



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Ana Rita Gama Bandeira

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS
BETUMINOSAS COM A INCORPORAÇÃO DE
FRAGMENTOS DE RESÍDUOS DE PLÁSTICO DE
BAIXA DENSIDADE

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, orientada pela Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Maio 2019



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Ana Rita Gama Bandeira

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM A INCORPORAÇÃO DE FRAGMENTOS DE RESÍDUOS DE PLÁSTICO DE BAIXA DENSIDADE

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF BITUMINOUS MIXTURES WITH THE INCORPORATION OF FRAGMENTS OF LOW DENSITY PLASTIC WASTE

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pela Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 22 de maio de 2019

Em memória do meu pai e dos meus avós, António e Isabel

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero deixar um agradecimento especial à Professora Arminda, minha orientadora, por todo o apoio, disponibilidade, simpatia e por todos os conhecimentos que me transmitiu. Foi, sem dúvidas, uma peça fulcral na elaboração desta dissertação.

Quero agradecer aos “rapazes do laboratório”. Ao Sr. Tino, ao Luís e principalmente ao César, por toda a ajuda prestada, pela amizade e pelas horas infindáveis de risadas e boa disposição. Fizeram da minha passagem pelo Laboratório de Pavimentos do DEC-FCTUC uma experiência que jamais vou esquecer e de lá não levo mais do que excelentes recordações.

Agradeço também ao Carlos Renato do Laboratório de Pavimentos do DEC-ISEC, pelo auxílio, pela amizade e sentido de humor. Ao Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico de Lisboa, na pessoa do Professor Luís Picado dos Santos, por permitir e ensaiar alguns dos provetes. Às empresas Contec – Construção e Engenharia, S.A., Cepsa e Ambiente – Recuperação de Materiais Plásticos, S.A., pela disponibilização dos materiais utilizados nas misturas.

Quero agradecer à minha mãe, a quem devo tudo o que tenho e tudo o que sou até hoje. Espero um dia poder retribuir tudo o que fez por nós, não pelo sentido de obrigação, mas por amor. À minha irmã Inês, que pela sua bondade e forma serena de estar na vida, me faz querer ser uma melhor pessoa, todos os dias. À minha gémea Beatriz, por todas as palavras, pela sua força interior e pelo coração de ouro. Não existe melhor pessoa, nem maior prova de que tudo é possível, basta tentar e acreditar, mantendo sempre a consciência tranquila.

Ao meu pai e aos meus avós, António e Isabel, a quem dedico esta dissertação e que apesar de já não estarem comigo, serão para sempre, os grandes amores da minha vida e as minhas principais referências.

Quero deixar também um agradecimento à minha família, não só de sangue, mas de coração, por todo o incentivo e por nunca duvidarem de que seria capaz. Em particular, aos meus primos, que pela sua importância me fizeram querer ser um exemplo a seguir e alguém de quem se orgulhar. A sua existência foi e é imprescindível.

Aos meus amigos de todas as horas, pelo amor, pelo apoio, por caminharem sempre comigo (muitas das vezes em dias piores, situações mais complicadas e em marés mais turbulentas) e por nunca, nem uma vez, me deixarem o copo vazio. À Tixa, pelas horas intermináveis ao telemóvel, por todos os conselhos sinceros, por ler este documento todas as vezes que necessitei, por ser a minha constante consultora científica e por ter sempre uma palavra amiga. À Diana, por ser a minha fotógrafa de serviço, por se oferecer e aparecer no laboratório quando precisei e por todo o carinho e amizade. À Chica, por me ajudar a descomprimir, por se preocupar comigo e com o meu trabalho, e por me disponibilizar a sua própria dissertação para consulta.

RESUMO

Com a crescente necessidade do uso de materiais mais sustentáveis na construção civil, tendo em vista a melhoria do meio ambiente e satisfazendo as necessidades das gerações vindouras, desenvolveu-se o estudo da utilização de resíduos de plásticos na concepção de misturas betuminosas a aplicar em pavimentos rodoviários. O uso destes materiais apresenta inúmeras vantagens, não só a nível ambiental, como económico quando comparadas com as misturas tradicionais.

Assim sendo, a presente dissertação estuda o desempenho de misturas betuminosas a quente com a inclusão de fragmentos de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) pela via seca. Esta consiste na adição de resíduos diretamente nas misturas. É avaliado o comportamento de várias misturas, com e sem a inclusão de plástico, sendo que algumas são submetidas ao processo de envelhecimento, pretendendo a análise da evolução das características do pavimento no decorrer da sua vida útil. Os parâmetros estudados são referentes à avaliação da deformação permanente, ao módulo de rigidez e à resistência à fadiga.

De uma forma geral, a incorporação de plástico exibiu resultados promissores no que diz respeito à avaliação da deformação permanente e dos módulos de rigidez. Na avaliação da resistência à fadiga, apesar de apresentar pior desempenho relativamente às misturas de referência, este não constitui uma problemática. No desenvolver do estudo, foi ainda notória a influência do processo de envelhecimento nos resultados obtidos.

Palavras-Chave: Mistura Betuminosa a Quente, Resíduos de Plástico, Polietileno de Baixa Densidade, Via Seca, Desempenho, Envelhecimento

ABSTRACT

With the increasing need for the use of more sustainable materials in the construction industry, in order to improve the environment and satisfy the needs of future generations, a study was carried out on the use of plastic waste in the design of bituminous mixtures to be applied to pavements road transport. The use of these materials has many advantages, not only at the environmental level, but also economical when compared to traditional mixtures.

Thus, the present dissertation studies the performance of hot mix asphalt with the inclusion of low density polyethylene (LDPE) fragments by the dry process. This consists of the addition of residues directly into the mixtures. It is evaluated the behaviour of several mixtures, with and without the inclusion of plastic, some of which are submitted to the ageing process, aiming the analysis of the evolution of the characteristics of the pavement over its useful life. The studied parameters are related to the evaluation of the permanent deformation, the modules of stiffness and the resistance to fatigue.

In general, the incorporation of plastic showed promising results regarding the evaluation of the permanent deformation and the stiffness modules. In the evaluation of the fatigue resistance, although it presents worse performance with reference mixtures, this is not a problem. In the development of the study, the influence of the ageing process on the results obtained was notorious.

Keywords: Hot Mix Asphalt, Plastic Waste, Low Density Polyethylene, Dry Process, Performance, Ageing

ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2.	Estado da Arte	3
2.1	Considerações Iniciais	3
2.2	As Misturas Betuminosas a Quente	3
2.3	O Plástico.....	9
2.3.1	Tipos de Plástico e suas Aplicações	9
2.3.2	Reciclagem de Plástico em Termos Gerais	13
2.4	Reciclagem de Plástico em Misturas Betuminosas.....	16
2.4.1	Via Húmida	16
2.4.2	Via Seca.....	20
2.4.3	Via Húmida vs Via Seca.....	21
3.	Trabalho Experimental	22
3.1	Considerações Iniciais	22
3.2	Materiais	22
3.2.1	Agregados.....	22
3.2.2	Betume.....	24
3.2.3	Plástico	26
3.3	Fabrico dos Provetes	27
3.3.1	Lajes	28
3.3.2	Vigas.....	29
3.3.3	Envelhecimento	29
3.4	Caraterísticas dos Provetes	30
3.4.1	Dimensões	30
3.4.2	Baridades	30
3.4.3	Baridade Máxima Teórica (BMT).....	32
3.4.4	Características Volumétricas dos Provetes.....	33
3.5	Ensaio de Avaliação da Resistência à Deformação Permanente	34
3.6	Ensaio de Avaliação do Módulo de Rigidez.....	37
3.7	Ensaio de Avaliação da Resistência à Fadiga.....	45
4.	Conclusões e Propostas para o Futuro	49
5.	Referências Bibliográficas.....	51
	Anexo A.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura-tipo de um Pavimento Rodoviário (Mendes, 2011).....	4
Figura 2.2 – Esquema do critério de deformação permanente (Ledo, 2009)	7
Figura 2.3 – Esquema do critério de fadiga (Ledo, 2009).....	8
Figura 2.4 – Esquemas da Economia Linear e Economia Circular (Ministério do Ambiente, 2019).....	13
Figura 2.5 – Exemplo do benefício da reciclagem de Plásticos em termos de emissões de CO ₂ (Comissão Europeia, 2018)	14
Figura 2.6 – Processo Mecânico de Reciclagem de Plástico.....	15
Figura 3.1 – Tipos de Agregados utilizados	23
Figura 3.2 – Fuso Granulométrico da mistura estudada.....	24
Figura 3.3 – Equipamento do Ensaio de Penetração a 25°C.....	25
Figura 3.4 – Equipamento do Ensaio para a determinação do Ponto de Amolecimento	26
Figura 3.5 – Resíduos de plástico utilizados na mistura.....	26
Figura 3.6 - Valores da Estabilidade e da Deformação pelo Ensaio de Marshall	27
Figura 3.7 – Sequência do Procedimento de Ensaio para a determinação da Baridade Máxima Teórica.....	33
Figura 3.8 – Execução e mistura dos provetes	28
Figura 3.9 – Compactação dos Provetes.....	28
Figura 3.10 – Dimensões e denominação das Lajes.....	28
Figura 3.11 – Dimensões e denominações das Lajes (antes e depois do corte em Vigas).....	29
Figura 3.12 – Simulação e aspeto dos provetes após o envelhecimento	30
Figura 3.13 – Abreviaturas adotadas para as dimensões dos provetes (lajes e vigas).....	30
Figura 3.14 – Determinação da baridade dos provetes (m ₂).....	31
Figura 3.15 – Máquina do ensaio de pista e lajes após ensaio (P1, P2E, P3 e P4E: com 6% de PEBD; S1, S2E, S3 e S4E: com 0% de PEBD).....	35
Figura 3.16 – Curva de evolução da deformação permanente (Provetes não envelhecidos) ...	36
Figura 3.17 – Curva de evolução da deformação permanente (Provetes envelhecidos)	36
Figura 3.18 – Profundidade média de rodeira	37
Figura 3.19 – Esquema e máquina de ensaio (4PB-PR).....	39
Figura 3.20 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura P).....	40
Figura 3.21 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura P).....	41
Figura 3.22 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura S).....	41
Figura 3.23 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura S).....	41
Figura 3.24 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura PE)	42
Figura 3.25 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura PE)	42
Figura 3.26 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura SE)	42
Figura 3.27 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura SE)	43

Figura 3.28 – Variação dos Módulos de Rigidez e dos Ângulos de Fase para todas as misturas, por frequência.....	43
Figura 3.29 – Leis de Fadiga das misturas sem envelhecimento (P e S).....	47
Figura 3.30 – Leis de Fadiga das misturas com envelhecimento (PE e SE).....	47
Figura 3.31 – Valores de ϵ_6 para as diversas misturas.....	48

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Camadas e respectivas funções de um pavimento rodoviário (Santos, 2016).....	4
Quadro 2.2 – Camadas e respectivas funções de um pavimento rodoviário (Santos, 2016) (continuação)	5
Quadro 2.3 – Nomenclaturas das misturas betuminosas (CEN, 2006)	5
Quadro 2.4 – Grupo de plásticos e características – Termorrígidos (Ecycle, 2017)	10
Quadro 2.5 – Grupo de plásticos e características - Termoplásticos (Ecycle, 2017)	10
Quadro 2.6 – Grupo de plásticos e características - Bioplásticos (Ecycle, 2017)	11
Quadro 2.7 – Sistema de numeração e abreviaturas para os plásticos (Marques, 2010).....	12
Quadro 2.8 – Resultados dos testes físico-químicos (Lima, 2008; Plastval, 2008a).....	12
Quadro 3.1 – Limites definidos pelo Caderno de Encargos e Curva Final (EP, 2014).....	23
Quadro 3.2 – Resultados do Ensaio de Penetração a 25°C.....	25
Quadro 3.3 – Especificações para betumes de pavimentação com penetrações entre 20 x 0,1 mm e 220 x 0,1 mm (CEN, 2009)	26
Quadro 3.4 – Variação dos valores das baridades obtidas com o envelhecimento	32
Quadro 3.5 – Resultados do Ensaio para a determinação da Baridade Máxima Teórica.....	33
Quadro 3.6 – Resultados obtidos no Ensaio de Pista para as diversas lajes.....	37
Quadro 3.7 – Relação entre a frequência de aplicação de carga, o tempo de carregamento e a velocidade média da circulação da corrente de tráfego	39
Quadro 3.8 – Valores de <i>p-value</i> para os Módulos de Rigidez e Ângulos de Fase, por frequência	44
Quadro 3.9 – Comparação entre misturas dos resultados dos Módulos de Rigidez e valores de <i>p-value</i> , por frequência	44
Quadro 3.10 – Comparação entre misturas dos resultados dos Ângulos de Fase e valores de <i>p- value</i> , por frequência	44
Quadro 3.11 – Comparação das variáveis para ensaios efetivados a extensão ou tensão controlada (Dias, 2009)	45
Quadro 3.12 – Número de ciclos necessários para atingir a rotura por fadiga e níveis de extensão (Misturas sem envelhecimento).....	46
Quadro 3.13 - Número de ciclos necessários para atingir a rotura por fadiga e níveis de extensão (Misturas com envelhecimento)	46
Quadro 3.14 – Parâmetros obtidos das Leis de Fadiga e valor de ϵ_6	48
Quadro A.1 – Características geométricas e volumétricas da Lajes.....	55
Quadro A.2 – Características geométricas e volumétricas das Vigas P	55
Quadro A.3 – Características geométricas e volumétricas das Vigas S	56
Quadro A.4 – Valores dos Módulos de Rigidez em função da frequência, por viga	57
Quadro A.5 – Valores dos Ângulos de Fase em função da frequência, por viga	58

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

4PB-PR – Ensaio de flexão em quatro pontos para provetes prismáticos

a – Parâmetro característico dos materiais

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AC 14 surf 35/50 (BB) – Betão betuminoso, a aplicar na camada de desgaste, produzido com um betume da classe de penetração 35/50 e com um agregado de diâmetro máximo de 14 mm

ANOVA – Análise de variância

b – Parâmetro característico dos materiais

B – Percentagem de betume do provete

c – Comprimento

CEN – Comissão Europeia de Normalização

Dim – Dimensão

ϵ_6 – Valor da extensão de tração necessária para que ocorra a rotura por fadiga do material, após a aplicação de um milhão de ciclos

ϵ_t – Extensão de tração

E^* – Módulo Complexo

EAPA – European Asphalt Pavement Association

EP – Estradas de Portugal

EN – European Normative

EVA – Acetato-vinilo de etileno

ϕ – Ângulo de Fase

g – Gramas

Hz – Hertz

IP – Infraestruturas de Portugal

IPQ – Instituto Português da Qualidade

kg – Quilograma

kN – Quilo Newton

l – Largura

m – Massa

m^3 – Metro cúbico

Mg – Megagrama

mm – Milímetros

MPa – Mega Pascal

N – Número de aplicações de carga

N_{80} – Número de eixos padrão de 80 kN

P – Com Plástico

PE – Com Plástico Envelhecida

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET – Politereftalato de etileno

PP – Polipropileno

PRD_{AIR} – Profundidade máxima de rodeira

PS – Poliestireno

PVC – Policloreto de vinilo

ρ_b – Baridade do Provete

ρ_B – Densidade do betume

$\rho_{b,dim}$ – Massa volúmica da amostra pelo procedimento geométrico
 $\rho_{b,ssd}$ – Massa volúmica da amostra pelo procedimento (SSD)
 ρ_{mv} – Baridade máxima teórica da mistura betuminosa
 ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio
 RD_{AIR} – Profundidade de rodeira ao fim de 10000 ciclos
 R^2 – Coeficiente de correlação
s – Segundos
S – Sem Plástico
SE – Sem Plástico Envelhecida
SSD – Superfície Saturada Seca
ton – Toneladas
 T_w – Temperatura da água no decorrer do ensaio
 μm – Micrómetro
UE – União Europeia
VFB – Volume de Vazios preenchidos com Betume
 V_m – Porosidade
VMA - Volume de Vazios na mistura de Agregados
 V_p – Volume do picnómetro cheio de água até à marca de referência
 WTS_{AIR} – Declive máximo de rodeira

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A rede rodoviária representa uma infraestrutura de extrema importância para o desenvolvimento socioeconómico de um país. Para tal, é fundamental que as vias apresentem um bom estado de conservação e que mantenham os requisitos mínimos de qualidade, que só são conseguidos com o seu constante controlo e manutenção. No nosso País e segundo as Infraestruturas de Portugal, a rede rodoviária nacional apresenta 17.874 km de extensão, encontrando-se praticamente concluída. Este fator proporcionou um aumento das despesas de reabilitação e conservação das infraestruturas viárias, aliado ao abrandamento da construção de novas estradas (Abreu, 2009; IP, 2016; Miranda, 2014; Santos, 2016).

Com o aumento do volume de tráfego mundial, particularmente dos veículos pesados, as vias de comunicação têm demonstrado um declínio da sua longevidade e funcionalidade, com o aparecimento prematuro de patologias no pavimento (fendilhamento à superfície, rodeiras, deformações, entre outras). De forma a contrariar esta tendência e com a crescente necessidade do uso de materiais sustentáveis na construção, vários métodos têm vindo a ser desenvolvidos e novos materiais empregues com vista à minoração dos impactes no meio ambiente (Branco *et al.*, 2011; Jan *et al.*, 2017).

Na atualidade, a nossa sociedade é consumista, procurando cada vez mais o uso de fontes naturais não renováveis e instigando ao aumento da produção de resíduos. O plástico, devido às suas excelentes propriedades como a resistência térmica, a leveza, a flexibilidade, o baixo custo de produção e a mutabilidade no processo de moldagem, constitui uma das principais fontes de poluição a nível global. Assim sendo, devido à sua vasta aplicação e quota importante na Economia, grande variedade e proporção de plásticos são geradas, anualmente, tendo inúmeras utilizações e cuja eliminação demonstra ser uma das maiores ameaças aos ecossistemas terrestres (Comissão Europeia, 2018; Costa *et al.*, 2017).

Uma das formas de eliminar estes resíduos de plástico consiste na sua inclusão no dimensionamento, construção e reabilitação de pavimentos rodoviários. Quando devidamente incorporados e nas proporções corretas, quer pela via húmida (modificação do betume pela adição de polímeros) ou pela via seca (adição de polímeros diretamente na mistura ou agregados), permitem obter misturas com um bom desempenho em serviço (Chavan, 2013; Fontes *et al.*, 2006; Kalantar *et al.*, 2012; Santosh e Kumar, 2013). A esta metodologia dá-se o nome de “*Plastic Roads*” ou “Estradas de Plástico” (em português), encontrando-se atualmente em início de exploração nos Países Africanos e na Europa (Nouali *et al.*, 2019).

A incorporação de resíduos plásticos, por ambos os processos (via húmida e via seca), permite a redução da necessidade de betume em cerca de 10%, contribuindo para a diminuição do uso de fontes de energia não renováveis (o betume é um derivado do petróleo) e permitindo a diminuição dos custos de produção (embora corresponda apenas a 4% ou 5% da massa total das misturas betuminosas, o ligante betuminoso representa cerca de 60% dos custos) (Vila-Cortavitate *et al.*, 2018).

Atualmente, as grandes potências mundiais têm apresentado bastante preocupação com o uso excessivo de plástico e com a geração de resíduos. Várias estratégias têm vindo a ser desenvolvidas e novas formas de reutilização ou proibição destes plásticos têm vindo a ser

aplicadas. A sua utilização na reciclagem de pavimentos rodoviários demonstra ser uma solução promissora, mas que necessita de suporte e mais investigação.

1.2 Objetivos

Sendo a sustentabilidade um tema com grande ênfase nos dias de hoje, e uma vez que o consumo e aumento dos resíduos de materiais plásticos apresentam inúmeras preocupações e especial destaque na nossa Economia, o presente trabalho tem como principal objetivo a viabilidade da incorporação de fragmentos de resíduos de plástico flexível na avaliação do comportamento de misturas betuminosas a utilizar em pavimentos rodoviários.

Apesar de esta metodologia ser já amplamente empregue em alguns países, como a Índia ou os Estados Unidos da América, na União Europeia esta prática é pouco usual, estando agora a dar os primeiros passos. Para isso, é imperativo o estudo e investigação do uso de resíduos de polímeros, que sustentem e permitam a sua ampla utilização como uma técnica viável de reciclagem. O processo de inclusão destes resíduos (via seca) surge também como uma das motivações para a realização desta dissertação, visto se tratar de um método pouco aprofundado, mais simples e que se prevê trazer mais benefícios tanto a nível económico, como ambiental.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos e um anexo, encontrando-se o conteúdo e organização descritos nesta secção. No desenvolver do estudo, expõem-se os resultados conseguidos e as opções tomadas.

Neste Capítulo 1 exhibe-se o enquadramento do tema, definem-se os objetivos e a estrutura do trabalho de investigação.

O Capítulo 2 destina-se à revisão da bibliografia, iniciando com a caracterização das misturas betuminosas a quente (Secção 2.2), apresentando uma síntese dos tipos de plástico que existem e das formas de reciclagem utilizadas (Secção 2.3) e terminando com a definição das formas de reciclar e incluir o plástico em misturas betuminosas (Secção 2.4).

O Capítulo 3 dirige-se ao trabalho experimental e à análise dos resultados executados no decorrer da investigação. Numa primeira fase expõem-se as características dos componentes das misturas (Agregados, Betume e Plástico) e definem-se o modo de fabrico e as características dos provetes (Secção 3.2, 3.3 e 3.4). As três últimas secções são reservadas aos ensaios de desempenho: Ensaio de Avaliação da Resistência à Deformação Permanente (Secção 3.5), Ensaio de Avaliação do Módulo de Rigidez (Secção 3.6) e Ensaio de Avaliação da Resistência à Fadiga (Secção 3.7).

No Capítulo 4 apresentam-se as principais conclusões retiradas da análise dos resultados e definem-se propostas para futuros trabalhos de investigação sobre a temática da incorporação de polímeros em misturas betuminosas.

O Capítulo 5 é reservado à descrição das referências bibliográficas utilizadas no decurso deste trabalho.

Terminando com o Anexo A, neste encontram-se os quadros que se consideraram dispensáveis aparecer no corpo do texto.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Considerações Iniciais

Esta secção destina-se a explicar as características dos materiais usados na mistura desenvolvida e testada no decorrer da dissertação, analisando o trabalho elaborado por outros autores e expondo os conceitos teóricos necessários para a sua compreensão. Em detalhe, o capítulo encontra-se dividido em três partes:

- 1) Introduzem-se as misturas betuminosas, destacando as misturas betuminosas a quente, enquadrando-as com a legislação portuguesa. Indicam-se os principais critérios que provocam a ruína de um pavimento rodoviário e quais os ensaios que os permitem caracterizar;
- 2) A segunda parte destina-se a analisar o aditivo plástico, indicando quais as tipologias de material existentes, as suas aplicações comuns e o modo de os identificar. Dado que se pretende utilizar resíduo de plástico na mistura, referem-se também os problemas gerais que advêm da contínua utilização de plásticos e as formas de os eliminar, focando na reciclagem e integrando os objetivos estipulados na Estratégia Europeia para os Plásticos (2018);
- 3) Para finalizar, analisa-se pormenorizadamente a incorporação e reciclagem de matérias plásticas em pavimentos rodoviários, explicitando os processos utilizados e alguns dos estudos desenvolvidos sobre a temática.

2.2 As Misturas Betuminosas a Quente

Um pavimento rodoviário consiste num sistema multiestratificado apoiado numa fundação composta por terreno natural, cujo propósito é conceder uma superfície de rolamento desempenada e livre, destinada à circulação de veículos em condições de conforto, economia e segurança adequadas. Na construção das camadas superiores, utilizam-se principalmente dois tipos de materiais, as misturas com ligantes hidráulicos e as misturas betuminosas. Em Portugal, bem como na maioria dos países do mundo, são aplicadas as misturas betuminosas. Como o próprio nome indica, uma mistura betuminosa é constituída por betume, agregados e ar, sendo que o betume serve de agente de ligação entre as partículas de agregado. A técnica de construção de estradas estratificadas (Processo Macadame) foi desenvolvida em 1820, por John Loudon McAdam (Branco *et al.*, 2011; Chhabra e Marik, 2014; Santos, 2016). A Figura 2.1 mostra um exemplo de uma estrutura estratificada de um pavimento.

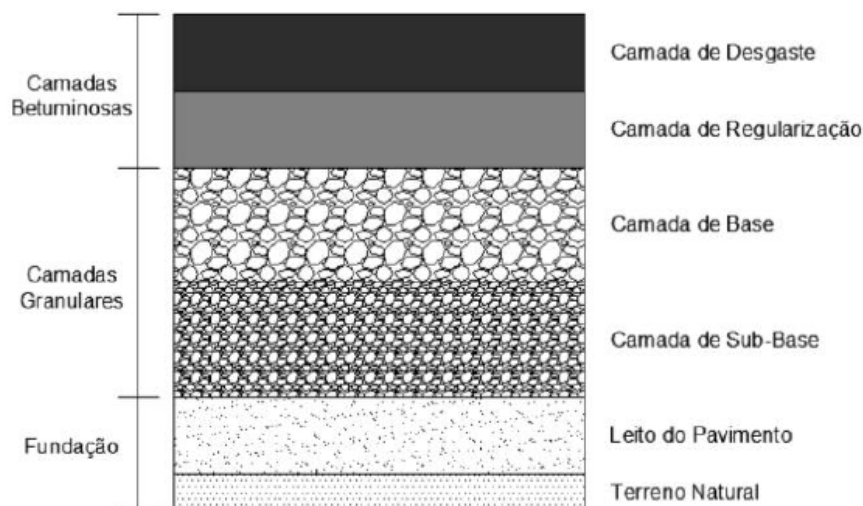


Figura 2.1 - Estrutura-tipo de um Pavimento Rodoviário (Mendes, 2011)

As misturas betuminosas podem ser divididas em quatro grupos, em função da sua temperatura de construção: misturas betuminosas a frio (produzidas sem o aquecimento dos agregados e com emulsões de betume ou betume espuma), misturas betuminosas semi-temperadas (produzidas com o mesmo tipo de ligante que as anteriores, a temperaturas abaixo dos 100°C, onde os agregados são aquecidos entre 70 e 100°C), misturas betuminosas temperadas (produzidas a temperaturas entre 100 e 150°C, podendo ou não conter aditivos) e misturas betuminosas a quente (produzidas e misturadas entre 150 e 200°C, dependendo do betume utilizado). As misturas betuminosas a quente são as mais utilizadas, estudadas e de larga aplicação mundial, sendo objeto de estudo na presente dissertação (EAPA, 2015; EAPA, 2017).

O comportamento de um pavimento é influenciado pela sua constituição (pelo número e espessura das camadas), pelas características da fundação, pelas solicitações que lhe são impostas e pelas características dos materiais empregues (Branco *et al.*, 2011; Santos, 2016). No Quadro 2.1 pode analisar-se as camadas usualmente presentes num pavimento, assim como as funções que lhes são intrínsecas.

Quadro 2.1 – Camadas e respetivas funções de um pavimento rodoviário (Santos, 2016)

Camadas do Pavimento		Função
Camadas Superiores	Desgaste	Adequada drenagem e impermeabilização; Circulação do tráfego com conforto e segurança; Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego.
	Regularização	Regularizar a camada de superfície da camada de base; Camada estrutural.
	Base Betuminosa	Camada estrutural.
Camadas Granulares	Base	Degradações induzidas pelo tráfego; Camada estrutural.
	Sub-Base	Proteger a base da subida da água capilar; Drenagem interna do pavimento; Resistência à erosão; Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores; Camada estrutural.

Quadro 2.2 – Camadas e respetivas funções de um pavimento rodoviário (Santos, 2016) (continuação)

Camadas do Pavimento		Função
Solo de Fundação	Leito do Pavimento	Homogeneidade das características mecânicas da fundação; Plataforma construtiva; Evitar deformação do solo; Possibilidade de compactação das camadas subjacentes em adequadas condições.
	Terreno de Fundação	As suas características condicionam o dimensionamento; Suporte do pavimento.

Em Portugal, as designações para as misturas betuminosas sofreram alterações, de forma a facilitar o entendimento entre Estados-Membros com a uniformização das designações europeias. Segundo o Instituto Português da Qualidade (IPQ), devem permanecer as abreviaturas presentes na versão inglesa da EN 13108-1 e são acrescentadas as siglas que ditam o tipo de mistura em causa (Santos, 2016). No Quadro 2.3 expõe-se as terminologias adotadas.

Quadro 2.3 – Nomenclaturas das misturas betuminosas (CEN, 2006)

Camada	Designação Anterior	Designação Atual
Base	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 bin ligante (AB)
Regularização	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 reg ligante (AB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(Micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)
Abreviaturas: AC – designação do produto, cuja terminologia em inglês é “Asphalt Concrete”; ligante – classe do betume a definir, por exemplo 35/50 ou 50/70; base – relativo à camada de base, cuja terminologia em inglês é “base course”; bin – relativo à camada de ligação, cuja terminologia em inglês é “binder course”; reg – relativo à camada de regularização, cuja terminologia em inglês é “regulating course”; surf – relativo à camada de desgaste, cuja terminologia em inglês é “surface course”; A numeração dita a granulometria do agregado cuja abertura do peneiro superior é igual a esse valor.		

No que diz respeito às misturas a utilizar nas camadas superficiais, de uma forma geral, são-lhes exigidas algumas particularidades como aderência, durabilidade, estabilidade, flexibilidade, impermeabilidade, resistência à fadiga e trabalhabilidade. Principalmente nos tempos chuvosos, a superfície do pavimento deve apresentar boa **aderência** aos pneus dos veículos. A **durabilidade** traduz a resistência do pavimento à desintegração quando sujeito às cargas de tráfego e às condições climáticas, e a **estabilidade** define a aptidão para resistir, com pequena deformação, a essas mesmas cargas. A capacidade para se adaptar aos assentamentos diferenciais ocorridos pelo movimento gradual das camadas de suporte e pelas zonas de compressão que surgem com a ação do tráfego, é dada pela **flexibilidade**. A **impermeabilidade** representa o correto desempenho das misturas à passagem de ar e água através das camadas da estrutura. A passagem sucessiva de veículos provoca extensões de tração reversíveis e irreversíveis ditando a sua **resistência à fadiga**, a acumulação de extensões irreversíveis origina a abertura de fendilhamento, sendo estas uma das principais patologias de um pavimento. É indispensável que o material betuminoso apresente boa **trabalhabilidade** para que possa ser colocado em obra e compactado com facilidade. Geralmente, a formulação correta da mistura e o cumprimento das regras de manuseamento dos equipamentos possibilitam resolver os problemas relativos à trabalhabilidade (Branco *et al.*, 2011).

A adequada formulação de misturas betuminosas é imprescindível para garantir um correto comportamento da mistura, esta resulta da necessidade de se otimizar e controlar as proporções volumétricas ou ponderais dos materiais constituintes. São vários os métodos disponíveis para formular misturas betuminosas, podendo ser por especificação (métodos receita), analíticos, empíricos, racionais e volumétricos. Em Portugal, é frequente recorrer-se ao Método de Marshall, que é um método empírico. Este permite obter uma previsão razoável do comportamento da mistura, recorrendo a procedimentos mecânicos simples (Branco *et al.*, 2011; Pimentel, 2013; Santos, 2016).

Como foi referido anteriormente, o projeto e dimensionamento de um pavimento rodoviário compreende a definição de uma estrutura que possua a capacidade de suportar as condições climáticas e as cargas aplicadas pelo tráfego dos veículos. Posto isto, as propriedades mecânicas das misturas a usar na estrutura de um pavimento têm que ser avaliadas, tais como o ângulo de fase, o módulo de rigidez e a resistência à fissuração devido a ações de fadiga (ação repetida de cargas) e deformação permanente (aparecimento de rodeiras sob carga de veículos pesados e/ou temperaturas elevadas). No que se refere às condições meteorológicas, a propriedade com maior relevância é a avaliação da sensibilidade à água, visto que está diretamente relacionada com o desempenho do pavimento. O fendilhamento térmico, que ocorre com o endurecimento do betume a baixas temperaturas, demonstra igualmente ser uma impactante fonte de preocupações (Costa *et al.*, 2017; Cuadri *et al.*, 2016; Nouali *et al.*, 2019).

Os critérios de ruína correspondem aos fenómenos considerados nos métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento, referindo-se aos limites máximos de extensão de compressão vertical e de tração, no topo da fundação e na base das camadas ligadas, respetivamente. Existem dois critérios a avaliar: o critério de deformação permanente (assentamento excessivo à superfície do pavimento) e o critério de fadiga (fendilhamento excessivo originado nas zonas mais tracionadas das camadas ligadas). A caracterização do comportamento à deformação permanente e à fadiga é realizado recorrendo a ensaios que traduzam um comportamento próximo da realidade. Para o estabelecimento das leis de fadiga e de deformação permanente ou para a sua verificação pode aplicar-se os métodos da Shell ou de Nottingham (Branco *et al.*, 2011; Ledo, 2009).

- **Critério de Deformação Permanente**

O critério de deformação permanente é controlado pela extensão máxima de compressão, ε_{dp} , no topo da fundação (Branco *et al.*, 2011). Na Figura 2.2 pode verificar-se o esquema do critério de deformação permanente.

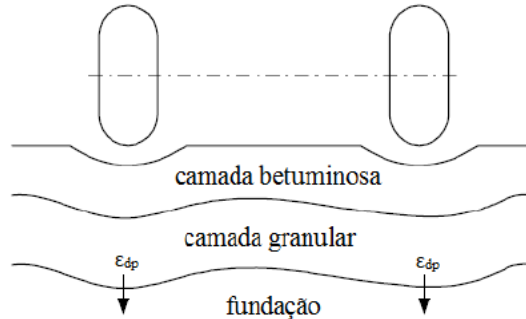


Figura 2.2 – Esquema do critério de deformação permanente (Ledo, 2009)

Os ensaios que permitem a sua caracterização e que antevêm a dimensão da rodeira ou as leis de comportamento do pavimento são os ensaios em laboratório (“*Wheel Tracking*”), de fluência dinâmica, de corte com altura variável ou de simulador de tráfego e os ensaios acelerados à escala real em pista de ensaios (Branco *et al.*, 2011).

Expressão de Nottingham:

$$\varepsilon_{dp} = \frac{A}{\left(\frac{N_{80}}{fr}\right)^{cl}} \quad (2.1)$$

ε_{dp} – Extensão vertical de compressão no topo da fundação (adimensional);

N_{80} – Número de eixos padrão de 80 kN, provocando estado de ruína;

fr – Fator de indução de assentamento dependendo do tipo de mistura betuminosa: 1,0 para betão betuminoso em camada de desgaste, 1,3 para mistura betuminosa densa para camada de regularização e 1,5 para macadame betuminoso;

A – Constante igual a 250 para N_{80} provocando estado crítico e igual a 451,29 para N_{80} provocando estado de ruína;

cl – Constante igual a 0,27 para N_{80} provocando estado crítico e igual a 0,28 para N_{80} provocando estado de ruína.

Expressão da Shell:

$$\varepsilon_{dp} = K_S \cdot N_{80}^{-0.25} \quad (2.2)$$

ε_{dp} – Extensão vertical de compressão no topo da fundação (adimensional);

N_{80} – Número de eixos padrão de 80 kN;

K_S – Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

- **Critério de Fadiga**

O critério de fadiga é controlado pela extensão radial de tração, ε_t , na base das zonas mais tracionadas das camadas betuminosas (Branco *et al.*, 2011). Na Figura 2.3 pode observar-se o esquema do critério de fadiga.

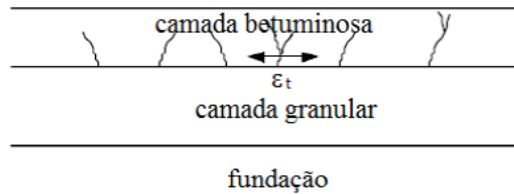


Figura 2.3 – Esquema do critério de fadiga (Ledo, 2009)

Os ensaios que possibilitam a sua caracterização são diversos, recorrendo-se uma vez mais a ensaios acelerados à escala real em pista de ensaios e aos ensaios laboratoriais (de tração indireta ou de flexão com repetição de carregamentos) (Branco *et al.*, 2011).

Expressão de Nottingham:

$$\log \varepsilon_t = \frac{14,38 \cdot \log V_b + 24,2 \cdot \log Tab - c - \log N_{80}}{5,13 \cdot \log V_b + 8,63 \cdot \log Tab - 15,8} \quad (2.3)$$

ε_t – Extensão de tração (adimensional);

N_{80} – Número de eixos padrão de 80 kN;

V_b – Percentagem volumétrica de betume no volume total (%);

Tab – Temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola (°C);

c – Igual a 46,06 (para N provocando estado de ruína), igual a 46,82 (N provocando estado crítico).

Expressão da Shell:

$$\varepsilon_t = (0,856 \cdot V_b + 1,08) \cdot E_m^{-0,36} \cdot N_{80}^{-0,2} \quad (2.4)$$

ε_t – Extensão de tração (adimensional);

N_{80} – Número de eixos padrão de 80 kN;

V_b – Percentagem volumétrica de betume no volume total (%);

E_m – Módulo de Rigidez da mistura betuminosa (em Pa).

2.3 O Plástico

2.3.1 Tipos de Plástico e suas Aplicações

O plástico é um dos materiais que pertence à família dos polímeros. Os polímeros referem-se às substâncias compostas por moléculas muito grandes (macromoléculas) formadas pela repetição de simples e pequenas unidades químicas (monómeros) (Marques, 2010). Dependendo da sua natureza, estes podem ser de três tipos: sintéticos, semi-sintéticos e naturais. A principal diferença entre estes é que os polímeros naturais ocorrem de forma espontânea na natureza, contrariamente aos sintéticos que são fabricados pelo Homem. Alguns exemplos de polímeros naturais são a celulose, as proteínas, o âmbar e a resina natural (Campos, 2010). Os polímeros semi-sintéticos são polímeros naturais modificados que exibem propriedades diferentes das originais, a borracha vulcanizada e a nitrocelulose são algumas das suas aplicações. O grupo dos polímeros sintéticos é um pouco mais complexo, uma vez que estes são distribuídos consoante as suas propriedades e comportamento mecânico. Assim sendo, podem dividir-se em elastómeros, plásticos e fibras (Toda a Matéria, 2017).

Os elastómeros diferem pelo seu comportamento elástico após a aplicação de uma deformação, ou seja, estes recuperam a sua forma e dimensões iniciais quando comprimidos ou tracionados (Gomes, 2007). A borracha é um exemplo de um elastómero, cuja utilização é recorrente no quotidiano. Quando submetidos a altas temperaturas, os elastómeros não conseguem atingir o ponto de fusão, o que torna a sua reciclagem inviável (Marques, 2010).

No que concerne às fibras não-naturais destacam-se dois grandes grupos: as fibras sintéticas e as fibras artificiais. Quanto ao processo de fabrico das fibras artificiais este constitui-se pela transformação química de matérias-primas naturais, como o algodão, o linho e as sedas do bicho-da-seda. Já as fibras sintéticas são concebidas recorrendo-se a precursores oriundos do petróleo. Estas são representadas pelas fibras de poliéster, de acrílico, de poliamida e de polipropileno (Fibrenamics, 2014; Toda a Matéria, 2017).

Relativamente aos plásticos estes agrupam-se em termoplásticos e termorrígidos (ou termofixos). Os termofixos são aqueles que, quando submetidos ao calor, sofrem alterações químicas, criando uma rede tridimensional, o que os torna infusíveis e insolúveis. Depois de aquecidos, estes decompõem-se antes de atingir o ponto de fusão, não conseguindo regressar à forma original. Geralmente são usados em estruturas rígidas e duráveis, o que dificulta o seu processo de reciclagem. Neste grupo destacam-se o poliuretano, o poliéster insaturado, a resina de melanina, o éster vinílico, o silicone, o fenol formaldeído, a resina fenólica, a resina de acrílico, o acetato-vinilo de etileno, o polioxibenzimetilenglicolanídrico, etc. (Gomes, 2007; Mir, 2015; PlasticsEurope, 2018; Singh e Gupta, 2016; Toda a Matéria, 2017). No Quadro 2.4 apresenta-se uma breve síntese das aplicações de alguns dos termorrígidos mais usados.

Os termoplásticos são a família que possibilita a solidificação por arrefecimento e a fusão por aquecimento, ou seja, designam-se por plásticos reversíveis. Estes podem ser repetidamente reaquecidos, remodelados e congelados. São exemplos de termoplásticos: o polipropileno, o polietileno, o policloreto de vinilo, o politereftalato de etileno, o poliestireno, o poliestireno expandido, o acrilonitrilo-butadieno-estireno, a poliamida, o policarbonato, o polimetilmetacrilato, entre outros mais (Gomes, 2007; Mir, 2015; PlasticsEurope, 2018; Singh e Gupta, 2016; Toda a Matéria, 2017). No Quadro 2.5 apresenta-se uma breve síntese das aplicações de alguns dos termoplásticos mais usados.

Quadro 2.4 – Grupo de plásticos e características – Termorrígidos (Ecycle, 2017)

Denominação	Caraterísticas	Usos
PU (Poliuretano)	Flexível, leve e resistente à abrasão. Formado a partir da reação de um polioli e um di-isocianato. Difícil reciclagem.	Esponjas, solas de calçado, pranchas de surf, espumas, cola, verniz, isolantes, etc.
EVA (Acetato-vinilo de etileno)	Flexível e resistente. Formado a partir da mistura de etil, vinil e acetato. Difícil reciclagem.	Solas de calçado, material de artesanato, brinquedos, equipamentos de ginásio, etc.
Resina fenólica	Bom comportamento térmico, bom isolante térmico e elétrico, boa estabilidade mecânica e térmica e grande resistência. Formado pela mistura de um fenol e um aldeído. Não é reciclável.	Bolas de snooker, tintas e vernizes, adesivos, revestimentos, etc.
Baquelite (Polioxibenzimetilenglicolanidrico)	Resina sintética resistente ao calor, duro, infusível. Formado a partir da mistura de formaldeído com fenol. Difícil reciclagem.	Interruptores, componentes de rádios, casquilhos de lâmpadas, cabos de painéis, telefones antigos, etc.

Quadro 2.5 – Grupo de plásticos e características - Termoplásticos (Ecycle, 2017)

Denominação	Caraterísticas	Usos
PET (Politereftalato de etileno)	Leve, transparente, impermeável e inquebrável. É reciclável. Derivado do petróleo.	Garrafas de água e de refrigerante, produtos farmacêuticos, produtos de limpeza, etc.
PEAD (Polietileno de alta densidade)	Resistente a baixas temperaturas, leve, duro, impermeável e inquebrável. É reciclável. Derivado do petróleo ou de fontes vegetais.	Sacos de supermercado, produtos de limpeza, tubagens, embalagens de cosméticos, etc.
PVC (Policloreto de vinilo)	Impermeável, duro, resistente à temperatura e inquebrável. Derivado do sal (57%) e do petróleo (43%). É reciclável.	Tubagens, material hospitalar, mangueiras, embalagens de medicamentos, revestimentos, garrafas de água, etc.
PEBD (Polietileno de baixa densidade)	Flexível, transparente, impermeável e leve. Derivado do petróleo ou de fontes vegetais. É reciclável.	Sacos de supermercado e do lixo, embalagens de alimentos, garrafas de leite e refrigerantes, etc.
PP (Polipropileno)	Transparente, brilhante, duro, resistente a mudanças de temperatura e inquebrável. Derivado do propeno. É reciclável.	Embalagens industriais e de alimentos, peças de automóvel, cadeiras, seringas descartáveis, tubagens, etc.
PS (Poliestireno)	Mais conhecido como esferovite. Leve, capacidade de isolamento térmico e flexibilidade. Derivado da resina. É reciclável.	Embalagens de alimentos, copos descartáveis, material escolar, caixas de CD, revestimentos de arcas e congeladores, etc.

Com a constante evolução da indústria e com a crescente necessidade de diminuição do uso de matérias-primas provenientes de fontes não renováveis, como o petróleo, desenvolveu-se a prática de utilização e evolução de materiais biológicos e biodegradáveis. A este conjunto dá-se o nome de “bioplásticos” ou “biopolímeros”, e é referente a todos os plásticos de base biológica que derivam de fontes renováveis, como as plantas, bem como a todos aqueles que derivam do petróleo, mas têm a capacidade de atender aos padrões de compostagem e biodegradabilidade. Estes representam 0,1-0,2% do consumo total de plásticos na União Europeia, mas têm como desvantagem o facto de não poderem substituir os plásticos de origem petrolífera, por razões de durabilidade, resistência e custos de produção. Na categoria dos bioplásticos pode encontrar-se o polibutileno tereftalato adipato, o polibutilenosuccinato, o políácido láctico, os bioplásticos de poliamida e feitos a partir de algas, de casca de camarão e de lixo orgânico, o polietileno furanoato, o polihidroxialcanoato e os bioplásticos *drop-in* (feitos à base de polipropileno, polietileno, policloreto de vinilo e politereftalato de etileno) (Ecycle, 2017; Bio Intelligence Service, 2011). No Quadro 2.6 apresenta-se uma breve síntese das aplicações de alguns dos plásticos mais usados.








Quadro 2.6 – Grupo de plásticos e características - Bioplásticos (Ecycle, 2017)

Denominação	Caraterísticas	Usos
PA (bio - Poliamida)	Produzido a partir de biomassa, de petróleo ou óleo de mamona. Não é biodegradável, nem reciclável.	Tecidos de roupa, acessórios, etc.
PBAT (Polibutileno tereftalato adipato ou poliburato)	Baixa densidade. Produzido a partir do petróleo. É compostável e biodegradável.	Sacos de supermercado
PBS (Polibutilenosuccinato)	Flexível e cristalino. Produzido a partir do ácido succínico. 100% de base biológica e biodegradável. Capacidade de armazenamento do CO ₂ .	Utensílios com capacidade de tolerar altas temperaturas (100°C a 200°C)
PEF (Polietileno furanoato)	Comparável ao PET. Produzido a partir de açúcares à base de plantas. 100% biológico. Grandes propriedades mecânicas e térmicas.	Garrafas de refrigerantes e de água, embalagens de alimentos, etc.
Bioplásticos <i>drop-in</i>	Versões híbridas de plásticos tradicionais (PE, PP, PET e PVC). Feitos parcial ou totalmente de base biológica. Não são recicláveis.	As mesmas aplicações que os plásticos de base petrolífera que lhe conferem o nome.

Em Portugal, não se exige aos fabricantes a marcação das embalagens de plástico. Este processo é de cariz voluntário e a sua prática proporciona aos consumidores a identificação do tipo de material em causa. Assim, o processo de reciclagem é facilitado, uma vez que a triagem é executada faseada e individualmente de acordo com o tipo de plástico. Ainda assim, a sua aplicação é comum, e geralmente são adotadas abreviaturas e numeração da Decisão 97/129/CE

em simultâneo com a simbologia sugerida pela *Society of Plastics Industry* (SPI) (Comissão Europeia, 1997; Plastval, 2008a). No Quadro 2.7 pode analisar-se o sistema de símbolos e abreviaturas para os plásticos. É de referir que este se encontra datado e incompleto, tendo em conta a existência de uma maior diversidade de plástico, no entanto estes seis materiais correspondem a 85% dos plásticos mais utilizados nos dias correntes (Lima, 2008).

Quadro 2.7 – Sistema de numeração e abreviaturas para os plásticos (Marques, 2010)

Numeração	Abreviatura	Material
	PET	Poli(tereftalato de etileno)
	PEAD	Polietileno de alta densidade
	PVC	Poli(cloreto de vinilo)
	PEBD	Polietileno de baixa densidade
	PP	Polipropileno
	PS	Poliestireno
	Outros	-

Não havendo obrigatoriedade de identificação destes materiais e tendo em conta que muitas vezes, um produto resulta da mistura de diferentes plásticos, com modo de processamento e natureza diferenciados, a triagem pode transformar-se num procedimento complicado e moroso. Todavia, existem formas experimentais de reconhecimento e distinção dos materiais plásticos, através de testes às suas características e propriedades físico-químicas. A inflamabilidade, a determinação da temperatura de fusão, a solubilidade e a densidade são os mais habituais. No Quadro 2.8 expõem-se os resultados aos testes acima descritos para os seis termoplásticos mais frequentes (Lima, 2008; Plastval, 2008a).

Quadro 2.8 – Resultados dos testes físico-químicos (Lima, 2008; Plastval, 2008a)

Abreviatura	Inflamabilidade (Cor da chama)	Continua a arder sem chama	Cheiro	Densidade (g/cm)	Temperatura de fusão (°C)	Solubilidade (com tolueno)
PET	Fuliginosa	Sim	Adocicado	1,38 – 1,41	250 – 260	Não se altera
PEAD	Amarela	Sim (ou extinção lenta)	Cera/ Parafina	0,94 – 0,98	≈ 130	Não se altera
PVC	Verde	Não (difícil ignição)	Irritante (HCL)	1,19 – 1,35	75 – 90	Alteração da forma
PEBD	Amarela	Sim (ou extinção lenta)	Cera/ Parafina	0,89 – 0,93	≈ 100	Não se altera
PP	Amarela	Sim	Amargo/ Diesel	0,85 – 0,92	160 – 170	Não se altera
PS	Fuliginosa	Sim	Caraterístico	1,04 – 1,08	70 – 115	Solubilizou-se

2.3.2 Reciclagem de Plástico em Termos Gerais

Na União Europeia (UE), a indústria do plástico emprega 1,5 milhões de pessoas, gerando cerca de 340 mil milhões de euros em volume de negócios. Contudo, a forma como o plástico é produzido, usado e eliminado não possibilita alcançar a totalidade dos seus proveitos económicos, prejudicando o ambiente. Isto deve-se, em grande parte, ao seu processo de produção e consumo baseado no conceito de fim-de-vida da economia linear (extração, produção e eliminação). Para contrariar esta tendência, a UE aprovou uma Estratégia para os Plásticos com base numa abordagem mais “circular”. Este conceito tem em vista a promoção da reutilização, renovação e restauração dos produtos, procurando mantê-los o máximo de tempo possível no ciclo económico, valorizando o capital natural e diminuindo os desperdícios (Comissão Europeia, 2018; Ministério do Ambiente, 2019). Na Figura 2.4 analisam-se as diferenças entre a economia linear e a economia circular.



Figura 2.4 – Esquemas da Economia Linear e Economia Circular (Ministério do Ambiente, 2019)

A Comissão Europeia pretende a intervenção nas diversas fases da cadeia de valor do plástico, desde a conceção até à eliminação (reentrada no ciclo), definindo que “em 2030, todas as embalagens de plástico colocadas no mercado da UE sejam facilmente recicláveis ou reutilizáveis.” As fases do ciclo de vida dos materiais plásticos são o design, a produção, a distribuição, a utilização e a eliminação, e são diversas as metodologias que podem ser adotadas, assim como as melhorias que podem ser executadas de forma a obter o máximo de benefícios inerentes da adoção de uma economia circular (Comissão Europeia, 2018; Ministério do Ambiente, 2019). Seguidamente, apresentam-se algumas medidas sugeridas pelo Ministério do Ambiente e pela Estratégia Europeia para os Plásticos.

- **Design/Conceção** – Utilização de menos recursos, através do desenho de serviços e produtos mais duráveis, ecologicamente eficientes e economicamente viáveis, prolongando-os por vários ciclos de vida. Espera-se que a melhoria da conceção permita a redução dos custos de reciclagem dos resíduos de plástico para metade e defende-se o desenvolvimento de metodologias que permitam rastrear de forma eficaz os plásticos, bem como a possibilidade de existir substâncias químicas potencialmente perigosas (retardadores de chama);
- **Produção** – Limitar o uso de substâncias tóxicas e promover a eficiência energética, através de técnicas de produção mais limpas;

- **Distribuição** – Promover modos de transporte sustentáveis para a distribuição dos produtos pelas transportadoras, uso de materiais recicláveis e diminuir o sobre-embalamento;
- **Utilização** – Maximizar a vida útil dos produtos, melhorar a eficiência energética e otimizar os métodos de reutilização e reparação;
- **Eliminação** – Dinamizar redes de reciclagem, retoma, reuso ou remanufactura. Ressaltar o *downcycling* (reconverter os resíduos em novos produtos ou materiais com menor funcionalidade/qualidade) ou no *upcycling* (reconverter os resíduos em produtos com maior valor ou em novos materiais).

Anualmente, a Europa produz cerca de 25,8 milhões de toneladas de resíduos plásticos e em 2016 gerou, em média, 170 kg de resíduos de embalagens por habitante (oscilando entre 55 kg/hab na Croácia e 221 kg/hab na Alemanha). O modo de eliminação destes resíduos traduz-se na incineração (39%), na disposição em aterros (31%) e na reciclagem (menos de 30%). A disposição em aterros provoca a contaminação do solo e dos corpos de água, enquanto a incineração causa poluição atmosférica. A nível global, estimou-se que a produção de plástico em conjunto com a queima de resíduos origina cerca de 400 milhões de toneladas de CO₂ por ano. Por outro lado, a reciclagem é a alternativa mais fiável para a eliminação de detritos, sem grandes prejuízos para o meio ambiente (Figura 2.5). Ainda assim, as taxas de reciclagem continuam a ser mais baixas comparativamente com os outros métodos. Também a procura por plástico reciclado é bastante reduzida, representando cerca de 6%, na UE (Chhabra e Marik, 2014; Comissão Europeia, 2018; Eurostat, 2019; Ministério do Ambiente, 2019).



Figura 2.5 – Exemplo do benefício da reciclagem de Plásticos em termos de emissões de CO₂ (Comissão Europeia, 2018)

Para além dos problemas supramencionados, a Comissão Europeia demonstra grande preocupação pelo aumento da quantidade de lixo presente nos mares e oceanos. Anualmente, 5 a 13 milhões de toneladas de resíduos de plástico são descartados, tornando-se lixo marinho. Supõe-se que 80% deste lixo corresponde a matérias plásticas. Os resíduos podem ser arrastados

para a costa, criar zonas densas de acumulação ou degradar-se em microplásticos (fragmentos de plástico com granulometria inferior a 5 mm). Os microplásticos, devido ao seu tamanho reduzido, tornam-se facilmente ingeridos pelos animais marinhos, podendo acabar na cadeia alimentar (Comissão Europeia, 2018).

A Estratégia Europeia defende a necessidade de proteger o ambiente, caminhando para um desenvolvimento mais sustentável. Este pode ser conseguido com a imposição de medidas que permitam a diminuição dos gases de efeito de estufa, a dependência dos combustíveis fósseis e a produção de lixo marinho, através do controlo do fabrico e uso de plásticos e com a transição para uma economia circular. Em Portugal, a partir de 2020, será proibida a utilização de plásticos descartáveis ou de utilização única, como forma de atender à estratégia europeia.

- **O ciclo de vida da Reciclagem do Plástico**

Numa primeira fase e depois do descarte dos resíduos de plástico, estes são coletados e transportados para centros de triagem, onde são separados de acordo com o tipo de material, a partir daí são encaminhados para empresas recicladoras. Nestas empresas, os plásticos podem sofrer três processos: reciclagem mecânica, reciclagem química ou valorização energética (Ecycle, 2013; Plastval, 2008b). É de referir que nos dias correntes, já existem empresas com capacidade de triar e reciclar os materiais plásticos num mesmo espaço.

A **reciclagem mecânica** é o método mais utilizado, que consiste na alteração física dos resíduos de plástico. Primeiramente, os materiais são triturados (operação de moagem) para reduzir o tamanho das suas partículas. De seguida, são encaminhados para a fase de lavagem, onde são friccionados e secos, de maneira a assegurar que o material processado apresente um tamanho, grau de humidade e contaminação adequados aos requisitos para o bom funcionamento da unidade de extrusão e granulação (Reciclagem Primária). É ainda permitido a adição de matérias virgens ou aditivos quando o material a reciclar está degradado, carente de algumas propriedades ou por pedido do cliente. Estes irão conferir ao produto final mais resistência ao impacto, rigidez, flexibilidade, cor, fluidez, brilho, entre outros (Reciclagem Secundária). A qualidade do produto final depende da qualidade do produto a reciclar (Ecycle, 2013; Meister, 1994; Plastval, 2008b). Na Figura 2.6 pode observar-se parte da sequência do processo mecânico da empresa Ambiente – Recuperação de Materiais Plásticos, S.A.



Figura 2.6 – Processo Mecânico de Reciclagem de Plástico

A **reciclagem química** é pouco desenvolvida em Portugal e consiste em submeter os plásticos a reações de despolimerização (grandes cadeias poliméricas são “partidas”) com o objetivo de regressar aos blocos estruturais (monómeros). Doravante, os materiais podem ser transformados em novas substâncias químicas ou em polímeros iguais aos originais (matérias-

primas). Esta metodologia é muito dispendiosa e carece de elevados consumos de energia (Ecycle, 2013; Meister, 1994; Plastval, 2008b).

A **valorização energética** ou reciclagem energética baseia-se na incineração dos resíduos de plástico em instalações próprias e em condições controladas, de forma a produzir energia térmica ou elétrica. Este método permite o aproveitamento do poder calorífico conservado nos plásticos. As suas etapas são a trituração, lavagem e reprocessamento (alteração física quando sujeitos a diferentes temperaturas) (Ecycle, 2013; Plastval, 2008b).

2.4 Reciclagem de Plástico em Misturas Betuminosas

Embora se trate de um material relativamente recente, com origem no início do século XX, o consumo de plástico tem vindo a desenvolver-se de forma excecional, e com ele os benefícios e inconveniências que o seu crescimento acarreta. Na realidade, devido à sua omnipresença vital nos diversos setores económicos e às suas vantajosas propriedades, já mencionadas, torna-se inexequível a sua proibição. Em contrapartida, milhões de toneladas de resíduos plásticos são produzidos anualmente, e atualmente o aproveitamento desses mesmos resíduos continua a ser ineficaz (Comissão Europeia, 2018; Ecycle, 2013; Soyol, 2015).

A reciclagem é uma das formas mais promissoras de eliminar os resíduos de plástico, mas o seu potencial permanece, de certa forma, por explorar (Comissão Europeia, 2018). A sua incorporação, quando devidamente tratados, no dimensionamento e execução de pavimentos rodoviários tem demonstrado ser um modo seguro, benéfico e eficiente de resolver os problemas relativos à disposição de detritos e de aperfeiçoamento das propriedades das misturas betuminosas (Nouali *et al.*, 2019; Rashid e Azizi, 2018).

Diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de verificar a vantagem da inclusão de polímeros reciclados em misturas betuminosas, comparativamente com o uso de polímeros virgens. Estes têm-se mostrado uma alternativa viável, dado que os resultados são praticamente os mesmos, no entanto trata-se de uma solução muito mais económica e com melhores benefícios ambientais (Costa *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2013; Kalantar *et al.*, 2012; Ranieri *et al.*, 2017). Existem dois processos para a adição de polímeros em misturas betuminosas, por via húmida ou por via seca.

2.4.1 Via Húmida

O **método húmido** consiste na modificação do betume com a incorporação de materiais poliméricos. Este é o processo mais estudado e apresenta inúmeras vantagens, como o aumento do tempo de serviço e do desempenho da estrada, assim como a capacidade de controlar as características do aglomerante antes da sua colocação em obra (Chavan, 2013; Jan *et al.*, 2017; Vila-Cortavitarre *et al.*, 2018). Segundo a literatura, as propriedades do betume que sofrem melhorias são a aderência, a rigidez a altas temperaturas, a elasticidade, a coesão e a suscetibilidade a variações térmicas, o que resulta numa maior durabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente (Mishra e Gupta, 2017; Nouali *et al.*, 2019; Ranieri *et al.*, 2017; Saroufim *et al.*, 2018). É pretendido que as misturas apresentem menor viscosidade na aplicação e compactação, maior flexibilidade durante a vida útil da estrada, melhor resistência à abrasão e, se possível, menores custos e espessura das camadas do pavimento (Miranda, 2014).

O processo de modificação de um betume depende de vários fatores, como a natureza do polímero (um polímero com um peso molecular superior carece de mais tempo para se unir com o betume), a sua forma física (grãos porosos dissolvem-se e dispersam-se mais lentamente que polímeros em pó), a natureza e qualidade do betume (a composição e viscosidade do betume podem influenciar o processo de mistura de variadas formas), o tipo de equipamento de mistura (mistura em terminal ou mistura contínua), a temperatura e o tempo de mistura (o processo de mistura ideal deve ocorrer à menor temperatura possível, correspondente à integração completa do polímero no ligante) e a compatibilidade e estabilidade betume-polímero (a compatibilidade deve ser tal que evite a separação de fases no armazenamento, transporte e colocação em obra) (Chavan, 2013; Fontes *et al.*, 2006; Kalantar *et al.*, 2012).

Diferentes autores defendem a necessidade de avaliar as propriedades do betume alterado através de ensaios de caracterização física, morfológica e reológica, uma vez que estas não se podem prever e delas depende a eficácia da modificação. Os ensaios de caracterização física são o Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento (EN 1427), o Ensaio de Penetração a 25°C (EN 1426), o Ensaio de Viscosidade Dinâmica (EN 13302), o Teste de Resiliência (EN 13880-3) e o Teste de Estabilidade de Armazenamento (EN 13399). A caracterização morfológica consiste na avaliação da microscopia de interação entre o polímero e o betume, e pode obter-se através da microscopia de fluorescência. A análise reológica pode ser executada por meio de um reómetro dinâmico de corte, de acordo com o Ensaio para a determinação das propriedades reológicas do betume (EN 14770) (Costa *et al.*, 2018, Costa *et al.*, 2013; Miranda, 2014; Saroufim *et al.*, 2018). Seguidamente, apresentam-se os ensaios supracitados.

- **Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento (Método do Anel e Bola)** – determina a temperatura na qual, um material sob condições padrão, atinge uma dada consistência (CEN, 2007e);
- **Ensaio de Penetração a 25°C** - mede a consistência da mistura, expressa através da distância vertical (em décimos de milímetro) que uma agulha-padrão irá penetrar uma amostra de material, sob condições de carga, temperatura e tempo específicas (CEN, 2007d);
- **Ensaio de Viscosidade Dinâmica** – determina a viscosidade de um dado material, através da aplicação de um binário a um eixo rotativo inserido na amostra em estudo. Geralmente recorre-se a um viscosímetro rotacional (Miranda, 2014);
- **Teste de Resiliência (Ensaio de penetração e recuperação)** – mede indiretamente a recuperação elástica do betume, mediante a redução percentual da penetração. Este ensaio baseia-se na aplicação de um deslocamento vertical de compressão de 10 mm numa amostra de betume, a uma temperatura de 25°C (Miranda, 2014);
- **Teste de Estabilidade de Armazenamento** – determina a estabilidade de armazenamento de betumes modificados, a elevadas temperaturas. A amostra é colocada num tubo de alumínio com 160 mm de altura, disposto verticalmente e devidamente selado, durante 3 dias a uma temperatura específica. Depois de arrefecida, esta é dividida em três partes iguais (topo, intermédia e base). Repetem-se os ensaios físicos das amostras do topo e da base, sendo desprezada a intermédia. As possíveis diferenças entre as suas propriedades dita a estabilidade de armazenamento (Miranda, 2014);

- **Microscopia de Fluorescência** – descreve a interação betume-polímero visível microscopicamente. O betume é constituído por duas frações importantes, os maltenos e os asfaltenos. Quando os polímeros são adicionados ao betume, aumentam de volume devido à absorção de maltenos. Nesta avaliação, estes podem ser observados como objetos brilhantes num fundo negro (betume) (Costa *et al.*, 2018);
- **Ensaio de caracterização reológica (Ensaio de Corte com Varrimento de Frequências)** – permite analisar o comportamento viscoelástico do betume modificado à fadiga e à deformação permanente, com a determinação de características intrínsecas do material, como o ângulo de fase e o módulo complexo, para condições de temperatura e carga distintas. De acordo com a norma, a amostra é sujeita a uma extensão fixa para cada patamar de temperatura (30, 45, 60, 70 e 80°C), enquanto se lhe aplica um torque que varia numa gama de frequências de 10 Hz a 0,1 Hz (Costa *et al.*, 2018; Miranda, 2014).

A percentagem ótima de plástico e de betume a inserir na modificação é, recorrentemente, estimada através do Método de Marshall. Este implica a determinação de diversas grandezas intrínsecas das misturas betuminosas, como a resistência máxima à compressão radial (Estabilidade), a deformação, o quociente de Marshall, a baridade aparente, a baridade máxima teórica, a porosidade (V_m), o volume de vazios na mistura de agregados (VMA) e o volume de vazios preenchidos por betume (VFB), através da aplicação de ensaios aos provetes (Branco *et al.*, 2011; Miranda, 2014). As características que permitem definir as percentagens ótimas de ligante e de plástico a inserir na mistura são a Estabilidade (em kN) e a deformação (em mm), que são obtidas através da realização do Ensaio de Compressão de Marshall (Fonseca, 2018; Kazmi e Rao, 2014; Prasad e Nair, 2013).

Kazmi e Rao (2014) estudaram a caracterização de um betume modificado com 5, 7, 9 e 11% de polietileno (PEAD e PEBD), observando que o valor da Estabilidade aumentava com o acréscimo da percentagem de plástico, atingindo o valor máximo aos 9% de polietileno e posteriormente diminuindo. Este seria o valor ótimo de polímero a inserir na mistura.

Prasad e Nair (2013) testaram a inclusão de 2, 4, 6, 8 e 10% de PET em amostras que variavam entre 3,5 – 6,0% de betume, concluindo que a percentagem ótima de ligante seria de 5,0% e 4% de polímero, que equivalia a um aumento do valor de Estabilidade de Marshall em cerca de 75 - 76%, comparativamente à mistura de referência.

Miranda (2014) avaliou três misturas com 5% de PEAD, 5% de EVA e a incorporação dos dois polímeros em simultâneo (4% de EVA e 2% de PEAD), analisando o desempenho de cada mistura e definindo qual a percentagem ótima de betume a incorporar em cada uma (4,5; 5,0 ou 5,5%), para um AC 14 Surf. Inicialmente, estabeleceu que as condições a ter em consideração na análise dos resultados seriam uma porosidade igual ou próximo de 4,0%, um valor de estabilidade superior a 14 kN e uma deformação inferior a 4 mm. O valor ótimo de aglutinante para um betume 70/100 modificado com EVA seria próximo, mas inferior a 5,0%, referindo-se a um valor de Estabilidade de 15,5 kN, sendo a deformação inferior a 4 mm. A porosidade de 4,0% equivalia a uma percentagem de betume de 4,8%, definindo a percentagem ótima de ligante como localizado no intervalo de 4,8 – 5,0%. O autor retirou a mesma conclusão da mistura com 5% de PEAD, apresentando um valor ótimo de ligante de 5,0%. Para a combinação das duas misturas, observou que a deformação aumentava com o aumento da percentagem de

betume e que a Estabilidade se encontrava próxima de 15 kN, sendo que uma vez mais, o valor ideal se localizava no intervalo de 4,8 – 5,0%.

No que diz respeito à avaliação das propriedades das modificações através dos ensaios supracitados, diferentes estudos recorreram à via húmida para definir quais os melhores polímeros a utilizar na pavimentação de estradas (Ahmad e Jaya, 2016; Appiah *et al.*, 2017; Fontes *et al.*, 2006; Jan *et al.*, 2017; Nouali *et al.*, 2019; Saroufim *et al.*, 2018; Soyal, 2015).

Jan *et al.* (2017) usaram garrafas de plástico (PET) incorporadas no betume para avaliar as suas propriedades físicas, concluindo que o ponto de amolecimento aumenta e que o valor da penetração diminui com o aumento da percentagem de resíduos plásticos, em comparação com a mistura convencional.

Nouali *et al.* (2019) avaliaram a penetração a 25°C, a porosidade, o ponto de amolecimento e a estabilidade de armazenamento de uma mistura com resíduos de PEBD, constatando que a porosidade e o valor da penetração diminuem com a inclusão de plásticos, o ponto de fusão aumenta e o polímero apresenta fraca estabilidade de armazenamento a altas temperaturas.

Costa *et al.* (2019) exploraram as propriedades físicas, morfológicas e reológicas de três misturas com 5% de EVA reciclado, 5% de PEAD reciclado e 5% de SBS virgem (estireno-butadieno-estireno), em comparação com um betume 35/50 convencional. O SBS, conjuntamente com o EVA virgem, são os polímeros mais usados na produção de betumes comerciais. Os autores concluíram que, uma vez mais, a incorporação de polímeros reduz o valor da penetração e aumenta o ponto de amolecimento das misturas quando comparadas com o betume de referência. O polímero PEAD apresentou menor valor de resiliência e a sua capacidade de recuperação elástica ficou aquém, relativamente ao EVA reciclado e ao SBS, o que se pode traduzir num menor desempenho à fadiga. Na avaliação da viscosidade, ambos os polímeros reciclados apresentaram piores resultados que o SBS. E na avaliação da capacidade de armazenamento, todos os polímeros apresentaram um fraco desempenho, tendo os autores concluído ainda assim que o EVA seria o polímero com menor suscetibilidade para a separação de fases. Na avaliação da microscopia de fluorescência, o EVA apresentou a solução mais homogénea de dispersão de polímero no betume. E relativamente à avaliação reológica, o SBS foi o polímero que apresentou maior rigidez, seguido do EVA, e por fim, do PEAD.

Muitos dos resíduos plásticos têm a capacidade de modificar o betume, originar uma mistura com boas propriedades e que permita um bom desempenho ao longo da vida útil do pavimento. O EVA é aquele, que de forma geral, apresenta melhores resultados. Em consonância com os diversos estudos, a taxa de incorporação de polímeros poderá ser de até 15% de resíduos plásticos, em massa de betume, e prevê-se a diminuição da penetração e o aumento do ponto de amolecimento, logo os betumes tornam-se mais rígidos e menos suscetíveis a variações térmicas. Observa-se uma diminuição da porosidade e um aumento substancial da resistência à água e do módulo de rigidez, apesar da fraca estabilidade de armazenamento. É de referir que nem todos os polímeros são adequados para as modificações, como é o caso do PVC, que quando sujeito a elevadas temperaturas, tende a libertar gases tóxicos (Ahmad e Jaya, 2016; Costa *et al.*, 2013; Nouali *et al.*, 2019; Rashid e Azizi, 2018).

O tamanho das partículas influencia a dispersão dos plásticos no ligante. Polímeros com características semelhantes aos elastómeros, como o SBS e o granulado de borracha, assim como polímeros com elevado ponto de fusão, apresentam dificuldade a dispersar-se no betume. Assim

sendo, poderá ser necessário um pós-processamento das partículas através da redução do seu tamanho a frações mais pequenas ou pós (Kalantar *et al.*, 2012).

2.4.2 Via Seca

O **processo seco** consiste na adição de polímeros sólidos diretamente na mistura ou nos agregados aquecidos. De acordo com a revisão bibliográfica, é mais vantajoso a introdução de plásticos nos agregados quentes e posteriormente adicionar o ligante, dado que os polímeros vão assumir a função de selar os agregados (revestimento fino dos agregados), conferindo-lhes uma textura oleosa, evitando a absorção de água e tornando-os mais duros e mais fortes. Esta metodologia permite o uso de agregados mais fracos, reduz os vazios e evita a oxidação do betume pelo ar retido (Chavan, 2013; Mishra e Gupta, 2017; Santosh e Kumar, 2013). Existe uma melhoria substancial da ligação entre betume e agregados, devido ao aumento da ligação e da área de contacto polímero-betume (Chhabra e Marik, 2014; Mir, 2015).

Em alguns casos, esta via também possibilita a substituição parcial dos agregados através de granulado de borracha bem graduado (conteúdo ideal entre 5 e 20% em volume total de agregados), minimizando a utilização de agregado convencional de pedra. O pavimento apresenta melhor desempenho à deformação permanente e ao fendilhamento térmico, aumentando a flexibilidade e a resistência à flexão da camada superficial. A nível ambiental, permite a introdução de maiores quantidades de resíduos de borracha de pneu e diminui a poluição sonora, uma vez que este agregado tem a capacidade de absorver o ruído (Chhabra e Marik, 2014). Yu *et al.* (2014) concluíram que a adição de granulado de borracha como substituto parcial dos agregados apresentava dificuldades no processo de compactação. O betume é um material viscoelástico por natureza e quando sujeito a elevadas temperaturas, como é o caso da compactação, apresenta-se na sua fase viscosa. Este comportamento não o permite conter a resiliência e elasticidade do granulado de borracha, podendo originar grandes deformações após a conclusão do processo de compactação. Os autores estabeleceram algumas formas de contornar esta problemática, como o uso de um compactador vibratório conjuntamente com o compactador de Marshall na compactação laboratorial, e a redução da temperatura de compactação, dado que esta fará com que o aglutinante passe do estado viscoso ao elástico ainda na fase de compactação, confinando a borracha mais facilmente.

Santosh *et al.* (2013) avaliaram a percentagem ótima de ligante e de polímero (PP) a introduzir numa mistura pelo método seco (diretamente nos agregados). Através do valor da Estabilidade de Marshall e da porosidade, estes determinaram que as percentagens ideais seriam de 5,0% e 8%, respetivamente.

Mishra e Gupta (2017) analisaram a incorporação de 7, 9 e 11% de resíduos de polietileno (PEBD e PEAD) numa mistura (diretamente nos agregados), comparando-a com uma de referência. O valor ótimo de polímero seria de 9%, valor máximo de Estabilidade de Marshall, e a percentagem de ligante de 5,2%. Os autores constataram que os valores das baridades dos provetes com inclusão de plásticos eram inferiores às baridades dos provetes de mistura de referência, concluindo que esta diminuição se deve à baixa densidade dos polímeros. Na avaliação do Ensaio de tração indireta (sensibilidade à água), a mistura de referência apresentou pior desempenho.

Costa *et al.* (2017) investigaram o uso de 5% de PEX (polietileno reticulado feito de PEAD, utilizado em cablagem elétrica e tubagens) pelo método seco (diretamente na mistura)

comparativamente a uma mistura convencional para camadas de desgaste (betume 50/70). Os autores definiram 5,0% de ligante como a percentagem ótima para misturas AC 14 Surf. Foram avaliadas a variabilidade da baridade aparente e da baridade máxima teórica dos provetes, e concluiu-se que devido à baixa densidade do PEX, os resultados foram inferiores para as amostras com plástico do que para as da mistura de referência. O desempenho à deformação permanente foi claramente superior na mistura com PEX, que é resultado da sua baixa suscetibilidade a variações térmicas. Conclusões semelhantes foram retiradas da observação dos módulos de rigidez mais elevados e dos ângulos de fase mais baixos. Os resultados de resistência à fadiga e de sensibilidade à água foram os piores, traduzindo-se na ineficácia de polímeros à base de polietileno de melhorar a flexibilidade das misturas como os betumes modificados virgens.

2.4.3 Via Húmida vs Via Seca

Vários autores também compararam a utilização dos dois métodos, usando múltiplos tipos de plástico e diferentes percentagens, entre os quais o EVA, o PEBD, o PEAD e o PS (Manju *et al.*, 2017; Mishra e Gupta, 2018; Ranieri *et al.*, 2017; Vila-Cortavitate *et al.*, 2018). Ranieri *et al.* (2017) concluíram que amostras com 5% de EVA ou PEAD pelo processo seco apresentavam melhores resultados de sensibilidade à água e resultados semelhantes de resistência à fadiga, comparativamente à mesma mistura pelo método húmido e à mistura convencional. Estes comprovaram que a incorporação do polímero residual de EVA no ligante asfáltico demonstrava um melhor comportamento relativamente ao módulo de rigidez, como consequência da interação entre o betume e o polímero. Manju *et al.* (2017) testaram o uso de sacos de plástico (PEBD) pelas duas vias, demonstrando que a utilização do método seco produz amostras com menor porosidade e com menores valores de profundidade da rodeira na avaliação da deformação permanente. Na caracterização do betume modificado, este apresentou menores valores de penetração a 25°C e maior Estabilidade em comparação com o betume de referência. Mishra e Gupta (2018) utilizaram o mesmo material (resíduos triturados de sacos de plástico) tendo concluído que a via seca é a melhor opção, tratando-se de um processo mais económico, mais simples e que produz melhores resultados.

De um modo geral, a incorporação de resíduos em misturas betuminosas demonstra ser uma mais-valia a nível económico e ambiental, reduzindo a necessidade de betume em cerca de 10% (ambos os métodos) (Chavan, 2013; Mir, 2015; Rajput e Yadav, 2016). Esta redução é importante, uma vez que o betume, apesar de corresponder apenas a 4,0% ou 5,0% da massa total das misturas, envolve sensivelmente 60% dos custos (Vila-Cortavitate *et al.*, 2018). No que concerne ao desempenho das misturas, estas apresentam grandes melhorias em vários parâmetros como a resistência à deformação permanente ou o módulo de rigidez.

Apesar do pouco desenvolvimento e de necessitar de mais investigação, a via seca comprovou ser uma boa opção em comparação com a via húmida. Esta melhora a superfície e qualidade dos agregados (cerca de 90 a 95% da massa total das misturas), sem resultar da queima de plásticos (Ahmad e Jaya, 2016; Mir, 2015). Esta poderá ser uma excelente prática a aplicar em países pouco desenvolvidos ou em desenvolvimento, onde a eliminação e disposição de resíduos de plástico representa um obstáculo e onde o desenvolvimento do sistema rodoviário demonstra ser uma necessidade constante (Ranieri *et al.*, 2017).

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo é dedicado ao trabalho laboratorial realizado durante a elaboração desta dissertação. Este foi faseado e efetuado em dois laboratórios, sendo que a execução dos provetes ocorreu no Laboratório de Pavimentos do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e a realização dos ensaios no Laboratório de Pavimentos da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Foram fabricadas duas misturas (AC 14 surf), com 6,0% de PEBD (polietileno de baixa densidade) e de 0% de PEBD (como termo de comparação). Ambas foram envelhecidas, obtendo-se quatro misturas finais para o estudo.

A formulação das misturas advém de uma pesquisa já realizada por outro autor (Fonseca, 2018). Todo o trabalho elaborado (de acordo com as normas europeias) encontra-se detalhadamente exposto neste capítulo, bem como toda a análise dos resultados, de modo a facilitar a leitura e a obter um encadeamento de ideias.

Os ensaios aplicados foram escolhidos de forma a avaliar o desempenho das misturas, ou seja, aqueles que permitam obter parâmetros que representem o comportamento observado no pavimento durante a sua vida útil. Para isso, recorreu-se ao ensaio de avaliação dos módulos de rigidez, à avaliação da deformação permanente e da resistência à fadiga. Também se procederam a ensaios de avaliação das características volumétricas dos provetes (Ensaio de determinação da Baridade Máxima Teórica e da Baridade Aparente) e de caracterização do betume (Ensaio de Penetração a 25°C e Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento).

O capítulo encontra-se dividido em sete secções. Primeiramente, procedeu-se à caracterização dos materiais utilizados: agregados, betume e plástico (Secção 3.2). De seguida, apresenta-se o procedimento de fabrico dos provetes (Secção 3.3) e as suas características geométricas e volumétricas (Secção 3.4). As três últimas secções são reservadas aos ensaios de desempenho e aos resultados obtidos: Ensaio de Avaliação da Resistência à Deformação Permanente (Secção 3.5), Ensaio de Avaliação do Módulo de Rigidez (Secção 3.6) e Ensaio de Avaliação da Resistência à Fadiga (Secção 3.7).

3.2 Materiais

3.2.1 Agregados

Como foi referido antecipadamente, a presente dissertação trata-se da continuação de trabalhos executados anteriormente, sendo que a percentagem tanto de agregados, como de betume e plástico já estavam previamente definidas (Fonseca, 2018), assim apenas se pode verificar se o fuso granulométrico respeita os limites estipulados no Caderno de Encargos para um AC 14 surf (EP, 2014).

No que é referente à tipologia dos agregados, foram utilizados quatro tipos extraídos de diferentes pedreiras e com granulometrias distintas: dois gnaises provenientes da Pedreira da

Malaposta, e dois calcários de uma Pedreira localizada em Pombal. Estes foram fornecidos pela empresa Contec – Construção e Engenharia, S.A. Atribui-se as nomenclaturas de Filler, Pó 0/4, Gnaisse 4/12 e Gnaisse 8/20, consoante o tipo de pedra e a sua granulometria, e são estas as utilizadas no desenvolvimento do texto. Na Figura 3.1 apresentam-se os diferentes agregados.



Figura 3.1 – Tipos de Agregados utilizados

De acordo com Fonseca (2018), foi feita uma análise granulométrica a cada agregado de forma a definir a sua percentagem na mistura.

Uma vez que se trata de um AC 14 surf ligante (BB), o “Caderno de Encargos Tipo Obra” das Estradas de Portugal (atualmente Infraestruturas de Portugal) estabelece os seguintes requisitos para os fusos granulométricos das misturas betuminosas a utilizar em camadas de desgaste (EP, 2014). No Quadro 3.1 podem observar-se todos os valores referidos e na Figura 3.2 o fuso granulométrico referente à mistura em estudo. É de referir que neste caso, o fuso respeita os limites impostos pelo Caderno de Encargos.

Quadro 3.1 – Limites definidos pelo Caderno de Encargos e Curva Final (EP, 2014)

AC 14 surf ligante (BB)	%	Peneiros (mm)							
		20	14	10	4	2	0,5	0,125	0,063
Caderno de Encargos	Máximo	100,0	100,0	77,0	52,0	40,0	19,0	10,0	8,0
	Mínimo	100,0	90,0	67,0	40,0	25,0	11,0	6,0	5,0
Gnaisse 8/20	15,0%	100,0	66,9	5,9	0,8	0,5	0,3	0,1	0,0
Gnaisse 4/12	36,4%	100,0	98,6	61,0	1,0	1,0	0,2	0,1	0,1
Pó 0/4	45,6%	100,0	100,0	100,0	95,0	60,0	22,5	12,0	9,0
Filler	3,0%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,0	82,0
Curva Final	100,0%	100,0	94,5	71,7	46,8	30,8	13,4	8,5	6,6

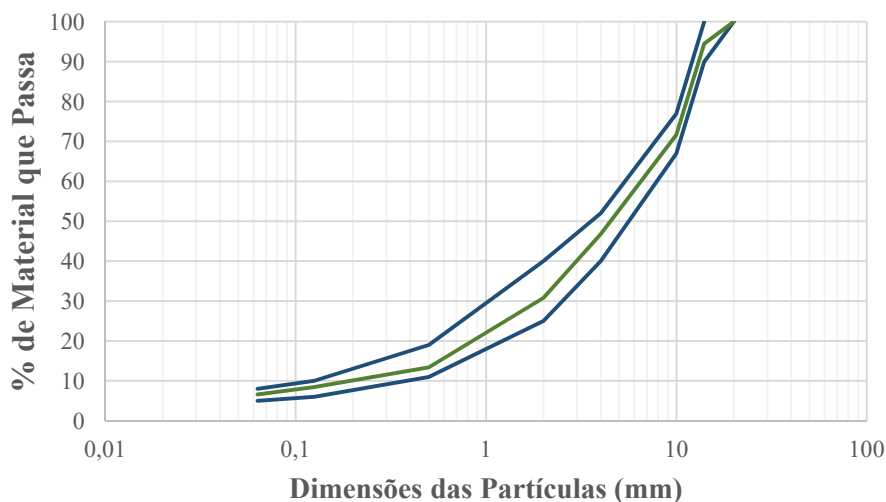


Figura 3.2 – Fusão Granulométrica da mistura estudada

3.2.2 Betume

A percentagem de ligante betuminoso a utilizar foi definida em 5,0% da massa total da mistura, tendo em conta que, segundo vários autores, este é o valor tipicamente utilizado na conceção de misturas de AC 14 para camadas de desgaste (Costa *et al.*, 2017; Fonseca, 2018; Ranieri *et al.*, 2017).

O betume utilizado trata-se de um 35/50 convencional fornecido pela Cepsa. De acordo com (Abreu, 2009; Baptista, 2006), e em função das condições climáticas de Portugal, é usual recorrer-se a um ligante da categoria 35/50 ou 50/70 se se tratar de misturas betuminosas a quente.

Neste estudo também se procedeu à caracterização básica do betume pelo Ensaio de Penetração a 25°C (EN 1426) e pelo Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento pelo Método do Anel e Bola (EN 1427), cujo intuito é verificar a classe do ligante em causa.

- **Ensaio de Penetração a 25°C**

O ensaio consiste na determinação indireta da rigidez do betume, através de uma agulha com uma massa de 100 gramas que penetra verticalmente uma amostra de ligante durante 5 segundos a uma temperatura de 25°C. O objetivo é verificar a profundidade a que a agulha penetrou, medida em décimas de milímetro, e são feitas várias medições em pontos distintos da amostra, distanciados de 1 cm cada (CEN, 2007d). O equipamento para a execução do ensaio contempla-se na Figura 3.3.

Conforme o estabelecido na norma EN 1426, são retiradas cinco medidas em cada tentativa e rejeitam-se o maior e o menor valor de penetração. No Quadro 3.2 apresentam-se os resultados do ensaio executado em laboratório.

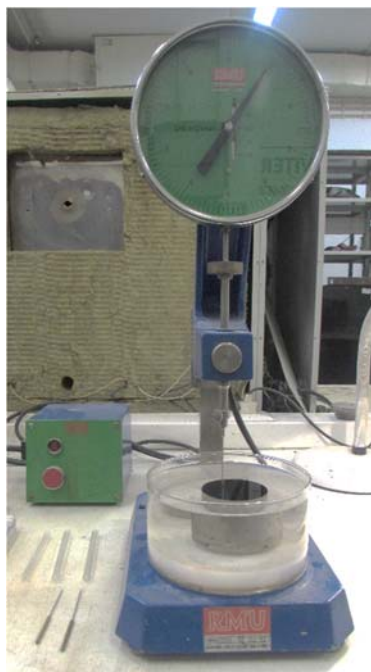


Figura 3.3 – Equipamento do Ensaio de Penetração a 25°C

Quadro 3.2 – Resultados do Ensaio de Penetração a 25°C

Medições	Tentativa 1 (0,1 x mm)	Tentativa 2 (0,1 x mm)
1	39	37
2	36	36
3	37	34
4	36	35
5	35	32
Média	36	35

- **Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento pelo Método do Anel e Bola**

O ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento consiste na determinação do ponto de amolecimento do betume, ou seja, da temperatura máxima que o ligante suporta sem sofrer grandes deformações. Este realiza-se de acordo com a norma a EN 1427. O equipamento utilizado pode ser observado na Figura 3.4. O Ponto de Amolecimento deu-se a uma temperatura de 52°C e 53°C, para cada amostra.

As especificações para betumes de pavimentação são dadas pela norma EN 12591 e analisando os resultados pode concluir-se que se trata de um betume da classe 35/50 como especificado pelo produtor. No Quadro 3.3 podem ver-se os limites exigidos para ambas as propriedades (Ponto de Amolecimento e Penetração a 25°C), consoante a classe de betume.



Figura 3.4 – Equipamento do Ensaio para a determinação do Ponto de Amolecimento

Quadro 3.3 – Especificações para betumes de pavimentação com penetrações entre 20 x 0,1 mm e 220 x 0,1 mm (CEN, 2009)

Propriedade	Norma	Unid.	Tipos de Betume							
			20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetração a 25°C	EN 1426	0,1 mm	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
Ponto de Amolecimento	EN 1427	°C	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43

3.2.3 Plástico

Para estimar a percentagem de plástico, o autor testou cinco percentagens diferentes de PEBD incorporado na mistura betuminosa anterior (0%, 2%, 4%, 6%, 8%) face à massa total de betume 35/50, escolhendo aquela que apresentasse melhores resultados de Estabilidade e de Deformação no Ensaio de Compressão de Marshall (Fonseca, 2018). Optou-se pelo uso de fragmentos de plástico em vez do uso de grãos de plástico (*pellets*), por ser uma solução mais económica e simples em termos de reciclagem. A obtenção de fragmentos de plástico implica essencialmente as seguintes fases: recolha, limpeza, secagem e corte, enquanto a obtenção de *pellets* implica as seguintes fases adicionais: aglomeração, coloração, extrusão, transformação em grãos, muitas vezes produzidos com mistura de materiais virgens. Na Figura 3.5 podem observar-se os resíduos de plástico utilizados na mistura.

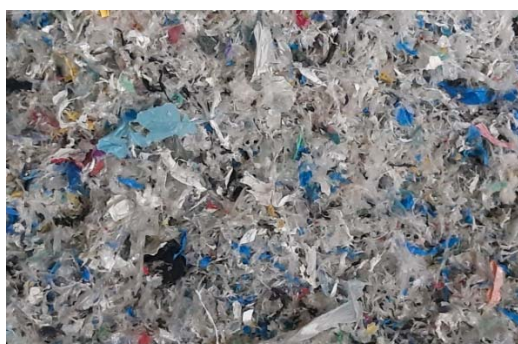


Figura 3.5 – Resíduos de plástico utilizados na mistura

Segundo Fonseca (2018), foram produzidos provetes cilíndricos de Marshall, compactados por impacto de acordo com a norma EN 12697-30. Na análise dos resultados, determinados em conformidade com a norma EN 12697-34, observou-se um aumento da Estabilidade com o aumento da incorporação de plástico reciclado até aos 6% de PEBD (valor máximo de Estabilidade de Marshall), diminuindo de seguida (8% de PEBD). No que é respeitante ao valor da deformação, para 4% de PEBD manteve-se idêntico à mistura de referência e para 8% verifica-se um aumento da deformação, a adição de 6% de PEBD originou o valor mais favorável, correspondendo ao maior quociente de Marshall (5,62 kN/mm) comparativamente a todas as composições avaliadas. Assim sendo, optou por se usar o valor de 6% de PEBD como percentagem ótima de plástico. Na Figura 3.6 podem observar-se os diferentes resultados de Estabilidade e Deformação obtidos para cada uma das percentagens de plástico adicionadas à mistura.

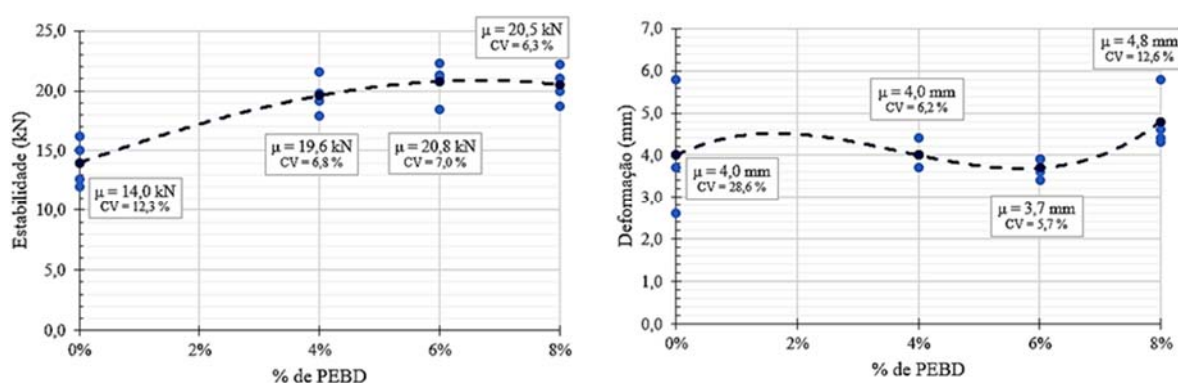


Figura 3.6 - Valores da Estabilidade e da Deformação pelo Ensaio de Marshall (Fonseca, 2018)

3.3 Fabrico dos Provetes

Todos os provetes foram executados em laboratório tendo em conta o estabelecido na norma EN 12697-35 e seguindo o mesmo procedimento (CEN, 2007b). Foram fabricadas lajes e vigas (lajes de maior dimensão que foram posteriormente cortadas), com uma percentagem de 6% de PEBD e de 0% de PEBD, sendo que algumas foram envelhecidas de acordo com a norma prática R 30-02 (AASHTO, 2015).

O procedimento laboratorial de preparação da mistura consistiu na secagem dos agregados a 180°C e no aquecimento do betume à temperatura de mistura (165°C), como exigido pela norma. O plástico foi adicionado diretamente na mistura, pelo método seco. Na Figura 3.7 pode observar-se o procedimento laboratorial para o fabrico dos provetes. O processo de mistura teve uma duração de 3 minutos e foi realizado recorrendo a um misturador automático (CEN, 2007b).

A compactação foi efetuada com o auxílio de um cilindro compactador manual e o objetivo seria atingir-se uma baridade alvo de 2380 kg/m³. Esta baridade foi definida de acordo com o trabalho já efetuado (Fonseca, 2018). Na Figura 3.8 verifica-se o processo de compactação dos provetes em laboratório.



Figura 3.7 – Execução e mistura dos provetes



Figura 3.8 – Compactação dos Provetes

3.3.1 Lajes

As lajes foram fabricadas com o intuito de avaliar o critério de deformação permanente pelo Ensaio de Pista (“*Wheel Tracking*”). Foram fabricadas 8 lajes, com as denominações de P (com Plástico) ou S (Sem plástico), se incorporadas com 6% de PEBD ou de referência, respetivamente. As dimensões pretendidas seriam 370x300x40 mm e uma massa de 10,57 kg. As dimensões e denominações das lajes podem verificar-se na Figura 3.9.

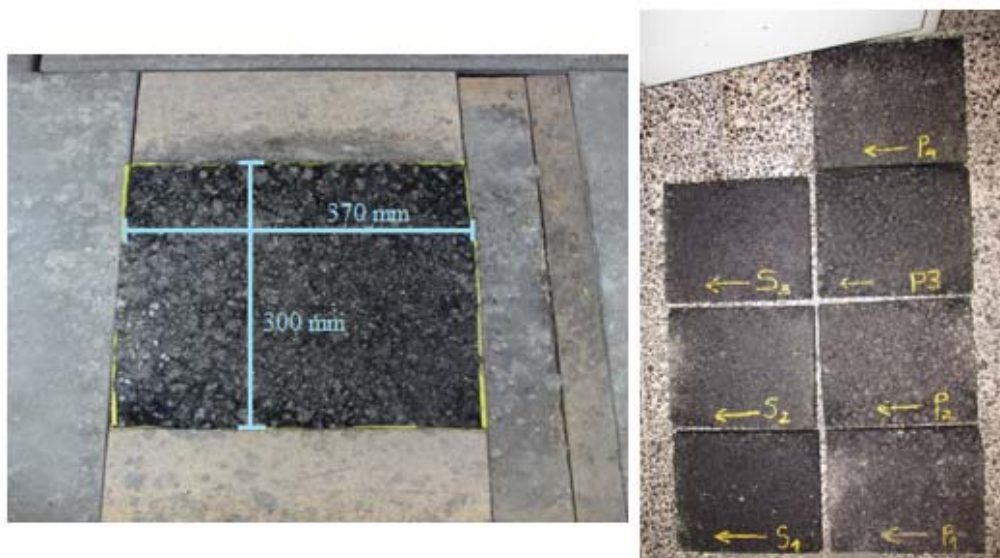


Figura 3.9 – Dimensões e denominação das Lajes

3.3.2 Vigas

As vigas foram produzidas de modo a avaliar os módulos de rigidez e a resistência à fadiga pelo Ensaio de Flexão em quatro pontos. Foram fabricadas 6 lajes (3 com incorporação de plástico e 3 de referência) de dimensões 550x500x60 mm e 39,27 kg, que posteriormente foram transportadas e cortadas na empresa Almeida & Ferreira, Lda. De cada laje obteve-se 10 vigas, o que fez um total de 60 vigas no conjunto das 6 lajes. As denominações adotadas foram as mesmas que das lajes para a avaliação da deformação permanente, S ou P, seguidas do número da laje em que se encontravam e do número da viga a que se referiam. Na Figura 3.10 podem observar-se as lajes executadas e as vigas após o corte.



Figura 3.10 – Dimensões e denominações das Lajes (antes e depois do corte em Vigas)

3.3.3 Envelhecimento

Como referido previamente, algumas das vigas e lajes (4 lajes e 21 vigas) foram submetidas ao processo de envelhecimento, de acordo com a norma R 30-02 da AASHTO (2015). Dias (2009) define o envelhecimento como a alteração das propriedades das misturas betuminosas, principalmente na camada de desgaste, devido à exposição atmosférica e ao contacto com o oxigénio, permitindo a degradação dos pavimentos com o endurecimento do betume com o passar do tempo.

No presente trabalho, o método de simulação do envelhecimento foi conseguido através da metodologia *Long-Term Conditioning for Mixture Mechanical Property Testing*, em que os moldes ficaram acondicionados em estufa, durante 5 dias a uma temperatura de 85°C (AASHTO, 2015). Na Figura 3.11 pode observar-se o acondicionamento dos provetes em estufa e o seu aspeto após a simulação do envelhecimento.

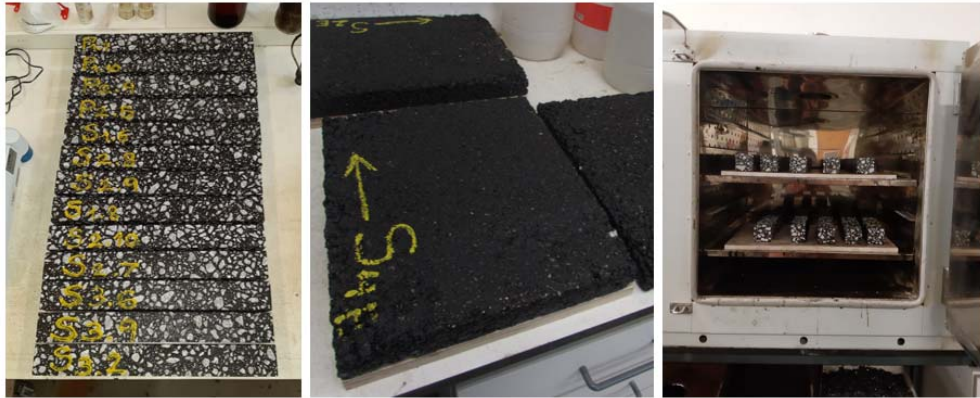


Figura 3.11 – Simulação e aspeto dos provetes após o envelhecimento

3.4 Características dos Provetes

3.4.1 Dimensões

As dimensões dos provetes foram retiradas recorrendo a um paquímetro. Adotaram-se as abreviaturas de *c* (comprimento), *l* (largura) e *h* (altura) para as diversas medidas, tanto para as lajes, como para as vigas (Figura 3.12). Tendo em conta o número elevado de provetes, optou por se colocar os quadros com as respetivas medições no Anexo A (Quadro A.1, Quadro A.2 e Quadro A.3).

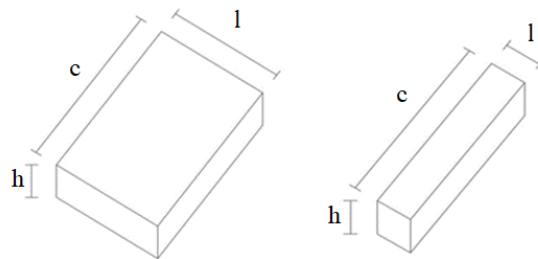


Figura 3.12 – Abreviaturas adotadas para as dimensões dos provetes (lajes e vigas)

3.4.2 Baridades

A baridade corresponde à massa por unidade de volume de uma amostra, com a inclusão dos vazios de ar, a uma temperatura conhecida (CEN, 2007c). Neste trabalho, a baridade foi estimada a partir de dois procedimentos de acordo com a EN 12697-6.

- **Procedimento B:** Baridade – SSD

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w \quad (3.1)$$

ρ_{bssd} – Massa volúmica (SSD) (kg/m^3);

m_1 – Massa do provete seco (g);

m_2 – Massa do provete em água (g);

m_3 – Massa do provete saturado com a superfície seca (g);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m^3), com aproximação a $0,1 \text{ kg}/\text{m}^3$.

- **Procedimento D:** Baridade geométrica (Provetes prismáticos)

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{h \cdot l \cdot c} \cdot 10^6 \quad (3.2)$$

$\rho_{b,dim}$ – Massa volúmica da amostra pelo procedimento geométrico (kg/m³);

m_1 – Massa do provete seco (g);

h – Altura da amostra (mm);

c – Comprimento da amostra (mm);

l – Largura da amostra (mm).

Os valores das baridades calculadas pelos dois procedimentos referidos encontram-se no Anexo A (Quadro A.1, Quadro A.2 e Quadro A.3). Ao analisarem-se os resultados obtidos pode concluir-se que de uma forma geral, a massa volúmica dos provetes com a mistura de referência é superior à dos provetes com 6% de PEBD, como verificado também no Estado da Arte. Isto deve-se à baixa densidade do plástico e ao facto da sua incorporação ocorrer por massa de betume, o que diminui a quantidade de ligante das amostras. Na Figura 3.13 observa-se parte do processo de determinação das baridades (massa do provete submerso – m_2) dos diferentes moldes.



Figura 3.13 – Determinação da baridade dos provetes (m_2)

Ainda nesta fase foi efetuada uma análise comparativa do valor das baridades das vigas, antes e depois de envelhecidas, de modo a verificar se o envelhecimento influenciava as características volumétricas das misturas. No Quadro 3.4 pode examinar-se os resultados obtidos, concluindo que o envelhecimento não afeta significativamente as características dos provetes (menos de 1,0% pelo Procedimento B e 0,0% pelo Procedimento D).

Quadro 3.4 – Variação dos valores das baridades obtidas com o envelhecimento

Viga	Envelhecidas		Não Envelhecidas		Taxa de Variação	
	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	$\rho_{b,dim}$ (kg/m ³)	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	$\rho_{b,dim}$ (kg/m ³)	Procedimento B (SSD)	Procedimento D (Dim)
P1.7	2444	2391	2433	2391	0,5%	0,0%
P1.10	2441	2386	2427	2387	0,6%	0,0%
P2.2	2372	2317	2371	2317	0,0%	0,0%
P2.4	2402	2347	2393	2347	0,4%	0,0%
P2.5	2401	2337	2393	2338	0,3%	0,0%
P2.8	2410	2370	2401	2370	0,4%	0,0%
P3.6	2429	2394	2424	2394	0,2%	0,0%
P3.7	2433	2379	2423	2379	0,4%	0,0%
P3.9	2423	2390	2420	2390	0,1%	0,0%
P3.10	2421	2376	2413	2376	0,3%	0,0%
S1.1	2415	2310	2410	2310	0,2%	0,0%
S1.2	2430	2382	2426	2383	0,2%	0,0%
S1.6	2445	2374	2434	2374	0,4%	0,0%
S1.8	2443	2383	2437	2384	0,3%	0,0%
S2.7	2445	2396	2441	2396	0,1%	0,0%
S2.8	2443	2398	2440	2399	0,1%	0,0%
S2.9	2446	2397	2442	2398	0,2%	0,0%
S2.10	2442	2284	2441	2284	0,0%	0,0%
S3.2	2437	2354	2436	2354	0,0%	0,0%
S3.6	2447	2382	2442	2383	0,2%	0,0%
S3.9	2451	2400	2445	2400	0,2%	0,0%

3.4.3 Baridade Máxima Teórica

A baridade máxima teórica, ρ_{mv} , consiste em considerar que a mistura não contém vazios, isto é, não contém ar entre as suas partículas, de forma que a sua massa volúmica seja máxima para as proporções de materiais utilizadas (Branco *et al.*, 2011). Esta, juntamente com a baridade, permite o cálculo da porosidade e de outras características relacionadas com os vazios de uma mistura betuminosa compactada. Neste caso, a baridade máxima teórica é estimada conforme o Procedimento A (volumétrico) da norma EN 12697-5 (CEN, 2007g).

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \cdot V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (3.3)$$

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m³);

m_1 – Massa do picnómetro mais tampa (g);

m_2 – Massa do picnómetro mais tampa e mais amostra (g);

m_3 – Massa do picnómetro mais a tampa, a amostra e água (g);

V_p – Volume do picnómetro cheio de água até à marca de referência (m³);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m³).

Neste trabalho, procedeu-se ao cálculo da baridade máxima teórica para 2 amostras, uma com e uma sem plástico, de 4 kg cada. A sequência do procedimento de ensaio pode ser observada na Figura 3.14 e os resultados obtidos aquando da aplicação da fórmula (3.3) encontram-se no Quadro 3.5.

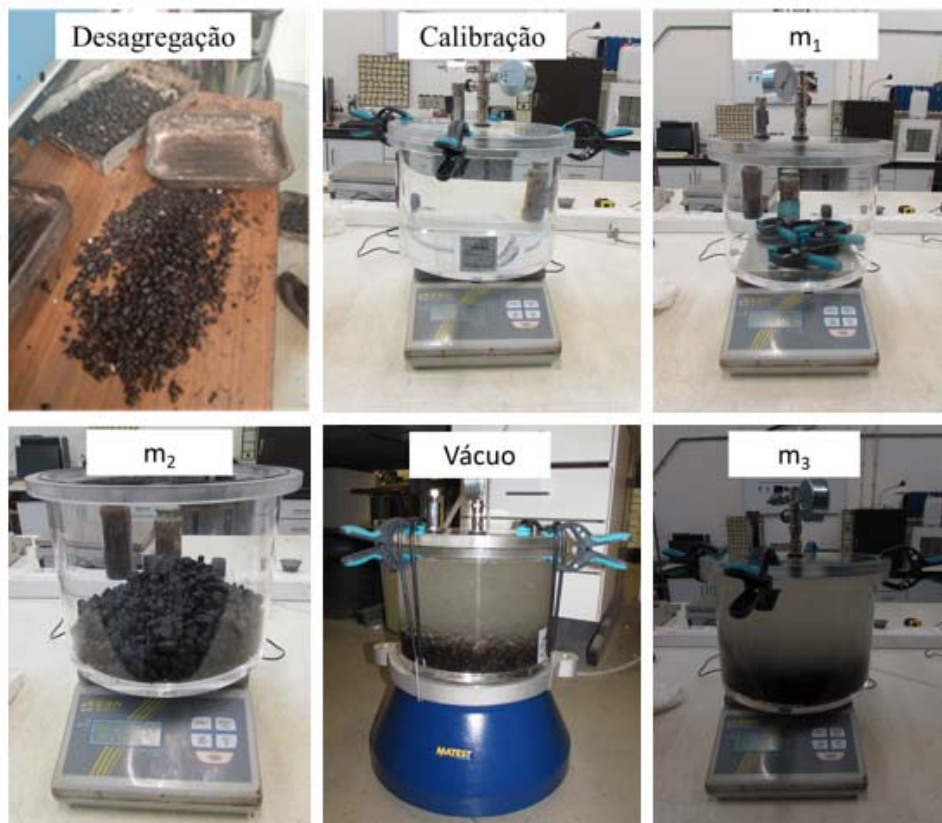


Figura 3.14 – Sequência do Procedimento de Ensaio para a determinação da Baridade Máxima Teórica

Quadro 3.5 – Resultados do Ensaio para a determinação da Baridade Máxima Teórica

Amostra	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	V_p (m ³)	ρ_w (kg/m ³)	ρ_{mv} (kg/m ³)
Com Plástico	5475	9284	21078	0,013358	998,3	2467
Sem Plástico	5471	9288	21069	0,013337	998,6	2479

3.4.4 Características Volumétricas dos Provetes

A determinação das características volumétricas dos provetes procede-se segundo a norma EN 12697-8. Estas consistem na porosidade (V_m), no volume de vazios na mistura de agregados (VMA) e no volume de vazios preenchidos com betume (VFB), podendo ser calculadas de acordo com as expressões (3.4), (3.5) e (3.6). Todos os resultados obtidos encontram-se no Anexo A (Quadro A.1, Quadro A.2 e Quadro A.3).

- **Porosidade**

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

V_m – Porosidade da mistura (%);
 ρ_m – Baridade máxima teórica da mistura (kg/m^3);
 ρ_b – Baridade do Provetete (kg/m^3).

- **Volume de Vazios na mistura de Agregados**

$$VMA = V_m + B \cdot \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad (3.5)$$

VMA – Volume de Vazios na mistura de Agregados (%);
 V_m – Porosidade da mistura (%);
 B – Percentagem de betume do provete (em 100% de misturas);
 ρ_b – Baridade do Provetete (kg/m^3);
 ρ_B – Densidade do betume (kg/m^3).

- **Volume de Vazios preenchidos com Betume**

$$VFB = \frac{B \cdot \rho_b}{VMA} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

VFB – Volume de Vazios preenchidos com Betume (%);
 VMA – Volume de Vazios na mistura de Agregados (%);
 B – Percentagem de betume do provete (em 100% de misturas);
 ρ_b – Baridade do Provetete (kg/m^3);
 ρ_B – Densidade do betume (kg/m^3).

3.5 Ensaio de Avaliação da Resistência à Deformação Permanente

A resistência à deformação permanente em misturas betuminosas pode ser executada através do Ensaio *Wheel Tracking* (Ensaio de Pista), caracterizando-se pela repetição da aplicação de uma carga rolante que têm como propósito a simulação da passagem sucessiva dos rodados dos veículos, ocasionando rodeiras que podem ser acompanhadas de elevações laterais (Abreu, 2009; Silva, 2014).

O Procedimento de ensaio encontra-se descrito na norma EN 12697-22 (Procedure B in air) e da sua aplicação obtém-se uma curva que relaciona a profundidade da rodeira (deformação permanente) com o número de ciclos. Segundo a norma, o ensaio realiza-se a elevadas temperaturas, pelo que se definiu uma temperatura de ensaio de $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$, e a uma frequência de 26 ciclos por minuto (cada ciclo equivale a duas passagens da roda) (Abreu, 2009; CEN, 2007f). Na Figura 3.15 pode ver-se a máquina utilizada para a avaliação da resistência à deformação permanente (Wessex S-867), assim como a profundidade de rodeira nas lajes envelhecidas (P2E, P4E, S2E e S4E) e não envelhecidas (P1, P3, S1 e S3).

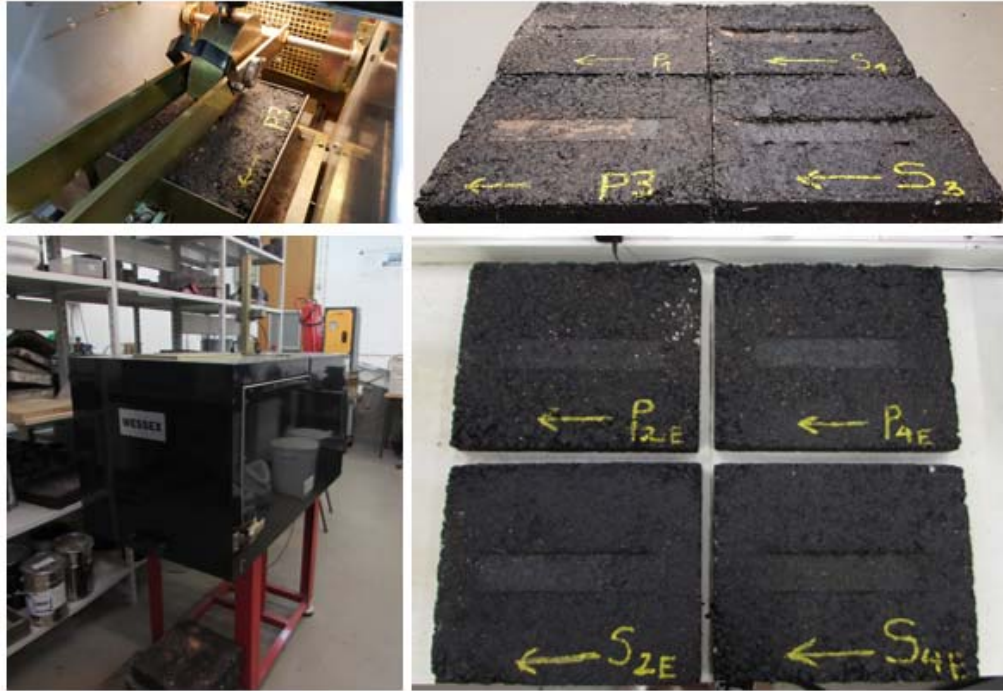


Figura 3.15 – Máquina do ensaio de pista e lajes após ensaio (P1, P2E, P3 e P4E: com 6% de PEBD; S1, S2E, S3 e S4E: com 0% de PEBD)

O ensaio acaba quando se atinge os 10000 ciclos ou uma profundidade de rodeira de 20 mm. Os parâmetros avaliados são o valor do declive máximo de rodeira (WTS_{AIR}), a percentagem da profundidade de rodeira máxima (PRD_{AIR}) e a profundidade de rodeira (RD_{AIR}).

- **Declive máximo de rodeira**

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5} \quad (3.7)$$

WTS_{AIR} – Declive máximo de rodeira (mm/10³ ciclos);

d_{5000} , d_{10000} – Profundidade de rodeira após 5000 e 10000 ciclos, respetivamente (mm).

- **Profundidade máxima de rodeira**

$$PRD_{AIR} = \frac{RD_{AIR}}{h} \quad (3.8)$$

PRD_{AIR} – Profundidade máxima de rodeira (%);

RD_{AIR} – Profundidade de rodeira ao fim de 10000 ciclos (mm);

h – Altura do provete (mm).

De uma forma geral, observa-se que a incorporação de plástico na mistura melhora consideravelmente o critério de resistência à deformação permanente. Esta conclusão pode ser examinada na evolução das curvas que relacionam o valor da deformação permanente com o número de ciclos (Figura 3.16 – Provetes não envelhecidos e Figura 3.17 – Provetes

envelhecidos), os provetes sem plástico apresentaram valores de deformação superiores aos provetes com plástico, antes e depois de envelhecidos. Verificou-se também que o envelhecimento tem influência nos resultados, denotando-se que o endurecimento do betume com o tempo, proporcionou uma melhoria na resistência dos provetes. No Quadro 3.6 podem analisar-se os resultados obtidos da aplicação das fórmulas anteriores após o término do ensaio. A incorporação do resíduo (6% de PEBD) permitiu reduzir a profundidade de rodeira em 66% e 51% para as lajes não envelhecidas e envelhecidas, respetivamente (Figura 3.18).

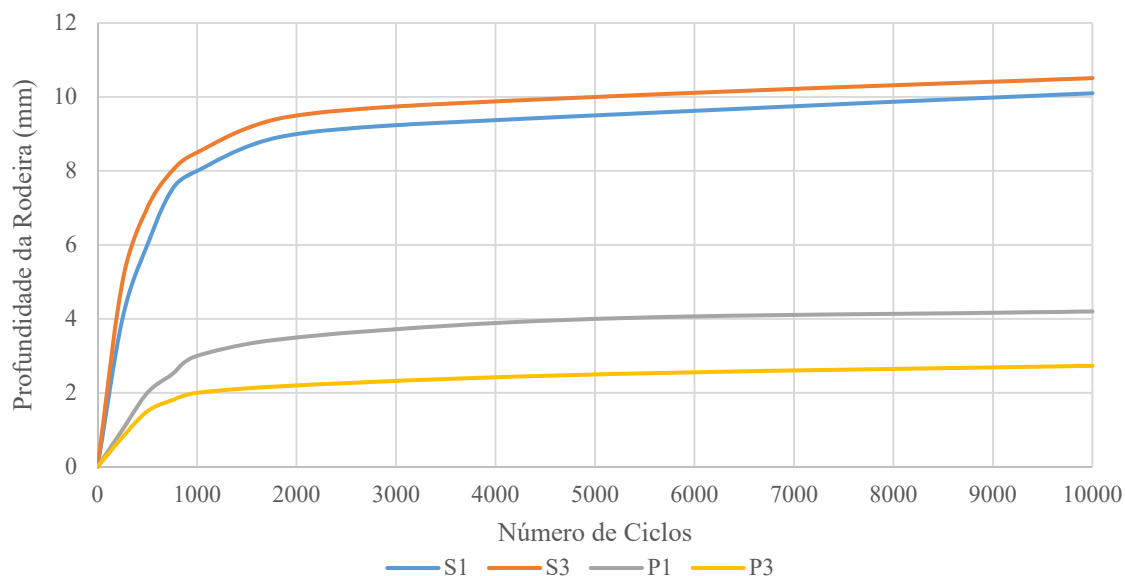


Figura 3.16 – Curva de evolução da deformação permanente (Provetes não envelhecidos)

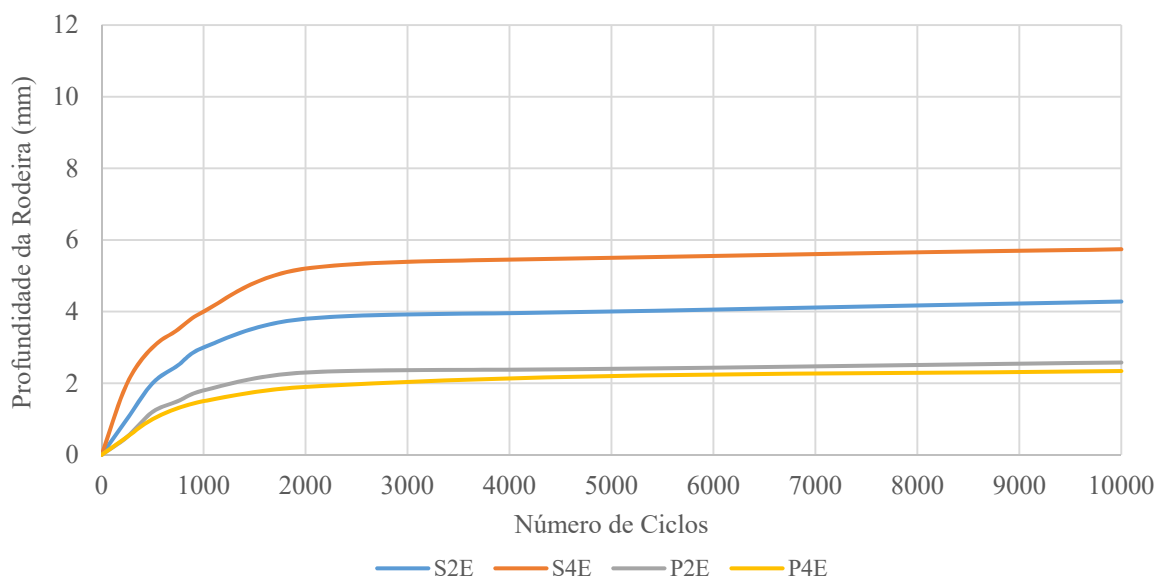


Figura 3.17 – Curva de evolução da deformação permanente (Provetes envelhecidos)

Quadro 3.6 – Resultados obtidos no Ensaio de Pista para as diversas lajes

Laje	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{AIR} (%)	RD _{AIR} (mm)	Valores médios RD _{AIR} (mm)
P1	0,04	10,48 %	4,20	3,47
P3	0,05	6,82 %	2,73	
S1	0,12	25,50 %	10,10	10,30
S3	0,10	26,33 %	10,51	
P2E	0,04	6,34 %	2,58	2,46
P4E	0,03	5,82 %	2,34	
S2E	0,06	10,72 %	4,28	5,01
S4E	0,05	14,49 %	5,74	

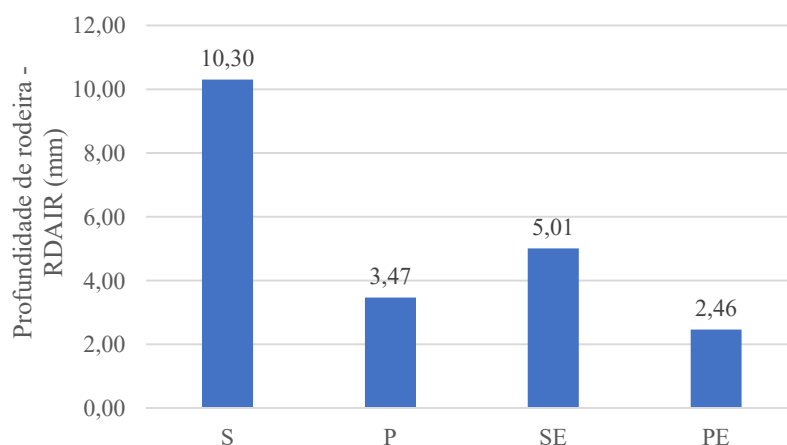


Figura 3.18 – Profundidade média de rodeira

3.6 Ensaio de Avaliação do Módulo de Rigidez

Como foi referido anteriormente, as misturas betuminosas são constituídas por um ligante betuminoso de comportamento viscoelástico e um esqueleto sólido de comportamento elástico (agregados). O betume é um material com comportamento viscoso a elevadas temperaturas, viscoelástico a temperaturas intermédias e elástico a baixas temperaturas. Assim sendo, pode afirmar-se que o comportamento de uma mistura depende essencialmente das características reológicas do betume (Abreu, 2009; Mendes, 2011; Santos, 2016).

Tendo em conta o comportamento viscoelástico do ligante, a relação entre a tensão aplicada e a extensão medida não será um valor constante, dependendo da forma e do tempo de carregamento, tal como da temperatura. A este valor dá-se o nome de módulo de rigidez, módulo complexo ou apenas rigidez. O módulo complexo aumenta com o aumento da frequência de aplicação de carga (para a mesma temperatura) e diminui com o aumento da temperatura (para a mesma frequência) (Martinho, 2014; Mendes, 2011).

O ensaio para a avaliação do módulo de rigidez de misturas betuminosas foi executado recorrendo ao Ensaio de Flexão em quatro pontos (4PB-PR) e é normalizado pela EN 12697-

26. Esta define o módulo complexo (E^*) como a razão entre a tensão ($\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(w \cdot t)$) e a extensão ($\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(w \cdot t - \varphi)$) de um material viscoelástico linear, quando sujeito a uma aplicação de carga segundo uma onda sinusoidal com uma frequência (w), num dado intervalo de tempo (t) (Equação (3.9)). A extensão irá sofrer um desfaseamento em relação à tensão, que é denominado de ângulo de fase (φ). O ângulo de fase permite definir se o comportamento da mistura é predominantemente viscoso (φ próximo de 90°) ou elástico (φ próximo de 0°) (CEN, 2004; Martinho, 2014; Mendes, 2011).

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot [\cos \varphi + i \cdot \sin \varphi] = |E^*| \cdot [\cos \varphi + i \cdot \sin \varphi] \quad (3.9)$$

O módulo complexo pode ser decomposto em duas partes, uma parte real ($E_1 = |E^*| \cdot \cos \varphi$) e uma parte imaginária ($E_2 = |E^*| \cdot \sin \varphi$). A primeira descreve a energia armazenada no material, e a segunda, a energia dissipada por atrito interno no seio do material (Piccone, 2018; Martinho, 2014; Mendes, 2011). O valor absoluto do módulo de rigidez e o ângulo de fase são dados pelas equações (3.10) e (3.11), respetivamente.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (3.10)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (3.11)$$

O ensaio ocorreu a 20°C e foi imposta uma extensão controlada de 50×10^{-6} micrómetros ($\mu\text{m}/\text{m}$). esta extensão foi escolhida de forma a evitar o fendilhamento precoce por fadiga e permitir o reaproveitamento dos provetes para o Ensaio de Resistência à Fadiga. As frequências utilizadas dependem da capacidade do aparelho de ensaio, podendo relacionar-se com a velocidade da corrente de tráfego e com o tempo de carregamento. A Universidade de Nottingham propôs uma expressão (Equação (3.12)) que relaciona a velocidade média da circulação da corrente de tráfego com o tempo de carregamento e é esta a utilizada no presente trabalho. No Quadro 3.7 apresentam-se os valores das frequências de ensaio aplicadas, tal como a velocidade e o tempo de carregamento a que correspondem.

$$v = \frac{1}{t_c} \quad (3.12)$$

v – Velocidade média da circulação na corrente de tráfego (km/h);
 t_c – Tempo de carregamento (s).

É de referir que se avaliou a resposta dos provetes às frequências de ensaio de 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz, 10 Hz e que se terminou com a repetição da primeira frequência (1 Hz), de forma a verificar se não ocorreram danos nas vigas no decorrer do ensaio.

A Figura 3.19 mostra o esquema e a máquina do Ensaio de Flexão em quatro pontos. Como se pode observar, o provete representa uma viga simplesmente apoiada submetida a flexão periódica em quatro pontos, que possibilitam a translação e a rotação livres. Os dois apoios localizados a um terço das extremidades, simétricos relativamente ao centro da viga,

correspondem aos pontos de aplicação das cargas verticais e os apoios nos extremos impedem o deslocamento vertical da viga (Dias, 2009; Martinho, 2014).

Quadro 3.7 – Relação entre a frequência de aplicação de carga, o tempo de carregamento e a velocidade média da circulação da corrente de tráfego

Frequência (Hz)	Velocidade (km/h)	Tempo de Carregamento (s)
1	6,3	0,1587
2	12,6	0,0794
4	25,2	0,0397
6	37,8	0,0265
8	50,4	0,0198
10	62,8	0,0159

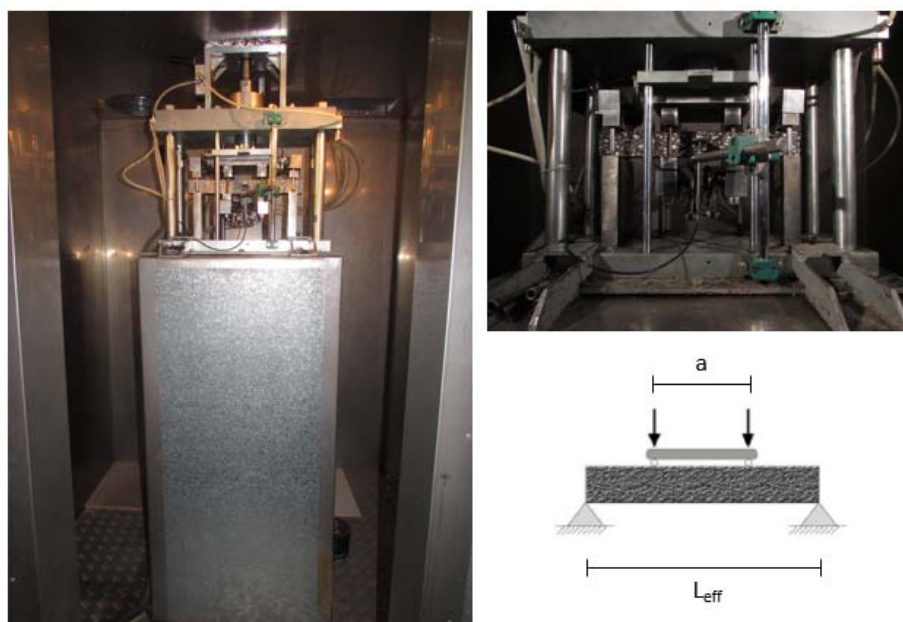


Figura 3.19 – Esquema e máquina de ensaio (4PB-PR)

Em Anexo (Quadro A.4 e Quadro A.5), podem ver-se todos os resultados obtidos por viga ensaiada. A análise dos resultados é feita estatisticamente, recorrendo a *boxplots* (diagrama de extremos e quartis) e a análises de variância de um fator (ANOVA) pelo software *MatLab*. A primeira permite analisar a variação de dados observados entre diferentes grupos e a segunda possibilita a comparação da distribuição de vários grupos de amostras independentes.

As *boxplots* foram criadas para cada tipo de mistura analisada (agrupamento das vigas) e os parâmetros avaliados foram a rigidez e o ângulo de fase por frequência de ensaio. As misturas em estudo eram: com plástico (P) (Figura 3.20 – Módulo de Rigidez e Figura 3.21 – Ângulo de Fase), sem plástico (S) (Figura 3.22 – Módulo de Rigidez e Figura 3.23 – Ângulo de Fase), envelhecida com plástico (PE) (Figura 3.24 – Módulo de Rigidez e Figura 3.25 – Ângulo de Fase) e envelhecida sem plástico (SE) (Figura 3.26 – Módulo de Rigidez e Figura 3.27 – Ângulo

de Fase). Os valores exteriores ao retângulo representado são referentes ao valor mínimo e máximo observados, as três linhas que compõe o retângulo especificam o primeiro, segundo (mediana) e terceiro quartis (sentido de baixo para cima).

Na Figura 3.28 apresenta-se uma comparação entre misturas, dos valores da mediana (obtidos nas *boxplots*), dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase, por frequência. Os módulos de rigidez variam entre 6000 e 13000 MPa, aumentando com o aumento da frequência (para a mesma temperatura), acabando por estabilizar a partir dos 6 Hz (37,8 km/h). A mistura PE é a que ostenta os valores mais elevados, sendo considerada a mais rígida. Este facto está relacionado com o endurecimento do betume ao longo do tempo (envelhecimento), uma vez que a mistura SE também demonstra um aumento da rigidez comparativamente às misturas não envelhecidas. É de notar, que como seria expectável, a incorporação de plástico influencia positivamente os valores dos módulos de rigidez, aumentando-os.

Os ângulos de fase diminuem com o aumento da frequência de ensaio, variando de 10 a 35°. As misturas que apresentam valores superiores são aquelas que não foram sujeitas a qualquer inclusão de plástico (S e SE), concluindo que estas exibem um comportamento viscoelástico com uma maior componente viscosa do que as misturas com 6% de PEBD. Também neste parâmetro é notável a interferência do envelhecimento nas características das misturas, visto que as misturas envelhecidas (PE e SE) demonstram menores ângulos de fase que as respetivas misturas não envelhecidas (P e S).

Relacionando os dois parâmetros em simultâneo, observa-se que a mistura PE é a que apresenta maiores módulos de rigidez e menores valores de ângulos de fase, concluindo que esta é a mistura mais rígida. Em oposição, a mistura com maiores ângulos de fase e menores valores de rigidez é a S.

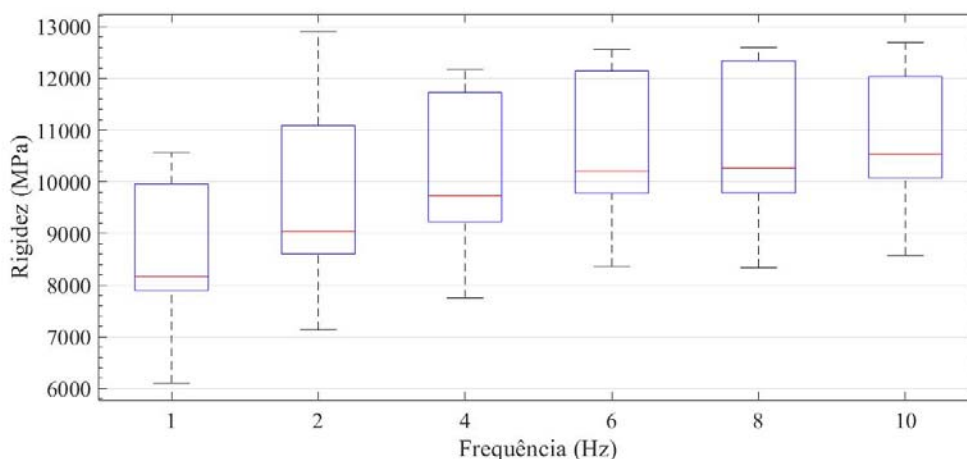


Figura 3.20 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura P)

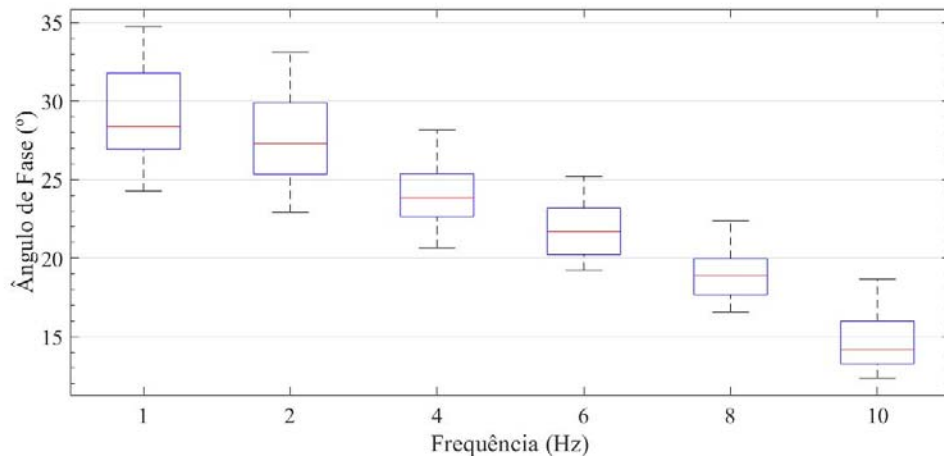


Figura 3.21 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura P)

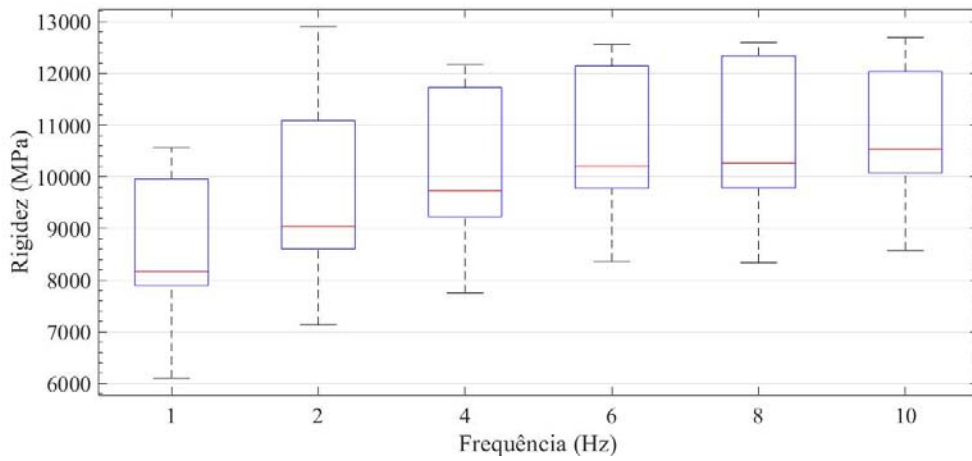


Figura 3.22 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura S)

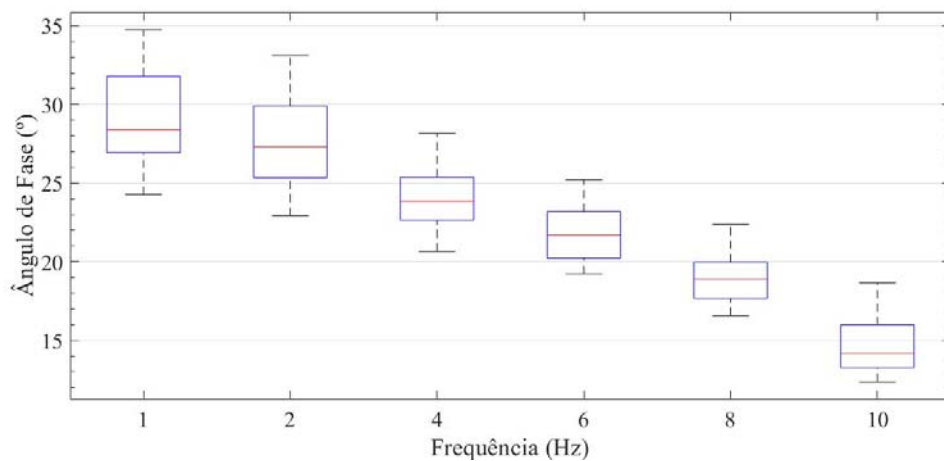


Figura 3.23 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura S)

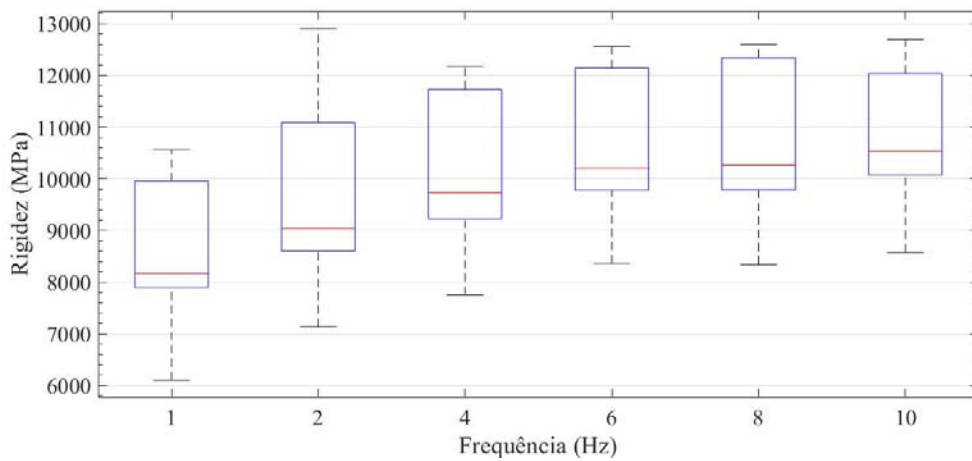


Figura 3.24 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura PE)

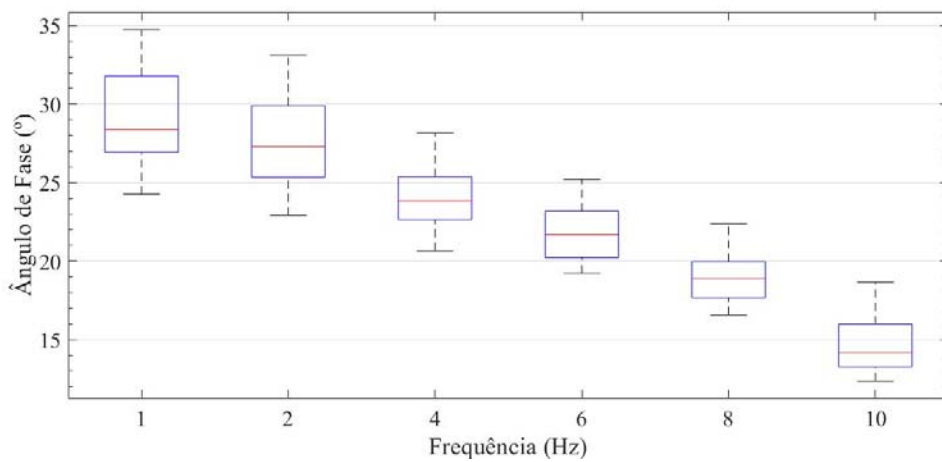


Figura 3.25 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura PE)

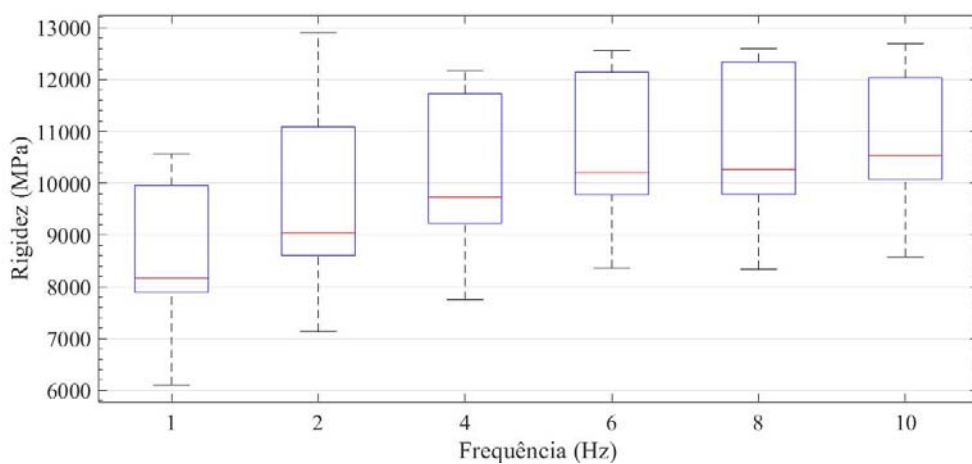


Figura 3.26 – Variação dos Módulos de Rigidez por frequência (Mistura SE)

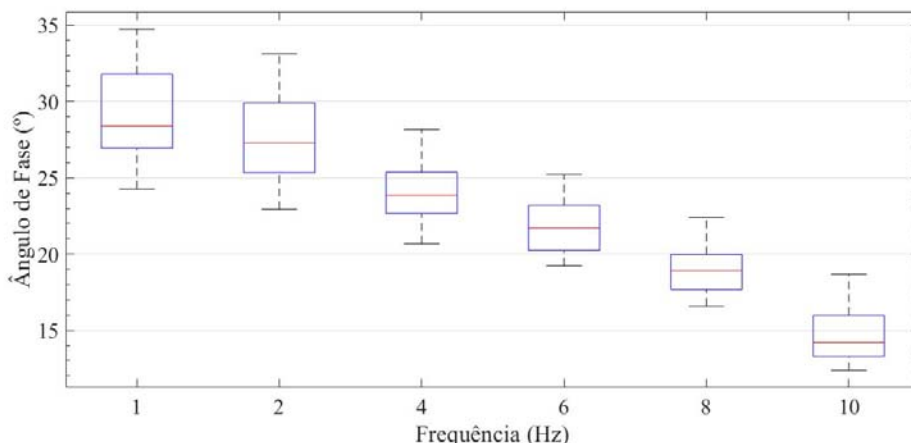


Figura 3.27 – Variação dos Ângulos de Fase por frequência (Mistura SE)

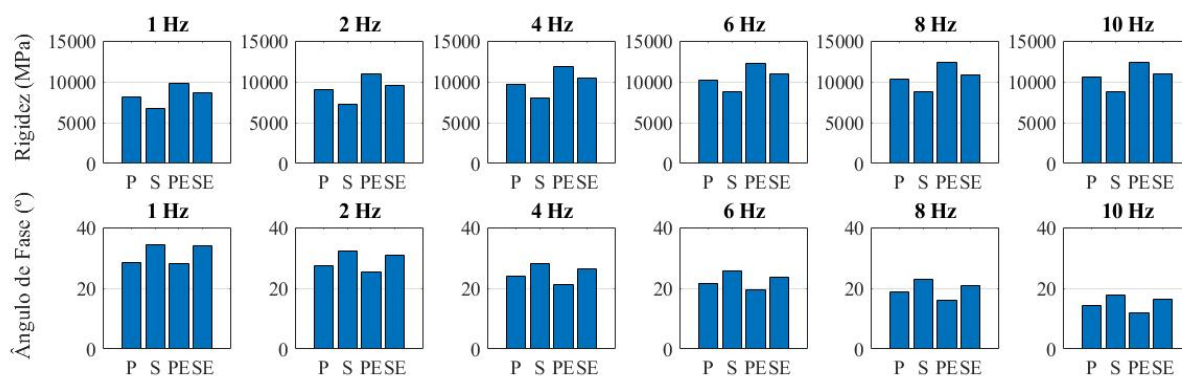


Figura 3.28 – Variação dos Módulos de Rigidez e dos Ângulos de Fase para todas as misturas, por frequência

A análise de variância teve como intuito comparar as medianas dos ângulos de fase e dos módulos de rigidez dos diferentes grupos de misturas (P, S, PE e SE), por frequência. Numa segunda fase, as misturas foram comparadas individualmente entre si. Paralelamente, avaliou-se a significância dos resultados, através da análise do *p-value*. Se o valor de *p-value* for inferior a 5%, os resultados são significativos na amostra, isto é, pode inferir-se que as medianas dos grupos (misturas) são diferentes, sendo imprudente considerar-se que os valores ocorreram “por acaso”.

Atentando o Quadro 3.8, conclui-se que todos os valores são inferiores a 5%, pelo que se pode afirmar que as medianas dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase são dependentes da frequência aplicada no ensaio e diferem de acordo com a sua variação, logo existe significância nos resultados.

No Quadro 3.9 analisa-se a comparação dos resultados das medianas dos módulos de rigidez entre as diferentes misturas. A primeira coluna é referente ao valor de *p-value* e a segunda, à diferença obtida entre misturas (dada pelo *MatLab*). Da análise dos resultados, pode concluir-se que todos os valores são significativos, à exceção da relação entre as misturas P e SE. Da comparação feita individualmente entre misturas, pode verificar-se que PE é a que apresenta rigidez superior, como já se tinha observado anteriormente, seguida de SE, P e terminando em S.

A análise do Quadro 3.10 é semelhante à precedente, diferindo na variável em estudo, que neste caso se trata dos valores medianos dos ângulos de fase. Neste caso, observa-se que as relações entre as misturas P e SE, S e SE, assim como P e PE (para uma frequência de 2 Hz), apresentaram valores de *p-value* superiores a 5%, pelo que os seus resultados são considerados não significativos. Comparando individualmente as misturas, conclui-se que S é a que demonstra maiores valores de ângulos de fase, seguida de SE, P e acabando em PE. É de referir que estas conclusões já tinham sido retiradas na análise das *boxplots*, servindo a análise de variância como um meio de validação dos resultados conseguidos e permitindo a comparação individual das misturas.

Quadro 3.8 – Valores de *p-value* para os Módulos de Rigidez e Ângulos de Fase, por frequência

Frequência	Módulos de Rigidez	Ângulos de Fase
1 Hz	0,000082%	2,390000%
2 Hz	0,000064%	0,000430%
4 Hz	0,000015%	0,000004%
6 Hz	0,000013%	0,000008%
8 Hz	0,000016%	0,000001%
10 Hz	0,000013%	0,000009%

Quadro 3.9 – Comparação entre misturas dos resultados dos Módulos de Rigidez e valores de *p-value*, por frequência

Módulos de Rigidez		Frequência											
		1 Hz		2 Hz		4 Hz		6 Hz		8 Hz		10 Hz	
P	S	1,1%	P>S	0,1%	P>S	0,1%	P>S	0,1%	P>S	0,2%	P>S	0,1%	P>S
P	PE	0,7%	PE>P	3,0%	PE>P	0,5%	PE>P	0,4%	PE>P	0,4%	PE>P	0,5%	PE>P
P	SE	99,9%	SE>P	93,3%	SE>P	99,1%	SE>P	98,6%	SE>P	98,8%	SE>P	99,5%	SE>P
S	PE	0,0%	PE>S	0,0%	PE>S	0,0%	PE>S	0,0%	PE>S	0,0%	PE>S	0,0%	PE>S
S	SE	1,0%	SE>S	1,2%	SE>S	0,2%	SE>S	0,1%	SE>S	0,2%	SE>S	0,2%	SE>S
PE	SE	1,2%	PE>SE	1,4%	PE>SE	2,1%	PE>SE	2,2%	PE>SE	1,9%	PE>SE	2,1%	PE>SE

Quadro 3.10 – Comparação entre misturas dos resultados dos Ângulos de Fase e valores de *p-value*, por frequência

Ângulos de Fase		Frequência											
		1 Hz		2 Hz		4 Hz		6 Hz		8 Hz		10 Hz	
P	S	1,1%	S>P	0,4%	S>P	0,0%	S>P	0,0%	S>P	0,0%	S>P	0,0%	S>P
P	PE	0,7%	P>PE	9,0%	P>PE	0,5%	P>PE	1,8%	P>PE	0,5%	P>PE	2,3%	P>PE
P	SE	99,9%	SE>P	7,3%	SE>P	24,0%	SE>P	38,7%	SE>P	23,5%	SE>P	15,6%	SE>P
S	PE	0,0%	S>PE	0,0%	S>PE	0,0%	S>PE	0,0%	S>PE	0,0%	S>PE	0,0%	S>PE
S	SE	1,0%	S>SE	85,2%	S>SE	18,8%	S>SE	5,6%	S>SE	5,7%	S>SE	19,3%	S>SE
PE	SE	1,2%	SE>PE	0,0%	SE>PE	0,0%	SE>PE	0,1%	SE>PE	0,0%	SE>PE	0,0%	SE>PE

3.7 Ensaio de Avaliação da Resistência à Fadiga

A resistência à fadiga de um pavimento rodoviário consiste na capacidade dos materiais de degradar as cargas provenientes da passagem sucessiva de veículos. A eficiência do pavimento diminui, devido à sua deterioração gradual ao longo do tempo, manifestando-se através do aparecimento de fendas. A avaliação do comportamento à fadiga pode ser analisada segundo a norma EN 12697-24, e tal como no módulo de rigidez, é simulada pelo Ensaio de Flexão em quatro pontos. Ainda que os ensaios sejam semelhantes, estes diferem no modo que dá como concluído o ensaio, no caso da avaliação à fadiga o critério de rotura diz respeito ao momento em que o módulo de rigidez atinge 50% do valor inicial (Abreu, 2009; CEN, 2007a; Piccone, 2018).

De acordo com a norma, o modo de carga pode ser definido como a extensão ou a tensão constante. Normalmente, recorre-se ao modo de extensão controlada para prevenir a ruína dos provetes, mas outras variáveis influenciam esta escolha (Quadro 3.11) (Dias, 2009; Martinho, 2014).

Quadro 3.11 – Comparação das variáveis para ensaios efetivados a extensão ou tensão controlada (Dias, 2009)

Variáveis	Tensão controlada	Extensão controlada
Espessura das Camadas	Indicado para camadas de maior espessura	Indicado para camadas de menor espessura
Definição de rotura	Rotura do Provette	Habitualmente adotada a redução de 50% do módulo de rigidez
Número de Provetes a ensaiar	Menor	Maior
Simulação do envelhecimento	Um aumento do envelhecimento resulta num aumento da vida à fadiga	Um aumento do envelhecimento resulta numa diminuição da vida à fadiga
Magnitude da vida à fadiga	Geralmente menor	Geralmente maior
Propagação de fendas	Rápida em relação às condições que ocorrem <i>in situ</i>	Mais representativo das condições que ocorrem <i>in situ</i>

O fendilhamento por fadiga ocorre quando o pavimento apresenta um comportamento viscoelástico com forte componente elástica, verificado a moderadas ou baixas temperaturas, pelo que em laboratório, o ensaio decorreu a 20°C. Conforme o descrito na EN 12697-24, o ensaio é realizado para uma frequência de 10 Hz (equivalente a uma velocidade de circulação de 63 km/h) e os provetes foram divididos em três grupos submetidos a níveis de extensão diferentes (100, 200 e 300 microns) (CEN, 2007a; Dias, 2009; Santos, 2016).

Nos Quadro 3.12 e Quadro 3.13 expõem-se o número de vigas submetidas ao ensaio de Flexão em quatro pontos, divididas por nível de extensão e tipo de mistura (adotaram-se as mesmas abreviaturas utilizadas no Ensaio de avaliação do Módulo de Rigidez de forma a facilitar a compreensão dos resultados), podendo também analisar-se o número de ciclos necessários para atingir a rotura por fadiga do material.

As Leis de Fadiga das misturas permitem relacionar a extensão imposta e o número de ciclos de carga no ponto em que se alcança a ruína do provete. Estas podem ser definidas por uma curva, traduzidas pela expressão (3.13), e possibilitam a compreensão do comportamento das misturas à fadiga. As Figura 3.29 e Figura 3.30 apresentam os resultados conseguidos, ou seja, as Leis de Fadiga para as quatro misturas em estudo.

$$\varepsilon_t = a \cdot N^{-b} \quad (3.13)$$

ε_t – Valor da extensão de tração (medida no 100º ciclo de carga);

N – Número de aplicações de carga (Ciclos);

a e b – Parâmetros característicos dos materiais.

Quadro 3.12 – Número de ciclos necessários para atingir a rotura por fadiga e níveis de extensão (Misturas sem envelhecimento)

Mistura P			Mistura S		
Vigas	Extensão	Ciclo Final	Vigas	Extensão	Ciclo Final
P1.2	100	2.680.199	S1.3	100	7.288.960
P1.4		1.158.408	S1.5		3.346.944
P1.8		9.998.219	S3.10		2.702.419
P2.3		2.814.743	S1.4	200	216.247
P3.4		2.694.143	S2.2		204.432
P1.3	200	66.719	S2.6	300	155.930
P3.1		53.200	S2.1		39.095
P3.2		165.585	S3.3		36.660
P3.3		121.358	S3.8	45.598	
P1.5	300	25.629			
P2.9		19.320			
P3.8		32.563			

Quadro 3.13 - Número de ciclos necessários para atingir a rotura por fadiga e níveis de extensão (Misturas com envelhecimento)

Mistura PE			Mistura SE		
Vigas	Extensão	Ciclo Final	Vigas	Extensão	Ciclo Final
P1.7	100	2.912.030	S1.6	100	330.695
P2.2		913.866	S2.7		880.180
P3.7		1.285.219	S3.9		1.608.992
P1.10	200	179.513	S2.8	200	124.400
P2.5		38.494	S2.9		70.935
P3.9		110.565	S3.6		55.345
P2.4	300	12.537	S1.8	300	30.605
P3.6		25.947	S2.10		17.498
P3.10		23.045	S3.2		20.477

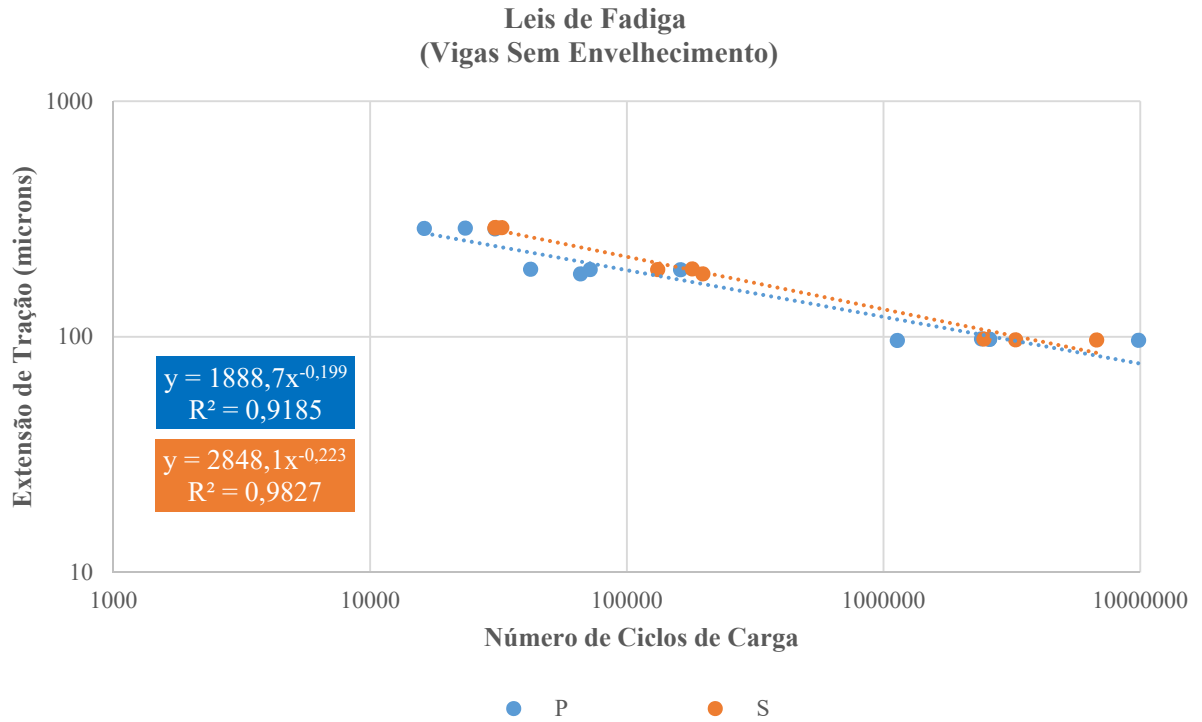


Figura 3.29 – Leis de Fadiga das misturas sem envelhecimento (P e S)

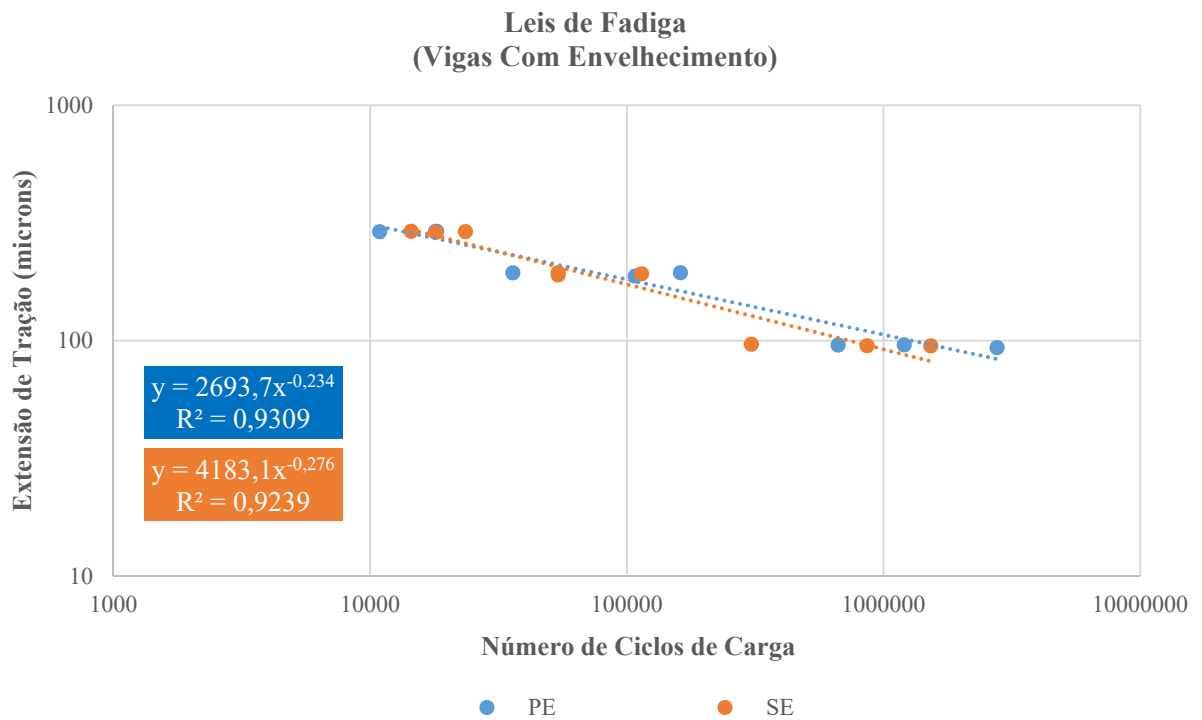


Figura 3.30 – Leis de Fadiga das misturas com envelhecimento (PE e SE)

Com base na análise dos resultados, é possível estimar o valor de ϵ_6 (extensão de tração necessária para que ocorra a rotura por fadiga do material, após a aplicação de um milhão de ciclos). É frequente recorrer-se a este parâmetro para avaliar o desempenho das misturas à fadiga (Abreu, 2009; Dias, 2009; Piccone, 2018). No Quadro 3.14 é possível analisar-se os parâmetros obtidos nas Leis de Fadiga e o valor de ϵ_6 (Figura 3.31), podendo depreender-se que a mistura S é a que apresenta melhor resistência, ao invés da mistura SE que obteve os piores resultados. Da comparação entre as misturas com 6% de PEBD e de referência (0% de PEBD), pode concluir-se que estas apresentam comportamentos não muito díspares. Apesar da incorporação de plástico diminuir a resistência à fadiga das misturas, os resultados demonstram que a sua inclusão não constitui um problema.

Uma vez mais, é evidente a importância do envelhecimento no comportamento das misturas. De um modo geral, as misturas envelhecidas demonstraram menor resistência à fadiga que as restantes, mas observou-se uma melhoria desta propriedade na mistura com plástico comparativamente à de referência (após o envelhecimento). De acordo com Dias (2009), estes resultados seriam de esperar, visto que o aumento da rigidez do betume torna as misturas mais frágeis e mais suscetíveis ao aparecimento de fendilhamento à superfície.

Quadro 3.14 – Parâmetros obtidos das Leis de Fadiga e valor de ϵ_6

Mistura	a	b	R ²	ϵ_6 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
P	1888,7	-0,199	0,9185	121
S	2848,1	-0,223	0,9827	131
PE	2693,7	-0,234	0,9309	106
SE	4183,1	-0,276	0,9239	92

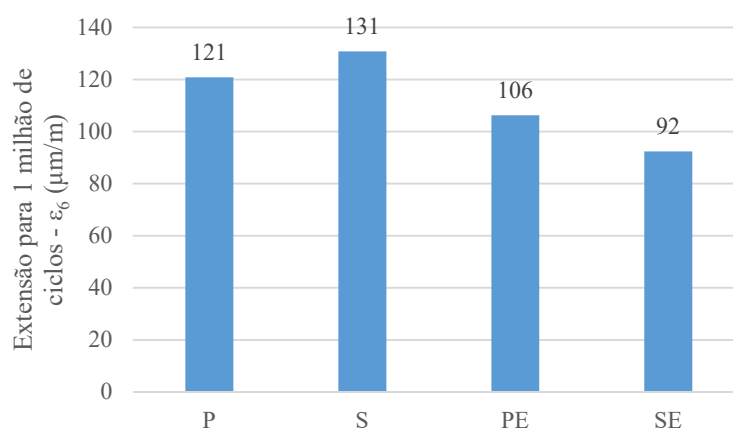


Figura 3.31 – Valores de ϵ_6 para as diversas misturas

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA O FUTURO

A presente dissertação tinha como propósito o desenvolvimento do estudo da incorporação de matérias plásticas em pavimentos rodoviários, recorrendo a uma metodologia mais simples, que acarretasse menos custos e que contribuísse para a melhoria das técnicas e formas de reciclagem, sem grandes prejuízos para o meio ambiente (via seca).

Como foi referido antecipadamente, a incorporação de resíduos de plástico, assim como de qualquer outro material, não é uma prática corrente na Europa. Tendo esta questão em mente e sabendo que no nosso País, o sistema rodoviário se encontra praticamente concluído, optou-se pelo estudo de misturas próprias para camadas de desgaste (AC 14), o que permitiria o uso e desenvolvimento desta técnica não só na construção, mas principalmente na reabilitação de vias de comunicação. Foram elaboradas duas misturas, uma com a inclusão de 6% de PEBD (Polietileno de Baixa Densidade) e outra de referência (0% de PEBD), que foram posteriormente envelhecidas. Este envelhecimento permitiu investigar a evolução do comportamento da mistura, proporcionando uma análise detalhada dos parâmetros que são influenciados pela modificação das características do pavimento com o tempo.

Os ensaios aplicados destinavam-se a avaliar as características físicas e de desempenho das misturas. Estes últimos avaliam os critérios que estão na base dos métodos de dimensionamento, como o critério de deformação permanente e a avaliação da resistência à fadiga. Também se estudaram os módulos de deformabilidade de forma a quantificar a sua rigidez.

Sendo assim, concluiu-se que a incorporação de plástico nas misturas diminui a sua massa específica comparativamente às misturas de referência. Também diminui a quantidade de ligante necessário, uma vez que a inclusão de plástico ocorre por substituição do betume. Este facto é uma mais-valia, visto que o betume é um derivado do petróleo, um combustível fóssil de fonte esgotável.

Na avaliação da deformação permanente, observou-se que a incorporação de 6% de PEBD diminuía a profundidade da rodeira em cerca de 66%. Nas misturas com envelhecimento, verificou-se também uma diminuição considerável desta propriedade para cerca de metade (51%), podendo afirmar-se que este valor se deve ao aumento da rigidez do betume com o tempo. Este facto pode ser visto na análise dos módulos de rigidez. Os resultados são promissores, tendo em conta a melhoria significativa do desempenho das misturas com plástico relativamente às de referência.

Na avaliação dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase, constatou-se que o envelhecimento influenciava consideravelmente o comportamento das misturas. No que diz respeito à rigidez, o valor médio dos módulos de deformabilidade do conjunto das quatro misturas variou entre 6000 e 13000 MPa. A incorporação de plástico aumentou a rigidez das misturas comparativamente às misturas de referência, assim como o endurecimento do betume. As misturas envelhecidas apresentaram maiores valores de módulos de rigidez, o que influenciou o seu desempenho quando submetidas a outros ensaios, como o *Wheel Tracking*. Uma mistura mais rígida vai ter menos propensão para se deformar, quando sujeita a elevadas temperaturas ou a diferentes carregamentos de carga.

Os valores medianos dos ângulos de fase variaram entre 10 e 35° e estes diminuíram com o aumento da frequência de ensaio. As misturas com a inclusão de 6% de PEBD apresentaram um comportamento viscoelástico com uma maior componente elástica, traduzindo-se em valores de ângulos de fase menores. Todas estas soluções foram verificadas na análise de variância (ANOVA), concluindo que na avaliação dos módulos de rigidez, todos os valores são significativos, à exceção da relação entre as misturas P e SE, e na avaliação dos ângulos de fase, as relações entre P e PE (para uma frequência de 2 Hz), S e SE, bem como P e SE apresentaram resultados não significativos.

Na avaliação da resistência à fadiga, a mistura S (sem plástico) foi a que se comportou melhor, em contrapartida a mistura SE (sem plástico com envelhecimento) obteve o pior desempenho. De forma genérica, as misturas com materiais plásticos antes do envelhecimento apresentaram resistência inferior às misturas de referência, e uma vez mais, foi visível o efeito do envelhecimento no comportamento das misturas. Este processo aumentou o desempenho da mistura com a inclusão de plástico comparativamente à de referência.

Posto isto, é seguro dizer que a incorporação de plásticos conduz a melhorias no comportamento das misturas betuminosas, considerando-se o método por via seca uma forma eficaz de obter o máximo partido do processo de reciclagem. É de referir a vantagem do uso de resíduos cujo tratamento e processamento é simples, como foi o caso dos fragmentos de plástico flexível utilizados, dado que a autora defende que seja incoerente o uso de materiais que necessitem de grandes gastos de energia e propiciem maiores libertações de gases com efeito de estufa no decorrer do processo de reciclagem (como é o caso das *pellets*).

Apesar dos resultados satisfatórios, serão necessários mais estudos que contribuam para o desenvolvimento e que sustentem o uso de polímeros pelo método seco. Seria uma boa prática a investigação da incorporação de outros tipos de resíduos de plástico, quer como aditivo, quer como substituto parcial de agregados em misturas betuminosas a quente ou em misturas betuminosas temperadas (cujo processo de fabrico implica a diminuição da temperatura de conceção, permitindo a atenuação da libertação de gases com efeito de estufa para a atmosfera). É de referenciar a necessidade de facilitar o processo de triagem dos materiais e de simplificar as técnicas de reciclagem usadas não só no nosso País, como na restante União Europeia. A autora defende também a imprescindibilidade de se legislar estes métodos e técnicas como contribuição para a melhoria da sustentabilidade não só na construção de pavimentos rodoviários, como na construção civil em geral.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2015). “*Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*”. R 30-02, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- Abreu, C. (2009). “*Caracterização do desempenho de um Stone Mastic Asphalt*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Ahmad, N., Jaya, R. (2016). “*The Use of Plastic Waste in Bituminous Mixture for the Road Pavement*”. Construction Management, Geotechnics and Transportation, Vol. 2, pp. 315-325.
- Appiah, J., Berko-Boateng, V., Tagbor, T. (2017). “*Use of waste plastic materials for road construction in Ghana*”. Case studies in construction materials, Vol. 6, pp. 1-7.
- Azizi, G., Rashid, Z. (2018). “*Review Paper on Use of Waste Plastic, Waste Rubber and Fly Ash in Bituminous Mixes*”. IRJET - International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 1, pp. 592-595.
- Baptista, A. (2006). “*Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central – Contribuição para o seu estudo e aplicação*”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Bio Intelligence Service (2011). “*Plastic Waste in Environment*”. Revised final report European Commission DG ENV, Paris, pp. 1-171.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L. (2011). “*Pavimentos Rodoviários*”. Edições Almedina, Coimbra.
- Campos, D. (2010). <http://dulce-campos.com/wordpress/wp-content/uploads/2010/10/Plasticos.pdf>. Portugal, acessado a 21/02/2019.
- CEN (2006). “*Bituminous mixtures – Material specifications – Part 1: Asphalt Concrete*”. EN 13108-1, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007a). “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue*”. EN 12697-24:2004+A1, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007b). “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing*”. EN 12697-35:2004+A1, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007c). “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*”. EN 12697-6:2003+A1, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007d). “*Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration*”. EN 1426, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007e). “*Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and Ball method*”. EN 1427, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007f). “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 11: Wheel tracking*”. EN 12697-22:2003+A1, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007g). “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density*”. EN 12697-5:2002+A1, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2004). “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness*”. EN 12697-26, European Committee for Standardization, Brussels.

- CEN (2009). “*Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*”. EN 12591, European Committee for Standardization, Brussels.
- Chavan, A. (2013). “*Use of plastic waste in flexible pavements*”. International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management, Vol. 2, Issue 4, pp. 540-552.
- Chhabra, R., Marik, S. (2014). “*A Review Literature on the Use of Waste Plastics and Waste Rubber Tyres in Pavement*”. Vol. 1, Issue 1, pp. 1-5.
- Comissão Europeia (2018). “*Uma Estratégia Europeia para os Plásticos na Economia Circular*”. Comunicação da Comissão Europeia ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, Estrasburgo, pp. 1-19.
- Comissão Europeia (1997). “*Decisão da Comissão que cria o sistema de identificação dos materiais de embalagem nos termos da Directiva 94/62/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa a embalagens e resíduos de embalagens*”. Jornal Oficial nº L 050, pp. 28-31.
- Costa, L., Silva, H., Oliveira, J., Fernandes, S. (2013). “*Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement*”. International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 6(4), pp. 457-464.
- Costa, L., Silva, H., Peralta, J., Oliveira, J. (2019). “*Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment*”. Construction and Building Materials, Vol. 198, pp. 237-244.
- Costa, L., Peralta, J., Oliveira, J., Silva, H. (2017). “*A New Life for Cross-Linked Plastic Waste as Aggregates and Binder Modifier for Asphalt Mixtures*”. Applied Sciences.
- Cuadri, A., Roman, C., García-Morales, M., Guisado, F., Moreno, E., Partal, P. (2016). “*Formulation and processing of recycled-low-density-polyethylene-modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies*”. Chemical Engineering Science, 156, pp. 197-205.
- Dias, J. (2009). “*Influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- EAPA (2015). “*The use of Warm Mix Asphalt*”. European Asphalt Pavement Association. pp. 1-4.
- EAPA (2017). “*Asphalt in Figures 2017*”. European Asphalt Pavement Association. pp. 1-17.
- Ecycle (2013). <https://www.ecycle.com.br/711-reciclagem-de-plastico> . Página eCycle, Brasil, acessado a 20/02/2019.
- Ecycle (2017). <https://www.ecycle.com.br/706-tipos-de-plasticos> . Página eCycle, Brasil, acessado a 22/02/2019.
- EP (2014). “*Caderno de Encargos Tipo Obra – Pavimentação*”. Estradas de Portugal, S.A. Portugal.
- Eurostat (2019). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics . Página Eurostat – Statistics Explained, União Europeia, acessado a 21/02/2019.
- Fernandes, S., Pereira, S., Silva, H., Oliveira, J., Palha, C. (2016). “*Avaliação de métodos de caracterização de betumes modificados*”. 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil (TEST&E 2016), Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, pp. 1-8.
- Fibrenamics (2014). <https://www.web.fibrenamics.com/pt/conhecimento/as-fibras/fibras-nao-naturais/>. Página Fibrenamics, Portugal, acessado a 22/02/2019.
- Fonseca, M. (2018). “*Estudo de misturas betuminosas*”. Relatório de Estágio Formal para Admissão à Ordem dos Engenheiros – Região Centro, Colégio de Engenharia Civil, Coimbra.

- Fontes, L., Pereira, P., Pais, J., Trichês, G. (2006). “*Performance of Wet Process Method Alternatives: Terminal or Continuous Blend*”, pp. 1-18.
- Gomes, M. (2007). <http://www.rubberpedia.com/borrachas/borrachas.php> . Página Rubberpedia: Portal da indústria da borracha, Portugal, acessado a 20/02/2019.
- IP (2016). <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/rodoviaria> . Página Infraestruturas de Portugal, Lisboa, acessado a 02/05/2019.
- Jan, H., Aman, M., Khan, S., Karim, F. (2017). “*Performance of Hot Asphalt Mixtures Containing Plastic Bottles as Additive*”. MATEC Web Conferences, Vol. 103, p.09006.
- Kalantar, Z., Karim, M., Mahrez, A. (2012). “*A review of using waste and virgin polymer in pavement*”. Construction and Building Materials, Vol. 33, pp. 55-62.
- Kazmi, S., Rao, D. (2014). “*Utilization of Waste Plastic Materials as Bitumen-Blends for Road Construction in Oman*”. Vol. 3, pp. 9-13.
- Ledo, M. (2009). “*Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- Lima, C. (2008). http://educa.fc.up.pt/destaques_documentos.php?id_noticia=69 . Página Educa, Portugal, acessado a 22/02/2019.
- Manju, R., Sathya, S. e Sheema, K. (2017). “*Use of Plastic Waste in Bituminous Pavement*”. International Journal of ChemTech Research, Vol. 10, No. 8, pp. 804-811.
- Marques, L. (2010). <http://www.videos.uevora.pt/oquesaopolimeros.pdf> . Página Universidade de Évora, Portugal, acessado a 22/02/2019.
- Martinho, F. (2014). “*Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica*”. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Meister, P. (1994). “*Reciclagem de Plástico*”. Novas Técnicas, pp. 1-4.
- Mendes, S. (2011). “*Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Ministério do Ambiente (2019). <http://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/estrategias> . Página eco.nomia, Portugal, acessado a 24/02/2019.
- Mir, A. (2015). “*Use of Plastic Waste in Pavement Construction: Na Example of Creative Waste management*”. IOSR Journal of Engineering, Vol. 5, Issue 2, pp. 57-67.
- Miranda, R. (2014). “*Estudo da Modificação de Betumes com Polímeros Reciclados*”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- Mishra, B., Gupta, M. (2017). “*A Study on Use of Plastic Coated Aggregates in Bituminous Concrete Mixes of Flexible Pavement*”. International Journal of Engineering Research and Application, Vol. 7, Issue 10, pp. 26-33.
- Mishra, B., Gupta, M. (2018). “*Use of Plastic Waste in Bituminous Mixes by wet and dry methods*”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer, pp. 1-11.
- Nouali, M., Derriche, Z., Ghorbel, E., Chuanqiang, L. (2019). “*Plastic bag waste modified bitumen a possible solution to the Algerian road pavements*”. Road Materials and Pavement Design, pp. 1-13.
- Piccone, G. (2018). “*Evaluation of the performance of a warm mix asphalt (WMA) made with low-temperature bitumen considering aged and un-aged specimens*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

- Pimentel, C. (2013). “*Formulação de Misturas Betuminosas a Quente – Contribuição para um novo Método de Formulação*”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias de Lisboa.
- PlasticEurope (2018). “*Plastics – the Facts 2018 – An analysis of European plastics production, demand and waste data*”. PlasticsEurope – Association of Plastics Manufacturers, Brussels, pp. 1-59.
- Plastval (2008). <http://www.plastval.pt/index.asp?info=reciclagem/identificacao> . Página Plastval, Portugal, acessado a 22/02/2019.
- Plastval (2008). <http://www.plastval.pt/index.asp?info=reciclagem/valorizacao> . Página Plastval, Portugal, acessado a 23/02/2019.
- Prasad, K., Mahendra, S., Kumar, N., Rakesh, G., Likith, T., Yogesh, B. (2013). “*Study on Utilization of Waste Plastic in Bituminous Mixes for Road Construction*”. International Conference on Futuristic Innovations & Developments in Civil Engineering, pp. 198-203.
- Rajput, P., Yadav, R. (2016). “*Use of Plastic Waste in Bituminous Road Construction*”. International Journal of Science Technology & Engineering, Vol. 2, Issue 10, pp. 509-513.
- Ranieri, M., Costa, L., Oliveira, J., Silva, H., Celauro, C. (2017). “*Asphalt surface mixtures with improved performance using waste polymers via dry and wet processes*”. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 29 (10).
- Santos, J. (2016). “*Misturas betuminosas a quente. Uma análise à abordagem empírica e fundamental da norma de produto*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Santosh, Y., Kumar, S., Arora, T. (2013). “*Performance evaluation of waste plastic and bitumen concrete mix in flexible pavements*”. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 4, Issue 10, pp. 398-406.
- Saroufim, E., Celauro, C., Mistretta, M. (2018). “*A simple interpretation of the effect of the polymer type on the properties of PMBs for road paving applications*”. Construction and Building Materials, Vol. 158, pp. 114-123.
- Singh, V. e Gupta, P. (2016). “*Comparative study of Hot mix asphalt to Warm mix asphalt containing plastic waste for sustainable development of roads*”. IRJET - International Research Journal of Engineerin and Technology, Vol. 3, Issue 7, pp. 1275-1279.
- Silva, A. (2014). “*Formulação de misturas betuminosas a quente: análise comparativa da aplicação de métodos empíricos e volumétricos*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Soyal, P. (2015). “*Use of Waste Polyethylene in Bituminous Concrete Mixes*”. IRJET - International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, Issue 7, pp.1114-1116.
- Toda Matéria (2017). <https://www.todamateria.com.br/polimeros/> . Página Toda Matéria, Brasil, acessado a 22/02/2019.
- Vila-Cortavitarte, M., Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M., Indacochea-Vega, I. (2018). “*Analysis of the influence of using recycled polystyrene as a substitute for bitumen in the behaviour of asphalt concrete mixtures*”. Journal of cleaner production, Vol. 170, pp. 1279-1287.
- Yu, M., Wu, G., Zhou, J., Easa, S. (2014). “*Proposed Compaction Procedure for Dry Process Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures*”. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 42, Issue 2, pp. 328-338.

ANEXO A

Quadro A.1 – Características geométricas e volumétricas da Lajes

Laje	c (cm)	l (cm)	h (cm)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	ρ _w (kg/m ³)	T _w (°C)	ρ _{bssd} (kg/m ³)	ρ _{b,dim} (kg/m ³)	V _m (%)	VMA (%)	VFB (%)
P1	37,74	30,68	4,01	10450,0	6052,9	10462,2	997,1	25	2363	2251	4,21	15,8	73,3
P2	37,44	30,61	4,07	10428,6	6058,1	10441,0	997,1	25	2372	2236	3,84	15,5	75,2
P3	37,61	30,86	4,01	10526,5	6145,6	10535,1	997,1	25	2391	2262	3,08	14,8	79,2
P4	37,46	30,58	4,02	10501,8	6148,3	10509,2	997,1	25	2401	2283	2,67	14,4	81,5
S1	37,59	30,54	3,96	10428,8	6129,3	10430,2	997,8	22	2419	2294	2,41	14,3	83,1
S2	37,51	30,55	3,99	10454,2	6143,3	10456,5	997,8	22	2418	2289	2,45	14,3	82,9
S3	37,53	30,53	3,99	10498,5	6164,5	10500,3	997,8	22	2416	2296	2,55	14,4	82,3
S4	37,40	30,55	3,96	10439,6	6134,9	10441,8	997,8	22	2419	2307	2,45	14,3	82,9

Quadro A.2 – Características geométricas e volumétricas das Vigas P

Laje	Viga	h (cm)	l (cm)	c (cm)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	ρ _w (kg/m ³)	T _w (°C)	ρ _{bssd} (kg/m ³)	ρ _{b,dim} (kg/m ³)	V _m (%)	VMA (%)	VFB (%)
P1	P1.1	5,20	4,50	41,04	2168,9	1266,9	2170,1	998,7	18,4	2394	2258	2,95	14,7	79,9
	P1.2	5,02	5,01	41,16	2522,7	1481,5	2523,3	998,7	18,4	2414	2437	2,13	14,0	84,7
	P1.3	5,02	5,03	41,13	2485,7	1464,6	2486,4	998,7	18,4	2426	2393	1,68	13,6	87,6
	P1.4	5,10	5,00	41,12	2494,7	1468,1	2495,4	998,7	18,4	2421	2379	1,85	13,7	86,5
	P1.5	5,01	5,00	41,12	2474,0	1458,6	2474,7	998,5	19,4	2429	2402	1,53	13,4	88,6
	P1.6	5,05	5,00	41,10	2494,6	1470,6	2494,9	998,5	19,4	2430	2404	1,50	13,4	88,8
	P1.7	5,00	5,00	41,12	2458,0	1450,6	2458,7	998,5	19,4	2433	2391	1,39	13,3	89,6
	P1.8	5,00	5,07	41,11	2459,3	1451,1	2459,8	998,5	19,4	2433	2360	1,39	13,3	89,5
	P1.9	5,06	5,00	41,10	2454,7	1444,7	2455,1	998,5	19,4	2424	2361	1,74	13,6	87,2
	P1.10	5,01	5,00	41,10	2457,4	1447,7	2458,0	998,5	19,4	2427	2387	1,63	13,5	88,0
P2	P2.1	4,98	4,71	41,00	2029,1	1165,7	2030,5	998,5	19,4	2343	2110	5,04	16,5	69,5
	P2.2	4,96	5,05	41,03	2381,1	1379,6	2382,2	998,5	19,4	2371	2317	3,88	15,5	75,0
	P2.3	5,05	4,95	41,10	2396,9	1392,6	2398,0	998,5	19,4	2380	2333	3,51	15,2	76,9
	P2.4	5,08	4,97	41,10	2435,9	1420,7	2437,0	998,5	19,4	2393	2347	2,99	14,7	79,7
	P2.5	4,95	4,98	41,10	2368,5	1381,4	2369,5	998,5	19,4	2393	2338	2,99	14,7	79,7
	P2.6	4,95	4,95	41,10	2403,2	1404,9	2403,8	998,5	19,4	2402	2386	2,63	14,4	81,7
	P2.7	4,91	5,00	41,10	2397,5	1401,9	2398,4	998,5	19,4	2402	2376	2,63	14,4	81,8
	P2.8	4,96	4,97	41,10	2400,8	1403,1	2401,7	998,5	19,4	2401	2370	2,70	14,5	81,4
	P2.9	4,97	4,99	41,07	2391,4	1394,0	2391,9	998,5	19,4	2393	2348	3,01	14,7	79,6
	P2.10	4,99	4,99	41,07	2400,6	1397,4	2402,0	998,5	19,4	2386	2347	3,29	15,0	78,1
P3	P3.1	5,01	4,96	41,41	2436,6	1425,5	2437,4	998,5	19,2	2404	2368	2,54	14,3	82,2
	P3.2	5,01	5,00	41,39	2452,4	1440,0	2453,2	998,5	19,2	2417	2370	2,04	13,9	85,3
	P3.3	4,99	4,97	41,40	2446,5	1436,1	2447,2	998,5	19,2	2416	2383	2,07	13,9	85,1
	P3.4	5,00	4,95	41,40	2432,2	1429,7	2432,9	998,5	19,2	2421	2374	1,88	13,7	86,3
	P3.5	5,01	5,01	41,40	2456,6	1446,0	2457,5	998,5	19,2	2425	2364	1,71	13,6	87,5
	P3.6	4,90	4,95	41,39	2403,6	1414,2	2404,4	998,5	19,2	2424	2394	1,76	13,6	87,1
	P3.7	4,97	4,99	41,36	2440,6	1435,7	2441,6	998,5	19,2	2423	2379	1,80	13,7	86,8
	P3.8	4,95	4,97	41,32	2428,1	1427,9	2428,9	998,5	19,2	2422	2389	1,83	13,7	86,7
	P3.9	4,87	4,95	41,31	2380,4	1399,1	2381,2	998,5	19,2	2420	2390	1,90	13,8	86,2
	P3.10	4,88	5,13	41,27	2455,2	1440,1	2456,1	998,5	19,2	2413	2376	2,20	14,0	84,3

Quadro A.3 – Características geométricas e volumétricas das Vigas S

Laje	Viga	h (cm)	l (cm)	c (cm)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	ρ _w (kg/m ³)	T _w (°C)	ρ _{bssd} (kg/m ³)	ρ _{b,dim} (kg/m ³)	V _m (%)	VMA (%)	VFB (%)
S1	S1.1	5,00	5,21	41,31	2485,8	1456,6	2486,3	998,5	19,6	2410	2310	2,77	14,6	81,0
	S1.2	5,07	4,96	41,31	2475,2	1457,1	2475,7	998,5	19,6	2426	2383	2,13	14,0	84,8
	S1.3	5,07	4,97	41,32	2485,8	1464,9	2486,1	998,5	19,6	2431	2387	1,96	13,9	85,9
	S1.4	4,99	5,00	41,30	2382,4	1405,5	2383,4	998,5	19,6	2433	2312	1,88	13,8	86,4
	S1.5	4,97	4,88	41,30	2412,5	1423,3	2413,1	998,5	19,6	2434	2408	1,84	13,8	86,7
	S1.6	5,00	5,00	41,31	2451,8	1447,0	2452,6	998,5	19,6	2434	2374	1,80	13,7	86,9
	S1.7	5,00	5,00	41,31	2458,5	1450,8	2459,2	998,5	19,6	2434	2381	1,81	13,7	86,8
	S1.8	5,00	5,00	41,32	2462,4	1453,5	2462,5	998,5	19,6	2437	2384	1,71	13,7	87,5
	S1.9	4,91	5,00	41,30	2429,3	1432,6	2429,8	998,5	19,6	2432	2396	1,89	13,8	86,3
	S1.10	4,91	5,00	41,31	2406,1	1418,6	2406,7	998,5	19,6	2431	2373	1,93	13,8	86,1
S2	S2.1	4,87	5,00	41,33	2437,2	1441,7	2438,1	998,5	19,6	2442	2422	1,49	13,5	88,9
	S2.2	4,97	5,00	41,33	2489,0	1471,0	2489,9	998,5	19,6	2439	2423	1,62	13,6	88,1
	S2.3	5,10	5,00	41,32	2546,3	1506,0	2547,0	998,5	19,6	2442	2417	1,49	13,5	89,0
	S2.4	4,93	4,95	41,33	2439,9	1442,7	2440,3	998,5	19,6	2442	2419	1,50	13,5	88,9
	S2.5	5,00	5,01	41,33	2462,1	1456,6	2462,7	998,5	19,6	2444	2378	1,44	13,4	89,3
	S2.6	5,10	5,00	41,30	2523,8	1491,8	2524,6	998,5	19,6	2440	2396	1,58	13,5	88,3
	S2.7	5,20	4,97	41,26	2555,0	1510,1	2555,4	998,5	19,6	2441	2396	1,56	13,5	88,5
	S2.8	5,14	5,01	41,30	2551,1	1508,1	2552,1	998,5	19,6	2440	2399	1,59	13,5	88,3
	S2.9	5,11	4,99	41,31	2526,3	1494,1	2527,0	998,5	19,6	2442	2398	1,49	13,5	88,9
	S2.10	4,98	4,98	41,30	2339,2	1381,7	2338,7	998,5	19,6	2441	2284	1,54	13,5	88,6
S3	S3.1	4,96	4,83	41,31	2436,9	1426,2	2437,6	998,5	19,4	2406	2462	2,96	14,8	79,9
	S3.2	5,14	5,00	41,34	2501,5	1476,7	2502,0	998,5	19,4	2436	2354	1,74	13,7	87,3
	S3.3	5,06	4,90	41,36	2495,2	1476,8	2496,1	998,5	19,4	2444	2433	1,41	13,4	89,5
	S3.4	5,10	5,00	41,34	2524,6	1493,3	2525,6	998,5	19,4	2442	2395	1,50	13,5	88,8
	S3.5	5,02	4,94	41,36	2482,3	1468,0	2483,0	998,5	19,4	2442	2420	1,50	13,5	88,8
	S3.6	5,14	5,00	41,36	2533,0	1498,0	2533,9	998,5	19,4	2442	2383	1,52	13,5	88,7
	S3.7	5,11	5,00	41,36	2536,0	1501,1	2536,5	998,5	19,4	2446	2400	1,35	13,3	89,8
	S3.8	5,05	5,00	41,37	2545,9	1506,3	2546,6	998,5	19,4	2444	2437	1,44	13,4	89,3
	S3.9	4,98	5,03	41,36	2486,7	1471,7	2487,4	998,5	19,4	2445	2400	1,40	13,4	89,6
	S3.10	5,06	5,00	41,36	2537,7	1501,2	2538,4	998,5	19,4	2443	2425	1,46	13,4	89,1

Quadro A.4 – Valores dos Módulos de Rigidez em função da frequência, por viga

Mistura	Viga	Baridade	Módulo de Rigidez (MPa)					
			1 Hz	2 Hz	4 Hz	6 Hz	8 Hz	10 Hz
P	P1.2	2414	10452	11116	12008	12484	12573	11902
	P1.3	2426	9085	9844	10521	11089	11225	11566
	P1.4	2421	7764	8470	9047	9622	9528	9669
	P1.5	2429	7878	8863	9583	10126	10262	10531
	P1.8	2433	6105	7134	7752	8362	8340	8579
	P2.3	2380	7997	8635	9179	9713	9773	9813
	P2.6	2402	7918	8519	9242	9805	9929	10155
	P2.9	2393	10565	11201	12173	12558	12368	12672
	P2.10	2386	8214	9042	9728	10202	9793	10258
	P3.2	2417	10131	11082	11908	12526	12601	12695
	P3.4	2421	9786	10490	11179	11649	11622	11938
	P3.8	2420	8115	8658	9508	10107	10066	10447
S	S1.3	2431	7133	7059	8020	8579	8756	8785
	S1.4	2433	6367	7152	7710	8199	8237	8236
	S1.5	2434	8820	9387	10078	10739	10820	10812
	S1.9	2432	5913	6615	7296	7895	7894	7833
	S2.2	2439	7884	8707	9769	10053	10022	10288
	S2.4	2442	6728	7849	8094	8586	8667	8750
	S2.5	2444	5859	6436	7193	7844	7993	7944
	S2.6	2440	6286	7002	7684	8114	8281	8237
	S3.3	2444	7460	8644	9420	10121	10149	10327
	S3.4	2426	6689	6941	7562	8092	8210	8214
	S3.5	2442	6219	7264	8068	8725	8841	8927
	S3.8	2422	7556	8371	9231	9869	9887	10088
S3.10	2443	7925	8975	9874	10099	10186	10495	
PE	P1.7	2433	9539	10551	11306	11767	11781	11925
	P1.10	2427	11436	12399	13256	13500	13597	13823
	P2.2	2371	10372	11273	12032	12595	12603	12854
	P2.4	2393	10814	11989	12875	13253	13277	13473
	P2.5	2393	9224	10430	11387	11899	11985	12112
	P3.6	2423	9725	10718	11812	12043	12173	12376
	P3.7	2423	11379	12284	13405	13904	14082	14293
	P3.9	2420	9798	10909	11632	12284	12322	11629
SE	S1.6	2434	9671	10373	11391	11784	11696	11746
	S1.8	2436	7436	8345	9502	10164	10201	10286
	S2.7	2441	8607	9562	10582	11197	11094	11292
	S2.8	2440	7721	8623	9538	10123	10125	10183
	S2.9	2442	7743	8529	9534	10085	10211	10424
	S2.10	2441	7256	8302	9312	9723	9826	10094
	S3.2	2436	9065	9630	10457	10941	10879	10987
	S3.6	2442	9109	10225	11278	11882	11822	11975
S3.9	2445	9933	10875	12128	12667	12764	12740	

Quadro A.5 – Valores dos Ângulos de Fase em função da frequência, por viga

Mistura	Viga	Baridade	Ângulo de fase (°)					
			1 Hz	2 Hz	4 Hz	6 Hz	8 Hz	10 Hz
P	P1.2	2414	27	25	21	20	17	17
	P1.3	2426	31	28	25	23	19	15
	P1.4	2421	24	23	21	19	17	12
	P1.5	2429	27	26	23	21	19	14
	P1.8	2433	33	27	23	22	19	14
	P2.3	2380	27	24	21	20	18	13
	P2.6	2402	29	30	28	25	22	16
	P2.9	2393	33	30	24	22	19	14
	P2.10	2386	27	26	24	20	18	13
	P3.2	2417	35	32	28	25	22	17
	P3.4	2421	29	28	24	22	19	14
	P3.8	2420	27	26	23	21	18	13
S	S1.3	2431	34	32	28	26	23	17
	S1.4	2433	32	28	25	23	21	15
	S1.5	2434	30	28	25	23	20	15
	S1.9	2432	34	33	31	30	27	22
	S2.2	2439	34	32	27	25	21	17
	S2.4	2442	37	32	30	28	25	20
	S2.5	2444	34	33	28	26	23	18
	S2.6	2440	37	32	29	26	24	19
	S3.3	2444	35	32	29	26	23	17
	S3.4	2426	30	28	27	26	21	17
	S3.5	2442	35	32	28	26	23	18
	S3.8	2422	37	33	28	26	22	18
S3.10	2443	37	32	27	25	22	17	
PE	P1.7	2433	25	21	18	16	13	10
	P1.10	2427	30	26	22	20	16	12
	P2.2	2371	29	26	21	19	16	11
	P2.4	2393	32	29	24	22	19	15
	P2.5	2393	28	25	22	21	19	15
	P3.6	2423	24	21	17	16	13	11
	P3.7	2423	32	30	24	23	19	14
	P3.9	2420	23	21	18	16	14	11
SE	S1.6	2434	30	26	23	20	18	14
	S1.8	2436	32	30	26	23	21	17
	S2.7	2441	34	31	26	23	21	15
	S2.8	2440	31	28	24	22	19	16
	S2.9	2442	35	32	27	24	21	17
	S2.10	2441	32	30	24	23	19	16
	S3.2	2436	36	32	26	25	22	16
	S3.6	2442	36	33	29	25	22	17
S3.9	2445	36	33	29	25	23	18	