliação da sensibilidade à água produziram-se um total de 30 provetes: 10 provetes MBF1 com 7,5% de emulsão betuminosa, 10 provetes MBF2 com 7,4% de emulsão betuminosa e 10 provetes MBF3 com 4,5% de emulsão betuminosa.

Antes de iniciar os ensaios, é imperativo realizar a medição das dimensões dos provetes de acordo com o estabelecido pela norma NP EN 12697-29. Esta norma detalha o procedimento para obter as dimensões e o volume de cada provete.

De acordo com a NP EN 12687-12, os provetes devem ser divididos em dois grupos com baridade semelhante. Um será mantido a seco a uma temperatura ambiente de $20 \pm 5^\circ \text{C}$, enquanto o outro será submerso num banho de água a $35 \pm 1^\circ \text{C}$ por 68 a 72 horas.

O grupo de provetes imerso deverá ser previamente submetido a vácuo, como apresentado na Figura 19, a uma temperatura de $20 \pm 5^\circ \text{C}$ por 30 ± 5 minutos, a uma pressão absoluta de $6,7 \pm 0,3 \text{ kPa}$, para permitir que a água penetre de forma eficaz nos vazios dos provetes.



Figura 19 – Grupo imerso em recipiente de vácuo.

Em seguida, os mesmos provetes devem ser colocados num banho de água a uma temperatura controlada de $35 \pm 1^\circ \text{C}$ por um período de 68 a 72 horas. Após o banho a 35°C , os provetes são retirados e colocados novamente imersos a uma temperatura de 15°C durante 2 horas. Por outro lado, o grupo que permaneceu em condições secas será mantido à temperatura ambiente de 15°C pelo mesmo período.

Posteriormente, conforme a norma NP EN 12697-23:2003, será realizado o ensaio para determinar a resistência à tração indireta por compressão diametral a uma temperatura de 15°C . e com uma velocidade constante de $50 \pm 1 \text{ mm/min}$, até rotura dos provetes.

A norma NP EN 12697-23:2003 classifica diferentes tipos de rotura em três categorias, apresentadas na Figura 20:

- a) Rotura Clara: O provete sofre uma rotura ao longo de uma linha diametral, com exceção de pequenas secções triangulares próximas à zona de contato.
- b) Deformação: O provete não apresenta uma linha de rotura claramente visível.
- c) Combinação: proveta provete apresenta uma rotura clara ao longo da linha diametral e também exhibe deformações próximas à zona de contato.

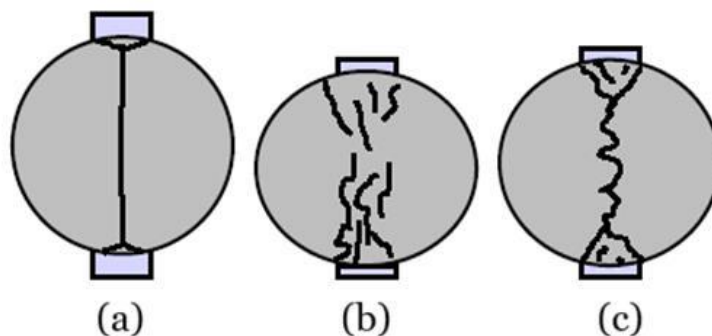


Figura 20 – Roturas por tração indireta através de compressão diametral:
(a) Rotura clara, (b) deformação, (c) combinação (NP EN 12697 – 23: 2003)

Para ambos os grupos, seco e imerso, a norma NP EN 12697 – 23: 2003 propõe a determinação da resistência à tração indireta através da expressão (14)

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (14)$$

Onde,

ITS - Resistência à tração indireta [kPa];

P - Carga Máxima [kN];

D - Diâmetro médio do provete [mm];

H - Altura média do provete [mm].

A norma EN 12697-12 correlaciona a resistência à tração indireta dos provetes secos com os provetes imersos através da expressão (15)

$$ITSR = 100 * \left(\frac{ITSw}{ITSD} \right) \quad (15)$$

Onde,

ITSR - Resistência conservada de tração indireta [%];

ITSw - Média da resistência à tração indireta do grupo imerso [kPa];

ITSD - Média da resistência à tração indireta do grupo seco [kPa].

Capítulo 5 – Resultados e discussão

5.1 Enquadramento

Neste capítulo são apresentados e interpretados os resultados obtidos no estudo tendo em conta o programa experimental descrito no capítulo anterior. Face à ausência de informação para as misturas betuminosas de reparação rápida a frio no Caderno de Encargos Tipo Obra (CEP, 2014), os resultados obtidos tiveram como referência principal as propriedades exigidas para as misturas betuminosas abertas a frio, e em determinadas situações, foram tidas em consideração características aplicadas às misturas betuminosas convencionais destinadas às camadas de desgaste. É importante referir que a análise dos resultados também foi efetuada tendo em consideração valores já estabelecidos por estudos realizados por outros autores para as misturas betuminosas a frio destinadas à reparação de pavimentos em zonas localizadas (tapagem de covas).

5.2 Caracterização dos materiais

Os agregados utilizados nas formulações das misturas são resíduos provenientes da Mina da Panasqueira, pó de grauvaque e brita grauvaque. A MBR foi extraída da camada de desgaste da autoestrada A23, localizada em Castelo Branco – Portugal. Utilizou-se ainda cal hidráulica, com a designação comercial de Martigança HL5 da empresa SECIL, com o objetivo de proporcionar uma melhor coesão e resistência às cargas de tráfego intenso e evitar a fissuração do pavimento.

Os agregados grauvaques foram recolhidos nos estaleiros da Câmara Municipal da Covilhã, o ligante utilizado em duas misturas é emulsão betuminosa C67BF3 cedida pela empresa Lusasfal. Relativamente à terceira mistura betuminosa é constituída com 100% de MBR e um aditivo Iterbflux Cold cedido pela empresa italiana Iterchimica.

5.2.1 Agregados e MBR

Análise granulométrica

Foram efetuadas as análises granulométricas de acordo com a EN 933-1: 2012. Na Figura 21 apresenta-se a estufa (a), a série de peneiros (b) e um exemplo do material retido num peneiro (c).

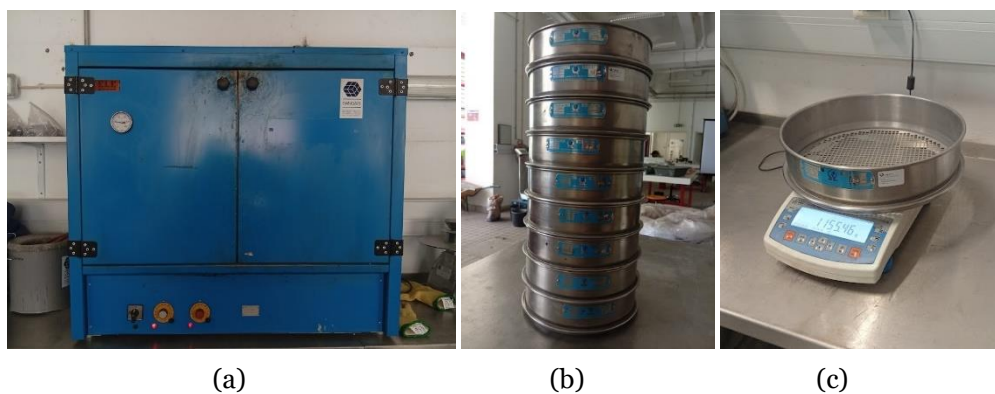


Figura 21 – (a) Estufa para secagem, (b) Peneiros (c) Pesagem dos peneiros

O conjunto de peneiros utilizado foi selecionado de acordo com o definido no CETO (2014) para uma mistura aberta a frio, aplicada em camada de base nos trabalhos de conservação corrente e espessuras inferiores a 4 cm.

Na Tabela 6 e na Figura 22 apresentam-se os resultados da análise granulométrica de todos os materiais utilizados neste estudo experimental.

Tabela 6- Análise granulométrica dos materiais utilizados

Abertura dos Peneiros	% Acumulada passados			
	MBR	Grauvaque pó 0/4	Grauvaque brita 2/12,5	Cal hidráulica
12,5	100	100	74	100
10	100	100	62	100
4	68	93	22	100
2	46	61	6	100
0,063	0	0	0	100

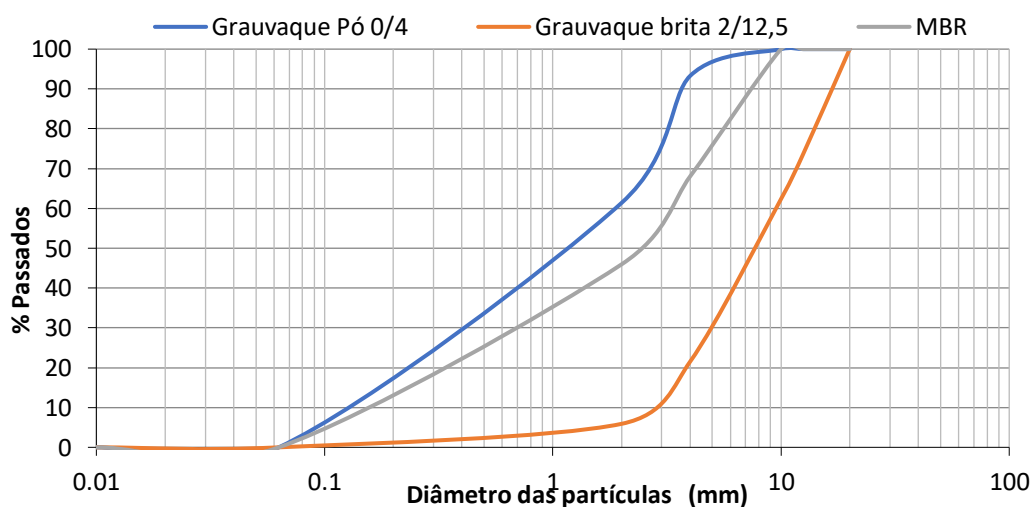


Figura 22 – Curva granulométrica dos agregados grauvaques Pó e brita 2/12.5 e MBR

Massa Volúmica

A massa volúmica dos agregados grauvaques da Mina da Panasqueira, Cal Hidráulica e MBR determinou-se de acordo com a Norma Portuguesa EN 1097-6:2003, tendo sido utilizado o método do picnómetro de hélio com o equipamento AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer, apresentado na Figura 23.



(a)

(b)

Figura 23 – (a) Balança; (b) AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer

Para a avaliação e determinação da massa volúmica dos materiais, foram realizadas três medições para cada amostra, sendo considerado o valor médio obtido apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa volúmica dos materiais utilizados

Material	Massa Volúmica [kg/m ³]
Grauvaque Pó 0/4	2847
Grauvaque Brita 2/12,5	2831
MBR	2527
Cal Hidráulica	2760

Forma das partículas - Índice de achatamento

A forma das partículas foi determinada através do índice de achatamento conforme preconizado na norma NP EN 933-3:2011. Para a realização deste ensaio é necessário para cada fração granulométrica, apresentadas na Figura 24, uma largura específica do peneiro de barras, tal como está evidenciada na Tabela 8.

Tabela 8- Fração granulométrica e respetiva largura dos peneiros de barras.

Fração granulométrica [mm]	Largura de ranhura do peneiro de barras [mm]
6,3/8	6,3/8
4/5	4/5



(a)

(b)

Figura 24 – (a) Fração granulométrica 6,3/8 (b) Fração granulométrica 4/5

A forma das partículas foi determinada através do índice de achatamento conforme preconizado na NP EN 933-3:2011, apresentam-se na Tabela 9 resultados do índice de achatamento obtido para a brita grauvaque 2/12,5.

Tabela 9–Índice de achatamento do resíduo de grauvaque

Parâmetro	Gruvaque Brita 2/12,5
Índice de Achatamento – FI	33 %

O valor de Índice de achatamento para misturas betuminosas aberta a frio preconizado no CETO da EP (2014) que é FI25, verificando-se que o agregado grauvaque tem um valor superior. O desvio do índice de achatamento pode ser um aspeto desfavorável e pode influenciar na estabilidade da mistura uma vez que a forma mais alongada dos agregados pode levar a uma diminuição da trabalhabilidade das misturas betuminosas.

Resistência das partículas – Resistência à fragmentação

De forma a analisar a resistência à fragmentação dos agregados grauvaque, recorreu-se ao ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles, apresentado na Figura 25, de acordo com a norma europeia EN 1097-2:2010, de modo a determinar o coeficiente Los Angeles (LA).



Figura 25 – Máquina de Los Angeles

Os resultados do Ensaio de fragmentação apresentam-se na Tabela 10.

Tabela 10– Resultados do ensaio de fragmentação

Massa do material retido no peneiro de 1,6 mm	g	2195,00
Perda por desgaste	g	305
Coefficiente de Los Angeles	%	8,8

O valor de resistência à fragmentação cumpre o preconizado no CETO da EP (2014) para misturas betuminosas aberta a frio que é LA35. Os agregados grauvaques, resíduos da Mina da Panasqueira, apresentam uma resistência à fragmentação muito elevada, de 8,8%, revelando que os agregados são duros, resistentes ao choque, ao atrito e ao desgaste das partículas produzido pelo tráfego. Desta forma, permitem obter uma mistura betuminosa com uma boa resistência.

Caracterização da MBR

A caracterização da MBR foi realizada pela empresa CEPESA Betumes, no Laboratório de Madrid, nomeadamente a determinação do teor de betume envelhecido com base na norma EN 12697-1:2000, assim como a penetração e ponto de amolecimento segundo as normas EN 1426 e EN 1427, respetivamente. Os resultados apresentam-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Características do ligante envelhecido extraído da MBR

Propriedades	Norma	Resultados
Ligante envelhecido extraído [%]	EN 12697-1	5,6
Penetração [mm]	EN 1426	11
Temperatura de amolecimento [°C]	EN 1427	77,8

Considerando os resultados apresentados, conclui-se que o betume envelhecido extraído da MBR tem um alto grau de envelhecimento. A reduzida penetração sugere uma rigidez alta e, portanto, uma perda da sua elasticidade original.

5.2.2 Ligantes

A emulsão betuminosa utilizada na produção das misturas é do tipo C67BF3 e foi cedida pela empresa Lusafal, derivados e asfálticos da Portugal, SA. As características apresentam-se na Tabela 12.

Tabela 12- Características da Emulsão Betuminosa C67BF3

Propriedades	Unidade	Norma	Desempenho	Resultado
Índice de Rotura	-	EN 13075-1	70 a 155	115
Teor em Ligante	% [m/m]	EN 1431	≥65	65
Teor em Óleo Destilado	% [m/m]	EN 1431	≤10	5
Tempo de Escoamento, 4 mm a 40°C	s	EN 12846	5 a 70	8
Resíduo no Peneiro de 0,500 mm	%[m/m]	EN 1429	≤0,1	0
Sedimentação (7 dias)	% [m/m]	EN 12847	≤5	1

Na produção da mistura betuminosa apenas com MBR foi utilizado o Iterbflux Cold. Trata-se de um aglutinante para misturas betuminosas a frio de alto desempenho armazenáveis, para manutenção de estradas. Desempenha a dupla função de aglutinante e agente fundente da mistura final. De acordo com o fabricante, a dosagem situa-se entre 3,0 e 4,5% sobre o peso dos agregados ou MBR, dependendo do tipo de aplicação e da curva de distribuição granulométrica utilizada. A Densidade a 25 ° C é de 1,00 g/cm³.

A MBR foi fornecida à empresa Iterchimica, para desenvolvimento de estudo sobre a dosagem adequada de ligante, obtendo-se os resultados apresentado na Figura 26.

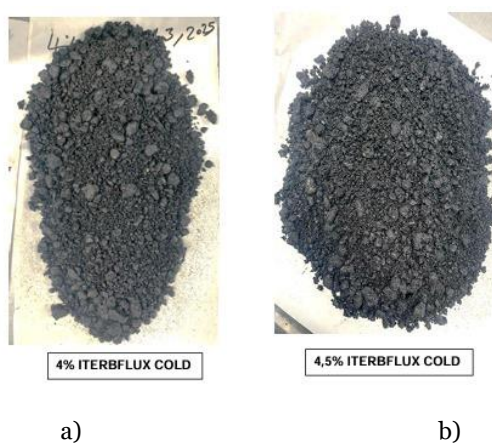


Figura 26 – Ensaios de dosagem ótima do ligante IterBflux Cold: a) 4,0%; b) 4,5%

Com base nestes resultados optou-se pela utilização de 4,5% de IterBflux Cold pois a mistura apresenta melhor trabalhabilidade.

5.2.4 Aditivos

O aditivo Iterlene SL/100-PLUS, fornecido pela empresa Italiana Iterchimica, foi adicionado nas misturas MBF1 e MBF2 no sentido de promover a ligação entre betume e agregados, aumentando a sua adesividade em qualquer condição de aplicação, melhorando a trabalhabilidade durante o ciclo de produção.

A dosagem geralmente é de 0,05 a 0,15% do peso do ligante, dependendo da natureza litológica do agregado e das condições de funcionamento (temperaturas, tipo de mistura a produzir, etc.).

Na Figura 27 apresenta-se o resultado do estudo de afinidade agregado ligante, com e sem aditivo.

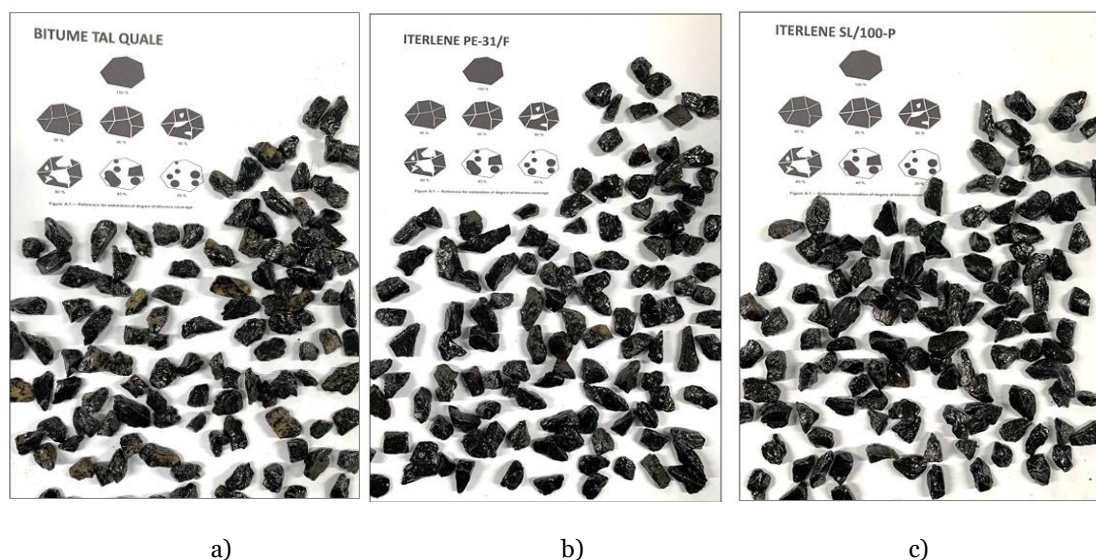


Figura 27 – Ensaio de aderência do ligante agregado grauvaque com a aplicação de diferentes aditivos: a) Sem aditivo – 70% de recobrimento; b) Com 0,3% de Interlene PE-31/F – 85% de recobrimento; c) Com 0,1% de Interlene SL/100-P – 100% de recobrimento

Com base nestes resultados optou-se pela utilização de 0,1% de Interlene SL/100-P nas misturas com utilização de resíduos da Mina da Panasqueira, agregados grauvaques. Esta opção permite aumentar a adesividade entre o agregado e o ligante, sendo essencial que os agregados se encontrem totalmente revestidos durante os períodos de armazenamento, aplicação e, sobretudo, após aplicação quando são sujeitos às condições de climáticas e de tráfego.

5.3 Formulação das misturas

Neste estudo experimental foram realizadas 3 misturas betuminosas distintas para tapamento de covas. A primeira formulação, chamada MBF1 incorporará resíduos da exploração mineira da Panasqueira e MBR, cal hidráulica, aditivo e emulsão betuminosa C67BF3. A segunda formulação, MBF2 incluirá agregados resíduos da exploração mineira da Panasqueira, cal hidráulica, aditivo e emulsão betuminosa. Por fim, a terceira formulação MBF3 caracterizar-se-á por ter apenas MBR e ligante.

5.3.1 Composição granulométrica das misturas

Na Tabela 13 apresenta-se a composição das misturas betuminosas em estudo.

Tabela 13 - Composição das misturas betuminosas produzidas.

Material	MBF1 [%]	MBF2 [%]	MBF3 [%]
Pó de Grauvaque 0/4	5	10	-
Brita Grauvaque 4/12,5	80	89	-
Cal Hidráulica	1	1	-
MBR	14	-	100

Na Tabela 14 e Figura 28 encontram-se representadas as curvas granulométricas das misturas MBF1, MBF2 e MBF3, assim como o fuso granulométrico das misturas utilizadas nos Trabalhos de Conservação Corrente com espessuras inferiores a 4 cm (EP, 2014).

Tabela 14 – Granulometria das misturas betuminosas.

Aberturas dos peneiros [mm]	Limite Inferior	Limite Superior	MBF1	MBF2	MBF3
12	-	-	100	100	100
10	70	90	89	88	100
8	-	-	74	73	86
5,6 (5)	-	-	53	51	79
4	10	35	37	34	68
2	0	5	14	12	46
1	-	-	6	4	25
0,5	-	-	3	3	10
0,25	-	-	2	2	2
0,125	-	-	1	1	0
0,063	0	2	1	1	0

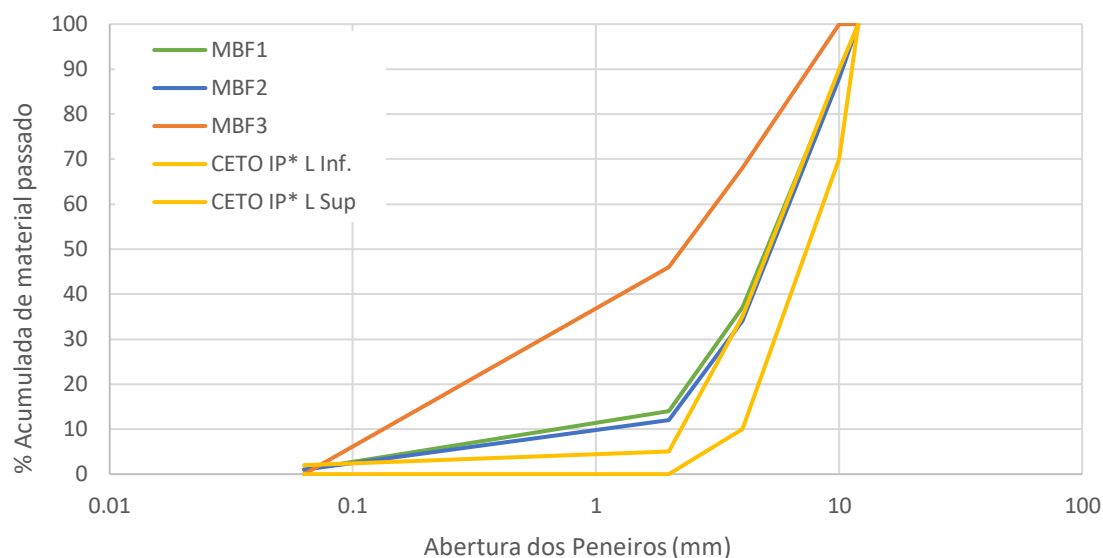


Figura 28 – Curvas granulométricas e fuso das misturas

De acordo com os valores obtidos, constata-se um afastamento da granulometria de todas as misturas relativamente ao fuso definido no CETO (EP, 2014) para misturas abertas a frio aplicadas em trabalhos de conservação corrente. As misturas MBF1 e MBF2 apresentam um ligeiro desvio da curva granulométrica uma vez que o resíduo apenas foi passado num peneiro de malha 12,5 mm porque se pretende utilizar o máximo de resíduo vindo da Mina da Panasqueira. No caso da MBF3 não foi efetuada qualquer seleção do material, para evitar acréscimo de custo na produção da mistura. A incorporação de cal hidráulica teve como objetivo o ajuste da granulometria das misturas e aumentar a coesão, durabilidade e estabilidade da estrutura do pavimento, especialmente quando são utilizados pavimentos ou materiais reciclados.

5.3.2 Teor inicial de ligante

O ligante a utilizar nas misturas MBF1 e MBF2 foi uma emulsão betuminosa catiónica do tipo C67BF3, de rotura média para misturas abertas a frio, conforme a norma EN 13808. Na mistura MBF3 utilizou-se o ligante IterBFlux Cold com o teor de 4,5%.

A Tabela 15 apresenta as quantidades ótimas de emulsão a usar nas misturas MBF1 e MBF2 de acordo com a expressão (7).

Tabela 15 - Quantidade ótima de emulsão calculada

Mistura	E [%]
MBF 1	6,5
MBF 2	6,4

5.3.3 Produção das misturas e compactação de provetes

De modo a selecionar o teor ótimo de emulsão betuminosa, nas misturas MBF1 e MBF2 foram produzidos 15 provetes com três teores diferentes. Após a produção das MBF1 e MBF2 com a quantidade ótima de emulsão, 6,5% e 6,4%, respetivamente, verificou-se que estas apresentavam-se muito secas e com baixa trabalhabilidade. Assim, para a mistura MBF1 foram produzidos provetes com 6,5%, 7,0% e 7,5% de emulsão e para a mistura betuminosa MBF2 foram produzidos provetes com 6,4%, 6,9% e 7,4% de emulsão. No caso da mistura MBF3 foram produzidos 5 provetes onde foi utilizado o teor de 4,5 % conforme indicado pela empresa Iterchimica.

A emulsão betuminosa C67BF3 e Iterbflux cold foram utilizados nas misturas à temperatura ambiente e as misturas foram produzidas manualmente.

Relativamente às misturas em estudo, e ao tipo de aplicação a que se destinam, considera-se oportuna a avaliação das propriedades mecânicas dos provetes compactados e curados, possibilitando a obtenção de indicador sobre o comportamento das misturas a médio e a longo prazo, face à ação do tráfego e da água.

Durante a desmoldagem dos provetes, devido à fraca coesão que os provetes recém-moldados apresentavam, verificou-se a sua desintegração, conforme se apresenta na Figura 29.



Figura 29 – Provetes sem coesão após 2 horas de cura

Deste modo, para garantir que os provetes não se desintegrassem durante o período de cura, houve a necessidade de confiná-los com cintas de papel conforme se apresenta na Figura 30.



a)

b)

Figura 30 - a) Provetes com cintas de papel; b) Provetes MBF1 após 72 horas de cura

5.3.4 Teor ótimo de ligante - Ensaio de Cântabro

A determinação do teor ótimo de emulsão em misturas betuminosas a frio foi feito com base no ensaio de Cântabro de acordo com a norma EN 12697-17:2004. Para cada mistura e respectivo teor de emulsão produziram-se 5 provetes. Na Figura 31 apresentam-se um exemplo de cada tipo de mistura após Ensaio Cântabro.



a)

b)

c)

Figura 31 - Provetes após o ensaio de Cântabro: a) MBF1 b) MBF2 C) MBF3

Os resultados do ensaio cântabro, obtidos através da expressão (8), apresentam-se na Figura 32.

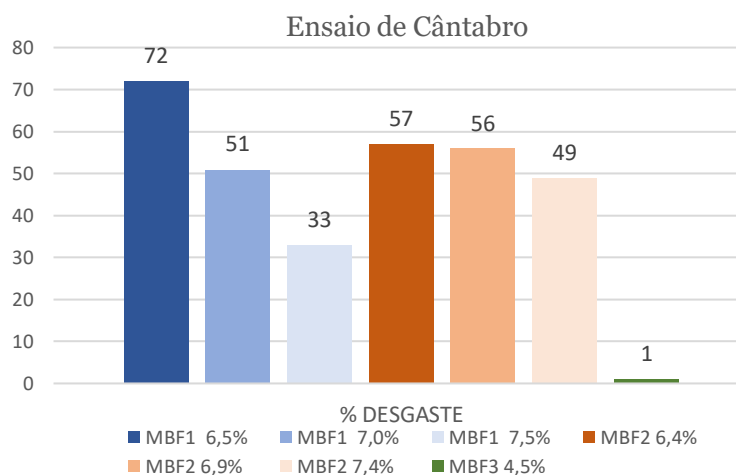


Figura 32 - Resultados do ensaio de Cântabro

Os resultados do ensaio Cântabro revelam que as misturas MBF1 e MBF2 não cumprem o valor máximo de 25% para misturas a frio estabelecido no Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, 2014). A mistura MBF3 apresenta um ótimo desempenho, com apenas 1% de desgaste. Deste ensaio resultam os teores ótimos de emulsão das diferentes misturas, apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Quantidade ótima de emulsão [%]

Mistura	E [%]
MBF 1	7,5
MBF 2	7,4

5.4 Características da mistura

5.4.1 Baridade máxima teórica

Apresentam-se na Tabela 17 os valores da Baridade Máxima Teórica determinados de acordo com a expressão (9)

Tabela 17 - Baridade Máxima Teórica [kg/m³]

Tipo de Mistura	Baridade máxima teórica [kg/m³]
MBF 1	2784
MBF 2	2831
MBF 3	2530

5.4.2 Baridade

Na Tabela 18 apresenta-se a média de 5 provetes para a baridade das misturas MBF1, MBF2 e MBF3, determinados a partir da expressão (10).

Tabela 18 - Baridade das misturas [kg/m³]

Tipo de Mistura	Baridade [kg/m³]
MBF1	2093
MBF2	2125
MBF3	2027

É importante destacar que nenhum dos valores registados excede os valores de baridade máxima teórica, o que demonstra que o processo de construção dos provetes foi correto. Por outro lado, os valores mais elevados de baridade correspondem às percentagens mais

elevadas de betume, indicando estes provetes apresentam melhor compactação e, conseqüentemente, uma menor porosidade.

5.4.3 Porosidade

A porosidade das misturas foi calculada com base na expressão (11) e apresentam-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Porosidade das misturas

Tipo de Mistura	Porosidade [%]
MBF1	24,8
MBF2	24,9
MBF3	19,9

Nas MBF1 e MBF2 a porosidade média registada foi de 24,8% e 24,9%, respetivamente, para a mistura MBF3 a porosidade média registada foi de 19,9%. Os resultados enquadram-se nos valores estudados por outros autores para este tipo de misturas betuminosas a frio (Fernandes, 2017).

5.4.4 Vazios na mistura de agregados

Os resultados para os Vazios na Mistura de Agregados (VMA) foram obtidos a partir da expressão (12) e apresentam-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Vazios na Mistura de Agregados

Tipo de Mistura	VMA [%]
MBF1	40,5
MBF2	40,7
MBF3	29,0

No Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, 2014) não há qualquer referência para os valores de VMA para as misturas betuminosas a frio. No entanto, o valor mínimo especificado para as misturas betuminosas de camadas de desgaste AC 14 Surf (BB) é de 14%. Todas as misturas cumprem este requisito.

5.4.5 Vazios preenchidos com betume

Os resultados para os vazios preenchidos com betume (VFB) foram determinados a partir da expressão (13) e apresentam-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Vazios preenchidos com betume

Tipo de Mistura	VFB [%]
MBF1	38,7
MBF2	38,7
MBF3	31,5

5.5 Ensaios de desempenho das misturas

5.5.1 Ensaio de Marshall

Os resultados obtidos através do Ensaio Marshall para a Estabilidade e Deformação apresentam-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Estabilidade e deformação das misturas MBF1, MBF2 e MBF3 (Média 3 valores)

Mistura	Estabilidade [kN]	Deformação [mm]
MBF1	8,1	2,0
MBF2	6,2	1,6
MBF3	3,5	1,2

Os resultados obtidos de todas as misturas para a Estabilidade são superiores aos obtidos para as misturas prontas disponíveis no mercado e apresentadas na Tabela 4 (Fernandes 2017). Relativamente à deformação, as misturas do estudo experimental apresentam valores da mesma ordem de grandeza que as misturas prontas disponíveis no mercado.

5.5.2 Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta

Na Tabela 23 apresentam-se os resultados obtidos para o módulo de rigidez.

Tabela 23 - Módulo de Rigidez (Média 5 valores)

Mistura	Módulo de Rigidez [MPa]
MBF1	8241
MBF2	9457
MBF3	2112

Com base nos valores obtidos para o Módulo de rigidez para as misturas betuminosas MBF1, MBF2 e MBF3, pode-se concluir que quanto maior o valor da rigidez, menos flexível mais resistente será a mistura a deformações permanentes. Portanto, dado que a rigidez da mistura betuminosa MBF3 é menor do que as misturas MBF1 e MBF2, a mistura MBF3 é

mais flexível e menos resistente a deformações permanentes sob cargas, em comparação com as misturas betuminosas MBF1 e MBF2. Isto é benéfico para o tapamento de covas pois existe menor propensão à formação de fissuras e consequente desagregação.

5.5.3 Ensaio de sensibilidade à água

Os resultados da resistência à tração indireta (ITS) e resistência conservada da tração indireta (ITSR) foram obtidos através da expressão (14) e (15) e apresentam-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Resistência à tração indireta e resistência conservada da tração indireta (Média 3 valores)

Mistura	ITS [kPa]		ITSR [%]
	Seco	Imerso	
MBF1	330	410	124%
MBF2	310	280	90%
MBF3	70	50	71%

Na Figura 33 apresentam-se, a título de exemplo, os provetes após ensaio de sensibilidade à água, podendo verificar-se que exibem uma rotura do tipo C, de acordo com a NP EN12697-23:2003.



Figura 33 – Provetes após compressão apresentando rotura do tipo C

No Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, 2014) não há qualquer referência para os valores de sensibilidade à água (ITSR) para as misturas betuminosas a frio. No entanto, o valor mínimo especificado para as misturas betuminosas de camadas de desgaste MBA-BBA e MBR-BBR é de 75% e 65%, respetivamente. Todas as misturas cumprem este requisito.

Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar e otimizar misturas betuminosas de reparação rápida a frio, com especial ênfase na incorporação de materiais reciclados, em particular o Material Betuminoso Recuperado (MBR). Foram analisadas as principais propriedades que influenciam o desempenho mecânico dessas misturas, por meio de ensaios como Cântabro, Marshall, módulo de rigidez e sensibilidade à ação da água. Esta abordagem permitiu avaliar a influência de diferentes parâmetros da composição da mistura — como a granulometria, a morfologia dos agregados e o teor de ligante — na obtenção de um material com boa trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da produção de misturas de reparação com incorporação integral de MBR, desde que seja assegurada uma formulação adequada. Ressalta-se que nenhum dos valores obtidos ultrapassou os limites da baridade máxima teórica, o que confirma a qualidade do processo de moldagem dos provetes. Verificou-se ainda que os valores mais elevados de baridade corresponderam às misturas com maior teor de betume, evidenciando melhor compactação e, por conseguinte, menor porosidade.

As misturas MBF1 e MBF2 apresentaram porosidades médias de 24,8% e 24,9%, respectivamente, enquanto a mistura MBF3 registou uma porosidade média inferior, de 19,9%. Esses valores estão em consonância com os observados na literatura para misturas betuminosas a frio (Fernandes, 2017).

Embora o Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, 2014) não apresente especificações relativas ao volume de vazios no agregado mineral para misturas betuminosas a frio, o valor mínimo estabelecido para misturas de desgaste tipo AC 14 Surf (BB) é de 14%, requisito que foi cumprido por todas as formulações analisadas.

Os resultados do ensaio Marshall revelaram que todas as misturas apresentaram valores de estabilidade superiores aos verificados em misturas comerciais disponíveis no mercado, conforme indicado na Tabela 4 (Fernandes, 2017). No que diz respeito à deformação, os valores observados nas misturas experimentais mantiveram-se na mesma ordem de grandeza das soluções comerciais, reforçando o bom desempenho das formulações estudadas.

Com base nos resultados obtidos para o módulo de rigidez, constatou-se que a mistura MBF3, por apresentar menor rigidez em comparação com MBF1 e MBF2, é mais flexível e, portanto, menos resistente a deformações permanentes. Essa característica pode ser vantajosa em determinadas aplicações, como o tapamento de covas, onde a maior flexibilidade reduz a propensão à fissuração e subsequente desagregação do material.

Relativamente à sensibilidade à água (ITSR), apesar de o Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, 2014) não apresentar valores de referência para misturas betuminosas a frio, os valores mínimos definidos para outras misturas de desgaste — 75% para MBA-BBA e 65% para MBR-BBR — foram atendidos por todas as formulações testadas.

Em síntese, os resultados evidenciam que é tecnicamente viável produzir misturas betuminosas de reparação a frio com desempenho satisfatório a partir de resíduos industriais, desde que a formulação seja cuidadosamente ajustada. Este estudo contribui para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficazes na conservação de infraestruturas viárias, reforçando o potencial de reutilização de resíduos em aplicações de Engenharia Civil.

6.2 Trabalhos futuros

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento e otimizar o desempenho das misturas betuminosas de reparação rápida a frio, identificam-se diversas linhas de investigação que deverão ser exploradas em trabalhos futuros.

Em primeiro lugar, propõe-se o afinamento da composição das misturas no sentido de reduzir a porosidade final. A porosidade excessiva pode comprometer a durabilidade da mistura, facilitando a infiltração de água e a conseqüente perda de coesão interna. Ao ajustar as proporções entre os agregados, a granulometria e o teor de ligante, será possível alcançar uma estrutura mais densa, que ofereça maior resistência à ação da água e ao tráfego.

Outro aspeto relevante passa por repetir os ensaios de desempenho utilizando misturas com 100% de Material Betuminoso Recuperado (MBR), mas com diferentes teores de ligante. Tal abordagem permitirá avaliar de forma mais abrangente a influência do conteúdo de ligante no comportamento mecânico e na durabilidade das misturas recicladas. Adicionalmente, é essencial analisar o impacto de diferentes proveniências de MBR, uma vez que a variabilidade nas características granulométricas deste material (resultante de

diferentes tipos de pavimento ou processos de fresagem) poderá influenciar significativamente o desempenho final da mistura.

Sugere-se também avaliar o período de armazenamento das misturas, em condições controladas e reais, com vista a definir a sua durabilidade em estaleiro e as condições ótimas de conservação. Esta informação é essencial para garantir a disponibilidade e eficácia do produto em intervenções de emergência, assegurando que as misturas mantêm as propriedades desejáveis mesmo após longos períodos de armazenamento.

Por fim, torna-se fundamental realizar a aplicação das misturas em contexto real, sob condições ambientais variáveis e em diferentes tipos de pavimento. Esta etapa permitirá monitorizar a adesividade da mistura ao pavimento existente e a qualidade da compactação obtida *in situ*, aspetos cruciais para a eficácia da reparação e o prolongamento da vida útil da intervenção. A observação e análise do comportamento da mistura ao longo do tempo fornecerá dados importantes para validar ou ajustar os parâmetros definidos em laboratório.

Referencias bibliográficas

Abdel Raouf, M., & Williams, C. R. (2010). General rheological properties of fractionated switchgrass bio-oil as a pavement material. *Road Materials and Pavement Design (EATA)*, 325–353.

Abdel-Ghani, N. T., El-Sayed, H. A., & El-Habak, A. A. (2018). Utilization of by-pass cement kiln dust and air-cooled blast-furnace steel slag in the production of some “green” cement products. *HBRC Journal*, 14(3), 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcej.2017.11.001>

Abdul Rahman, N. R., Hainin, M. R., Abdul Hassan, N., & Ani, F. N. (2015). A review on the application of bio-oil as an additive for asphalt. *Jurnal Teknologi*, 72(5), 105–110.

Abreu, V. H. S. (2020). Uma visão geral sobre a aplicação da economia circular no setor de transporte rodoviário urbano. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET.

Adiansyah, J. S., Rosano, M., Biswas, W., & Haque, N. (2017). Life cycle assessment of site-specific sustainable water management practices in mining. *Journal of Cleaner Production*, 140(Part 2), 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.018>

Ahmadinia, E., Zargar, M., Rehan, K., Abdelaziz, M., & Shafiqh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Materials & Design*, 32, 4844 - 4849. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>

Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>

Alam, M., Arulrajah, A., & Ali, Y. (2012). Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. *Waste Management & Research*, 30. <https://www.researchgate.net/publication/225043621>

Alhassan, H. M., & Tanko, A. M. (2012). Characterization of solid waste incinerator bottom ash and the potential for its use. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2(4), 516–522.

American Coal Ash Association. (2018). Ash around the world. Ash at Work.

Antão, A. M. (2001). Os recursos minerais na Beira Baixa. *Associação Portuguesa de Geólogos, Geonovas*, (15), 45–59.

Antunes, D. (2014). Misturas betuminosas temperadas, do tipo SMA, com incorporação de material betuminoso reciclado e fibras celulósicas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Anupiya, S., Perera, M., Zhu, H., Saberian, M., Liu, M., Cameron, D., & Li, J. (2021). Application of glass in subsurface pavement layers: A comprehensive review. *Sustainability*, 13(21), 11825. <https://doi.org/10.3390/su132111825>

APA – Agência Portuguesa do Ambiente. (2019). Resíduos de Construção e Demolição – Resultados 2018 e evolução 2016-2018. Departamento de Resíduos.

APA – Agência Portuguesa do Ambiente. (2021). Relatório de Execução Anual. <https://www.apambiente.pt/>

- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Maghool, F., & Horpibulsuk, S. (2019). Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications. *Journal of Cleaner Production*, 230, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.084>
- Astrup, T., Muntoni, A., Poletini, A., Pomi, R., Van Gerven, T., & Van Zomeren, A. (2016). Treatment and reuse of incineration bottom ash. In M. N. V. Prasad & K. Kaimin (Eds.), *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention* (pp. 497–520). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00024-X>
- Bakare, M. D., Pai, R. R., Patel, S., & Shahu, J. T. (2019). Environmental sustainability by bulk utilization of fly ash and GBFS as road subbase materials. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 23(4), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000450)
- Balaguera, A., Carvajal, G. I., Albertí, J., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternatives: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.022>
- Bamigboye, G. O., Basse, D. E., Olukanni, D. O., Ngene, B. U., Adegoke, D., Odetoyan, A. O., Kareem, M. A., Enabulele, D. O., & Nworgu, A. T. (2021). Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124581>
- Baptista, A. (2006). *Misturas betuminosas recicladas a quente em central – Contribuição para o seu estudo e aplicação*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Beskou, N. D., Tsinopoulos, S. V., & Hatzigeorgiou, G. D. (2016). Fatigue cracking failure criterion for flexible pavements under moving vehicles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 476–479.
- Birlie Genet, M., Barantie Sendekie, Z., & Lemessa Jembere, A. (2023). Investigation and optimization of waste LDPE plastic as a modifier of asphalt mix for highway asphalt: Case of Ethiopian roads. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 200250. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100150>
- Biswas, S., (2016). *Pothole Condition in Canada and Evaluation of Maintenance Material*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiente, da Universidade de Alberta, Canada.
- Blight, G. (2011). Mine waste: A brief overview of origins, quantities, and methods of storage. In *Waste* (Vol. 1, pp. 77–88). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10005-1>
- BP. (2019). *BP Statistical Review of World Energy – 68th Edition*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- Branco, F. A., Ferreira, P. A., & Picado-Santos, L. G. (2005). *Pavimentos rodoviários*. Almedina.
- Butler, J. H., & Hooper, P. D. (2019). Glass waste. In *Waste* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00015-3>
- Cantero, B., Saéz del Bosque, I. F., Sánchez de Rojas, M. I., Matías, A., & Medina, C. (2022). Durability of concretes bearing construction and demolition waste as cement and coarse aggregate substitutes. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104722. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104722>

Capitão, S. D. (2014). Abertura e Tapamento de Valas em Pavimentos Rodoviários. Instituto Superior de Educação de Coimbra.

Carvalho, R. L., & Barreno, M. I. M. (2013). Avaliação do uso de materiais fresados de pavimentos asfálticos em novas misturas betuminosas. In XIX Congresso Brasileiro de Pavimentação (pp. xx–xx). Associação Brasileira de Pavimentação.

Center for Health, Environment and Justice. (2011). PVC: Bad news comes in threes – The poison plastic, health hazards and the looming waste crisis. Falls Church, VA: CHEJ.

CETO EP (2014). “Caderno de Encargos Tipo Obra – Características dos materiais”. Estradas de Portugal, S.A., Vol. 5, Capítulo 14.03, Setembro.

Chen, D., Gao, D., Capareda, S. C., Huang, S., & Wang, Y. (2019). Effects of hydrochloric acid washing on the microstructure and pyrolysis bio-oil components of sweet sorghum bagasse. *Bioresource Technology*, 277, 37–45.

Chowdhury, R., Apul, D., & Fry, T. (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>

Claisse, P. (2016). *Civil Engineering Materials*. Butterworth-Heinemann.

CONAMA. (2002). Resolução CONAMA nº 307/2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

Dantas, I. S. (2024). Contribuição da reciclagem de misturas betuminosas para a economia circular. Tese de Mestrado, Universidade do Minho.

Díaz, J. M. (2016). Life cycle assessment of asphalt mixtures in road construction: A review. *Construction and Building Materials*, 93, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>

Disfani, M. M., Arulrajah, A., & Bo, M. W. (2012). Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. *Journal of Cleaner Production*, 20, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.020>

DNIT (2005). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Pavimentos Rígidos. Brasília: DNIT, 2005.

Domingos, M. (2009). Patologias de pavimentos betuminosos flexíveis em meio urbano. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

Donnelly, L. J., & Bell, F. G. (2011). Geotechnical and environmental problems: Coal and spontaneous combustion. In *Coal and Peat Fires: A Global Perspective* (pp. 83–100). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52858-2.00005-0>

Ede, A. N. (2014). Cumulative damage effects of truck overloads on Nigerian road pavement. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 14, 21–26.

EN 1097-2:2010 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.

EN 1097-6:2003 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption.

EN 12697-1:2000 – Bituminous mixtures – Test methods – Part 1: Sampling.

EN 12697-11:2012 - Bituminous mixtures- Test methods for mix asphalt – Part 11: Determination of the affinity between aggregates and bitumen. Brussels: European Committee for Standardization; 2012.

EN 12697-17:2004 – Bituminous mixtures – Test methods – Part 17: Particle loss of porous asphalt specimens. Brussels: CEN, 2004.

EN 12697-34:2004+A1:2010 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Parte 34: Marshall test. Brussels: European Committee for Standardization; 2010.

EN 12697-35:2004 + A1 :2007 - Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing.

EN 12697-5:2002 – Bituminous mixtures – Test methods – Part 5: Determination of the binder content by extraction.

EN 12846-1:2011 – Bitumen and bituminous binders – Determination of efflux time by the efflux viscometer – Part 1: Bitumens

EN 12847:1999 – Bitumen and bituminous binders – Determination of storage stability of bituminous emulsions.

EN 13075-1:2000- Bituminous mixtures – Test methods – Part 1: Determination of the affinity between aggregate and bitumen.

EN 1426:2015 - Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Needle Penetration.

EN 1427:2010 - Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point. Ring and Ball method. Brussels: European Committee for Standardization; 2010.

EN 1427:2015 - Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Softening Point. Ring and Ball Method.

EN 1429:2013 – Bitumen and bituminous binders – Determination of residue on sieving of bituminous emulsions, determination of storage stability by sieving, and determination of water content

EN 1431:2009 – Bituminous binders – Determination of residual binder and oil distillate from bitumen emulsions by evaporation.

EN 933-1:2012 – Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method.

Eugénio, B. M. (2008). Relatório de Projeto – Especialização em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

European Asphalt Pavement Association. (2023). Asphalt in figures 2022. <https://eapa.org>

Fernandes, D. F. R. M. (2017). Avaliação da qualidade de misturas betuminosas para a reparação rápida a frio de pavimentos [Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa].

https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113703703/Dissertacao_MBF_DF_versaofinal.pdf

Fernandes, S., Silva, H. M. R. D., & Oliveira, J. R. M. (2019). Mechanical, surface and environmental evaluation of SMA mixtures with advanced binders using waste. *Road Materials and Pavement Design*, 20(2), 316–333. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1387169>

Ferreira, J. M. (2007). Pavimentos em espaços públicos urbanos – Contribuição para a análise e conceção de soluções [Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa].

Figueiredo, N. P. (2011). Avaliação e conservação de pavimentos rodoviários municipais com baixo tráfego – Contribuição para uma metodologia de apoio [Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra].

Flynn. (1993). Recycled plastic finds home in asphalt binder. *Scranton Gillette Communications*, 31(3), 41 - 47. Obtido de <https://trid.trb.org/view/372099>

Freire, A. C. (2002). Incorporação de resíduos em misturas betuminosas: Contributo para a sustentabilidade da construção rodoviária [Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa]. Repositório da ULisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/5808>

Furlan, A.P., Gouveia, L.T., Fabbri, G.T.P. e Fernandes Jr., J.L. (2004). Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas. *Anais do 17º Encontro de Asfalto*. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). Rio de Janeiro, dezembro de 2004, 8p.

Ghataora, G. S., Ghazireh, N., & Hall, N. (2015). Remediation of acid generating colliery spoil using steel slag: Case studies. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(2), 75–84. <https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0024>

Gonzalez, O., Peña, J., Muñoz, M., Santamaría, A., Pérez-Lepe, A., Martínez - Boza, F., & Gallegos, C. (2022). Rheological Techniques as a Tool To Analyze Polymer–Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends. *Energy & fuels*, 1258 - 1263. doi:<https://doi.org/10.1021/ef020049l>

Government of India – Ministry of Steel. (2019). Strategy on resource efficiency in steel sector. NITI Aayog. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Gramacho, B. B., et al. (2013). Construção sustentável: Soluções para construir agredindo menos o ambiente.

Günay, E., Kara, M., Kavaklı, B., Tayfur, S., Eren, K., & Yildırım, S. A. (2004). Steel slag and waste management. *Key Engineering Materials*, 264–268, 2481–2484. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.2481>

Gürdür Broo, D., Lamb, K., Ehwi, R. J., Parn, E., Koronaki, A., Makri, C., & Zomer, T. (2021). Built environment of Britain in 2040: Scenarios and strategies. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102645. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102645>

Haider, S., Hafeez, I., Jamal, Ullah, & Rafi. (2020). Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures. *Construction*

Hassan, K. E., Woodward, D., & Woodside, A. (2004). A performance related overall asphalt mix design and analysis system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 157(2), 91–103. DOI: 10.1680/tran.2004.157.2.91

Heidrich, C., Feuerborn, H., & Weir, A. (2013). Coal combustion products: A global perspective. World of Coal Ash Conference (WOCA). <http://www.flyash.info/and> Building Materials, 117496. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117496>

Hoy, M., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., & Arulrajah, A. (2016). Recycled asphalt pavement–fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. *Science of the Total Environment*, 573, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.078>

Huang, B., Wang, X., Li, G., & Shu, X. (2018). Recycling of road construction materials: Review and prospects. *Construction and Building Materials*, 190, 928–938. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.124>

Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>

Huang, Y., Wang, L., Wu, T., Liu, W., & Tang, Q. (2023). Mechanical properties and heavy metal leaching behaviors of municipal solid waste incineration bottom ash as road embankment fillings. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136355>

Infraestruturas de Portugal. (2025). Plano estratégico rodoviário nacional 2025. Infraestruturas de Portugal.

Jafar, J. J. (2016). Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of KSCE *Journal of Civil* doi:<https://doi.org/10.1007/s12205-015-0511-0> Engineering, 243 - 249.

Jala, S. K., & Sharma, P. (2019). Effect of cement kiln dust and RBI Grade 81 on engineering properties of plastic clay. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 32, pp. 37–49). https://doi.org/10.1007/978-981-13-7017-5_5

Kokh, S. N., Sokol, E. V., & Sharygin, V. V. (2015). Ellestadite-group minerals in combustion metamorphic rocks. In *Coal and Peat Fires: A Global Perspective* (Vol. 3, pp. 543–562). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59509-6.00020-X>

Krayushkina, K., Prentkovskis, O., Bieliatynskiy, A., & Junevicius, R. (2012). Use of steel slags in automobile road construction. *Transport*, 27(2), 129 - 137. doi:<https://doi.org/10.3846/16484142.2012.690093>

Kubanek, J. (2013). Asphalt mixtures with reclaimed asphalt: Mix design and performance evaluation [Master's thesis, Delft University of Technology]. TU Delft Repository. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4e0cfe15-905c-4f43-b5b0-4c9f7a314a3a>

Kumar, R. (2017). Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. *Construction and Building Materials*, 142, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.077>

Kumar, V., & Panwar, R. S. (2019). Mitigation of greenhouse gas emissions by fly ash stabilization and sisal fibre reinforcement of clay subgrade for road construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 219(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/219/1/012020>

Leng, Z., Sreeram, A., Kumar Padhan, R., & Tan, Z. (2018). Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Journal of Cleaner Production*, 615 - 625. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.119>

- Li, J., Shen, W., Zhang, B., Ji, X., Chen, X., Ma, W., et al. (2019). Investigation on the preparation and performance of clinker-fly ash-gypsum road base course binder. *Construction and Building Materials*, 212, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.253>
- Ling, T. C., Mohamad, H., & Hassan, N. A. (2016). Performance of waste materials in hot mix asphalt and warm mix asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 987–1000. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.090>
- Linyi, Y., Lan, J., Chen, R., & Jiang, J. (2022). Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130405>
- Lopes, J. (2015). Estudo do desempenho de misturas betuminosas a quente e a temperaturas reduzidas [Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra]. *Estudo Geral*. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/31265>
- Lozano, D. C. P., Ramírez, C. X., Chaparro, J. A. S., Thomas, M. J., Gavard, R., & Jones, H. E. (2020). Characterization of bio-crude components derived from pyrolysis of soft wood and its esterified product by ultrahigh resolution mass spectrometry and spectroscopic techniques. *Fuel*, 259, 116085.
- Luo, H.-L., Chen, S.-H., Lin, D.-F., & Cai, X.-R. (2017). Use of incinerator bottom ash in open-graded asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 497–506.
- MacArthur, F. E. (2013). *Towards the circular economy Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org>
- Martinho, F. (2014). *Misturas temperadas com subprodutos industriais – Caracterização e validação tecnológica* [Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa].
- Mazhoud, B., Sedran, T., Cazacliu, B., Cothenet, A., & Torrenti, J. M. (2022). Influence of residual mortar volume on the properties of recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 57, 104945. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104945>
- McGinnis, M. J., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon, B. D., & Kurama, Y. C. (2017). Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 154, 258–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.015>
- Modarres, A., & Ayar, P. (2014). Moisture damage evaluation of asphalt mixtures using anti-stripping additives, glass and carbon fibers. *Construction and Building Materials*, 72, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.011>
- Mogawer, W., Fini, E., Austerman, A., Booshehrian, A., & Zada, B. (2016). Performance characteristics of high reclaimed asphalt pavement containing bio-modifier. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 753–767. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1144224>
- Moreno, M., & Costa, J. (2009). *Guia para uma gestão sustentável dos resíduos*. LIPOR.
- Moschen-Schimek, J., Kasper, T., & Huber-Humer, M. (2023). Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste. *Waste Management*, 167, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.016>

Movilla - Quesada, D., Raposeiras, A. C., Silva - Kein, L. T., Lastra, González, & Catro, F. (2019). Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. *Waste Management*, 751 - 760. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.018>

Munyagi, A.B. (2006), Evaluation of cold asphalt patching mixes. Dissertação de Mestrado, na Universidade de Stellenbosch

Museu Nacional de História Natural e da Ciência. (2004). Jóias da Terra: O minério da Panasqueira. Universidade de Lisboa. <https://museus.ulisboa.pt/joias-da-terra-o-o-minerio-da-panasqueira>

NAÇÕES UNIDAS. World Population Prospects 2019: Highlights. New York: United Nations, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Publications/>. Acesso em: 13 jul. 2025.

Nie, X., Li, Z., Yao, H., Hou, T., Zhou, X., & Li, C. (2020). Waste bio-oil as a compatibilizer for high content SBS modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 38(4), 316–322. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1704005>

Noor, A., & Muhammad, A. U. (2022). A mini-review on the use of plastic waste as a modifier of the bituminous mix. *Cleaner Materials*, 3, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100059>

NP EN 1097-2:2011 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.

NP EN 12697-1:2000 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 1: Amostragem.

NP EN 12697-12:2008 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 12: Determinação da sensibilidade à água dos provetes betuminosos.

NP EN 12697-23:2003 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 23: Determinação da resistência à tração indireta dos provetes betuminosos.

NP EN 12697-26:2004 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 26: Rigidez.

NP EN 12697-29:2002 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 29: Determinação da resistência à desagregação do betume dos agregados.

NP EN 12697-30:2004 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 30: Preparação de provetes por compactador de impacto.

NP EN 12697-35:2004 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 35: Mistura em laboratório.

NP EN 12697-5:2002 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 5: Determinação do teor de ligante.

NP EN 12697-6:2003 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 6: Determinação do teor de ligante por extração.

NP EN 12697-8:2003 – Misturas betuminosas – Métodos de ensaio – Parte 8: Determinação das características de vazios dos provetes betuminosos.

NP EN 13043:2010 – Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

NP EN 13108-1:2008 – Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso.

NP EN 933-3:2011 – Ensaio para determinação das propriedades geométricas dos agregados – Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de forma.

Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., & Kozinski, J. A. (2020). A review on subcritical and supercritical water gasification of biogenic, polymeric and petroleum wastes to hydrogen-rich synthesis gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109586>

ONU Meio Ambiente. (2018). Acabe com a poluição plástica neste Dia Mundial do Meio Ambiente. <https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/>

Park, S. W., Tia, M., Ruth, B. E., & Roque, R. (2003). Investigation of field and laboratory rutting performance of Superpave mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72, 771–806.

PARLAMENTO EUROPEU (2018). Economia circular: definição, importância e benefícios. Bruxelas: Parlamento Europeu, 2018. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STOO5603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>. Acesso em: 13 jul. 2025.

Pereira, P. A. A. (2009). Caracterização e avaliação do comportamento mecânico de misturas betuminosas com incorporação de agregados reciclados [Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra]. Estudo Geral – Repositório Científico da UC. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/13169>

Perera, S., Arulrajah, A., Wong, Y. C., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2019). Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials. *Construction and Building Materials*, 221, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.047>

Pimentel, E. (2007). Utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em misturas betuminosas a quente [Dissertação de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/660>

Prowell, B. D., Zhang, J., & Brown, E. R. (1995). Predicting moisture sensitivity of asphalt mixes. National Center for Asphalt Technology (NCAT Report No. 95-05). Auburn University. <https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep95-05.pdf>

Reyes-Ortiz, O., Alvarez, J., Agudelo, E., Rivera, J. E., & Camacho, J. E. (2012). Traditional and modified asphalt with rubber tire additive. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.01.318>

Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2013). Warm mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>

Saberian, M., Li, J., & Cameron, D. (2019). Effect of crushed glass on behavior of crushed recycled pavement materials together with crumb rubber for making a clean green base and subbase. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002765)

Santos, L., Fonseca, M., Almeida, A., & Capitão, S. (2020). Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Construction and Building Materials*, 247, 117253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117253>

Santucci, L. (2001). Rut resistant asphalt pavements. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Segui, P., Mahdi, A., Amrani, M., & Mostafa, B. (2023). Mining wastes as road construction material: A review. *Minerals*, 13(1), 90. <https://doi.org/10.3390/min13010090>

Seo, M., Lee, S.-Y., Lee, C., & Cho, S.-S. (2019). Recycling of cement kiln dust as a raw material for cement. *Environments*, 6(10), 113. <https://doi.org/10.3390/environments6100113>

SÉTRA/LCPC. (2005). NF P 98-331:2005 – Essais relatifs aux chaussées – Détermination de la sensibilité à l'eau des mélanges hydrocarbonés. Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer – France.

Shiva Bhushan, J. Y. V., Parhi, P. S., & Umashankar, B. (2019). Geotechnical characterization of construction and demolished (C&D) waste. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 45–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0899-4_4

Silva, L. F. O., & Oliveira, M. L. S. (2014). Nanominerals and ultrafine particles from Brazilian coal fires. In Stracher, G. B., Prakash, A., & Sokol, E. V. (Eds.), *Coal and peat fires: A global perspective* (Vol. 3, pp. 38–55). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59509-6.00002-8>

Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. (2020). Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>

Sojobi, A. O., Nwobodo, S. E., & Aladegboye, O. J. (2016). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. *Cogent Engineering*, 3(1), 1133480. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1133480>

Su, N., & Chen, J. S. (2002). Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. *Resources, Conservation and Recycling*, 35(4), 259–274. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00007-1)

Suescum-Morales, D., Romero-Esquinas, A., Fernandez-Ledesma, E., Fernandez, J. M., & Jimenez, J. R. (2019). Feasible use of colliery spoils as subbase layer for low-traffic roads. *Construction and Building Materials*, 229, 116910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116910>

Sugiyanto, G. (2017). Characterization of asphalt concrete produced from scrapped tire rubber. *Engineering Journal*, 21(4), 193–206. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.4.193>

Taha, Y., Benarchid, Y., & Benzaazoua, M. (2021). Environmental behavior of waste rocks-based concrete: Leaching. *Resources Policy*, 74, 101419. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101419>

Tayh, S., Muniandy, R., Hassim, S., Mohd Jakarni, F., & Aburkaba, E. (2014). An overview of utilization of bio-oil in hot mix asphalt. *WALIA Journal*, 30(S3), 131–141.

Temesgen, A., Storsletten, V., & Jakobsen, O. (2019). Circular economy – Reducing symptoms or radical change? *Philosophy of Management*, 18, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s40926-019-00113-z>

Toraldo, E., Saponaro, S., Careghini, A., & Mariani, E. (2013). Use of stabilized bottom ash bound layers of road pavement. *Journal of Environmental Management*, 121, 117–123.

Torgal, F. P., & Jalali, S. (2010). A sustentabilidade dos materiais de construção. [PDF].

United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). Single-use plastic: A roadmap for sustainability. <https://www.unenvironment.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability>

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2016). Advancing sustainable materials management: 2014 fact sheet. Office of Land and Emergency Management. <https://www.epa.gov/smm>

UTEP – Usina de Tratamento Ecológico de Pneus. Trituradora de pneus. Disponível em: <https://www.utep.com.br/trituradora-de-pneus.php>. Acesso em: 13 jul. 2025.

Vasudevan, R., Chandra Sekar, R., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2002). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 28, 311 - 320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031>

Videira, F. (2014). Manual de conservação de pavimentos para pequenas redes rodoviárias municipais: Bases para sua elaboração [Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra].

Vignesh, H., Ramesh Babu, N., Manivasagan, V., Saganya, S., & Eajas Basha, M. (2013). Emerging trends in greener pavements. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(1), 1–4. <https://doi.org/10.1177/2393957514555052>

Vijayakumar, A., Kumar, S. N., & Tejareddy, P. A. (2019). Utilization of waste materials for the strengthening of pavement subgrade—A research. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(9, Special Issue 2), 209–212. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I1041.0789S219>

Weber, B., & Kroll, J. (2019). Global Recycling, 24. *The Magazine for Business Opportunities & International Markets*.

Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 66 - 72.

Yonus Ali, M. M., Newman, G., Arulrajah, A., & Disfani, M. (2011). Application of recycled glass–crushed rock blends in road pavements. *Australian Geomechanics Journal*, 46, 113–121. <https://www.researchgate.net/publication/288138717>

Zhao, W., Qian, G., & Yang, Q. (2025). Sustainable pavement design: A comprehensive study on incorporating 100% recycled asphalt pavement and utilizing 100% industrial solid waste. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139972>