

**Desempenho de misturas betuminosas
temperadas com incorporação de MBR
(Misturas Betuminosas Recuperadas) e
resíduos plásticos**

(Versão final após defesa)

João Gualberto Massa Cordeiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(Mestrado integrado)

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

Maio de 2023

Declaração de Integridade

Eu, João Gualberto Massa Cordeiro, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 40310 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 31 /05 /2023

João Cordeiro

Agradecimentos

O estudo do presente trabalho foi desenvolvido na Universidade da Beira Interior (UBI), no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), sob orientação da Prof.^a Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida.

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos aqueles que me ajudaram durante a realização desta dissertação. Primeiramente, quero agradecer à minha família, à minha irmã Daniela Cordeiro, ao meu pai Gualberto Cordeiro e à minha mãe Luísa Cordeiro, por sempre me terem apoiado e encorajado a lutar pelos meus objetivos, pelo amor incondicional, apoio e incentivo durante toda a minha vida académica. Sem o seu suporte e apoio esta conquista não seria possível.

Também gostaria de agradecer à minha orientadora, Prof.^a Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida pela sua amizade, comprometimento, constante incentivo, orientação, paciência e disponibilidade ao longo de todo o processo.

À CEPSA Portuguesa, na pessoa da Engenheira Teresa Carvalho, pela emulsão betuminosa fornecida e pelo seu contributo na realização deste estudo.

À Proas Betumes CEPSA, na pessoa do Engenheiro Antonio García Siller, pela realização dos ensaios de caracterização das misturas betuminosas recuperadas, nos laboratórios de Madrid.

Ao Sérgio Patrício e Elisabete Serrano pela realização do ensaio Marshall e do ensaio de sensibilidade à água na sua empresa, InfraLab – Laboratório de Materiais de Construção Civil e Obras Públicas.

Ao Sr. António Félix, técnico dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI, pela boa disposição transmitida e pelo importante apoio prestado na execução do trabalho experimental.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos e colegas de curso por estarem sempre presentes. Vocês são a minha segunda família e estou-vos eternamente grato por terem tornado o meu percurso académico memorável.

Gostaria de agradecer também à Lúcia e aos seus pais, Isidro Pires e Maria Élia Pires, por todo o amor, apoio e incentivo durante todo este processo. A sua presença e incentivo ajudaram-me a superar muitos desafios ao longo do caminho.

Resumo

A indústria de construção rodoviária tem adotado novas técnicas de produção de misturas betuminosas, como a produção a temperaturas mais baixas, incorporação de misturas betuminosas recuperadas (MBR) e resíduos, para reduzir os impactos ambientais, o consumo de energia e as emissões de gases para a atmosfera.

O principal objetivo deste estudo é desenvolver uma mistura betuminosa temperada com incorporação de uma elevada taxa de MBR e plástico de alta densidade (HDPE) com uma emulsão catiónica de rotura lenta (RECIEMUL 90 C60B5 REC) para uma camada de base, comparando o seu desempenho mecânico com o de uma mistura a quente.

Esta dissertação apresenta, primeiramente, uma revisão bibliográfica, que aborda a temática das misturas betuminosas temperadas, respetivas temperaturas de produção, resumo da evolução ao longo da história, técnicas de produção mais utilizadas e vantagens e desvantagens da sua utilização. Posteriormente, faz-se uma breve abordagem a vários resíduos utilizados nas misturas betuminosas, expondo-se os prós e contras da sua aplicação e os seus métodos de incorporação. Em seguida, apresenta-se a metodologia utilizada na produção de misturas em laboratório, com diferentes percentagens de ligante e plástico. Por último, realiza-se o ensaio de sensibilidade à água, de forma a avaliar o seu efeito na melhor mistura produzida, sendo, posteriormente, apresentadas as considerações finais e recomendações para estudos futuros.

Os resultados obtidos mostraram que as misturas produzidas com incorporação de 65% de MBR e 4% de HDPE, cumpriram os requisitos preconizados no Cadernos de Encargos das Estradas de Portugal, atualmente Infraestruturas de Portugal, nomeadamente, Porosidade com 4.7 %, VMA com 14.4%, Estabilidade Marshall com 13.3 kN, Quociente de Marshall com 2.6 kN/mm e Resistência conservada em tração indireta com 100%. A deformação Marshall apresentou 5.4mm sendo o valor máximo 4mm. No que diz respeito à mistura desenvolvida no estudo, a mesma apresenta grandes vantagens ambientais e económicas, ainda assim são necessários mais estudos para potenciar este novo tipo de misturas.

Palavras-chave

Misturas betuminosas temperadas; Misturas betuminosas recuperadas; Resíduos; Plástico de alta densidade;

Abstract

The road construction industry has adopted new techniques for producing asphalt mixtures, such as production at lower temperatures, incorporation of reclaimed asphalt pavement (RAP) and waste materials to reduce environmental impacts, energy consumption, and emissions of gases into the atmosphere.

The main objective of this study is to develop a warm mix asphalt with the incorporation of high ratio of RAP and high-density polyethylene (HDPE) with a slow breaking cationic emulsion (RECIEMUL 90 C60B5 REC) for a base layer, comparing its mechanical performance with a hot mixture.

This dissertation first presents a literature review that addresses the topic of tempered asphalt mixtures, their production temperatures, a summary of their evolution throughout history, the most used production techniques, and the advantages and disadvantages of their use. Subsequently, a brief overview of various waste materials used in asphalt mixtures is provided, including the pros and cons of their application and methods of incorporation. Next, the methodology used in the laboratory production of mixtures with different binder and plastic percentages is presented. Finally, a water sensitivity test is performed to evaluate its effect on the best produced mixture, followed by final considerations and recommendations for future studies.

The results obtained showed that the mixtures produced with an incorporation of 65% MBR and 4% HDPE met the requirements recommended in the, Caderno de Encargos das Estradas de Portugal currently Infraestruturas de Portugal, namely, Porosity with 4.7%, VMA with 14.4%, Marshall Stability with 13.3 kN, Marshall Quotient with 2.6 kN/mm, and Indirect Tensile Strength Ratio with 100%. The Marshall deformation was 5.4mm, with a maximum value of 4mm. Regarding the mixture developed in the study, it has significant environmental and economic advantages, although further studies are necessary to enhance this new type of mixture.

Keywords

Warm mix asphalt; Reclaimed Asphalt Pavement; High Density Polyethylene; Waste

Índice

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Quadros	xv
Lista de Acrónimos	xvii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do trabalho.....	2
Capítulo 2 – Misturas Betuminosas Temperadas.....	5
2.1 Introdução	5
2.2 Temperatura de produção de misturas betuminosas	5
2.3 Evolução das misturas betuminosas temperadas	7
2.4 Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas.....	10
2.4.1 Aditivos orgânicos.....	10
2.4.2 Aditivos químicos	11
2.4.3 Formação de espuma de betume	13
2.5 Vantagens da utilização das misturas betuminosas temperadas	14
2.6 Desvantagens da utilização das misturas betuminosas temperadas ..	16
Capítulo 3 – Utilização de resíduos em misturas betuminosas.....	17
3.1 Introdução	17
3.2 Misturas Betuminosas Recuperadas	17
3.3 Plásticos.....	20
3.4 Granulado de borracha de pneu.....	23
3.5 Agregados siderúrgicos	24
3.6 Cinzas Volantes	25
3.7 Óleo alimentar	26
3.8 Resíduos de construção e demolição	27
3.9 Resíduos de Vidro	28

Capítulo 4 – Trabalho experimental.....	29
4.1 Introdução	29
4.2 Caracterização dos materiais utilizados	29
4.2.1 Agregados naturais	29
4.2.2 Misturas Betuminosas Recuperadas	30
4.2.3 Plástico de alta densidade.....	31
4.2.4 Ligantes Betuminosos	33
4.2.5 Análise Granulométrica.....	34
4.2.6 Massa Volúmica.....	35
4.3 Determinação da composição das misturas betuminosas	36
4.3.1 Composição granulométrica	37
4.3.2 Estimativa do teor de ligante.....	39
4.3.3 Determinação do teor ótimo de emulsão	41
4.3.3.1 Baridade máxima teórica	43
4.3.3.2 Baridade.....	44
4.3.3.3 Porosidade, vazios na mistura de agregados e vazios nos agregados cheios de betume	45
4.3.3.4 Ensaio de Marshall	47
4.3.3.5 Escolha do teor ótimo de emulsão	49
4.3.4 Determinação do teor ótimo de plástico de alta densidade	50
4.4 Ensaio de sensibilidade à água.....	51
Capítulo 5 – Considerações finais e recomendações para estudos futuros ..	57
Bibliografia.....	61
Acervo Normativo	71

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Classificação de misturas betuminosas conforme temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões de gases (Dinis-Almeida, 2010)	6
Figura 2.2 - Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas (adaptado de Valente, 2019)	10
Figura 2.3 - Produção de espuma de betume com injeção de água (Wirtgen, 2004 citado por Pereira, 2010)	14
Figura 3.1 - Aplicações do fresado nos países europeus em 2020 (Adaptado de EAPA a, 2022)	18
Figura 3.2 - Economia circular das MBR (adaptado de EAPA b, 2022)	20
Figura 3.3 - A contribuição de diferentes países na produção de WCO em percentagem (adaptado de N. Xu et al., 2023)	26
Figura 4.1 - Agregados naturais utilizados na produção das misturas betuminosas ...	30
Figura 4.2 - MBR	30
Figura 4.3 - Tubo de rega de alta densidade	32
Figura 4.4 - Moinho (DECA-UBI)	32
Figura 4.5 - HDPE granulado	33
Figura 4.6 - Agitador (DECA-UBI)	34
Figura 4.7 - Curva granulométrica dos agregados, HDPE e MBR	35
Figura 4.8 - Picnómetro AccuPyc 1330 (DECA-UBI)	36
Figura 4.9 - Curvas granulométricas das misturas MQ e MT	38
Figura 4.10 - Curvas granulométricas das misturas MTH4, MTH5 e MTH6	38
Figura 4.11 - Provetes cilíndricos produzidos: a) MQ b) MT	41
Figura 4.12 - Temperatura de produção das misturas temperadas	42
Figura 4.13 - Etapas de produção das misturas betuminosas	43
Figura 4.14 - Baridade saturada com superfície seca das misturas MT	44
Figura 4.15 - Porosidade das misturas MT	46
Figura 4.16 - VMA das misturas MT	47
Figura 4.17 - VFB da mistura MT	47
Figura 4.18 - Equipamento utilizado na realização do ensaio Marshall: a) Prensa b) Banho de imersão	48
Figura 4.19 - Resultados de Estabilidade e Deformação do ensaio Marshall	49
Figura 4.20 - Grupo imerso submetido ao banho de vácuo	53
Figura 4.21 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral (InfraLab)	54

Figura 4.22 - Classificação de roturas no ensaio ITS (EN 12697-23)	55
Figura 4.23 - Rotura dos provetes: a) Seco b) Imerso	56

Lista de Quadros

Quadro 2.1 - Tecnologias de formação de espuma de betume (Adaptado de Mohd Hasan et al., 2017)	13
Quadro 3.1 - Reutilização e Reciclagem das MBR em alguns países da Europa (adaptado de EAPA Asphalt in Figures, 2021)	19
Quadro 3.2 - Ponto de fusão de alguns plásticos reciclados	21
Quadro 3.3 - Resíduos Plásticos que podem ser reutilizados em misturas betuminosas segundo o método húmido (adaptado de You et al., 2022)	22
Quadro 3.4 - Resíduos Plásticos que podem ser reutilizados em misturas betuminosas segundo o método seco (adaptado de (You et al., 2022)	23
Quadro 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização das MBR (Proas Betumes CEPESA)	31
Quadro 4.2 - Características do betume 50/70	33
Quadro 4.3 - Características da emulsão betuminosa RECIEMUL 90 (C60B5 REC)	34
Quadro 4.4 - Análise granulométrica dos agregados, HDPE e MBR	35
Quadro 4.5 - Massa volúmica dos componentes das misturas	36
Quadro 4.6 - Designação das misturas betuminosas produzidas	37
Quadro 4.7 - Granulometria das misturas betuminosas produzidas	37
Quadro 4.8 - Composição das misturas betuminosas em estudo (massa total de agregados)	39
Quadro 4.9 - Percentagem de teor de betume MTH	40
Quadro 4.10 - Percentagem de emulsão a adicionar às misturas betuminosas temperadas	41
Quadro 4.11 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas	44
Quadro 4.12 - Requisitos da mistura AC 20 base (MB)	49
Quadro 4.13 - Resultados das misturas betuminosas MQ e MT	50
Quadro 4.14 - Resumo dos resultados das misturas MTH4, MTH5 e MTH6	51
Quadro 4.15 - Composição granulométrica das misturas MTH-V2	51
Quadro 4.16 - Resumo dos resultados das misturas MTH4-V2, MTH5-V2 e MTH6-V2	51
Quadro 4.17 - Baridade e Porosidade dos provetes separados por grupos	52
Quadro 4.18 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água	55
Quadro 4.19 - Resumo das propriedades da mistura MTH4	56

Lista de Acrónimos

UBI	Universidade da Beira Interior
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
MBT	Misturas Betuminosas Temperadas
FHWA	Federal Highway Administration
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
NAPA	National Asphalt Pavement Association
EUA	Estados Unidos da América
UCPRC	University of California Pavement Research Center
CALTRANS	California Department of Transportation
AASHTO	American Association of State Highway And Transport Official
EAPA	European Asphalt Pavement Association
CO ₂	Dióxido de Carbono
SO ₂	Dióxido de Enxofre
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
NO _x	Óxido de Azoto
MBR	Misturas Betuminosas Recuperadas
ND	No Data
PS	Polystyrene
PP	Polypropylene
LDPE	Low Density Polyethylene
HDPE	High Density Polyethylene
PET	Polyethylene Terephthalate
PU	Polyurethane
PVC	Polyvinyl Chloride
PE	Polyethylene
PMMA	Polymethyl Methacrylate
ATH	Aluminium trihydroxide
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PEX	Cross-linked Polyethylene
BFS	Blast Furnace Slags
EAF	Electric Arc Furnace
WCO	Waste cooking oil
SMA	Stone Mastic Asphalt

MQ	Mistura betuminosa a Quente com 100% de agregados naturais
MT	Mistura betuminosa temperada com emulsão e 65% de MBR
MTH	Mistura betuminosa temperada com emulsão, 65% de MBR e HDPE
EP	Estradas de Portugal
EN	European Standard
ATSM	American Society for Testing and Materials
MB	Macadame Betuminoso
Pb	Percentagem de betume
Pb _N	Percentagem de betume novo
E	Percentagem de emulsão betuminosa
ρ_{mc}	Baridade máxima teórica da mistura betuminosa
ρ_{bssd}	Baridade saturada com superfície seca
VMA	Vazios na mistura de agregados
VFB	Vazios nos agregados cheios de betume
V _m	Porosidade da mistura
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio
ITS	Indirect Tensile Strength

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Enquadramento

A indústria da construção rodoviária é responsável por uma série de impactos ambientais significativos, como a poluição atmosférica e sonora, a utilização de recursos naturais em grande quantidade e a produção de resíduos. Resíduos estes, que são frequentemente colocados em aterros, não possuindo mais utilidade ou até mesmo incinerados. Estes impactos verificam-se não só na fase de produção, mas também na de pavimentação, sendo necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, a fim de minimizar as desvantagens ambientais desta indústria.

Neste sentido, surgiram várias técnicas de redução das temperaturas de produção e de pavimentação de misturas betuminosas, que para além de minorarem as emissões geradas, vêm beneficiar economicamente a indústria de construção rodoviária pela diminuição do consumo de energia. A utilização de misturas betuminosas temperadas reduz a emissão de gases como, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, compostos orgânicos voláteis e óxido de azoto e diminui o consumo de energia entre 18% a 30%, proporcionando melhores condições de trabalho aos trabalhadores (Behnood, 2020).

Os recursos consumidos na produção de misturas betuminosas são limitados. Neste âmbito, surgiu o conceito de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) estas, são misturas provenientes de fresagem de camadas betuminosas de pavimentos, que vêm diminuir o consumo de agregados e ligante através da adição à mistura de um rejuvenescedor. Apesar das misturas betuminosas temperadas e a adição de MBR apresentarem algumas desvantagens individualmente, quando em conjunto têm um enorme potencial para substituir as misturas tradicionais a quente (Guo et al., 2020).

Atualmente, a humanidade enfrenta outro grande desafio, a gestão dos resíduos plásticos. A incorporação deste tipo de resíduo em misturas betuminosas, para além de permitir a solução do problema anteriormente referido, diminui a procura de agregados naturais por parte da indústria de construção rodoviária. A utilização de plástico tem atraído a atenção de muitos estudos na última década, que relatam várias melhorias nas propriedades das misturas betuminosas como, melhoria nas propriedades mecânicas, durabilidade do pavimento, resistência à fadiga, entre outras (You et al., 2022).

Devido às exigências cada vez maiores da União Europeia, por uma Europa mais sustentável e à demanda por estudos que caracterizem e estabeleçam formulações para a aplicação de novos tipos de misturas betuminosas, considerou-se oportuno neste trabalho, avaliar o desempenho de misturas betuminosas temperadas com incorporação de MBR e plástico de alta densidade com o propósito de desenvolver maior conhecimento acerca do tema e, se possível, contribuir para uma aplicação mais significativa deste tipo de misturas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho passa por desenvolver uma formulação de uma mistura betuminosa temperada com incorporação de elevada taxa de MBR e resíduos plásticos para uma camada de base, respeitando os requisitos preconizados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, atualmente Infraestruturas de Portugal (EP, 2014) e avaliar o seu desempenho.

O programa experimental basear-se-á na produção de uma mistura a quente, com o intuito de servir de mistura de referência, e de misturas betuminosas temperadas com incorporação de MBR e diferentes quantidades de plástico de alta densidade através do método seco, depois de uma prévia caracterização de todos os materiais constituintes da mistura. Posteriormente realizar-se-ão ensaios de avaliação de desempenho mecânico das misturas betuminosas por meios do ensaio de Marshall e de Sensibilidade à água segundo as normas em vigor.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, resumidos da seguinte forma:

No capítulo 1 – Introdução, é feito um enquadramento do tema desenvolvido no estudo, tendo uma abordagem genérica à importância da utilização das misturas betuminosas temperadas, MBR e resíduos plásticos, assim como os objetivos do desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 2 - Misturas Betuminosas Temperadas, apresenta-se o estado de arte das misturas betuminosas temperadas, contemplando a sua temperatura de produção, um

resumo da sua evolução ao longo da história, técnicas de produção mais utilizadas e, vantagens e desvantagens da sua utilização.

No capítulo 3 - Utilização de resíduos em misturas betuminosas, descreve-se o estado de arte das misturas betuminosas com incorporação de resíduos, apresentando vantagens e desvantagens assim como métodos de adição dos mesmos.

No capítulo 4 - Trabalho experimental, apresenta-se a caracterização dos materiais utilizados, formulação das misturas, determinação do teor ótimo de ligante e a melhor taxa de incorporação de plástico através da avaliação dos resultados do ensaio Marshall e das propriedades fundamentais como a baridade e porosidade. É neste capítulo que também é realizado o ensaio de sensibilidade à água da melhor mistura produzida e a apresentação dos resultados laboratoriais.

No capítulo 5 - Considerações finais e recomendações para estudos futuros, são apresentadas as considerações finais do estudo e recomendações para estudos futuros.

Capítulo 2 – Misturas Betuminosas Temperadas

2.1 Introdução

O setor rodoviário tem vindo a desenvolver e aprimorar misturas betuminosas a baixas temperaturas para atingir benefícios económicos e ambientais. Melhorias estas destinadas a diminuir o consumo de energia, reduzindo a temperatura de produção que, conseqüentemente, beneficia ambientalmente o planeta havendo menos emissões para atmosfera tanto na central como no local de pavimentação.

Se pudesse ser alcançada uma diminuição significativa da temperatura de produção, mantendo a trabalhabilidade da mistura betuminosa e o seu desempenho mecânico seria um ganho enorme para a sociedade (Capitão et al., 2012).

Neste capítulo serão apresentadas as temáticas mais relevantes nas misturas betuminosas temperadas (MBT), tais como a sua temperatura de produção, a sua evolução, técnicas de produção, vantagens e desvantagens.

2.2 Temperatura de produção de misturas betuminosas

O consumo de energia é um dos fatores na produção de misturas betuminosas que contribui significativamente para o custo. Sendo importante gerir os custos na indústria de construção rodoviária e atender igualmente a regulamentos ambientais que são cada vez mais rigorosos, conclui-se que a redução tanto das temperaturas de produção como de pavimentação proporcionam benefícios a nível económico e ambiental (Mohd Hasan & You, 2015).

Uma das formas de classificar as misturas betuminosas é através do intervalo de temperaturas a que são produzidas, como ilustra a Figura 2.1.

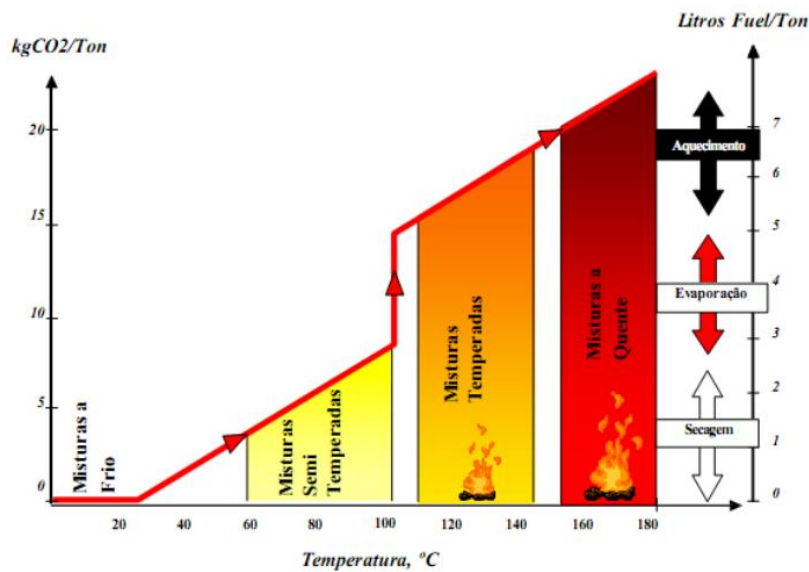


Figura 2.1 - Classificação de misturas betuminosas conforme temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões de gases (Dinis-Almeida, 2010)

A temperatura ambiente é a condição que permite dar origem às misturas betuminosas a frio, isto é, sem que haja aquecimento dos agregados e ligante (Pei et al., 2022).

As misturas betuminosas semi-temperadas possuem uma temperatura de produção situada abaixo dos 100°C, sendo os agregados aquecidos aproximadamente entre os 60°C e os 100°C. Os agregados grossos não ficam totalmente secos e a humidade retida melhora o processo de revestimento dos agregados pelo ligante. A energia consumida é menor que nas misturas a quente, devido a esta diferença de temperatura na fase de aquecimento dos agregados (Barbosa Alconada, 2011).

A produção das misturas betuminosas temperadas envolve o uso de aditivos orgânicos, aditivos químicos e técnicas de formação de espuma de betume, de modo a diminuir a viscosidade do ligante, encontrando-se as suas temperaturas de produção entre os 100 e os 140°C (Dinis-Almeida, 2010).

Por fim, as misturas a quente produzem-se a entre os 150 e 180°C aproximadamente, dado que a sua temperatura de produção irá depender do betume incorporado na mistura. O ligante aplicado normalmente é o betume tradicional e os betumes modificados com borracha ou com polímeros (Dinis-Almeida, 2010). As misturas tradicionais ou convencionais estão incluídas neste tipo de misturas onde a percentagem de energia consumida e a libertação de poluentes para a atmosfera é significativa (Autelitano et al., 2017).

2.3 Evolução das misturas betuminosas temperadas

Produzir misturas betuminosas a temperaturas mais baixas não é um conceito novo. Em 1956, Ladis Csanyi da *Iowa State University* estudou o potencial da espuma de betume como ligante para solos. Desde então, o recurso a esta tecnologia que permite temperaturas mais baixas de mistura vem a ser utilizado em muitos países com sucesso. Em 1968, *Mobil Oil Australia* adquiriu os direitos das patentes da invenção de Csanyi, modificando o processo adicionando água fria no lugar de vapor de água, tornando assim o procedimento mais prático (Kristjansdottir, 2006; Muthen, 1998 citado por Chowdhury & Button, 2008).

No início da década de 70, Chevron desenvolveu metodologias de formulação para pavimentos com misturas betuminosas estabilizadas com emulsões. Posteriormente, em 1977 publicou “*Butumuls Mix Manual*” que continha informações sobre a metodologia de formulação destas misturas. Mais tarde entre 1979 e 1981 foram publicados manuais análogos, nomeadamente pela *Federal Highway Administration* (FHWA) e *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA), apoiando a aplicação deste tipo de misturas fundamentalmente em meios com reduzido nível de tráfego e onde existem restrições de emissões (FHWA, 1979; AEMA, 1981 citado por Chowdhury & Button, 2008).

Em 1982, estas misturas tinham vindo a ser produzidas para camadas de desgaste, tendo sido aplicadas em centenas de quilómetros nos Estados Unidos. Também em 1982 já estavam a ser amplamente utilizadas na Austrália nas camadas de base e sub-base. Este tipo de tecnologia foi adotado também por outros países como Nova Zelândia, Japão, Alemanha e África do Sul (Mohd Hasan & You, 2019).

As misturas betuminosas com emulsão eram vantajosas em áreas rurais onde o distanciamento às centrais betuminosas a quente e o baixo volume de tráfego dificultavam a utilização das misturas convencionais. Ao mesmo tempo, as centrais de misturas betuminosas a frio não implicam um investimento inicial tão alto quanto as centrais a quente, podendo ser implementadas em qualquer local, considerando a ausência de emissões prejudiciais para a atmosfera. A possibilidade de incorporação de grandes quantidades de material recuperado nestas misturas era uma vantagem acrescida (Kuennen, 2004 citado por Chowdhury & Button, 2008).

Em 1994, Maccarone et al. (1994) citado por Ferreira (2009), estudaram misturas betuminosas a frio com elevados conteúdos de emulsão como ligante e também com espuma de betume, concluindo que ambas as misturas apresentavam vantagens devido à redução de energia consumida e emissões.

Os pioneiros na adesão à construção de estradas com recurso a misturas betuminosas temperadas no continente europeu foram a Alemanha em 1995 seguindo-se a Dinamarca e a Noruega, utilizando uma aplicação com a incorporação de um zeólito sintético (Aspha-Min®) (Prowell and Hurley, 2008 citado por Ferreira, 2009). Ainda em 1995, a *Shell Bitumen* patenteia a técnica WMA-Foam® baseada na mistura de dois componentes de betumes duros e moles. Mais tarde em 1997, começa a ser comercializado na europa um aditivo orgânico que tem como função auxiliar a compactação de misturas, denominado Sasobit®. Este aditivo, desde então, tem sido muito utilizado na produção de MBT (Chowdhury & Button, 2008).

Jenkins et al. (1999) propuseram um novo sistema na produção de misturas betuminosas semi-temperadas, investigando as vantagens de pré-aquecer os agregados a temperaturas ligeiramente superiores à temperatura ambiente, e inferiores a 100°C, posteriormente introduzindo espuma de betume. Referem ainda que o pré-aquecimento dos agregados fomenta o envolvimento das partículas, a coesão da mistura, a resistência à tração e a compactação, sendo especialmente favorável para misturas que contenham RAP (do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*) ou misturas britadas densas com agregados britados.

Devido aos elevados custos dos combustíveis fósseis, a Austrália, África do Sul e a Europa iniciaram a investigação das vantagens e o comportamento das misturas betuminosas temperadas (Koenders et al., 2002).

Em 2002, a NAPA (*National Asphalt Pavement Association*) lidera a análise e estudo das misturas betuminosas temperadas pela Europa. Nesta altura o interesse e desenvolvimento perante esta tecnologia verificou um crescimento exponencial nos EUA de tal forma que a FHWA aponta as MBT como área em foco. Em 2003 a FHWA juntamente com a NAPA organiza uma conferência cujo propósito seria examinar o seu potencial de utilização nos EUA. Em 2004, no *World of Asphalt* diversas empresas e entidades rodoviárias apresentaram projetos e desenvolvimentos na área das misturas betuminosas temperadas, sendo que após esta conferência, tanto nos EUA como na

Europa, deu-se continuidade ao estudo das vantagens da produção das MBT (Ferreira, 2009).

Em 2007 surgiu uma parceria entre a *University of California Pavement Research Center* (UCPRC) e o *California Department of Transportation* (CALTRANS) no âmbito de verificar o desempenho das misturas betuminosas temperadas comparativamente às misturas produzidas a quente. Este estudo incluiu múltiplos ensaios de laboratório de forma a identificar adversidades a curto, médio e longo prazo. Tiveram em conta também possíveis complicações relacionadas com a sensibilidade à água e baixas temperatura de compactação. Os resultados acabaram por ser positivos, demonstrando um maior conforto dos trabalhadores devido a uma menor temperatura de trabalho, acompanhado de uma menor emissão de fumos. A mistura não demonstrou perdas nas propriedades analisadas revelando uma utilização promissora (Jones, 2009 citado por Budney, 2012).

Uma equipa de treze investigadores americanos, em maio de 2007, visitou quatro países na Europa (França, Alemanha, Noruega e Bélgica) com o propósito de avaliar e debater diferentes modos de reduzir a temperatura de misturas betuminosas a quente na fase de mistura e compactação. Estes investigadores representavam diferentes agências do setor rodoviário, *American Association of State Highway And Transport Official* (AASHTO) e consultores da FHWA. Houve um especial interesse pelo comportamento dos pavimentos a longo prazo, referindo recomendações para ajudar a implementar a MBT como uma alternativa viável às misturas a quente nos EUA (D'Angelo et al., 2008).

Desde então, numerosos estudos têm sido realizados na Europa e no resto do mundo que mostram que qualquer processo usado para obtenção das MBT apresentam desempenho mecânico similar em comparação com as misturas betuminosas a quente (EAPA, 2014).

Várias técnicas têm sido desenvolvidas para obter a redução da viscosidade do betume, e conseqüentemente permitir a produção das MBT. Na secção seguinte serão apresentadas as diversas alternativas de melhoria de desempenho, redução de temperatura e menores emissões.

2.4 Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas

Atualmente na indústria da construção rodoviária utilizam-se diversas técnicas de redução da viscosidade efetiva do ligante, permitindo o revestimento dos agregados durante a fase de mistura, aplicação e compactação a menores temperaturas (J. Xu et al., 2020).

As técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas, de acordo com vários autores (D'Angelo et al, 2008; EAPA, 2010) estão subdivididas em três grupos, que podem ser observados na Figura 2.2.

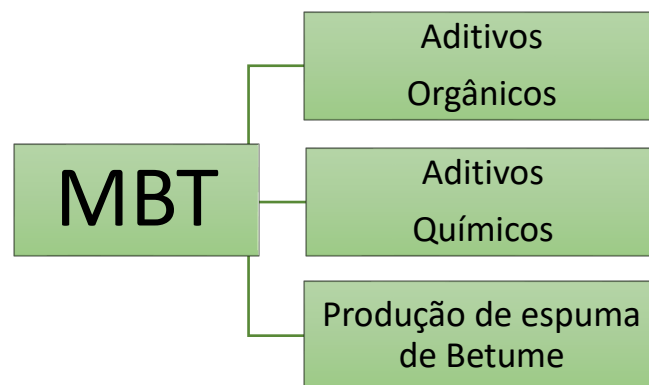


Figura 2.2 - Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas (adaptado de Valente, 2019)

2.4.1 Aditivos orgânicos

Aditivos orgânicos como o Sasobit®, Asphaltan B® e Licomont® BS 100, são os mais utilizados na produção de misturas betuminosas podendo ser adicionados à mistura ou ao ligante. Estes aditivos quando incorporados na mistura reduzem a temperatura e viscosidade do ligante na fase de produção e compactação. O aditivo orgânico deve ser selecionado cuidadosamente, para que o ponto de amolecimento do ligante seja superior ao esperado nas temperaturas de serviço do pavimento, minimizando a fragilidade da mistura a baixas temperaturas (Guo et al., 2020).

A Sasobit® é uma cera sintética dura amplamente utilizada na construção de estradas por todo o mundo. Quando adicionada uma percentagem de 3%, obtêm-se pavimentos betuminosos duradouros diminuindo a viscosidade e melhorando a trabalhabilidade da mistura (Singh et al., 2022).

O Asphaltan B® é gerado a partir da lignite, uma rocha sedimentar considerada uma forma menor do carvão pelo seu baixo poder calorífico. É frequentemente misturado com ceras de amida com o intuito de aumentar a sua baixa temperatura de fusão (S. Xu et al., 2017).

Das et al. (2012) realizaram estudos com adição de 4% de Asphaltan B®, submetendo a amostra a testes convencionais. Deste trabalho resultaram as seguintes conclusões:

- a) Com a adição do Asphaltan B® aumentou-se o ponto de amolecimento e a penetração, o que indica o efeito de maior endurecimento;
- b) A viscosidade dinâmica a 135°C e a 165°C foi reduzida. Esta redução de viscosidade resulta na diminuição da temperatura de mistura e compactação entre 10°C a 15°C aproximadamente;
- c) Os resultados mostraram ainda que a força de deformação aumentou o que indica maior rigidez.

O Licomont® BS 100 é um ácido de amida gordo, formado a partir da reação de ácidos gordos com aminas, tendo um ponto de fusão entre 141°C e 146°C, reduzindo a temperatura da mistura e a viscosidade (Rodríguez-Alloza et al., 2013).

Este aditivo, contribui para uma melhor resistência ao tráfego pesado, dado que reduz a penetração e aumenta o ponto de amolecimento da mistura, aumentando o tempo de vida útil do pavimento diminuindo as deformações (Pereira, 2010).

2.4.2 Aditivos químicos

Segundo Rubio et al., (2012) a produção de misturas betuminosas temperadas utilizando aditivos químicos não depende da formação de espuma ou redução da viscosidade do ligante para diminuir as temperaturas de mistura e compactação. A melhoria do revestimento dos agregados, trabalhabilidade e compactação da mistura deve-se aos agentes de emulsificação, polímeros, tensoativos e aditivos.

A quantidade de aditivos necessários e a redução de temperatura alcançada depende do produto utilizado. Os aditivos químicos mais utilizados nas misturas betuminosas

temperadas são o Revix[®], Rediset[®], Evotherm[®], RECIEMUL 90[®], Cecabase RT[®] e o Iterlow[®] T.

O Revix[®] atua devido à variedade das componentes na sua constituição, como agentes tensioativos, polímeros, ceras, auxiliares de processos químicos e outros materiais, não dependendo da diminuição de viscosidade ou da produção de espuma para reduzir a temperatura de produção e compactação das misturas (Prowell and Hurley, 2008).

O Rediset[®] foi inicialmente introduzido em forma sólida (Rediset[®] WMX) sendo em 2011 introduzido em forma líquida (Rediset[®] LQ), não contendo água em nenhum dos produtos. Este aditivo químico modifica o ligante de forma a reduzir a tensão superficial, o que, conseqüentemente, aumenta a capacidade de revestimento da superfície do agregado e aumenta a trabalhabilidade da mistura. Os componentes do mesmo permitem que a temperatura de revestimento e de compactação da mistura seja reduzida até 33°C. Os agentes ativos de adesão promovem a ligação entre o ligante e a superfície do agregado mesmo que o agregado esteja húmido (Prowell et al, 2012).

O Evotherm[®] foi projetado com o intuito de melhorar o revestimento, adesão, trabalhabilidade da mistura e a compactação a temperaturas reduzidas. Este aditivo permite realizar a mistura a temperaturas entre os 85°C e 115°C (Prowell et al, 2012). Este utiliza uma emulsão betuminosa de alto teor de betume (aproximadamente 70%), melhorando a adesividade ao agregado quando ocorre o processo de mistura, uma vez que a água se liberta sob forma de vapor ao entrar em contato com os agregados aquecidos. É ainda referida a facilidade de não ser necessária alteração das centrais de misturas betuminosas para utilização deste aditivo (Chowdhury & Button, 2008).

A RECIEMUL 90[®] é uma emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta, de betume especial para reciclagem de material fresado, especialmente usada em misturas betuminosas temperadas que incorporam uma elevada quantidade de material reciclado. O seu teor de betume que varia entre 58%-62% e os polímeros com grupos amina e hidroxilo, possibilitam a obtenção de uma viscosidade que permite o envolvimento de todo o material reciclado (CEPSA, 2022).

O Cecabase RT[®] possui uma base de agentes tensioativos que quando misturado com o betume permite uma diminuição da temperatura de mistura e compactação em aproximadamente 50°C (Pereira 2010). Este aditivo não altera a viscosidade do ligante, uma vez que funciona como uma camada entre o mesmo e o agregado, facilitando a disposição e a compactação da mistura. Desta forma, é promovido um melhor teor de

humidade nos agregados e, conseqüentemente, uma melhor adesão sem o comprometimento do desempenho do ligante na mistura (Awazhar et al., 2020).

O Iterlow® T é um aditivo no estado líquido que apenas funciona como agente tensioativo, não alterando a temperatura de amolecimento, penetração e viscosidade do ligante. Permite a produção de misturas a temperaturas entre os 90°C e 120°C, com a adição de quantidades entre 0.3% a 1% recomendado pelo fabricante. É também importante referir que o mesmo é estável durante a fase de armazenamento (Iterchimica, 2010 citado por Pereira, 2010).

2.4.3 Formação de espuma de betume

As técnicas de formação de espuma de betume podem ser diferenciadas em duas categorias principais por injeção de água e com recurso a minerais sintéticos ou naturais existindo uma grande variedade de técnicas, como se pode verificar no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Tecnologias de formação de espuma de betume (Adaptado de Mohd Hasan et al., 2017)

Tecnologias	Recomendação da temperatura de produção	Composição requerida (por peso do ligante)
Processos de injeção de água		
WAM Foam Shell (Reino Unido) and Kolo-Veidekke (Noruega)	100- 120 °C	2 -5% água
LEA (Low Energy Asphalt) LEA-CO (França)	< 100 °C	3- 4% água
Gencor® Ultrafoam GX® Gnecor Industries Inc. (EUA)	100- 120 °C	1.25- 2% água
Aquablack WMA Maxam Equipment Inc (EUA)	125- 140 °C	1.5- 3% água
Double - Barrel Green Astec Industries (EUA)	116- 135 °C	≈ 2% água
Terex WMA system Terex (EUA)	130 °C	≈ 2% água
LT Asphalt Nynas (Países Baixos)	90 °C	Espuma ligante com aditivo hidrofílico (≈0,5- 1%)
LEAB ROYAL BAM Group (Países Baixos)	90 °C	Espuma ligante com aditivo especial (0,1%)
Accu-Shear™ Stansteel (EUA)	122- 158°C	água e/ou aditivos (dependendo do tipo de aditivos)
Aditivos minerais sintéticos ou naturais		
Aspha-Min Eurovia GmbH (Alemanha)	20- 30 °C < MQ*	0.3%
Advera WMA Zeolite PQ Corporation	120 °C	0.25%

*MQ mistura a quente

As técnicas de injeção de água são amplamente utilizadas, inserindo pequenas quantidades de água no ligante betuminoso pré aquecido. Água esta que vaporiza, reduzindo a viscosidade do betume e aumentando o seu volume, permitindo o melhor revestimento, trabalhabilidade e compactação da mistura, a temperaturas mais baixas. Este processo à base da água permite uma redução de temperaturas das misturas betuminosas que variam entre 20°C a 30°C (Mohd Hasan et al., 2017).

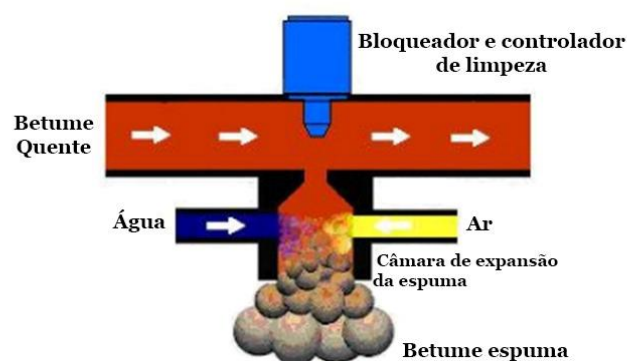


Figura 2.3 - Produção de espuma de betume com injeção de água (Wirtgen, 2004 citado por Pereira, 2010)

Quanto à produção de misturas betuminosas temperadas com recurso a minerais sintéticos ou naturais, tem como base o uso de zeólitos. Estes são silicatos de alumínio hidratados e cristalizados hidrotermicamente que retêm humidade na forma sólida gerando bolhas quando em contato com o betume quente. Os aditivos mais comumente utilizados são o Aspha-min® e o Advera® que têm uma percentagem de água que é libertada à medida que a temperatura sobe, criando uma expansão de volume no ligante, formando a espuma de betume que melhora o revestimento dos agregados e a trabalhabilidade da mistura (Mohd Hasan et al., 2017).

2.5 Vantagens da utilização das misturas betuminosas temperadas

As misturas betuminosas temperadas reúnem muitas vantagens a nível de benefícios ambientais, técnicos, económicos, condições de trabalho, assim como redução de emissões, consumo de energia, envelhecimento do betume e do tempo de construção (Behnood, 2020).

No geral, em termos de benefícios ambientais, as tecnologias das misturas betuminosas temperadas reduzem a temperatura de mistura e compactação e, conseqüentemente, o consumo de energia entre 18% a 30% e as emissões de gases tóxicos e de efeito estufa. Estas melhorias providenciam condições de trabalho mais favoráveis pois a exposição a gases e fumos tóxicos será menor (Behnood, 2020).

Com base em pesquisas científicas, é possível verificar diversas reduções de emissões perigosas na produção de MBT (Prowell et al, 2012):

Redução de CO₂ (Dióxido de Carbono) entre 30% a 40%.

Redução de SO₂ (Dióxido de Enxofre) em 35%.

Redução de COV (Compostos Orgânicos Voláteis) em 50%.

Redução de NO_x (Óxido de Azoto) entre 60% a 70%.

Redução de poeiras entre 20 a 25%.

Este tipo de misturas possui um menor número de restrições, pois permite efetuar pavimentações a temperaturas ambientais mais baixas do que as misturas convencionais, possuindo melhor trabalhabilidade e possibilitando a mais rápida abertura ao trânsito. Devido à baixa emissão de fumos e ruído o seu fabrico pode ser realizado em áreas com limitações de emissões, sendo que esta facilidade de localização reduz a distância à obra e evita congestionamentos de tráfego, oferecendo assim inúmeras vantagens a nível social, técnico e económico (Almeida-Costa & Benta, 2016; Hurley & Prowell, 2006).

A redução dos custos de consumo de combustível é outra vantagem das MBT, as medições deste tipo de misturas mostraram custos menores de até 40% se comparadas às misturas betuminosas a quente, no entanto a magnitude desta vantagem irá depender diretamente da temperatura de produção da mistura (Prowell et al, 2012).

As misturas convencionais, devido às altas temperaturas, podem levar a um aumento da rigidez do ligante quando o mesmo é mantido a temperaturas superiores a 150°C, mesmo que por breves períodos (Brown et al., 2009). A produção das misturas betuminosas temperadas, como é realizada a uma temperatura inferior, permite o menor envelhecimento do ligante reduzindo a sua fragilidade às fissuras térmicas e estruturais (Prowell et al., 2006).

Este tipo de misturas possibilita também a incorporação de altas taxas de material fresado. Neste caso, haverá uma diminuição de custo da mistura, por um lado devido à menor necessidade de agregados novos e, por outro lado, pela redução da quantidade de material proveniente da fresagem depositado em vazadouros autorizados. As temperaturas mais baixas irão favorecer a adição de material fresado devido à redução do envelhecimento do ligante, que por sua vez será favorável ao rejuvenescimento do betume existente no fresado aumentando a vida à fadiga da mistura (D'Angelo et al., 2008; Ferreira 2009).

2.6 Desvantagens da utilização das misturas betuminosas temperadas

Os processos de produção das misturas betuminosas temperadas ainda apresentam desvantagens que devem ser superadas, pois existem algumas preocupações referidas por diversos autores que serão apresentadas nos seguintes parágrafos.

As tecnologias disponíveis para a produção deste tipo de misturas geralmente aumentam o custo de produção inicial, pois o uso de aditivos implica um custo suplementar acrescido que só poderia ser compensado pela redução do consumo de energia (Capitão et al., 2012). Além disso, em algumas tecnologias pode ser necessário adaptar equipamentos existentes em centrais para a produção deste tipo de misturas, o que viria a ser mais um ponto desfavorável economicamente (Zaumanis, 2010).

Temperaturas mais baixas de mistura e compactação podem resultar numa secagem incompleta do agregado, o que irá aumentar a suscetibilidade da mistura à humidade, podendo causar problemas de assentamento prematuro do pavimento e fissuração (Zaumanis, 2010). Inclusive devido à diminuição do envelhecimento do ligante, o potencial de deformação permanente do pavimento pode aumentar e a resistência à tração diminuir (Mohd Hasan et al., 2017).

Alguns aditivos que possuem ceras na sua composição não apresentam bons resultados a temperaturas atmosféricas muito baixas, devido à cristalização das ceras que por sua vez terão a tendência de aumentar a viscosidade e rigidez do ligante (Zaumanis, 2010).

São reduzidas as emissões provenientes do processo de produção das misturas betuminosas temperadas quando comparadas com as misturas betuminosas a quente, mas a produção de aditivos que posteriormente vão ser adicionados à mistura, gera também emissões que são desfavoráveis (Rubio et al., 2012)

Capítulo 3 – Utilização de resíduos em misturas betuminosas

3.1 Introdução

Em 2020 foi publicado pela comissão europeia o *New Circular Economy Action Plan* no qual se refere que, para cumprir as metas ambientais da União Europeia enumeradas no *European Green Deal* apresentado pela comissão de Von der Leyen a 11 de dezembro de 2019, a Europa necessita reduzir a sua pegada ecológica e duplicar a sua taxa de reutilização de materiais na próxima década. Isto é especialmente relevante no setor da construção, visto que requer uma grande quantidade de recursos, representando cerca de 50% de todo o material extraído e tendo mais de 35% da produção total de resíduos na Europa (EAPA a, 2022).

De acordo com Esther et al. (2020) na indústria de construção rodoviária a substituição de agregados naturais por resíduos e subprodutos é uma das medidas mais consensuais para alcançar a sustentabilidade das estradas uma vez que proporciona vários benefícios como, a diminuição da extração e produção de matérias-primas reduzindo consequentemente o consumo de água, eletricidade, gásóleo e também a produção de ruído e poeira. Além disso, reduz-se o depósito de resíduos em aterros e emissões.

Nas seguintes secções serão apresentados vários tipos de resíduos incorporados na produção de misturas para camadas de pavimentação rodoviária.

3.2 Misturas Betuminosas Recuperadas

As Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) são misturas provenientes de fresagem de camadas betuminosas de pavimentos, britagem de placas (lajes ou blocos) retiradas dos pavimentos, de lotes rejeitados ou de produções excedentárias, de acordo com a norma NP EN 13108-8:2011, Misturas betuminosas – Especificações dos materiais – Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas que são utilizadas na produção de misturas betuminosas para pavimentação e reabilitação rodoviária. Desta forma, diminui-se a quantidade de recursos utilizados, nomeadamente agregados e ligantes, recursos estes que são limitados. A incorporação das MBR contribuem para a preservação de recursos

naturais e, simultaneamente, para a redução de resíduos não prejudicando o desempenho do pavimento (Dinis-Almeida et al., 2012).

O termo de “reutilização” e “reciclagem” diferem na medida em que, quando se fala de “reutilização”, é uma operação pela qual o fresado é reincorporado numa nova mistura betuminosa, com os agregados e o ligante betuminoso envelhecido desempenhando a mesma função que possuíam originalmente. Quando o termo é “reciclagem”, o fresado é utilizado como material de fundação ou enchimento em camadas não ligadas, onde o agregado e o betume envelhecido desempenham uma função diferente da sua aplicação original (EAPA a, 2022). Observa-se na figura 3.1 que ambas as aplicações do fresado já apresentam destaque nos países da Europa.

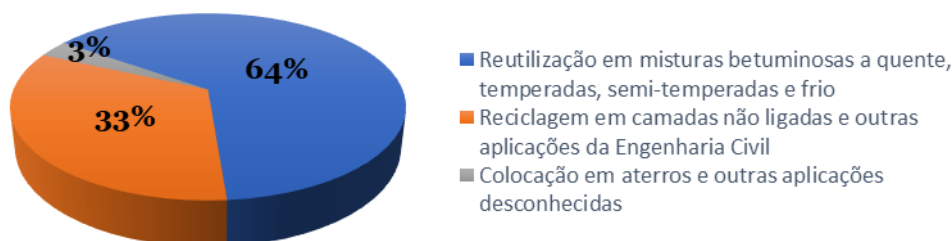


Figura 3.1 - Aplicações do fresado nos países europeus em 2020 (Adaptado de EAPA a, 2022)

No Quadro 3.1 apresentam-se as quantidades de MBR utilizadas em 17 países europeus. O montante total utilizado nestes países em 2022 foi de 46,4 milhões de toneladas, tendo destaque a Alemanha com 11,6 milhões de toneladas (25% do total), a França com 6 milhões de toneladas (13%) e a Grã-Bretanha, com 5 milhões de toneladas (11%). O uso do fresado está a aumentar na Europa, apesar de ainda haver uma falta de disponibilização de dados por parte de alguns países.

Quadro 3.1 – Reutilização e Reciclagem das MBR em alguns países da Europa (adaptado de EAPA *Asphalt in Figures, 2021*)

Países	Quantidade de fresado disponível a ser utilizado pela indústria de construção rodoviária [ton]	Total Reutilizado [%]	Total Reciclado [%]	Total Depositado [%]
Áustria	900.000	90	10	0
Bélgica	1.506.000	71	ND	ND
Croácia	390.000	47	0	53
Répubblica Checa	2.500.000	40	32	28
Dinamarca	1.172.000	85	15	ND
França	6.042.000	86	ND	ND
Alemanha	11.600.000	84	16	0
Grã Bretanha	4.973.106	37	63	0
Hungria	160.000	98	2	0
Irlanda	500.000	45	ND	ND
Noruega	1.172.618	46	54	0
Eslováquia	70.946	92	8	0
Eslovénia	79.000	45	23	32
Espanha	2.495.000	66	34	0
Turquia	1.800.000	1	99	0
Portugal	ND	ND	ND	ND

*ND no data

Segundo Baptista (2006), Portugal tinha como destino final para este material o abandono em aterros ou a sua utilização em caminhos secundários, públicos ou privados, que não possuíam tráfego significativo, em que o material fresado vinha a substituir o tradicional caminho de terra batida.

Devido ao acréscimo dos preços dos derivados do petróleo, em particular do betume, e ao facto de estar-se a consumir mais recursos naturais do que o planeta nos pode oferecer, a tendência da indústria rodoviária passará cada vez mais por operações de manutenção com reutilização das MBR, como se pode observar na Figura 3.2 (EAPA b, 2022).



Figura 3.2 – Economia circular das MBR (adaptado de EAPA b, 2022)

A reutilização de materiais na indústria rodoviária, já data de há décadas, sendo desenvolvidas várias técnicas para fornecer os métodos com maiores vantagens económicas e ambientais para o tipo de projeto e localização. No processo de fresagem deve-se fresar as camadas existentes separadamente de modo a classificar o material, aproveitando os materiais de maior valor normalmente localizados nas camadas superficiais. As técnicas de reutilização podem ser divididas em dois grupos: *in situ* e em central. A reutilização *in situ* permite que o material recuperado seja diretamente incorporado no novo pavimento. A reutilização em central consiste na remoção do material e seu transporte para a respetiva central, onde será processado ou poderá ser armazenado para utilização noutro projeto (EAPA b, 2022).

3.3 Plásticos

A entrada de resíduos plásticos nos oceanos tornou-se uma grande ameaça ambiental pelo que, se nenhuma medida for tomada, prevê-se um aumento insustentável da quantidade de resíduos acumulados nos ecossistemas terrestres e aquáticos com impactes sobre a biodiversidade e a saúde humana (González-Fernández et al., 2021).

Vários autores mencionam que a quantidade de resíduos plásticos adicionados ao lixo anualmente, mesmo que cuidadosamente colocados em aterros ou espalhados por terra e mar, poderão chegar a 380 milhões de toneladas em 2040, estimando-se que cerca de 10 milhões de toneladas poderão estar na forma de microplásticos. Os investigadores referem ainda que se todas as soluções comprovadas para reduzir a poluição por plástico fossem adotadas imediatamente e ampliadas o mais brevemente possível, a quantidade

de resíduos plásticos adicionados poderia cair para os 140 milhões de toneladas por ano até 2040 (Lim X, 2021).

Os estudos de incorporação de resíduos plásticos em misturas betuminosas já datam desde 1991. Maupin estudou a incorporação de polietileno através do método seco em misturas betuminosas, juntamente com a incorporação de aditivos. Desde então datam vários estudos com diferentes tipos de plásticos (Yin et al., 2020).

Os dois principais métodos para incorporar resíduos plásticos em misturas betuminosas, são o método húmido, e o método seco. O método húmido baseia-se numa modificação do betume com a incorporação de polímeros, ou seja, estes são misturados com o ligante a alta temperatura, antes de o betume entrar em contacto com os agregados. O processo fica favorável a resíduos plásticos com pontos de fusão baixos como o Poliestireno (PS), o Polipropileno (PP) e o Polietileno de Baixa Densidade (do inglês *Low-density polyethylene* LDPE), como se apresenta no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Ponto de fusão de alguns plásticos reciclados

Tipo de plástico	Ponto de fusão [°C]
Polietileno Tereftalato (PET)	250
Polietileno de Alta Densidade (HDPE)	132
Policloreto de vinila (PVC)	298
Polietileno de Baixa Densidade (LDPE)	110
Polipropileno (PP)	162
Poliestireno (PS)	>100

Os resíduos plásticos são triturados, transformados em pó e posteriormente adicionados ao ligante com taxas entre 6% a 10%. O plástico adicionado aumenta o ponto de fusão do ligante, aumentando a flexibilidade do pavimento a temperaturas mais baixas, e consequentemente, resultando numa vida útil prolongada (You et al., 2022). No Quadro 3.3 pode-se observar alguns resíduos plásticos inseridos nas misturas betuminosas através do método húmido assim como os seus benefícios nas mesmas.

Quadro 3.3 - Resíduos Plásticos que podem ser reutilizados em misturas betuminosas segundo o método húmido (adaptado de You et al., 2022).

Tipo de plástico	Benefícios no desempenho
Polietileno Tereftalato (PET) (Ahmadinia et al., 2012; Baghaee et al., 2012; Dubois et al., 2020; ghuzlan et al., 2013; Nasr and Pakshir, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> · Aumentou a resistência à fadiga · Reforçou as propriedades de elasticidade e recuperação · Aumentou a rigidez da mistura · Melhorou a resistência à deformação permanente · Aumentou os valores do módulo de resiliência da mistura · Aumentou a resistência à formação de rodeira
Polietileno Reciclado (PE) (Fuentes-Audén et a., 2008)	<ul style="list-style-type: none"> · Melhorou as propriedades a altas e médias temperaturas de serviço · Melhorou a susceptibilidade térmica
Polietileno (PE) (Fang et al., 2014a,b)	<ul style="list-style-type: none"> · Melhorou a estabilidade térmica
Polietileno de baixa densidade (LDPE) (Attaelmanan et al., 2011; Zoorob and Suparma, 2000)	<ul style="list-style-type: none"> · Melhorou a estabilidade Marshall · Melhorou a resistência à tração indireta · Melhorou a resistência à tensão de cisalhamento em médias e altas temperaturas · Melhorou a resistência à deformação · Reduziu a suscetibilidade à temperatura da mistura · Aumentou a rigidez e o módulo dos valores de rotura a baixas temperaturas (10°C)
Polietileno (PE) (Kamada and Yamada 2002; Punith and Veeraragavan, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> · Aumentou a resistência à formação de rodeira, fadiga e sensibilidade à água · Reduziu a suscetibilidade ao envelhecimento, temperatura e aumentou a durabilidade
Polipropileno (PP) (Al-Hadidy, 2006; Huang and White, 1996)	<ul style="list-style-type: none"> · Melhorou a resistência à tensão de cisalhamento em médias e altas temperaturas · Melhorou a resistência à deformação · Melhorou o desempenho da viscosidade do ligante · Aumentou a estabilidade e deformação Marshall e a densidade
Polietileno de alta densidade (HDPE) (Al-Hadidy and Tan, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> · Melhorou a resistência à tensão de cisalhamento em médias e altas temperaturas · Melhorou a resistência à deformação permanente · Aumentou a rigidez e o módulo dos valores de rotura a baixas temperaturas (10°C) · Aumentou os valores do módulo de resiliência a temperaturas elevadas (25°C) · Reduziu a suscetibilidade à temperatura da mistura
Poliuretano (PU) (Salas and Pérez-Acebo, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> · Reduziu a penetração do ligante para poder ser usado em estradas com tráfego pesado
Acrlonitrila butadieno estireno (ABS) (Singh et al., 2020)	<ul style="list-style-type: none"> · Aumentou a resistência à formação de rodeira
Polimetilmetacrilato (PMMA) / Trihidróxido de alumínio (ATH) (Šušteršič et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> · Aumentou a durabilidade do pavimento · Aumentou a resistência à formação de rodeira · Reduziu a sensibilidade à água
Embalagens de PVC e OMMT (Fang et al., 2014a,b)	<ul style="list-style-type: none"> · Reduziu a suscetibilidade à temperatura da mistura · Melhorou a dispersão do PVC

O método seco tem duas variantes, a primeira consiste na adição de resíduos plásticos diretamente na mistura como substituição de uma percentagem de agregados, enquanto a segunda, mais comumente utilizada, centra-se na adição dos resíduos plásticos diretamente aos agregados aquecidos. Na primeira variante, são habitualmente utilizados resíduos plásticos com ponto de fusão elevado comparativamente à temperatura de produção das misturas betuminosas, tais como PP, PET entre outros. Na segunda variante, é mais vantajoso utilizar resíduos plásticos com um ponto de fusão mais baixo que a temperatura de produção das misturas betuminosas, como é o exemplo dos LDPE e HDPE. Estes, ao serem adicionados aos agregados aquecidos, irão revesti-los conferindo-lhes características físicas e superficiais melhoradas, permitindo o uso de agregados menos resistentes (Willis et al., 2020). O Quadro 3.4 apresenta alguns estudos da incorporação de resíduos plásticos através do método seco e os benefícios que daí resultaram.

Quadro 3.4 – Resíduos Plásticos que podem ser reutilizados em misturas betuminosas segundo o método seco (adaptado de (You et al., 2022))

Tipo de plástico	Benefícios no desempenho
Polietileno Tereftalato (PET) (Lugeiyamu et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> · Reduziu a sensibilidade à água · Aumentou a resistência à fadiga · Melhorou a rigidez a baixas e médias temperaturas e a resistência a tráfego pesado
Polietileno Reticulado (PEX) (Costa et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> · Aumentou a resistência à deformação permanente · Reduziu a densidade das misturas
Polietileno Reciclado (PE) (Angelone et al., 2016)	<ul style="list-style-type: none"> · Melhorou a estabilidade e deformação Marshall · Aumentou a resistência à fadiga · Satisfaz os requisitos relativos à sensibilidade à água · Aumentou a resistência à deformação permanente
Polietileno de baixa densidade (LDPE) (Almeida et al., 2020)	<ul style="list-style-type: none"> · Satisfaz os requisitos relativos à sensibilidade à água · Aumentou a resistência à deformação permanente · Aumentou a rigidez · Diminuiu ligeiramente a resistência à fadiga

De um modo geral a incorporação de resíduos plásticos nas misturas betuminosas demonstra ser benéfica a nível ambiental e económico, dando um uso ao plástico impedindo este de acabar em vazadouros ou oceanos e reduzindo a necessidade de betume utilizado. Por fim, escolhendo o tipo de plástico e método mais adequado para o mesmo pode-se conseguir uma mistura com uma durabilidade melhorada, como foi retratado através de diversos estudos apresentados nos Quadros 3.3 e 3.4.

3.4 Granulado de borracha de pneu

Os pneus em fim de vida são mais um dos desafios do presente século, uma vez que são materiais não biodegradáveis, os seus produtos químicos quando em contato com água e sol podem libertar fumos perigosos para a atmosfera e líquidos que contaminam o solo e água. A abordagem mais comum na eliminação de grandes quantidades deste material continua a ser a deposição em aterros, isto não deve ser encarado como um problema apenas de carácter ambiental, mas também como uma enorme perda económica. A indústria de construção rodoviária tem várias aplicações para o aproveitamento da borracha de pneu que, depois de um tratamento inicial, pode ser incorporada em misturas betuminosas através do método húmido como uma modificação do ligante e método seco substituindo uma parte do agregado (Zheng et al., 2021).

O granulado de borracha reciclado de pneus utilizado em misturas betuminosas varia até um máximo de 2 milímetros dependendo do tipo de equipamento de fragmentação utilizado (Fontes et al, 2006). Os dois principais processos para a obtenção do granulado de borracha de pneus são o ambiente e criogénico. O processo ambiente consiste no corte e moagem através da introdução do material no granulador à temperatura ambiente. A

borracha resultante deste processo apresenta-se esponjosa, com forma irregular, textura áspera, possuindo elevada superfície específica. O sistema criogénico baseia-se no uso de azoto líquido ou dióxido de carbono sólido para que a material atinga temperaturas inferiores a 120°C negativos, aumentando a sua fragilidade e, posteriormente, através de prensas reduzir os mesmos à granulometria desejada. A borracha proveniente deste processo possui uma maior recuperação elástica quando comparada com a borracha proveniente do processo ambiente, sendo a sua principal vantagem controlar a uniformidade, o tamanho e o formato das partículas (Fontes, 2009).

Segundo Pais et al. (2014) o método húmido engloba duas variantes que levam à modificação de betume com borracha: a) “continuous blend” que conduz a betumes modificados com alta percentagem de borracha e b) “terminal blend” que conduz a betumes modificados com baixa percentagem de borracha.

- a) Os betumes modicados que incorporam entre 18% a 22% de granulado de borracha, apresentando uma elevada viscosidade que, posteriormente, pode ser reduzida com o uso de aditivos conferindo viscosidades compatíveis com equipamentos de produção das misturas betuminosas;
- b) Os betumes que apresentam quantidades de borracha incorporada inferiores a 15%, possuem as mesmas necessidades de armazenamento que um betume modificado com polímeros.

No método seco, a taxa de incorporação do granulado de borracha varia entre 1% a 3% por massa do agregado total na mistura, sendo utilizado desta forma somente na produção de misturas betuminosas a quente.

Segundo Duan et al. (2022), as misturas betuminosas com incorporação de granulado de borracha podem melhorar significativamente a estabilidade das misturas a baixas e altas temperaturas, assim como a durabilidade e vida de serviço do pavimento, juntamente com uma diminuição de custos na produção, justificando o amplo estudo em redor desta tecnologia ao longo dos anos.

3.5 Agregados siderúrgicos

O agregado siderúrgico é um subproduto resultante da fundição do aço, resultando fundamentalmente da produção de alto forno (BFS *Blast Furnace Slags*) e da aciaria. As composições químicas e geométricas destes materiais variam em função das matérias-primas, do local de produção e do produto final pretendido. Em Portugal os agregados provenientes de forno de arco elétrico (EAF *Electric Arc Furnace*) em aciaria, após serem

processados são comercializados pelo nome de ASIC (Agregado Siderúrgico Inerte para Construção) (Caló & Vale, 2022)

O desempenho mecânico de agregados siderúrgicos provenientes de fornos de arco elétrico em misturas betuminosas na substituição do agregado grosso foi avaliado aprofundadamente por diversos autores, obtendo resultados positivos em termos de trabalhabilidade, rigidez, resistência à fadiga, resistência à humidade e à deformação permanente (Ameri et al., 2013; Kavussi and Qazizadeh, 2014; Pasetto and Baldo, 2010; Sorlini et al., 2012 citado por Esther et al., 2020).

Dadas as características mecânicas dos agregados siderúrgicos, é aparentemente promissora a sua utilização para vias com um maior volume de tráfego. No entanto, existem algumas limitações associadas ao facto da trituração das escórias em partículas de menores dimensões ser dispendiosa e as misturas apresentarem um maior volume de vazios causado pela angularidade das partículas, necessitando assim de uma maior quantidade de ligante. Também foram relatados alguns problemas de lixiviação por libertação de metais pesados (Caló & Vale, 2022).

3.6 Cinzas Volantes

As cinzas volantes são um subproduto mineral obtido através da combustão do carvão em centrais termoelétricas, estas são precipitadas em electrofiltros. Este tipo de resíduo é um pó com granulometria semelhante à do cimento, com uma massa volúmica seca de 0.6-0.8 g/cm³ e 0.1-0.3% de humidade natural (Gorski, 2010).

O pequeno tamanho das partículas e a forma esférica influenciam positivamente a durabilidade e as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. São utilizadas como potenciador do ligante, reduzindo o seu teor ótimo diminuindo também o teor de vazios da mistura (Faheem et al., 2017).

Segundo Mistry et al. (2019) os valores de resistência à tração indireta obtidos por misturas modificadas com cinzas volantes são notoriamente mais elevados que em misturas não modificadas. Simultaneamente, quando a relação entre o filer e ligante é aumentada, pode fortalecer a rigidez da mistura. O aumento do conteúdo de filer em misturas modificadas com cinzas volantes irá amplificar o quociente de Marshall gradualmente, o que se deve à menor quantidade de teor ótimo de betume necessário, e maior proporção de resíduos de materiais utilizados.

Misturas betuminosas com rigidez muito alta apresentam uma menor resistência à tração pelo que se deve determinar uma quantidade adequada da incorporação deste tipo de resíduo para garantir um bom desempenho do pavimento (Wong et al., 2022).

3.7 Óleo alimentar

Os resíduos de óleo alimentar (*WCO Waste cooking oil*) contêm vastas quantidades de metais pesados, bactérias e vírus, sendo que uma grande parte do mesmo é gerado por países com uma grande densidade populacional como os EUA e China de acordo com o apresentado na Figura 3.3 (N. Xu et al., 2023).

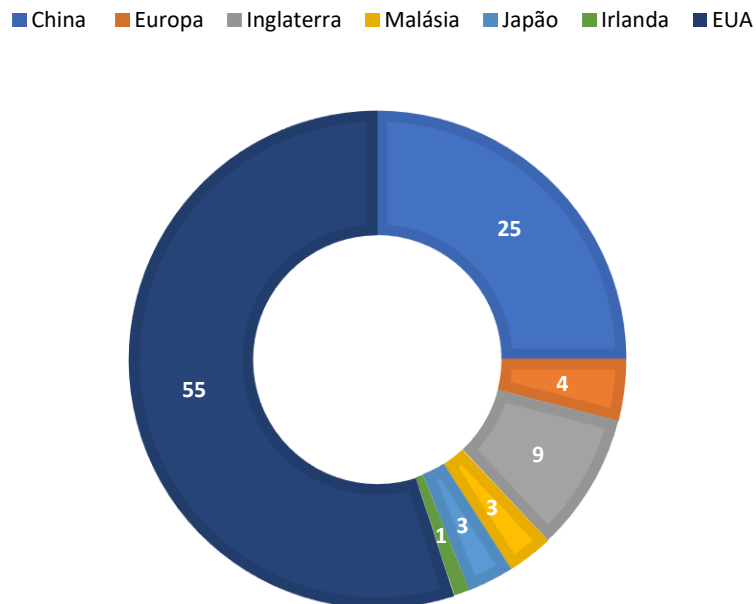


Figura 3.3 – A contribuição de diferentes países na produção de WCO em percentagem (adaptado de N. Xu et al., 2023)

A eliminação de forma não ponderada do WCO poderá trazer sérios problemas à humanidade como eutrofização da qualidade da água local, resultando no crescimento de microrganismos o que quebrará o equilíbrio ecológico. O mundo enfrenta uma pressão para transformar resíduos em energia valiosa, e o WCO tem um enorme potencial para ser reutilizado, visto que pode ser incorporado com 3 funções principais: Modificador, rejuvenescedor ou solvente no pré-tratamento de granulado de borracha de pneu (N. Xu et al., 2023).

Como modificador, existem vários estudos que demonstram a influência da incorporação do WCO nas propriedades macroscópicas do ligante. Verifica-se que esta adição reduz o desempenho a altas temperaturas da mistura, no entanto melhora o seu desempenho a baixas temperaturas. A resistência à fadiga também foi ligeiramente aumentada (Al-Omari et al, 2018 citado por N. Xu et al., 2023).

O seu papel como rejuvenescedor revelou-se ser a utilização mais promissora. A incorporação de WCO reduz a viscosidade do betume envelhecido, diminui o ponto de amolecimento e restaura as macro propriedades do betume envelhecido do ponto de vista do equilíbrio químico. Em ambientes de baixa temperatura o seu desempenho é favorável (N. Xu et al., 2023).

A sua utilização como solvente no pré-tratamento de granulado de borracha de pneu é favorável na rutura da estrutura reticulada do mesmo. Apesar desta nova função do WCO ainda estar numa fase precoce de estudo pode-se afirmar que vem promover a estabilidade de armazenamento térmico em misturas betuminosas com granulado de borracha de pneu (Yang e Dong, 2022 citado N. Xu et al., 2023).

3.8 Resíduos de construção e demolição

Os resíduos provenientes da construção e demolição são cada vez mais um problema atual devido ao rápido desenvolvimento da sociedade, da economia e da aceleração da urbanização. As propriedades dos agregados reciclados diferem dos agregados naturais e são o principal fator que afeta o desempenho de misturas betuminosas com a incorporação deste tipo de resíduos (Yin et al., 2020).

Os resíduos de construção e demolição incluem principalmente tijolos, betão, argamassa, poeiras e outros materiais provenientes principalmente da demolição (plástico, vidro, madeira, solo e metal). Este tipo de resíduos deve ser submetido a várias técnicas de processamento antes que possam ser incorporados em misturas betuminosas. O processo mais comum passa pelo esmagamento para produção de um produto granular de pequenas dimensões. Posteriormente, deverão remover-se os materiais impuros. É possível neste processo de reciclagem adquirir agregados grossos de boa qualidade que cumprem as especificações das normas EN-12620:2013 e EN-13043:2013. No entanto, os agregados finos apresentam uma menor qualidade uma vez que contêm uma grande quantidade de argamassa envelhecida, que não produz um bom desempenho na mistura (Cardoso et al., 2016).

Segundo Cardoso et al, (2016), este tipo de resíduo, quando na forma de agregados grossos, satisfaz os requisitos na utilização de camadas não ligadas atingindo um desempenho semelhante ao dos agregados naturais, pelo que se pode considerar o seu uso. Esta utilização viria a ser um passo importante no caminho da sustentabilidade na indústria da construção rodoviária.

3.9 Resíduos de Vidro

O vidro é formado através de matérias-primas abundantes como areia, carbonato de sódio e calcário, sendo primeiramente aplicado em misturas betuminosas por volta de 1960, tendo consistido a sua aplicação na substituição de uma percentagem de agregados com resíduos de vidro moído. Mais recentemente, vários autores estudaram o seu potencial em misturas betuminosas com diferentes propósitos e variantes do resíduo, pó de vidro como filler (Choudhary et al., 2020), substituição de agregados através de vidro moído (Arabani, 2011; Shafabakhsh & Sajed, 2014), e incorporação de fibra vidro em SMA (*Stone Mastix Asphalt*) (Mahrez and Karim, 2010).

Os resíduos de vidro utilizados como filler, como o pó de vidro, obtiveram um bom desempenho na mistura em termos da estabilidade de Marshall, vida útil à fadiga e resistência à rotura. A mistura exibiu também excelente resistência à formação de rodeira. No entanto, demonstrou uma fraca ligação do ligante ao resíduo, reduzindo a resistência à sensibilidade à água e a adesão da mistura. Nota-se ainda que estas suscetibilidades podem ser melhoradas com a adição de 2% de cal hidratada (Choudhary et al., 2020).

A incorporação deste resíduo na forma de agregado deu-se com o tamanho máximo de 4.75mm apresentando melhorias do comportamento dinâmico em comparação com misturas SMA sendo a quantidade ótima de incorporação de vidro de 15% (Arabani, 2011; Shafabakhsh and Sajed, 2014).

A sua incorporação como fibra não foi tão benéfica pelo que não se recomenda este tipo de utilização visto que, os ensaios realizados com SMA com mais de 0.2% de fibra de vidro, mostraram uma baixa estabilidade da mistura enquanto o número de vazios aumentava, resultando numa redução da resistência à deformação permanente (Mahrez and Karim, 2010).

Capítulo 4 – Trabalho experimental

4.1 Introdução

Este estudo experimental teve como objetivo o desenvolvimento de uma mistura betuminosa temperada com incorporação de misturas betuminosas recuperadas (MBR) e plástico de alta densidade (HDPE) para aplicação numa camada de base.

Primeiramente, fez-se uma caracterização dos materiais utilizados, definiu-se a composição granulométrica, estimou-se o teor ótimo de ligante, taxa ideal de plástico e produziram-se as misturas betuminosas para avaliação do desempenho.

Foram produzidas 7 misturas betuminosas, uma mistura betuminosa a quente só com agregados naturais, utilizada como mistura de referência, e 6 misturas betuminosas recuperadas temperadas (três para a determinação do teor ótimo de emulsão apenas com MBR e três para determinar a melhor taxa de incorporação de HDPE). Para as misturas betuminosas produzidas teve-se como base os requisitos preconizados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, atualmente Infraestruturas de Portugal (EP, 2014).

Os ensaios laboratoriais da caracterização dos materiais e das misturas betuminosas desenvolvidas tiveram lugar nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI) e no InfraLab, Laboratório de materiais, lda.

4.2 Caracterização dos materiais utilizados

As misturas betuminosas produzidas no presente estudo envolvem agregados naturais, MBR, HDPE e ligantes betuminosos. A caracterização destes materiais foi realizada através de um conjunto de ensaios, nomeadamente, análise granulométrica, massa volúmica, e, especificamente no caso das MBR a percentagem de betume envelhecido assim como temperatura de amolecimento e penetração.

4.2.1 Agregados naturais

Os agregados naturais empregues neste estudo foram cal hidráulica, pó de pedra, brita 3/6 e 15/25 originárias da pedreira da Capinha explorada pela empresa Cimpor

Agregados, localizada no concelho do Fundão e a brita 6.3/14 fornecida pela empresa Diamantino Jorge & Filho, do concelho de Castelo Branco. Na Figura 4.1 apresentam-se os materiais acima descritos.



Figura 4.1 – Agregados naturais utilizados na produção das misturas betuminosas

As propriedades geométricas, físicas, químicas e mecânicas são essenciais para um bom comportamento da mistura na fase de pavimentação assim como para o seu desempenho em serviço. Tendo isto em conta, para caracterizar os agregados e as MBR efetuaram-se vários ensaios de acordo com as normas em vigor, determinando-se a granulometria, e massa volúmica que serão apresentados na secção 4.2.4. e 4.2.5.

4.2.2 Misturas Betuminosas Recuperadas

As MBR utilizadas nas misturas betuminosas temperadas com e sem incorporação de HDPE, são provenientes da A23 junto ao concelho de Castelo Branco. Na Figura 4.2 pode observar-se as MBR.



Figura 4.2 – MBR

A determinação do teor de betume envelhecido deste material, assim como a penetração e ponto de amolecimento foi efetuado pela Proas Betumes CEPESA, nos laboratórios em Madrid.

A percentagem de ligante envelhecido extraído foi realizado através do método da centrifugação segundo a norma EN 12697-1:2000, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 1: Soluble binder content*.

Para a determinação da penetração e ponto de amolecimento os ensaios foram realizados segundo as normas EN 1426 *Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration* e EN 1427 *Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method*. No Quadro 4.1 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios anteriormente mencionados.

Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização das MBR (Proas Betumes CEPESA)

Propriedades	Norma	MBR
Ligante extraído [%]	EN 12697-1:2000	5,6
Penetração [0,1 mm]	EN 1426	11
Temperatura de amolecimento [°C]	EN 1427	77,8

Segundo os resultados obtidos, pode observar-se que o betume presente nas MBR apresenta-se bastante envelhecido, muito duro revelado por uma penetração baixa e uma temperatura de amolecimento alta. A granulometria e massa volúmica serão apresentados na secção 4.2.4. e 4.2.5.

4.2.3 Plástico de alta densidade

O plástico de alta densidade utilizado provém de tubos danificados de rega como está ilustrado na Figura 4.3, podendo ser encontrado em outros materiais como garrafas de óleo de motor, de detergente entre outros produtos. A densidade deste tipo de plástico varia entre 0.940 g/cm³ a 0.965 g/cm³ e o seu ponto de fusão encontra-se nos 132°C. O objetivo da utilização destes tubos no estudo experimental passa pela reutilização deste material que em Portugal é muito utilizado na rega e posteriormente, quando danificado não possui outra funcionalidade sendo depositado em aterros ou incinerado.



Figura 4.3 – Tubo de rega de alta densidade

Os tubos foram então introduzidos num moinho ilustrado na Figura 4.4 e posteriormente peneirados para obtenção de uma granulometria uniforme.



Figura 4.4 – Moinho (DECA-UBI)

Após moagem do material, realizou-se uma análise granulométrica verificando-se que grande parte do material passava no peneiro 4 e ficava retida no peneiro 2, tendo-se optado por utilizar esta fração nas misturas. Na Figura 4.5 observa-se o HDPE já granulado. A granulometria e massa volúmica serão apresentados na secção 4.2.4. e 4.2.5.



Figura 4.5 – HDPE granulado

4.2.4 Ligantes Betuminosos

A mistura betuminosa a quente usada como referência foi produzida com betume 50/70, fornecido pela CEPSA Portuguesa Petróleos. Este betume está de acordo com as especificações da norma EN 12591 sendo adequado para todo o tipo de misturas a quente principalmente em zonas térmicas médias e temperadas. A temperatura de fabrico das misturas produzidas com este betume situa-se entre os 150°C e 160°C e a sua temperatura de compactação situa-se entre os 145°C e os 155°C. No Quadro 4.2 são apresentadas as características referentes ao betume 50/70 utilizado na produção da mistura de referência.

Quadro 4.2 – Características do betume 50/70

Propriedades	Norma	Betume 50/70		Utilizado
		Limites		
		Mínimo	Máximo	
Penetração 25°C, 100g, 5s (0,1 mm)	EN 1426	50 - 70		54
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	46- 54		50

Na produção de misturas betuminosas temperadas com incorporação de MBR e nas misturas com e sem incorporação de HDPE, adotou-se para a sua produção uma emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta RECIEMUL 90 (C60B5 REC). Esta contém características adequadas para a aplicação a temperaturas entre os 100°C e os 120°C, sendo habitualmente utilizada em misturas betuminosas recicladas temperadas. O betume utilizado na produção da emulsão possui uma consistência e composição adequada para rejuvenescer o ligante envelhecido presente nas misturas betuminosas recuperadas e o seu teor em betume possibilita a obtenção de uma viscosidade que permite o envolvimento de todo o material a reciclar. No Quadro 4.3 apresentam-se as características da RECIEMUL 90, fornecida pela CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.

Quadro 4.3 – Características da emulsão betuminosa RECIEMUL 90 (C60B5 REC)

Propriedades		Norma	Utilizado	Requisitos EN 13808
Viscosidade Saybolt Furol (25°C), s		ASTM D244	29	20 - 100
Sedimentação aos 7 dias, %		EN 12847	25,4	≤ 10
Carga das partículas		EN 1430	Positiva	Positiva
Resíduo no peneiro 0,5mm, %		EN 1429	0	≤ 0,1
Rotura com filler, BV		EN 13075-1	210	170 - 230
Destilação	Betume, % (m/m)	EN 1431	61	58 - 62
	Óleo, % (v/m)	EN 1431	0,25	≤ 8
Resíduo de destilação	Penetração 25°C, 100g, 5seg (0,1 mm)	EN 1426	103	≤ 330
	Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	46	≥ 35

4.2.5 Análise Granulométrica

A análise granulométrica para os componentes que as misturas betuminosas incorporam foi feita em concordância com a norma NP EN 933-1:2000, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração. O material foi seco em estufa pelo período de 24h, à temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. De seguida por meio de um conjunto de peneiros ordenados de forma decrescente quanto à abertura da malha, insere-se os mesmos num agitador com vibração como se pode observar na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Agitador (DECA-UBI)

A série de peneiros foi utilizada de acordo com as especificações do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014), correspondente ao fuso granulométrico de uma AC 20 base (MB). Os resultados da análise granulométrica estão representados no Quadro 4.4 e as respetivas curvas na Figura 4.7.

Quadro 4.4 – Análise granulométrica dos agregados, HDPE e MBR

Abertura dos peneiros [mm]	Passados [%]					
	Pó de pedra 0/4	Brita 3/6	Brita 6,3/14	Brita 15/25	HDPE	MBR
31,5	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	93	100	95
12,5	100	100	88	22	100	90
4	100	76	2	0	100	59
2	94	33	1	0	0	39
0,5	50	15	0	0	0	13
0,125	19	6	0	0	0	6
0,063	10	3	0	0	0	5

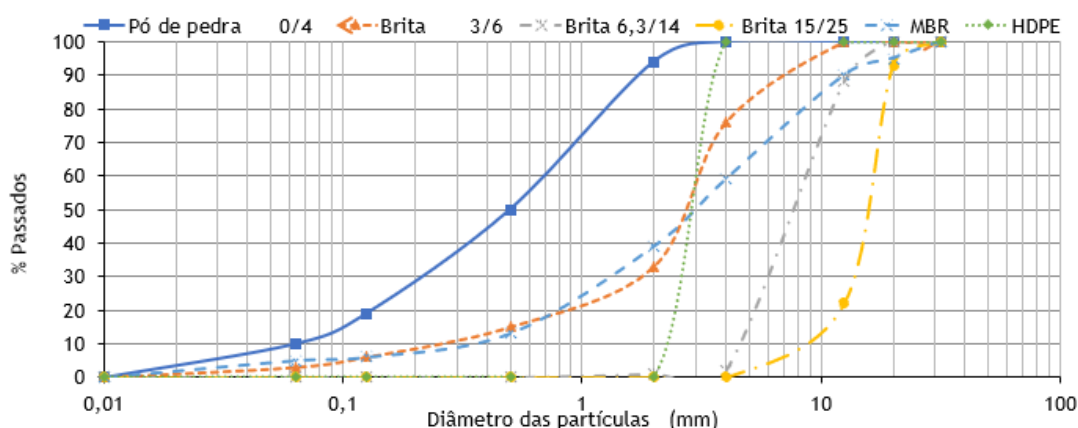


Figura 4.7 – Curva granulométrica dos agregados, HDPE e MBR

4.2.6 Massa Volúmica

A massa volúmica dos diversos materiais da mistura betuminosa foi determinada através do Picnómetro AccuPyc 1330. Este funciona pelo princípio de deslocamento de fluidos, usando um gás inerte como hélio para medir o volume do sólido. O processo de medição inicia-se colocando uma pequena amostra do material na câmara do picnómetro. Em seguida, uma pequena quantidade de gás hélio é injetada na câmara, onde ele se espalha uniformemente ao redor da amostra. Uma vez que a pressão dentro da câmara é

estabilizada, a densidade do material é calculada a partir do volume de gás hélio que foi deslocado pela amostra.

O Picnómetro AccuPyc 1330 é capaz de medir a massa volúmica de uma ampla variedade de materiais, incluindo materiais porosos e não porosos, sólidos e líquidos, com precisão. Na Figura 4.8 apresenta-se o Picnómetro AccuPyc 1330 do laboratório DECA-UBI, utilizado para a determinação da massa volúmica dos materiais constituintes das misturas betuminosas em estudo e no Quadro 4.5 os respetivos valores.



Figura 4.8 - Picnómetro AccuPyc 1330 (DECA-UBI)

Quadro 4.5 – Massa volúmica dos componentes das misturas

Massa Volúmica dos agregados [kg/m ³]	
Cal Hidráulica	2,74
Pó de Pedra	2,72
Brita 3/6	2,69
Brita 6,3/14	2,69
Brita 15/25	2,69
MBR	2,50
HDPE	0,95

4.3 Determinação da composição das misturas betuminosas

No presente estudo foram produzidos cinco tipos de misturas betuminosas, como referido anteriormente, uma mistura a quente como mistura de referência, uma mistura betuminosa temperada com incorporação de 65% MBR e três misturas betuminosas temperadas com incorporação de 65% de MBR e uma percentagem de HDPE de 4%, 5% e 6%. No Quadro 4.6 pode observar-se a designação de cada mistura betuminosa.

Quadro 4.6 - Designação das misturas betuminosas produzidas

Tipo de mistura	Designação
Mistura betuminosa a quente com 100% de agregados naturais	MQ
Mistura betuminosa temperada com emulsão e 65% de MBR	MT
Mistura betuminosa temperada com emulsão, 65% de MBR e 4% de HDPE	MTH4
Mistura betuminosa temperada com emulsão, 65% de MBR e 5% de HDPE	MTH5
Mistura betuminosa temperada com emulsão, 65% de MBR e 6% de HDPE	MTH6

4.3.1 Composição granulométrica

Como já referido anteriormente o fuso granulométrico utilizado é de uma mistura betuminosa a quente para camada de base AC 20 (MB) do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, devido ao facto das misturas betuminosas recuperadas temperadas ainda não estarem devidamente caracterizadas pela inexistência de dados neste tipo de camada e o seu desempenho a longo prazo.

O Quadro 4.7, e as Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a granulometria relativamente às cinco misturas betuminosas estudadas juntamente com os limites do fuso granulométrico utilizado.

Quadro 4.7 – Granulometria das misturas betuminosas produzidas

Abertura dos peneiros [mm]	Passados [%]						
	Limite inferior	Limite superior	MQ	MT	MTH4	MTH5	MTH6
31,5	100	100	100	100	100	100	100
20	90	100	98	95	96	96	96
12,5	57	86	73	77	81	81	81
4	34	49	36	45	49	49	49
2	26	41	26	31	31	30	29
0,5	12	26	14	13	13	12	12
0,125	4	14	7	7	7	7	7
0,063	2	7	5	7	7	6	6

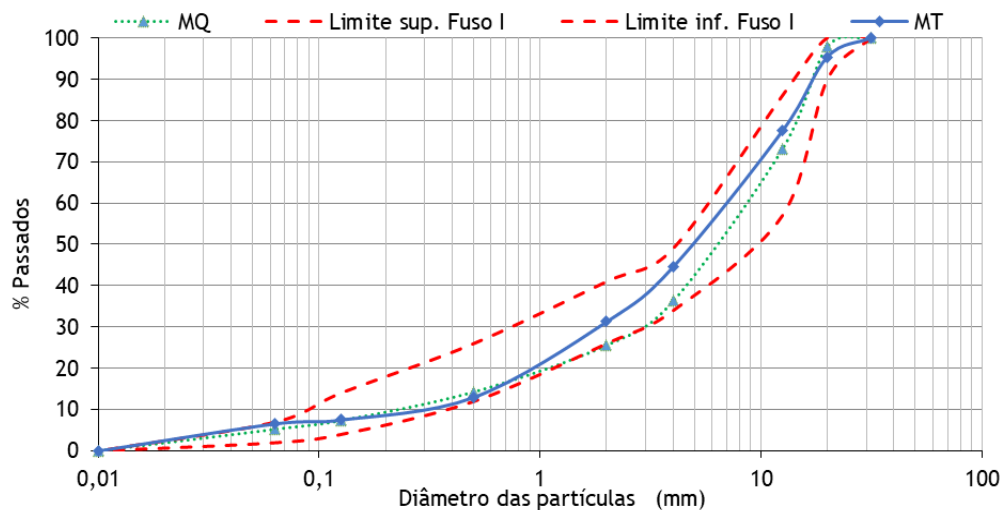


Figura 4.9 – Curvas granulométricas das misturas MQ e MT

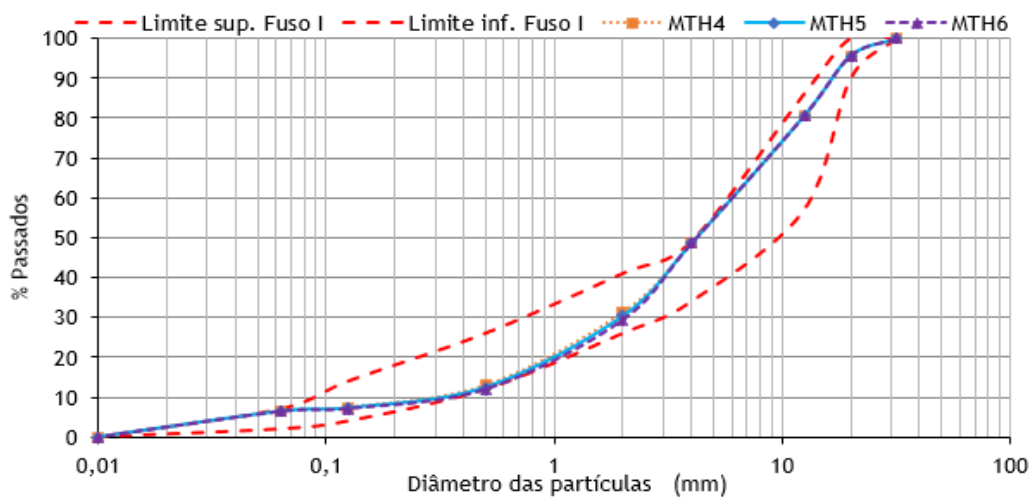


Figura 4.10 – Curvas granulométricas das misturas MTH4, MTH5 e MTH6

Através das análises às Figuras 4.9 e 4.10 verifica-se que todas as misturas cumprem o respetivo fuso granulométrico. Note-se que apenas a mistura de referência teve na sua formulação a incorporação da brita 3/6 por forma a cumprir o fuso granulométrico. No Quadro 4.8 apresenta-se a composição das misturas betuminosas em estudo.

Quadro 4.8 – Composição das misturas betuminosas em estudo (massa total de agregados)

Agregado	MQ [%]	MT [%]	MTH4 [%]	MTH5 [%]	MTH6 [%]
Cal hidráulica	3	3	3	3	3
Pó de Pedra	16	3	3	2	1
Brita 3/6	22	0	0	0	0
Brita 6,3/14	29	10	10	10	10
Brita 15/25	30	19	15	15	15
MBR	0	65	65	65	65
HDPE	0	0	4	5	6

4.3.2 Estimativa do teor de ligante

A percentagem de betume (Pb) em relação ao peso total da mistura de agregados que tem em conta a superfície específica dos mesmos, foi determinada com base na expressão empírica (4.1).

$$Pb = 0.0355 \times A + 0.045 \times B + K \times C + F \quad (4.1)$$

Onde:

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

A - Percentagem de agregados retidos no peneiro 2,36 mm;

B - Percentagem de agregados que passa no peneiro 2,36 mm e fica retido no peneiro 0,075 mm;

C - Percentagem de agregados que passa no peneiro 0,075 mm;

K - Constante, função da quantidade de material que passa no peneiro 0,075 mm;

- K= 0,15 para 11-15 % passados no peneiro 0,075 mm
- K= 0,18 para 6-10 % passados no peneiro 0,075 mm
- K= 0,20 para ≤ 5 % passados no peneiro 0,075 mm

F - Fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2%) Na falta de informação F=0,7%.

Os valores de K considerados foram 0.18 para todas as misturas exceto a MQ que utilizou-se 0.2, e adotou-se um fator de absorção dos agregados (F) de 0.7%.

Para todas as misturas, à exceção da MQ, calculou-se a quantidade de betume novo a adicionar à mistura (Pb_N), considerando que o teor de betume envelhecido presente nas MBR deve ser subtraído à percentagem de betume obtido na expressão (4.1), tendo presente também a taxa de reciclagem da mistura. Na expressão (4.2) determina-se o teor de betume novo expresso como percentagem de massa total da mistura.

$$Pb_N = Pb - \frac{Pb_{MBR} \times TR}{100} \quad (4.2)$$

Onde:

Pb_N - Percentagem de betume novo expressa como percentagem da massa total da mistura;

Pb - Percentagem de betume estimada na expressão (4.1);

Pb_{MBR} - Teor de betume das misturas betuminosas recuperadas;

TR - Taxa de reciclagem.

De acordo com o Quadro 4.9 é possível observar os resultados obtidos para as percentagens de teor de betume nas misturas.

Quadro 4.9 – Percentagem de teor de betume MTH

Mistura	Pb [%]	Pb _N [%]
MQ	5,3	-
MT	5,4	1,8
MTH4	5,4	1,8
MTH5	5,4	1,7
MTH6	5,4	1,7

No entanto para chegar à percentagem de emulsão a incorporar na mistura, visto que esta é constituída por água e betume, é necessário alterar a percentagem de betume novo (Pb_N) para a percentagem de emulsão (E), recorrendo à expressão (4.3).

$$E = \frac{Pb_N}{X} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde:

E - Percentagem de emulsão betuminosa a adicionar à mistura betuminosa [%];

Pb_N - Percentagem de betume novo calculado em relação à massa total da mistura [%];

X - Teor em betume da emulsão betuminosa (Quadro 4.3 o valor utilizado foi de 61 %).

Pode-se observar no Quadro 4.10 os resultados relativos à percentagem de emulsão a adicionar às misturas betuminosas temperadas, resultantes da fórmula (4.3).

Quadro 4.10 – Percentagem de emulsão a adicionar às misturas betuminosas temperadas

Mistura Betuminosa	E [%]
MT	2,9
MTH4	2,9
MTH5	2,8
MTH6	2,8

No presente estudo a mistura a quente (MQ) produziu-se com 5.3% de betume 50/70 tendo em conta a expressão 4.1. Quanto à mistura MT trata-se de uma mistura betuminosa temperada de agregados naturais com incorporação de MBR que difere com as restantes apenas pela utilização de HDPE que varia entre 4% a 6%. Assim sendo, para

o desenvolvimento do estudo, a mistura MT serviu de base para a determinação da percentagem ótima de emulsão. Inicialmente, optou-se por produzir a mistura com 3% e 3.5% de emulsão, no entanto, verificou-se que uma grande parte de agregados não estavam envolvidos pelo ligante pois o teor de finos absorvia toda a emulsão e não permitia um revestimento apropriado. Desta forma, produziram-se as misturas com as percentagens de 4%, 4.5% e 5% de emulsão. Na Figura 4.11 pode-se observar os provetes da mistura betuminosa a quente (identificados pela letra Q) e da mistura betuminosa temperada (identificados pela letra T).

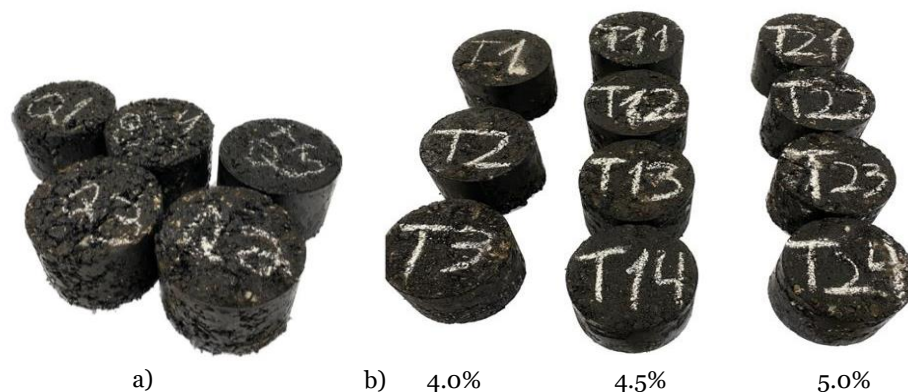


Figura 4.11 – Provetes cilíndricos produzidos: a) MQ b) MT

4.3.3 Determinação do teor ótimo de emulsão

O teor de ligante para a mistura a quente anteriormente calculado assumiu-se como o teor ótimo de ligante para a mistura de referência.

A determinação do teor ótimo de emulsão efetuou-se, segundo os parâmetros definidos no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014), tendo sido os provetes preparados segundo a norma europeia EN12697-35: 2004, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing*. Moldaram-se 3 provetes para a percentagem de 4% de emulsão por esta, ainda assim não demonstrar um total envolvimento dos agregados e 4 provetes para as restantes percentagens de ligante, fazendo um total de 11 provetes como está exemplificado na Figura 4.10 b).

Cada provete foi produzido aproximadamente com 1200g de agregados, para cada percentagem de emulsão. Os agregados e a MBR foram previamente aquecidos numa estufa a uma temperatura de 110°C para as misturas betuminosas temperadas assim como os moldes e a 160°C para a mistura betuminosa de referência a quente, sendo que esta também envolveu o aquecimento do betume 50/70 à mesma temperatura.

Na produção das misturas betuminosas temperadas primeiramente colocaram-se as britas 6.3/14 e 15/25 e a MBR envolvendo-se as mesmas com uma parte de emulsão à temperatura ambiente de modo a promover o total recobrimento dos agregados grossos sendo posteriormente adicionados o pó de pedra, a cal hidráulica e a restante emulsão.

Periodicamente mediu-se a temperatura das misturas, na fase de produção e compactação. As misturas a quente produziram-se aproximadamente a 160 °C e compactaram-se aproximadamente a 150 °C. No caso das misturas betuminosas temperadas, o fabrico envolveu temperaturas aproximadamente de 100°C (conforme ilustrado na Figura 4.12) e temperaturas de compactação de 90°C.



Figura 4.12 – Temperatura de produção das misturas temperadas

No processo de compactação dos provetes foram utilizados os moldes Marshall, com aproximadamente 101.6mm de diâmetro, sendo o seu conjunto composto por placa de base, molde e colar. Previamente foram lubrificados com óleo e colocou-se um filtro de papel no fundo do mesmo. A compactação foi realizada segundo a norma EN 12697-30:2017, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor*, com 75 pancadas em cada face do provete, totalizando um total de 150 pancadas. Após 4 horas os provetes foram desmoldados. Na Figura 4.13 pode-se observar algumas etapas da produção das misturas.



Figura 4.13 – Etapas de produção das misturas betuminosas

4.3.3.1 Baridade máxima teórica

O cálculo da baridade máxima teórica foi concretizado segundo a norma EN 12697-5:2002, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density*, procedimento C. O cálculo da mesma foi realizado segundo a expressão (4.4), sendo os resultados apresentados no Quadro 4.11.

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{P_{a1}}{\rho_{a1}}\right) + \left(\frac{P_{a2}}{\rho_{a2}}\right) + \dots + \left(\frac{P_{ab}}{\rho_{ab}}\right)} \quad (4.4)$$

Onde:

ρ_{mc} - Baridade máxima teórica da mistura betuminosa [kg/m³];

P_{a1} - Percentagem do agregado 1 na mistura [%];

P_{a2} - Percentagem do agregado 2 na mistura [%];

P_b - Percentagem do ligante na mistura [%];

ρ_{a1} - Massa volúmica do agregado 1 [kg/m³];

ρ_{a2} - Massa volúmica do agregado 2 [kg/m³];

ρ_b - Massa volúmica do ligante [kg/m³].

Quadro 4.11 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas

Misturas betuminosas	Pecentagem de betume [%]	Baridade máxima teórica [kg/m ³]
MQ	5,3	2483
	4	2412
MT	4,5	2394
	5	2377

4.3.3.2 Baridade

A baridade foi determinada segundo a norma europeia EN 12697-6: 2003, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens* procedure B: Bulk density – SSD. O cálculo da baridade saturada com superfície seca (ρ_{bssd}) foi realizado através da expressão (4.5) e na Figura 4.14 apresentam-se os resultados obtidos.

$$\rho_{bssd} = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \times \rho_w \quad (4.5)$$

Onde:

ρ_{bssd} - Baridade da mistura compactada saturada com superfície seca [kg/m^3];

M_1 – Massa do provete seco [kg];

M_2 – Massa do provete saturado, imerso em água [kg];

M_3 – Massa do provete saturado com superfície seca [kg];

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

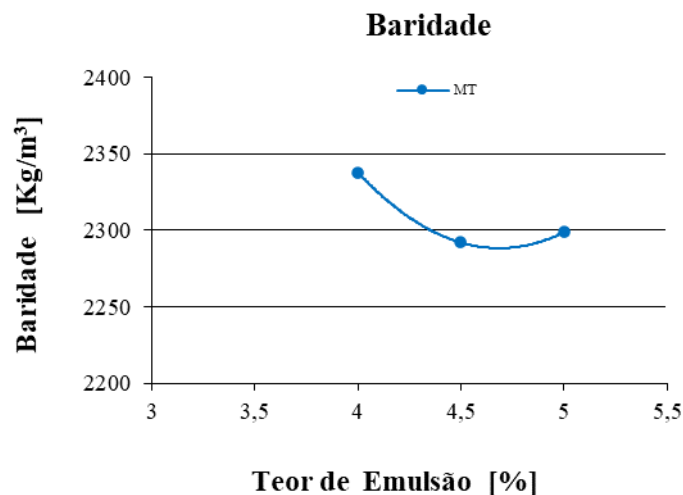


Figura 4.14 – Baridade saturada com superfície seca das misturas MT

Comparando os valores obtidos com os de baridade máxima teórica apresentados no Quadro 4.11, verifica-se que todas as misturas betuminosas temperadas com os diferentes teores de emulsão encontram-se abaixo da baridade máxima teórica correspondente.

O valor de baridade da mistura MQ foi de $2344 \text{ Kg}/\text{cm}^3$ que também se encontra abaixo do valor de baridade máxima teórica calculado para a respetiva mistura.

4.3.3.3 Porosidade, vazios na mistura de agregados e vazios nos agregados cheios de betume

Tendo os valores de baridade máxima teórica e de baridade saturada com superfície seca é possível calcular a porosidade das misturas betuminosas temperadas através da norma europeia EN 12697-8:2003, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Esta norma fornece as seguintes expressões:

(4.6) Permite calcular a porosidade das misturas;

(4.7) Permite calcular os vazios na mistura de agregados (VMA);

(4.8) Permite calcular os vazios nos agregados cheios de betume (VFB).

Na Figura 4.15 e 4.16 e 4.17 observam-se os resultados obtidos para as misturas betuminosas temperadas com vários teores de emulsão.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (4.6)$$

Onde:

V_m – Porosidade da mistura [%];

ρ_m – Baridade máxima teórica da mistura [kg/m³];

ρ_b – Baridade saturada com superfície seca dos provetes [kg/m³].

$$VMA = V_m + B \times \rho_b / \rho_B \quad (4.7)$$

Onde:

VMA - Vazios na mistura de agregados [%];

V_m - Porosidade da mistura [%];

B - Conteúdo de ligante, em 100 % da mistura [%];

ρ_b - Baridade saturada com superfície seca dos provetes [kg/m³];

ρ_B - Massa volúmica do ligante [kg/m³].

$$VFB = \frac{B \times \rho_b / \rho_B}{VMA} \times 100 \quad (4.8)$$

Onde:

VFB - Vazios nos agregados cheios de betume [%]

VMA - Vazios na mistura de agregados [%];

B - Conteúdo de ligante, em 100 % da mistura [%];

ρ_b - Baridade saturada com superfície seca dos provetes [kg/m³];

ρ_B - Massa volúmica do ligante [kg/m³].

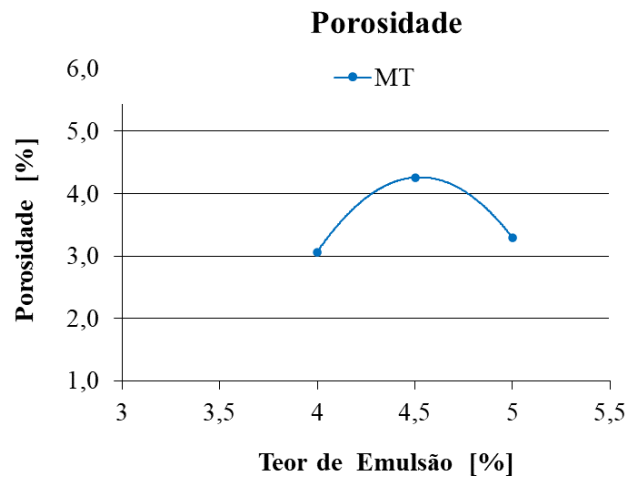


Figura 4.15 – Porosidade das misturas MT

Os limites estabelecidos no parâmetro da porosidade no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) encontram-se entre 3% e 6% para uma AC 20 base (MB). Neste caso, pode concluir-se que todas as percentagens de emulsão adotadas encontram-se neste intervalo de valores incluindo a mistura MQ que teve uma porosidade de 5.6%.

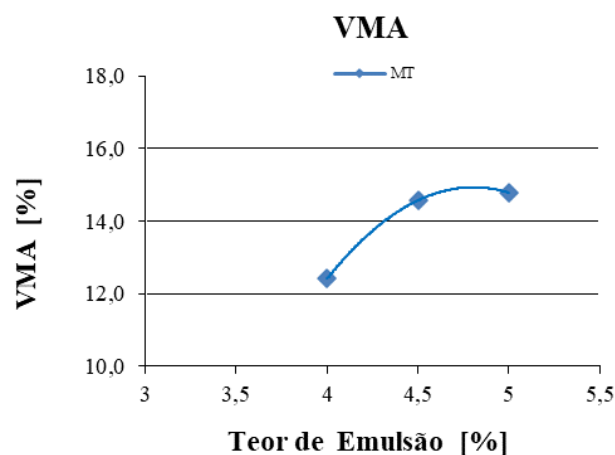


Figura 4.16 – VMA das misturas MT

Os VMA das misturas MT situam-se entre 12% e 15% sendo o valor mínimo imposto nos requisitos do AC 20 base (MB) de 14%. Conclui-se que as misturas MT com 4.5% e 5% de

emulsão cumprem este parâmetro, por outro lado a mistura produzida com 4% de emulsão não cumpre este requisito. Quanto à mistura MQ o seu valor de VMA calculado foi de 15 % pelo que respeita as normas impostas pelo Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014).

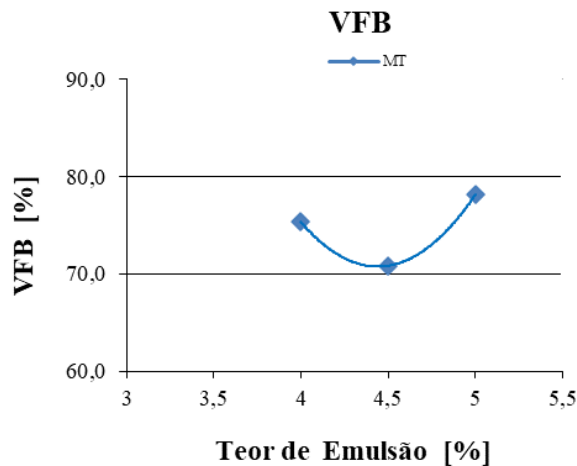


Figura 4.17 – VFB da mistura MT

Os VFB dos agregados cheios de betume situaram-se entre os 70% e 80% na mistura betuminosa com incorporação de MBR registando um menor valor na percentagem de 4.5% de teor de emulsão. Para a mistura MQ obteve-se uma percentagem de VFB de 62.1%.

4.3.3.4 Ensaio de Marshall

O ensaio de Marshall tem como referência a norma europeia EN 12697-34:2004, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 34: Marshall test*, é um ensaio padrão amplamente utilizado na indústria de construção rodoviária para determinação da formulação da mistura e avaliação do desempenho de misturas betuminosas. Os resultados deste ensaio pretendem principalmente calcular a deformação e resistência mecânica de uma mistura betuminosa compactada laboratorialmente, sob determinadas condições.

O ensaio foi executado no laboratório da empresa Infralab, os provetes foram previamente submetidos a um banho de imersão em água a 60°C durante cerca de 50 minutos, sendo posteriormente colocados individualmente no estabilómetro Marshall. Na Figura 4.18 pode observar-se o equipamento utilizado na realização do ensaio.



Figura 4.18 – Equipamento utilizado na realização do ensaio Marshall: a) Prensa b) Banho de imersão

O provete deforma-se lateralmente pois neste ensaio é aplicada uma força de compressão constante verticalmente, sendo assim medida a carga aplicada e o respetivo valor de deformação. Na Figura 4.19 encontram-se os resultados de estabilidade e deformação em função da percentagem de ligante para as misturas MT.

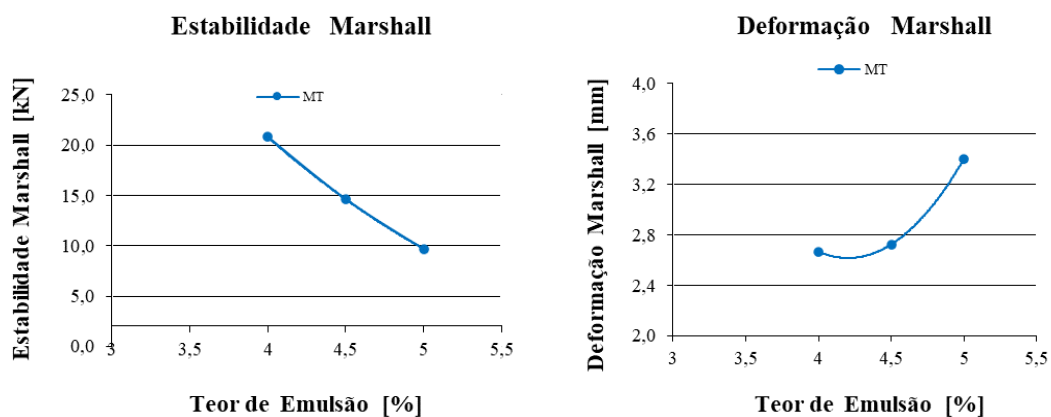


Figura 4.19 – Resultados de Estabilidade e Deformação do ensaio Marshall

Para as misturas MQ obtiveram-se resultados de estabilidade de 14.7% e deformação 2.3%, estes cumprem os requisitos do AC 20 base (MB) do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014), que definem uma estabilidade de 7.5% a 15% e uma deformação entre 2% a 4%. Pelos gráficos apresentados podemos verificar que nas misturas temperadas com incorporação de MBR a mistura com 4% de emulsão não cumpre os requisitos referentes à estabilidade, no entanto, as restantes cumprem apesar

da mistura com 4.5% de emulsão se encontrar no limiar da estabilidade máxima definida. No parâmetro da deformação verifica-se que todas as misturas estão dentro dos limites. Conclui-se assim que à medida que o teor de emulsão aumenta a estabilidade diminui e a deformação tende a aumentar.

4.3.3.5 Escolha do teor ótimo de emulsão

No Quadro 4.12 apresentam-se os requisitos referentes a uma mistura betuminosa a quente AC20 base (MB) preconizados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, uma vez que não existem valores especificados para misturas betuminosas com incorporação de MBR.

Quadro 4.12 – Requisitos da mistura AC 20 base (MB)

Requisitos/Propriedades	Referência Normativa	Caderno de Encargos das Estradas de Portugal
Estabilidade Marshall [kN]	EN 12697 - 34	7,5 - 15
Deformação Marshall [mm]	EN 12697 - 34	2 - 4
Vazios na mistura de agregados - VMA [%]	En 12697 - 8	min 14
Porosidade [%]	EN 12697 - 8	3 - 6
Quociente Marshall [kN/mm]	EN 12697 - 34	min 2

No Quadro 4.13 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para a mistura MQ e MT com vista à determinação da percentagem ótima de ligante, neste caso a emulsão RECIEMUL 90.

Quadro 4.13 – Resultados das misturas betuminosas MQ e MT

Misturas betuminosas	Ligante [%]	Estabilidade Marshall [kN]	Deformação Marshall [mm]	VMA [%]	Porosidade [%]	Quociente de Marshall [kN/mm]
MQ	5,3	14,7	2,3	15,0	5,6	6,6
	4,0	20,8	2,7	12,4	3,1	7,9
MT	4,5	14,6	2,7	14,6	3,9	5,4
	5,0	9,7	3,4	14,8	3,3	2,9

A mistura MQ, tendo sido desenvolvida com o objetivo de ser a mistura de referência, cumpre na íntegra todos os requisitos definidos. Quanto às misturas MT, a mistura com 4% de emulsão para além de não apresentar os agregados totalmente revestidos, não cumpre os parâmetros definidos na estabilidade Marshall e no VMA. As restantes misturas com 4.5% e 5% de emulsão estão de acordo com todos os requisitos. Optou-se

pela mistura com 4.5% de emulsão por se ter concluído que os resultados da mesma são mais vantajosos para a finalidade do estudo, quando comparada à mistura com 5% de emulsão. A escolha do teor ótimo de emulsão, neste caso 4.5% será empregue no seguimento do estudo nomeadamente nas misturas MTH4, MTH5 e MTH6.

4.3.4 Determinação do teor ótimo de plástico de alta densidade

Alguns estudos têm demonstrado que a incorporação de plástico em misturas betuminosas com percentagens a variar entre 2% a 10% em peso total da mistura, pode proporcionar efeitos positivos no desempenho das misturas betuminosas. No caso do HDPE quando incorporado através do método seco, as percentagens mais usuais variam entre 2% a 8% (Yin et al., 2020; Willi et al., 2020; Subrahmanya Sarma & Srikanth, 2018). No entanto, não havendo conhecimento prévio das melhores percentagens desta classe de plástico quando incorporado em misturas betuminosas temperadas com alta taxa de reciclagem de MBR, optou-se por valores de 4%, 5% e 6%. Previamente no capítulo 4.3.1 no Quadro 4.7 já foi exposta a composição granulométrica aplicada às misturas. No Quadro 4.14 apresentam-se a baridade máxima teórica, baridade, porosidade, VMA, VFB, estabilidade, deformação e quociente Marshall.

Quadro 4.14 – Resumo dos resultados das misturas MTH4, MTH5 e MTH6

Misturas betuminosas	Baridade máxima teórica [Kg/m ³]	Baridade [Kg/m ³]	Porosidade [%]	VMA [%]	VFB [%]	Estabilidade Marshall [kN]	Deformação Marshall [mm]	Quociente Marshall [kN/mm]
MTH4	2253	2146	4,7	14,4	69,25	13,3	5,4	2,6
MTH5	2220	2040	8,1	17,3	56,69	14,87	5,4	2,9
MTH6	2188	2048	6,4	15,6	59,72	11,73	6,0	2,1

A adição de HDPE de algum modo veio aumentar a porosidade das misturas e a deformação como se pode verificar no Quadro 4.14. A composição granulométrica das misturas com diferentes quantidades de HDPE diferem da mistura MT (sem incorporação de HDPE) na percentagem de agregados 15/25, pó de pedra e no acréscimo de HDPE como apresentado no Quadro 4.8. Procurou-se outra formulação que aumentasse a quantidade de brita 15/25 na tentativa de o esqueleto mineral contribuir para uma menor deformação das misturas. No Quadro 4.15 apresentam-se as composições granulométricas das novas misturas denominadas de MTH-V2.

Quadro 4.15 – Composição granulométrica das misturas MTH-V2

Agregado	MTH4-V2 [%]	MTH5-V2 [%]	MTH6-V2 [%]
Cal hidráulica	3	3	3
Pó de Pedra	1	1	1
Brita 6,3/14	9	8	7
Brita 15/25	18	18	18
MBR	65	65	65
HDPE	4	5	6

Posteriormente estas misturas foram ensaiadas segundo o método de Marshall e no Quadro 4.16 apresenta-se um resumo dos resultados.

Quadro 4.16 - Resumo dos resultados das misturas MTH4-V2, MTH5-V2 e MTH6-V2

Misturas betuminosas	Baridade máxima teórica [Kg/m ³]	Baridade [Kg/m ³]	Porosidade [%]	VMA [%]	VFB [%]	Carga máxima Marshall [kN]	Deformação Marshall [mm]
MTH4-V2	2252	2002	11,1	20,1	45,34	7,1	6,47
MTH5-V2	2219	1995	10,1	19,1	47,32	7,9	6,27
MTH6-V2	2188	1991	9,0	18	50,11	11,1	8,35

Pelo Quadro 4.16 pode-se concluir que a adição de brita mais grossa, com o intuito de fortalecer o esqueleto mineral, não se revelou positiva pois a porosidade e o VMA aumentaram substancialmente, não cumprindo os requisitos definidos no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014).

Com estes resultados, e devido ao facto de não haver quantidade suficiente de emulsão RECIEMUL 90 para produção de mais misturas, foi necessário prosseguir o estudo selecionando de entre as misturas apresentadas no Quadro 4.14 a mistura mais conveniente, ou seja, a MTH4.

4.4 Ensaio de sensibilidade à água

A caracterização das propriedades mecânicas e do comportamento das misturas betuminosas é um aspeto fundamental na indústria de construção rodoviária. De modo a conhecer o comportamento face à presença de água da mistura MTH4, apresenta-se nesta secção o ensaio de sensibilidade à água.

O ensaio de sensibilidade à água foi realizado segundo as diretrizes da norma EN 12697-12: 2003, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 12:*

Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. Este teve como objetivo comparar os valores médios de resistência à tração em compressão diametral de dois grupos de três provetes, que foram mantidos em diferentes condições: secos e imersos.

A separação do grupo de provetes para o grupo seco e imerso teve em conta a semelhança da baridade e os valores das alturas de modo que, cada grupo não variasse mais do que 5mm. Foram produzidos 4 provetes para cada grupo e selecionaram-se os 3 com baridades e alturas idênticas. Apresentam-se no Quadro 4.17 as baridades e porosidades de cada provete.

Quadro 4.17 – Baridade e Porosidade dos provetes separados por grupos

Provetes	Baridade [kg/m ³]		Porosidade [%]	
	Seco	Imerso	Seco	Imerso
1	2123	-	5,7	-
2	-	2213	-	1,7
3	-	2222	-	1,3
4	-	2182	-	3,2
5	2168	-	3,8	-
6	2162	-	4	-
7	-	2211	-	1,9
8	2098	-	6,9	-

O grupo de provetes seco foi mantido ao ar a, aproximadamente, $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, enquanto o grupo imerso foi colocado em banho de água a $40 \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante o período de 68 a 72h. É importante realçar que, de acordo com a norma, os provetes do grupo imerso foram previamente submetidos a vácuo em água a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ e mantidos 30 minutos com uma pressão absoluta de 6.7 ± 0.3 kPa de modo a garantir que a água penetre de forma adequada nos poros dos provetes do segundo grupo. Após a aplicação de vácuo feita uma verificação de volume dos provetes, confirmando que não houve um aumento de volume superior a 2%. Na Figura 4.20 apresenta-se o grupo imerso submetido ao banho de vácuo.



Figura 4.20 - Grupo imerso submetido ao banho de vácuo

Após o banho de 40°C o grupo imerso foi colocado em água a 15°C durante mais de 2 horas e o grupo seco foi colocado ao ar a 15°C pelo mesmo período. Por fim, os dois grupos de provetes foram ensaiados à compressão diametral, com uma aplicação de carga a velocidade constante de 50 ± 2 mm/min seguindo os procedimentos definidos na norma EN1697-23:2003, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. Na Figura 4.21 pode-se observar o ensaio de tração indireta em compressão diametral.



Figura 4.21 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral (InfraLab)

A resistência conservada em tração indireta (ITSR - Indirect Tensile Strength Ratio) é calculada através da expressão (4.9).

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (4.9)$$

Onde:

ITSR – Resistência conservada em tração indireta [%];

ITS_w – Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes do grupo imerso;

ITS_d – Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes do grupo seco.

Para ambos os grupos de provetes, a resistência à tração indireta (ITS – Indirect Tensile Strength) é dada pela expressão (4.10).

$$ITS = \frac{2 P}{\pi D H} \quad (4.10)$$

Onde:

ITS – Resistência à tração indireta [kPa];

P – Resistência máxima média [kN];

D – Diâmetro do provete [mm];

H – Altura do provete [mm].

No Quadro 4.18 apresentam-se os resultados do ensaio de sensibilidade à água.

Quadro 4.18 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água

Mistura betuminosa	ITS [kPa]		ITSR [%]
	Seco	Imerso	
MTH4	1630	1922	118

Não estão referenciados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) requisitos referentes ao ensaio de sensibilidade à água. No entanto, podemos concluir que estes valores, sendo superiores a 100%, demonstram que não ocorre penetração da água nos provetes devido à baixa porosidade destes e, consequentemente, maior baridade. A norma EN 12697-23:2003, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect*

tensile strength of bituminous specimens, classifica a rotura dos provetes ensaiados como está apresentado na Figura 4.22.

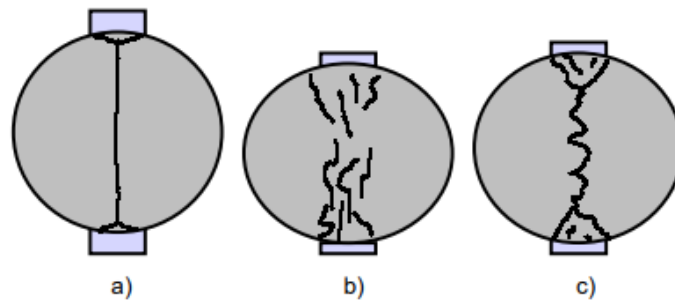


Figura 4.22 – Classificação de roturas no ensaio ITS (EN 12697-23)

Os tipos de rotura são classificados da seguinte forma:

- a) “Clear tensile break” - O provete rompe ao longo de uma linha diametral, exceto em pequenas secções triangulares próximas da zona de contacto.
- b) “Deformation” - O provete não apresenta uma linha de rotura clara.
- c) “Combination” – O provete apresenta uma linha de rotura e maiores deformações junto da zona de contacto.

Na seguinte Figura 4.23 apresentam-se as roturas dos provetes do grupo seco e imerso, que de acordo com a norma são do tipo c) “Combination”.

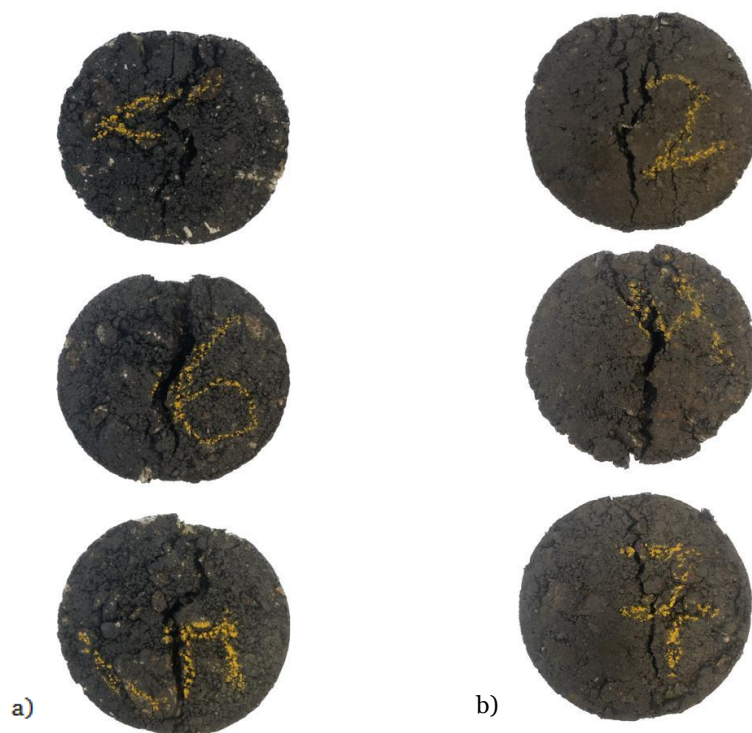


Figura 4.23 – Rotura dos provetes: a) Seco b) Imerso

Quadro 4.19 – Resumo das propriedades da mistura MTH4

MTH4		
Propriedades	Norma	Valor obtido
Porosidade [%]	EN 12697-8:2003	4,7
Baridade [kg/m ³]	EN 12697-8:2003	2146
Estabilidade Marshall [kN]	EN 12697-34:2004	13,3
Deformação Marshall [mm]	EN 12697-34:2004	5,4
VMA [%]	EN 12697-8:2003	14,4
VFB [%]	EN 12697-8:2003	69,25
Quociente de Marshall [kN/mm]	EN 12697-34:2004	2,6
ITS (Grupo seco) [kPa]	EN 12697-12: 2003	1630
ITS (Grupo Imerso) [kPa]	EN 12697-12: 2003	1922
ITSR [%]	EN 12697-12: 2003	100

Capítulo 5 – Considerações finais e recomendações para estudos futuros

A introdução de resíduos juntamente com o MBR na produção de misturas betuminosas para manutenção e reabilitação de pavimentos, será certamente o futuro da indústria de construção rodoviária, sendo por isso necessário aprofundar o conhecimento do desempenho destas soluções.

Cada vez mais, estão a ser impostas legislações rigorosas no que toca à sustentabilidade. Sendo a indústria da construção rodoviária uma das maiores consumidoras de recursos naturais, emissões de CO₂ e produção de resíduos, terá de investir no desenvolvimento de novas misturas. Assim sendo, o objetivo principal deste trabalho passava por avaliar o comportamento mecânico de misturas betuminosas produzidas a temperaturas mais baixas, com uma grande percentagem de MBR e incorporação de resíduos plásticos, quando comparadas às misturas tradicionais a quente em camadas de base.

Iniciou-se o estudo caracterizando os materiais das misturas betuminosas produzidas em laboratório. A caracterização das MBR revelou que o ligante recuperado encontrava-se bastante envelhecido com uma penetração muito baixa, de 11 (0.1mm) e uma temperatura de amolecimento de 77.8°C, não cumprindo esta última o valor exigido no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal.

O trabalho experimental incluiu a produção de diferentes tipos de misturas. Uma mistura produzida a quente, com betume 50/70 (MQ), que serviu como mistura de referência. Uma mistura temperada com incorporação de 65% de MBR (MT) e uma mistura temperada com incorporação de 65% de MBR e com HDPE (MTH), ambas produzidas com a emulsão catiónica de rotura lenta RECIEMUL 90.

Realizaram-se estudos da composição das misturas de modo que cumprissem o fuso granulométrico preconizado no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, para uma mistura de AC 20 base (MB). Posto isto, foram produzidas a mistura MQ e MT e realizou-se o ensaio Marshall para diferentes teores de ligante. Utilizando a mistura MQ como referência determinou-se o teor ótimo de ligante para a mistura MT tendo em conta os resultados do ensaio Marshall e as propriedades fundamentais como baridade e porosidade. Do estudo resultou 4.5% de emulsão como sendo o valor apropriado para a

mistura betuminosa temperada com incorporação de 65% MBR, sendo este o teor ótimo quando comparados os resultados com mistura MQ, cumprindo todos os requisitos do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para uma mistura AC20 base (MB).

Após determinação do teor de ligante ótimo, produziu-se a mistura MTH com o propósito de identificar a percentagem ideal de incorporação de HDPE. Nesta fase do estudo também foi utilizado o ensaio Marshall. Verificou-se que a mistura não cumpriu a deformação imposta no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, no entanto estes requisitos foram definidos para misturas betuminosas a quente com agregados naturais, não estando incluído as misturas com MBR e o plástico, não significando que estes materiais não sejam adequados a esta aplicação. Com a evolução da tecnologia e a procura por soluções sustentáveis para aplicação e reutilização de resíduos, outros métodos de ensaio devem ser desenvolvidos ou ajustados, pois a incorporação destes materiais em misturas betuminosas representa um feito enorme para a sustentabilidade do planeta. A mistura MTH com 4% de incorporação de HDPE (MTH4) apenas não cumpriu o requisito de deformação Marshall em 1.4%, sendo este valor relativamente pequeno quando comparado ao benefício da incorporação de plástico juntamente com MBR em misturas betuminosas temperadas.

Durante o ensaio de sensibilidade à água, verificou-se que a resistência à tração indireta (ITS) dos provetes do grupo “seco” foi menor que no grupo “imerso” apresentando um valor de resistência conservada indireta (ITSR) superior a 100%. Conclui-se que a mistura MTH4, não permite a penetração da água, devido à sua baixa porosidade, não influenciando o seu desempenho. O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal não referencia qualquer requisito para este tipo de ensaio, no entanto para uma camada de base é essencial que a mistura detenha uma baixa porosidade, de modo a não permitir a infiltração da água mitigando danos que possam ocorrer em camadas mais profundas. Através do ensaio de sensibilidade à água foi ainda possível classificar os tipos de rotura nos provetes, observando-se roturas do tipo “Combination”, segundo a norma vigente.

A utilização de misturas betuminosas temperadas com incorporação de MBR e HDPE mostrou-se uma opção viável e promissora, apresentando um conjunto enorme de vantagens ambientais e económicas a seu favor, no entanto, seria importante estudar outro tipo de formulações e temperaturas na fase de produção, assim como a aplicação de outros ensaios de desempenho das mesmas.

Seria pertinente realizar análises de lixiviados, de modo a avaliar o desprendimento de partículas de HDPE ao longo do tempo e a possibilidade de risco de contaminação de solos e lençóis freáticos.

Bibliografia

Almeida-Costa, A., & Benta, A. (2016). Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2308–2317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.077>

Almeida, A., Captao, S., Bandeira, R., et al. (2020). Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Construction and Building Materials* 232, 117253.

Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., & Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 984-989.

Al-Hadidy, A., Tan, Y. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials* 23 (3), 1456-1464.

Angelone, S., Martinez, F., Cauhape Casaux, M. (2016). A Comparative Study of Bituminous Mixtures with Recycled Polyethylene Added by Dry and Wet Processes. In: Canestrari, F., Partl, M. (eds) 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. RILEM Bookseries, vol 11. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_47

Arabani, M. (2011). Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1181–1185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.043>

Attaelmanan, M., Feng, C.P., Al-Hadidy, A. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials* 25 (5), 2764-2770.

Autelitano, F., Bianchi, F., & Giuliani, F. (2017). Airborne emissions of asphalt/wax blends for warm mix asphalt production. *Journal of Cleaner Production*, 164, 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.247>

Awazhar, N. A., Khairuddin, F. H., Rahmad, S., Fadzil, S. M., Omar, H. A., Nur, N. I., & Badri, K. H. (2020). Engineering and leaching properties of asphalt binders modified with polyurethane and Cecabase additives for warm-mix asphalt application. *Construction and Building Materials*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117699>

Barbosa Alconada, I. (2011). Contribuição para o estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas mornas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, outubro

Behnood, A. (2020). A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 259). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120817>

Brown, E. R., Kandhal, P. S., Roberts, F. L., Kim Y.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W. (2009). Hot mix asphalt: Materials, mixture design, and construction. Lanham: NCAT at Auburn University 3rd Edition. (2009)

Budney, J. (2012). Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, fevereiro.

Caló, M., & Vale, C. (s.d.). Potencialidades e fragilidades na utilização de resíduos em misturas betuminosas. 10^oCRP Congresso Rodoferroviário Português

Capitão, S. D., Picado-Santos, L. G., & Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. In *Construction and Building Materials* (Vol. 36, pp. 1016–1024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>

Cardoso, R., Silva, R. V., Brito, de J., & Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*, 49, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>

CEPSA (2022). RECIEMUL 90 (C60B5 REC). Technical specification, Revision n^o1, 10 Novembro 2022

Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>

Chowdhury, A., & Button, J. W. (2008). *A Review of Warm Mix Asphalt 5. Report Date 13. Type of Report and Period Covered Unclassified*. <http://www.ntis.gov>

Costa, L., Peralta, J., Oliveira, J.R., et al. (2017). A new life for cross-linked plastic waste as aggregates and binder modifier for asphalt mixtures. *Applied Sciences*, 7(6), 603.

D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., & Yeaton, B. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. FHWA, AASHTO, NCHRP. Report No. FHWA PL-08-007, Alexandria.

Das, P. K., Tasdemir, Y., & Birgisson, B. (2012). Evaluation of fracture and moisture damage performance of wax modified asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(1), 142–155. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.644120>

Dinis-Almeida, M. (2010). *Caracterização e Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas em Central*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, dezembro.

Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., & Antunes, M. D. L. (2012). Mix design considerations for warm mix recycled asphalt with bitumen emulsion. *Construction and Building Materials*, 28(1), 687-693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.053>

Duan, K., Wang, C., Liu, J., Song, L., Chen, Q., & Chen, Y. (2022). Research progress and performance evaluation of crumb-rubber-modified asphalts and their mixtures. *Construction and Building Materials*, 361, 129687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129687>

Dubois, C. J., Brown, H., & Serrat, C. (2020). Case study: wet processed plastics in asphalt. In Transportation Research Board 99th Annual Meeting, Washington DC, 2020.

EAPA (2008). Arguments to Stimulate the Government to Promote Asphalt Reuse and Recycling. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, 21 may.

EAPA (2014). The use of Warm Mix Asphalt. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, October.

EAPA Asphalt in Figures (2021), European Asphalt Pavement Association

EAPA a (2022). A Key Construction Product for the European Circular Economy. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, June
<https://eapa.org/download/15517/>

EAPA b (2022). Recomendations for Road Authorities to achieve circular economy goals through the maintenance, re-use and recycling of asphalt, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, June
<https://eapa.org/download/15437/>

Esther, L. A., Pedro, L. G., Irune, I. V., & Gerardo, F. (2020). Comprehensive analysis of the environmental impact of electric arc furnace steel slag on asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 275.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123121>

Estradas de Portugal, S.A. (2014). Caderno de Encargos Tipo Obra, Capítulo 14.03 – Pavimentação. Estradas de Portugal, S.A., Vol. 3, setembro.

Faheem, A., Cloutier, C., Bautista, E. G., & Sobolev, K. (2017). Impact of coal combustion product incorporation in asphalt mixture performance (No. 17-05853).

Fang, C., Liu, P., Yu, R., et al. (2014a). Preparation process to affect stability in waste polyethylene-modified bitumen. *Construction and Building Materials* 54, 320-325.

Fang, C., Liu, X., Yu, R., et al. (2014b). Preparation and properties of asphalt modified with a composite composed of waste package poly(vinyl chloride) and organic montmorillonite. *Journal of Materials Science & Technology* 30 (12), 1304e1310.

Ferreira, C. I. G., (2009). “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga.

Fontes, L. P. T. L., Pereira, P. A. A., Pais, J. C., & Trichês, G. (2006). Performance of wet process method alternatives: Terminal or continuous blend. *Asphalt Rubber 2006 Conference*, Palm Springs, USA, 473-486.

Fontes, L. P. T. L. (2009). *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*. (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

Fuentes-Auden, C., Sandoval, J.A., Jerez, A., et al. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen. *Polymer Testing* 27 (8), 1005-1012

González-Fernández, D., Cózar, A., Hanke, G., Viejo, J., Morales-Caselles, C., Bakiu, R., Barceló, D., Bessa, F., Bruge, A., Cabrera, M., Castro-Jiménez, J., Constant, M., Crosti, R., Galletti, Y., Kideys, A. E., Machitadze, N., Pereira de Brito, J., Pogojeva, M., Ratola, N., ... Tourgeli, M. (2021). Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean. *Nature Sustainability*, 4(6), 474–483. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00722-6>

Gorski, C.M.F.M. (2010). *Estabilização de Solos Argilosos com Ligante Hidráulico LIPIDUR DS*, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Ghuzlan, K. A., Al-Khateeb, G. G., & Qasem, Y. (2013). Rheological properties of polyethylene-modified asphalt binder. *Athens Journal of Technology and Engineering*, 10, 1-14

Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D., & Liang, M. (2020). Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 266). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121704>

Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2006). Evaluation of Evotherm® for use in warm mix asphalt. National Asphalt Pavement Association (NAPA) Report.

Jenkins, K., Goot, J.L.A., van de Ven, M.F.C., & Molenaar, A.A.A. (1999). Halfwarm foamed bitumen treatment, a new process. Proceedings of the 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa - CAPSA'99. Victoria Falls, Zimbabwe, August 29 to September 2.

Kamada, O., & Yamada, M. (2002). Utilization of Waste Plastics in Asphalt Mixtures. Osaka City University, Osaka.

Koenders, B.G., Stoker, D.A., Robertus, C., Larsen, O., Johansen, J. (2002). Wam-Foam – Asphalt Production at Lower Operating Temperatures. 9th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1 of 2, august, pp. 161-169, Copenhagen, Denmark.

Lim X (2021) Microplastics are everywhere - but are they harmful? Nature. 6 May; Vol 593 doi: 10.1038/d41586-021-01143-3.

Lugeiyamu, L., Kunlin, M., Mensahn, E.S.K., et al. (2021). Utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) as partial replacement of bitumen in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 309, 125176.

Mahrez, A., & Karim, M.R. (2010). Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass. *International Journal of Physical Sciences* 5 (12), 1840-1847.

Mistry, R., Karmakar, S., & Roy, T. K. (2019). Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 20(4), 979-990. doi: 10.1080/14680629.2017.1422791

Mohd Hasan, M. R., & You, Z. (2015). Estimation of cumulative energy demand and green house gas emissions of ethanol foamed WMA using life cycle assessment analysis. *Construction and Building Materials*, 93, 1117–1124.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.029>

Mohd Hasan, M. R., You, Z., & Yang, X. (2017). A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques. In *Construction and Building Materials* (Vol. 152, pp. 115–133). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.135>

Mohd Hasan, M. R., & You, Z. (2019). Comparative study of ethanol foamed asphalt binders and mixtures prepared via manual injection and laboratory foaming device.

Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 6(4), 383–395. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.06.005>

Nasr, D., & Pakshir, A. H. (2019). Rheology and storage stability of modified binders with waste polymers composites. *Road Materials and Pavement Design*, 20(4), 773–792.

<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1459372>

Pais, J. C., Pereira, Maricato, S., & Moura, J. (2014). Desempenho de misturas betuminosas abertas e fechadas com betume modificado com baixa percentagem de borracha. <https://hdl.handle.net/1822/17183>

Pei, Z., Yi, J., Fan, L., Yu, W., Hai, B., & Feng, D. (2022). Analysis of the trend in evolution of multilevel mechanical properties of solvent-based cold mixed liquid asphalt and mixture. *Construction and Building Materials*, 335.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127476>

Pereira, R.X.L. (2010). *Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interação Aditivo-Ligante*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Prowell, B. D. & Hurley, G. (2006). “Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, pp 41-90.

Prowell, B.D., Hurley, G.C., Frank B. (2012). "Warm-Mix Asphalt: Best Practices". NAPA (National Asphalt Pavement Association), Quality Improvement Publication 125 – 3rd Edition, Lanham – USA.

Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2011). Behavior of reclaimed polyethylene modified asphalt cement for paving purposes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 833-845.

Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., & Pérez, I. (2013). Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 43, 300–308.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.025>

Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm Mix Asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>

Salas, M.Á., & Pérez-Acebo, H. (2018). Introduction of recycled polyurethane foam in mastic asphalt. *Gradjevinar*, 70(5), 403-412.

Shafabakhsh, G. H., & Sajed, Y. (2014). Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.05.002>

Singh, P.K., Suman, S.K., Kumar, M. (2020). Influence of recycled acrylonitrile butadiene styrene (ABS) on the physical, rheological and mechanical properties of bitumen binder. *Transportation Research Procedia*, 48, 3668-3677. doi: 10.1016/j.trpro.2020.08.059

Singh, G. D., Sharma, V. K., Sangma, B., Kumar, R., Senthil, K., & Singh, A. P. (2022). Experimental study on bituminous concrete pavement using low density polyethylene and sasobit. *Materials Today: Proceedings*, 52, 2109–2114.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.387>

Subrahmanya Sarma, M., & Srikanth, B. (2018). Study on use of Waste Polythene in Bituminous Paving Mix Design. In *International Journal for Modern Trends in Science and Technology* (Vol. 04). <http://www.ijmtst.com/vol4issue6.html>

Šušteršič, E., Tušar, M., & Zupančič Valant, A. (2014). Asphalt concrete modification with waste PMMA. *Materials and Structures*, 47(11), 1817-1824.

Willis, R., Yin, F., & Moraes R. (2020). RECYCLED PLASTICS IN ASPHALT PART A: State of the Knowledge. National Asphalt Pavement Association, October
www.AsphaltPavement.org

Valente, V. F. D., (2019). “Avaliação do desempenho de uma mistura betuminosa temperada com betume aditivado para tal”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Wong, T. L. X., Mohd Hasan, M. R., & Peng, L. C. (2022). Recent development, utilization, treatment and performance of solid wastes additives in asphaltic concrete worldwide: A review. In *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* (Vol. 9, Issue 5, pp. 693–724). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.06.003>

Xu, J., Yang, E., Luo, H., & Ding, H. (2020). Effects of warm mix additives on the thermal stress and ductile resistance of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117746>

Xu, N., Wang, H., Wang, H., Kazemi, M., & Fini, E. (2023). Research progress on resource utilization of waste cooking oil in asphalt materials: A state-of-the-art review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 385). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135427>

Xu, S., Xiao, F., Amirkhanian, S., & Singh, D. (2017). Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 142, pp. 148–161). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069>

Yin, F., Moraes, R., & Anand, A. (2020). RECYCLED PLASTICS IN ASPHALT PART B: State of the Knowledge. National Asphalt Pavement Association, October
www.AsphaltPavement.org

You, L., Long, Z., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., Hashemi, M., & Diab, A. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. In *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* (Vol. 9, Issue 5, pp. 742–764). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>

Zaumanis, M. (2010). Warm Mix Asphalt Investigation. Master of Science Thesis. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark in cooperation with the Danish Road Institute, Department of Civil Engineering

Zheng, W., Wang, H., Chen, Y., Ji, J., You, Z., & Zhang, Y. (2021). A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder. In *Construction and Building Materials* (Vol. 297). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123820>

Zoorob, S.E., Suparma, L.B. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement and Concrete Composites*, 22(4), 233-2

Acervo Normativo

EN 12697-1:2000	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder contente
EN 12697-5:2002	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density
EN 12697-6: 2003	Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens
EN 12697-8:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens
EN 12697-12: 2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens
EN 12697-23:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.
EN 12697-30:2017	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor
EN 12697-34:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test
NP EN 933-1:2000	Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração
NP EN 13108-8:2011	Misturas betuminosas Especificações dos materiais - Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas