



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ivna de Sousa Dantas

**Contribuição da reciclagem de misturas  
betuminosas para a economia circular**

Fevereiro de 2024



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ivna de Sousa Dantas

**Contribuição da reciclagem de misturas  
betuminosas para a economia circular**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia Urbana

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

Fevereiro de 2024

## **Contribuição da reciclagem de misturas betuminosas para a economia circular**

### **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

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

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

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

#### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição-SemDerivações**

**CC BY-ND**

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

## **Contribuição da reciclagem de misturas betuminosas para a economia circular**

### **Agradecimentos**

Em primeiro lugar a Deus. Pela vida, pela proteção e sabedoria, por estar concluindo meu curso, pela inspiração e paz.

Aos meus pais Jean (*in memoriam*) e Ângela. Pelo amor incondicional, pelo exemplo e incentivo, sempre. Aos meus irmãos, Igor e Fernanda, pelo apoio, companheirismo e amor.

Ao meu orientador, Professor Joel Oliveira, pelas portas abertas e por sempre se dispor a me ajudar no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pela oportunidade e pela confiança depositada.

À equipa do laboratório de Pavimentos Rodoviários da Universidade do Minho pela enorme disponibilidade da infraestrutura física e instrumental, em especial ao técnico do laboratório, Eng.º Carlos Palha. Agradeço-lhe imensamente pelo apoio, compreensão, disponibilidade e pelo acompanhamento durante a preparação e ensaios do material.

A todos os meus amigos e familiares. Obrigada pela paciência nestes anos quando minha presença foi mais rara e por torcerem sempre por esta conquista.

## **Contribuição da reciclagem de misturas betuminosas para a economia circular**

### **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

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

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

# **Contribuição da reciclagem de misturas betuminosas para a economia circular**

## **Resumo**

A crescente relevância da reciclagem e da economia circular tem ampliado o foco na sustentabilidade em diversas áreas da engenharia, sendo motivada pela gestão responsável de resíduos e pela redução dos impactos ambientais. A reutilização de materiais nas obras de engenharia civil desempenha um papel fundamental na preservação do meio ambiente. Nesse contexto, a reciclagem de materiais betuminosos de pavimentação destaca-se como um tópico de interesse, requerendo uma análise aprofundada. Esta dissertação tem como objetivo central avaliar os efeitos da incorporação de agentes rejuvenescedores nas propriedades de misturas betuminosas com incorporação de 30% de material fresado de pavimentos flexíveis envelhecidos, com o propósito de promover a reciclagem sustentável dos mesmos, alinhada aos princípios da economia circular.

O estudo explorou a viabilidade de usar um rejuvenescedor para alcançar características de uma mistura reciclada comparáveis às de misturas convencionais, com a utilização de um betume novo do tipo 50/70. O material fresado utilizado foi extraído de pavimentos degradados, tendo sido caracterizado. Seguiu-se um estudo para determinar a percentagem ideal de rejuvenescedor, com o objetivo de obter um ligante final da mistura reciclada com as propriedades semelhantes às de um betume do tipo 35/50.

O estudo compreendeu diversos ensaios laboratoriais no material fresado, extração e análise do ligante residual para avaliar seu grau de envelhecimento. Diversas concentrações de rejuvenescedor foram testadas para determinar a mais apropriada para recuperar as características originais do ligante. Para validação da composição da mistura reciclada foram produzidas amostras de mistura betuminosa com material fresado e diferentes dosagens de rejuvenescedor, e suas propriedades mecânicas foram avaliadas em laboratório.

Através da análise das características físicas, mecânicas e reológicas do material desenvolvido neste estudo, incluindo a caracterização do ligante e a sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência à fadiga, ficou evidente que a utilização de rejuvenescedor em misturas recicladas permite atingir as propriedades de misturas convencionais. Os resultados obtidos fomentam práticas mais sustentáveis e contribuem para a redução do impacto ambiental na construção e reabilitação de pavimentos rodoviários.

### **Palavras-Chave:**

Material fresado, Pavimentação, Economia Circular, Rejuvenescedor

# **The contribution of bituminous mixtures recycling to the circular economy**

## **Abstract**

The growing importance of recycling and the circular economy has increased the focus on sustainability in various areas of engineering, motivated by responsible waste management and the reduction of environmental impacts. The reuse of materials in civil engineering works plays a fundamental role in preserving the environment. In this context, the recycling of bituminous paving materials stands out as a topic of interest, requiring in-depth analysis. The main aim of this dissertation is to evaluate the effects of incorporating rejuvenating agents into asphalt mixtures with 30% milled material (reclaimed asphalt pavement, RAP) from aged flexible pavements on the properties of the recycled mixture, intending to promote their sustainable recycling in line with the principles of the circular economy.

The study explored the feasibility of using a rejuvenator to achieve recycled mix characteristics comparable to conventional mixtures using a new 50/70 type bitumen. The RAP material used was extracted from distressed pavements and characterized. This step was followed by a study to determine the optimum rejuvenator percentage, aiming to obtain a final binder for the recycled mix with properties similar to those of a 35/50 type bitumen.

The study included various laboratory tests on the RAP material, including extraction and analysis of the residual binder to assess its degree of aging. Various rejuvenator concentrations were tested to determine the most appropriate to recover the original characteristics of the binder. To validate the composition of the recycled mix, samples of asphalt mixtures were produced with RAP material and different rejuvenator dosages, and their mechanical properties were assessed in the laboratory.

By analyzing the physical, mechanical, and rheological characteristics of the material developed in this study, including the characterization of the binder and its water sensitivity, resistance to permanent deformation, stiffness modulus, and fatigue resistance, it became clear that the use of a rejuvenator in recycled mixtures makes it possible to achieve the properties of a conventional mixture. The results obtained encourage more sustainable practices and contribute to reducing the environmental impact of road pavement construction and rehabilitation.

### **Keywords:**

Reclaimed asphalt pavement, Road paving, Circular Economy, Rejuvenator

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABELAS .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. ECONOMIA CIRCULAR.....	5
2.3. TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	7
2.3.1. Reciclagem a quente em central .....	8
2.3.2. Reciclagem a quente no local ou <i>in situ</i> .....	9
2.3.3. Reciclagem a frio em central .....	10
2.3.4. Reciclagem a frio no local ou <i>in situ</i> .....	11
2.3.5. Reciclagem temperada.....	13
2.4. INFLUÊNCIA DA LEGISLAÇÃO NO INCENTIVO À RECICLAGEM DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	14
2.5. UTILIZAÇÃO DE REJUVENESCEDOR EM MISTURAS RECICLADAS .....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	18
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	18
3.1.1. Material Fresado .....	18
3.1.2. Betume.....	19
3.1.3. Rejuvenescedor.....	19
3.2. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS LABORATORIAIS.....	20
3.2.1. Obtenção de amostra representativa do material fresado .....	20

3.2.2.	Obtenção do betume contido no material fresado .....	20
3.2.3.	Preparação das misturas betuminosas .....	22
3.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO .....	24
3.3.1.	Caracterização Granulométrica.....	24
3.3.2.	Percentagem de betume .....	25
3.4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE BETUMES.....	26
3.4.1.	Temperatura de amolecimento.....	27
3.4.2.	Penetração de betumes .....	27
3.4.3.	Viscosidade rotacional.....	28
3.4.4.	Reologia.....	29
3.5.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS .....	30
3.5.1.	Estudo de Formulação de Misturas Betuminosas.....	30
3.5.2.	Sensibilidade à água de misturas betuminosas.....	31
3.5.3.	Resistência à deformação permanente .....	32
3.5.4.	Módulo de Rigidez.....	34
3.5.5.	Resistência à fadiga por flexão a 4 pontos .....	35
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	37
4.1.	PROPRIEDADES DO MATERIAL FRESADO .....	37
4.1.1.	Caracterização granulométrica .....	37
4.1.2.	Percentagem de Betume.....	38
4.2.	PROPRIEDADES DOS BETUMES .....	38
4.2.1.	Ponto de Amolecimento .....	38
4.2.2.	Penetração de Betume.....	39
4.2.3.	Viscosidade dinâmica.....	40
4.2.4.	Módulo complexo de corte .....	42
4.3.	CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS BETUMINOSAS .....	43
4.3.1.	Estabilidade Marshall .....	43
4.3.2.	Sensibilidade à água .....	44
4.3.3.	Resistência à deformação permanente .....	46
4.3.4.	Módulo de Rigidez.....	47

4.3.5. Resistência à fadiga .....	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
5.1. CONCLUSÕES .....	50
5.2. TRABALHOS FUTUROS .....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre sistemas económicos de produção (CTCV, 2020) .....	6
Figura 2 - Tipos de reabilitações em pavimentos flexíveis (Adaptado de Cunha, 2010). .....	8
Figura 3 - Pré-aquecedores utilizados na reciclagem <i>in situ</i> a quente (Cunha, 2010).....	10
Figura 4 - Fases de reciclagem em central a frio com emulsão betuminosa (Baptista et. al, 2007) .....	11
Figura 5 - “Comboio” de reciclagem <i>in situ</i> a frio (Wirtgen, 2009) .....	12
Figura 6 - Categorização de tecnologias para a produção de misturas asfálticas com base na temperatura de fabricação (Ferreira, 2009).....	14
Figura 7 - Amostra do material fresado .....	18
Figura 8 - Seleção da amostra representativa do material fresado.....	20
Figura 9 - Centrifugadora Rotarex.....	21
Figura 10 - Centrifugadora de tubos (RotoFix).....	21
Figura 11 - Evaporador Rotativo .....	22
Figura 12 - Gráfico de conformidade granulométrica aos limites de uma mistura AC20 bin .....	23
Figura 13 - RAP após ensaio de granulometria .....	25
Figura 14 - Amostras após ensaio de teor de betume e ensaio de granulometria.....	25
Figura 15 - Mufla utilizada para determinação da percentagem de betume .....	26
Figura 16 - Equipamento utilizado no ensaio de “Anel e bola” .....	27
Figura 17 - Aparelho utilizado para realização do ensaio de penetração .....	28
Figura 18 - Viscosímetro rotacional .....	29
Figura 19 - Reómetro dinâmico de corte.....	29
Figura 20 - Equipamentos de compactação de lajetas de mistura betuminosa .....	33
Figura 21 - Equipamento de ensaio de pista ( <i>wheel tracking</i> ).....	33
Figura 22 - Ensaio de flexão em 4 pontos (Afonso, 2015) .....	35
Figura 23 - Equipamento servo-hidráulico utilizado nos ensaios de flexão a 4 pontos.....	36
Figura 24 - Distribuição granulométrica do material fresado .....	37
Figura 25 - Variação do ponto de amolecimento com a adição de rejuvenescedor.....	39
Figura 26 - Variação da penetração com a adição de rejuvenescedor.....	40
Figura 27 - Resultados de viscosidade do betume recuperado e de um betume rejuvenescido .....	41
Figura 28 - Resultados do ensaio de reologia.....	42
Figura 29 - Provetes utilizados no ensaio de sensibilidade à água .....	45

Figura 30 - Resultados do Ensaio de Pista.....	46
Figura 31 - Variação do módulo de rigidez com a frequência de aplicação de cargas .....	47
Figura 32 - Variação do ângulo de fase com a frequência de aplicação de cargas .....	48
Figura 33 - Resistência à fadiga das misturas em estudo.....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos comuns de agentes rejuvenescedores (Arámbula-Mercado <i>et al.</i> , 2018 .....	17
Tabela 2 - Fórmula para mistura AC20 convencional .....	23
Tabela 3 - Fórmula para mistura AC20 com 30% RAP .....	24
Tabela 4 - Condições de ensaio para determinação da penetração da agulha (EN 1426) .....	28
Tabela 5 - Resultados do ensaio de percentagem de betume .....	38
Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de ponto de amolecimento (anel e bola) .....	39
Tabela 7 - Resultados do ensaio de penetração de betumes .....	40
Tabela 8 - Resultados obtidos no ensaio de Marshall para as misturas em estudo .....	44
Tabela 9 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura convencional e das misturas recicladas com 0,3% e 0,25% de rejuvenescedor .....	45

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO**

O aumento do tráfego nas vias urbanas, o término da vida útil dos pavimentos e os fatores climáticos durante as últimas décadas combinados com a falta de conservação das vias urbanas, contribuíram diretamente para a perda de qualidade e a deterioração acelerada das infraestruturas rodoviárias em diversos países. Tendo isso em mente, fica clara a importância da manutenção e conservação das vias, a fim de garantir boas condições de rolamento e segurança aos utentes.

Atualmente, as crescentes preocupações com as mudanças climáticas e consumo excessivo de recursos colocaram o desenvolvimento sustentável sob os holofotes. O planeamento urbano para o desenvolvimento sustentável concentra-se no equilíbrio entre atividades económicas, sociais e ambientais (Chen et al., 2006). O planeamento urbano desenvolve e antecipa as necessidades das cidades, identificando as questões mais urgentes e assegurando que as medidas necessárias sejam implementadas.

Neste contexto, o transporte rodoviário desempenha um papel fundamental no desenvolvimento sustentável urbano porque promove o crescimento económico, a inclusão social, a expansão urbana, a distribuição de atividades e a equidade no uso do espaço urbano e de todas as utilidades. Entretanto, o transporte, além da infraestrutura que garante a circulação, é um grande consumidor de combustíveis fósseis, importante contribuidor para o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e poluição do ar, assim como um grande gerador de resíduos provenientes do fim da vida dos componentes constituintes dos veículos (Abreu, 2020).

Durante a última década, o exercício da reciclagem de pavimentos asfálticos tem ganho cada vez mais força. O estudo e desenvolvimento de novas técnicas de reciclagem objetivam diminuir o consumo de petróleo bruto e do seu subproduto, cientificamente conhecido como betume (Sergoz, 2013). Analisando as técnicas de reabilitação convencionais disponíveis e mais comumente utilizadas, nota-se que ainda existem diversas desvantagens ao se utilizar estes métodos. Entre elas, a extração de recursos naturais e o aumento na geração de resíduos sólidos, ocasionados pelo resultado da remoção do antigo pavimento (Mazzuco et al., 2019). As técnicas convencionais continuam sendo amplamente utilizadas devido à sua familiaridade, facilidade de implementação e, em alguns casos, custos aparentemente mais baixos a curto prazo. No entanto, a crescente conscientização ambiental e a busca por práticas mais sustentáveis

levantam questões cruciais sobre a necessidade de explorar alternativas mais eficientes e ecologicamente corretas.

O desenvolvimento sustentável da sociedade é cada vez mais um objetivo central na definição de novas estratégias de produção e construção. No domínio dos pavimentos rodoviários flexíveis, a reciclagem é uma das tecnologias que melhor se enquadra na necessidade de selecionar métodos mais sustentáveis na construção, sendo que esta tecnologia pode apresentar vantagens económicas.

Uma resposta às ameaças contemporâneas ao meio ambiente é a Economia Circular (EC) (Ghisellini et al., 2016; Saidani et al., 2018), que é uma solução de sistema que visa minimizar o impacto ambiental adverso da produção e do consumo de bens e serviços, especialmente no contexto da redução de emissões de GEE e da geração de resíduos (Serokastolka e Ociepa-Kubicka, 2019). Isso porque a EC é um sistema económico que suporta uma gestão mais sustentável dos recursos ao longo do ciclo de vida dos sistemas e é caracterizado por ciclos fechados, promovendo atividades tais como reutilização, remanufactura e reciclagem (Saidani et al., 2019; Albuquerque et al., 2019).

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo central deste estudo consiste em avaliar a contribuição da reciclagem de misturas betuminosas para o alcance das metas definidas no Plano de Ação para a Economia Circular da Comissão Europeia.

Como objetivo específico, destaca-se a elaboração de misturas betuminosas utilizando material reciclado de fresagem de um pavimento degradado e a incorporação de um rejuvenescedor. O propósito é alcançar propriedades semelhantes às das misturas convencionais, utilizando um betume de base do tipo 50/70, com a finalidade de obter características compatíveis com um betume do tipo 35/50. Isso envolverá uma pesquisa aprofundada e prática para desenvolver misturas que sejam tanto ecologicamente responsáveis quanto eficazes em termos de desempenho.

Além disso, este trabalho visa avaliar as propriedades físicas e os comportamentos mecânicos e reológicos das misturas desenvolvidas, garantindo que estejam em conformidade com os parâmetros essenciais para sua aplicação segura e duradoura.

## **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O desenvolvimento da dissertação será dividido em cinco capítulos dos quais serão abaixo apresentados cada um sucintamente.

No primeiro capítulo contextualiza-se o tema da pesquisa, estabelecendo os principais propósitos deste estudo, fornecendo uma breve visão geral da estrutura adotada para a dissertação.

No segundo capítulo aborda-se a importância da economia circular no âmbito das infraestruturas rodoviárias e apresenta-se as técnicas de reciclagem de pavimentos deterioradas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes de fresagem. Além disso, aborda-se a influência que a legislação tem no incentivo à reciclagem de materiais de construção, quais os tipos de rejuvenescedores utilizados e os seus benefícios.

No capítulo “Materiais e Métodos”, apresentam-se os materiais utilizados para a realização dos ensaios necessários para a caracterização física, mecânica e reológica da mistura, nomeadamente, o material fresado, o betume e o rejuvenescedor. Além disso foram apresentados os métodos utilizados para a realização de todos os ensaios.

No quarto capítulo, intitulado “Análise de Resultados”, apresentam-se os principais resultados obtidos, além de uma avaliação do impacto da adição do rejuvenescedor na mistura derivada do material fresado que inclui a análise de propriedades físicas, mecânicas e reológicas da mistura, permitindo compreender os efeitos e benefícios dessa adição.

Por último, o quinto capítulo resume as principais conclusões obtidas neste trabalho, destacando-se a importância para o meio ambiente e para a economia circular da utilização de uma mistura produzida utilizando material reciclado.

## **2. ESTADO DA ARTE**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

A construção civil é um setor vital para o desenvolvimento e crescimento das cidades e da sociedade como um todo. Nos últimos anos, tem experimentado um crescimento significativo e esse crescimento vem acompanhado de uma preocupação ambiental cada vez mais urgente: a geração excessiva de resíduos.

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

A maioria dos materiais utilizados em construção não é projetada com a possibilidade de serem reaproveitados ou reciclados. Além disso, a falta de planeamento adequado, a ausência de políticas eficazes de gestão de resíduos e a falta de consciencialização por parte dos envolvidos no setor contribuem para agravar esse problema.

Contudo, como resposta aos desafios, surge uma perspetiva promissora: a economia restaurativa aplicada à construção civil. Essa abordagem procura criar um ciclo virtuoso de produção, utilização e recuperação de materiais, em que os resíduos gerados nas obras possam ser reutilizados como matéria-prima em novas construções ou em outros setores.

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

Para alcançar essa meta ambiciosa, são necessárias mudanças significativas em várias etapas do ciclo de vida dos materiais utilizados na construção. Isso inclui a seleção criteriosa de materiais, priorizando aqueles que são recicláveis ou reutilizáveis; o fomento à pesquisa e inovação para desenvolver novos materiais e técnicas construtivas mais sustentáveis; o estímulo à criação de políticas públicas que

incentivem a reciclagem e a reutilização de resíduos; e a consciencialização e aliciamento de todos os atores envolvidos no setor, desde os profissionais da construção civil até aos consumidores finais.

## **2.2. ECONOMIA CIRCULAR**

A Economia Circular é uma resposta às ameaças contemporâneas ao meio ambiente, principalmente provenientes das atividades humanas. Em outras palavras, é uma solução que visa mitigar o impacto ambiental adverso da produção e do consumo de bens e serviços (Abreu, 2020).

Atualmente vive-se num cenário de economia linear, que se quer evitar a partir de princípios estabelecidos em conjunto com práticas indissociáveis, como o conceito conhecido por 3R's, sendo assim definidos:

- Reduzir: Utilizar técnicas de gestão para diminuir a quantidade de material consumido para determinado fim (ex. água, energia, minerais, etc.);
- Reutilizar: Utilizar novamente um material, no mesmo uso para o qual foi projetado, ou em outro uso compatível, aumentando assim a vida útil do material, antes de ser descartado ou enviado para a Reciclagem;
- Reciclar: Conjunto de técnicas que tem por finalidade aproveitar os resíduos e colocá-los novamente no ciclo de produção de que saíram. É o resultado de uma série de atividades, pelas quais alguns materiais que se iriam tornar-se lixo, ou estão no lixo, são desviados, recolhidos, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de novos produtos (Viet, 2012).

Os princípios dos 3R's estão intrinsecamente interligados, formando uma abordagem holística para promover práticas sustentáveis. Embora possam operar de forma isolada, a sinergia entre eles potencializa os benefícios ambientais. A prioridade de aplicação depende do contexto, mas geralmente inicia-se com a redução, buscando minimizar o consumo e os resíduos. Em seguida, a reutilização é promovida para prolongar a vida útil dos materiais. Por fim, a reciclagem entra em cena, fechando o ciclo ao reintegrar os resíduos na produção.

Com o intuito de acelerar o desenvolvimento e a implementação da economia circular, em 2010 foi criada a Ellen MacArthur Foundation e em 2015 o Programa Circular Economy 100 (CE100), para tornar possível a integração entre as empresas, cidades, governos, instituições académicas em uma única plataforma, a fim de desenvolver habilidades e competências de forma homogênea entre as partes e avançar com as novas possibilidades geradas pela economia circular.

Recentemente, começaram a ser estabelecidos parâmetros para efetivar o sistema económico, chamados pilares da economia circular. Passou-se a ter como objetivo preservar o capital natural ao manter os produtos e materiais em circulação por mais tempo que no sistema linear, além de tornar o sistema mais eficaz quanto à produção, de forma que a utilização dos recursos naturais ocorra de forma mais coerente (Smart Waste Portugal, 2017). Dessa forma, foram estabelecidas as diferenças entre os sistemas económicos, como demonstrados através da Figura 1.

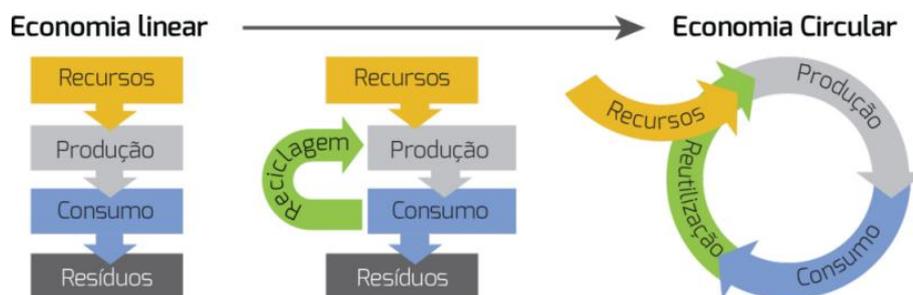


Figura 1 - Comparação entre sistemas económicos de produção (CTCV, 2020)

Na imagem vê-se genericamente o funcionamento da economia circular, mas observando de forma mais indireta, verifica-se o que de facto precisa ser feito para que a sua cadeia restaurativa chegue a atingir os objetivos pelo qual foi idealizada. Sendo assim, há princípios deste modelo económico que revelam dificuldades a serem enfrentadas (De Azevedo, 2015):

- Criação de modelos de negócios que agreguem valor ao produto;
- Criação de produtos de múltiplas utilidades;
- Desenvolvimento de uma logística que mantenha a qualidade e o custo de forma equilibrada;
- Coordenação dos atores dentro e entre as cadeias de fornecimento para criar escala e identificar usos de maior valor.

O plano de ação para a economia circular da comissão europeia estabelece uma estratégia orientada para o futuro, no intuito de criar uma Europa mais limpa e mais competitiva em associação com os agentes económicos, os consumidores, os cidadãos e as organizações da sociedade civil. Visa ainda acelerar a mudança transformadora requerida pelo Pacto Ecológico Europeu.

De forma abrangente, a estratégia do Pacto Ecológico Europeu baseia-se numa economia com impacto neutro no clima, tendo em vista que metade das emissões de GEE e mais de 90% da perda de biodiversidade e da pressão sobre os recursos hídricos advêm da extração e da transformação de recursos. Para concretizar esta ambição, a UE tem de acelerar a transição para um modelo de crescimento regenerativo que restitua ao planeta mais do que lhe retira, progredir no sentido de o

consumo de recursos, não ultrapassar os limites do planeta, envidar esforços para reduzir o impacto ecológico do consumo e duplicar a taxa de utilização de materiais circulares na próxima década.

Adicionalmente, o plano de ação para a economia circular da comissão europeia inclui um conjunto de iniciativas relacionadas entre si por forma a estabelecer um quadro estratégico sólido e coerente, em que os produtos, serviços e modelos de negócio sustentáveis sejam a norma e haja uma transformação dos padrões de consumo no sentido da prevenção de resíduos. Pretende-se que o desenvolvimento deste quadro estratégico seja gradual, sendo dada prioridade às principais cadeias de valor dos produtos. Serão tomadas novas medidas para reduzir a produção de resíduos e garantir o bom funcionamento do mercado interno da UE para as matérias-primas secundárias de alta qualidade. A capacidade de a UE se responsabilizar pelos seus resíduos será igualmente reforçada.

O plano visa também garantir que a economia circular esteja ao serviço das pessoas, das regiões e das cidades, contribua integralmente para a neutralidade climática e aproveite o potencial da investigação, da inovação e da digitalização. Por último, o plano contempla o desenvolvimento de um quadro de acompanhamento robusto que contribua para medir o bem-estar para além do PIB.

### **2.3. TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS**

Entende-se por reciclagem de pavimentos o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes de fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de betume, ligantes betuminosos novos, quando necessários, e também com adição de ligantes hidráulicos (Cunha, 2010).

Com o intuito de simplificar o entendimento sobre as diversas técnicas de reciclagem utiliza-se a Figura 2 onde é explicitado por meio de um fluxograma as principais características sobre as mesmas.

De forma sucinta, os métodos de reciclagem podem ser classificados em dois grupos: a frio e a quente. A reciclagem a frio utiliza a técnica da fresagem na qual o pavimento asfáltico é removido a uma profundidade desejada e depois restaurado através da aplicação de uma nova camada superficial. Este método permite a correção de irregularidades, inclinações, ondulações e deformações na camada superficial. A reciclagem a quente consiste no método pelo qual o pavimento asfáltico existente é removido por intermédio de uma fresadora ou outro equipamento capaz de arrancar a camada superficial total ou parcialmente a uma profundidade previamente estabelecida; em seguida o material é transportado para armazenamento e reciclado numa central betuminosa (Asphalt Institute, 1986).

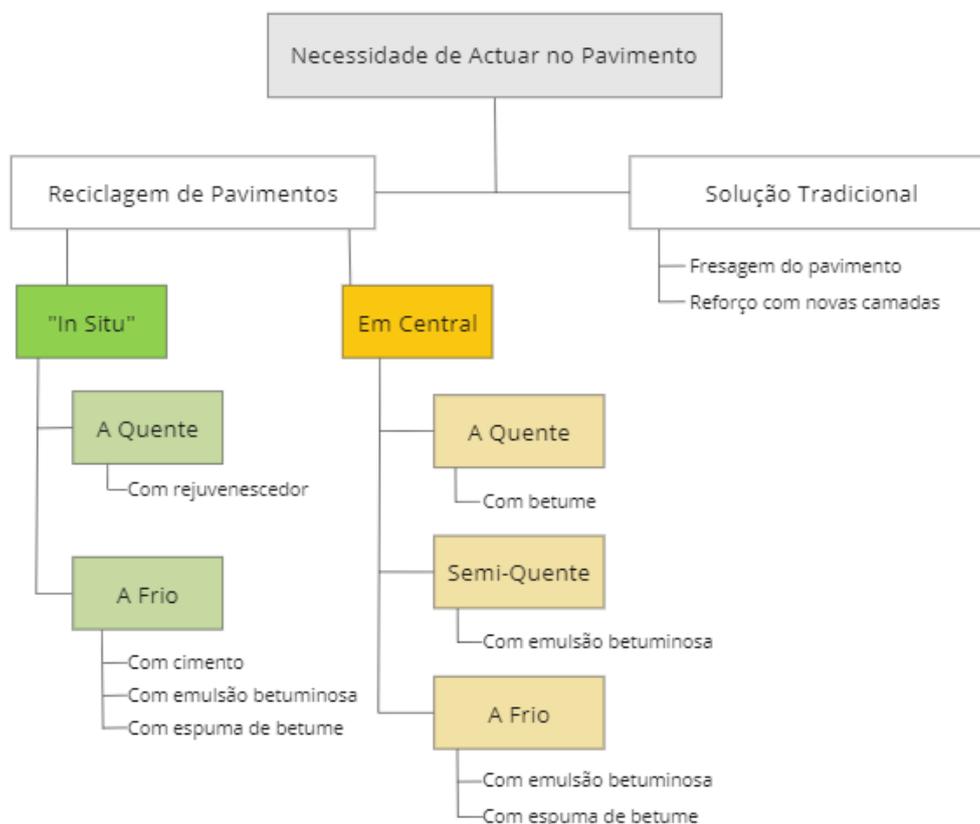


Figura 2 - Tipos de reabilitações em pavimentos flexíveis (Adaptado de Cunha, 2010).

As técnicas de aplicação e compactação de misturas asfálticas recicladas são as mesmas empregadas para as misturas convencionais. A administração Federal de Autoestradas dos Estados Unidos, apresentou os resultados de estudos realizados em 17 estados norte-americanos sobre o desempenho de misturas asfálticas recicladas, no período compreendido entre 1992 e 1995. Esta pesquisa mostrou que aproximadamente 33% dos pavimentos asfálticos fresados são reciclados. O consenso destes estados foi de que misturas betuminosas recicladas possuem desempenho igual, ou melhor, que as misturas betuminosas convencionais, desde que projetadas e produzidas adequadamente.

### 2.3.1. Reciclagem a quente em central

A técnica de reciclagem em central a quente oferece uma solução viável em face de quase todos os problemas relacionados às patologias que atuam sobre um pavimento danificado, sendo também uma das técnicas com um maior custo de produção devido às elevadas temperaturas que atuam sobre as misturas no seu processo de fabrico (Curado, 2019). Neste tipo de reciclagem o ligante a ser utilizado é usualmente o betume.

Os benefícios de realizar a mistura em central incluem a capacidade de incorporar materiais de outras obras, proporcionando um controle mais preciso sobre os materiais (Batista, 2015). Na produção em

central, os materiais que serão utilizados podem ser armazenados e submetidos a testes antes da realização da mistura, permitindo ajustes precisos nas proporções conforme necessário (Oliveira et al., 2013). Isso pode resultar em melhorias significativas na qualidade da mistura. Além disso, várias modificações podem ser implementadas durante o processo, como a manipulação do tempo de retenção do material na câmara misturadora, influenciando diretamente na qualidade final da mistura (Wirtgen, 2004).

De acordo com o estudo feito por Pereira e Miranda (1999), a qualidade das misturas realizadas com os materiais reciclados a quente são comparáveis a das misturas realizadas com materiais novos. No entanto, é importante ressaltar que a equivalência da qualidade pode depender das condições específicas de produção na central de reciclagem. A capacidade de controle de qualidade é maximizada em ambientes controlados, como nas centrais de reciclagem, devido às condições operacionais controladas. Além disso, a utilização de altas temperaturas durante o processo de fabricação favorece uma integração mais eficiente entre os materiais de correção e os possíveis ligantes utilizados.

Na reciclagem a quente na central, o pavimento asfáltico recuperado é combinado com agregado novo e betume para produzir mistura asfáltica a quente. Esse processo envolve o uso de equipamentos especializados, como a fresadora, que é capaz de remover a camada do revestimento degradado de acordo com uma espessura pré-determinada (Federal Highway Administration, 1997).

Após a conclusão do fabrico da mistura a mesma deve ser direcionada a silos de armazenamento de misturas betuminosa, sendo posteriormente direcionadas para os locais de reabilitação do pavimento, onde deve ocorrer o seu espalhamento e compactação (Curado, 2019).

A principal vantagem da reciclagem a quente em centrais estacionárias é a possibilidade de produzir um material de qualidade superior quando comparado com o método *in situ*. Como desvantagens, pode-se citar o preço adicional do transporte do material fresado até a central e, posteriormente, da central até o local de aplicação. Além disso, há o risco de queimar o material no processo de aquecimento da mistura, um fenômeno que pode estar relacionado ao método específico de reciclagem a quente utilizado. (IEP, 2004). Esse risco pode variar de acordo com a percentagem de material fresado a ser incorporado no processo, sendo necessário um cuidado especial para evitar danos ao material durante o aquecimento.

### **2.3.2. Reciclagem a quente no local ou *in situ***

Usualmente, são empregues equipamentos especiais para o aquecimento controlado do pavimento existente, facilitando sua desintegração e subsequente mistura com um agente rejuvenescedor, muitas

vezes uma emulsão betuminosa formulada especificamente para o tipo de mistura asfáltica a ser reciclada. Existem duas variantes de equipamentos utilizados: um que aquece previamente o pavimento e outro que fresadora a mistura betuminosa e a submete a um processo de aquecimento em um tambor secador misturador (Esteves, 2014).

Está técnica por vezes pode ser tratada por termorregeração ou termorreperfilagem, e está associada à reabilitação de camadas superficiais do pavimento, sendo indicada em casos em que se procure atenuar os defeitos das camadas superficiais e os efeitos de descolagem das camadas de desgaste.



Figura 3 - Pré-aquecedores utilizados na reciclagem in situ a quente (Cunha, 2010)

Sua utilização é desaconselhada em pavimentos que possuam quaisquer problemas de ordem estrutural, sendo esta técnica de reciclagem considerada por vezes como uma metodologia quase que exclusiva de restituição das qualidades funcionais das camadas superficiais do pavimento. O ligante a ser aplicado nesta técnica é usualmente um rejuvenescedor que contém na sua composição elementos que o betume das misturas existentes no pavimento foi perdendo por conta do seu envelhecimento, possibilitando assim ao betume recuperar suas propriedades químicas e físicas iniciais (Curado, 2019).

Devido ao tamanho e à complexidade dos equipamentos usados na reciclagem a quente no local, bem como à emissão de substâncias durante o processo de fabricação da mistura, essa prática pode ter grandes impactos sociais e ambientais, além de exigir um investimento financeiro considerável (Branco *et al.*, 2008).

### **2.3.3. Reciclagem a frio em central**

A reciclagem de materiais a frio em centrais fixas é uma técnica em que o material fresado dos pavimentos é transportado até um depósito central, onde a alimentação do mesmo é feita por meio de

uma unidade de processamento (Wirtgen, 2004). Essa abordagem é preferível em comparação com a reciclagem in situ a frio quando há uma maior necessidade de controle de qualidade na mistura final. A produção em um ambiente controlado reduz a suscetibilidade a ações externas, proporcionando maior rigor na dosagem e qualidade dos materiais utilizados na solução de reabilitação (Curado, 2019).

Neste tipo de técnica, o pavimento é fresado e o material resultante é direcionado para um veículo que irá proceder ao transporte do mesmo até uma central de reciclagem. Usualmente neste tipo de reciclagem a frio, os ligantes utilizados são principalmente a espuma de betume e a emulsão betuminosa (Figura 4). A sua utilização apresenta resultados semelhantes aos da técnica realizada in situ, porém com uma maior confiabilidade dos resultados a serem obtidos ao fim do processo de aplicação e compactação. Esta técnica é considerada inviável por muitos devido ao aumento de etapas no processo face aos reais benefícios finais obtidos, sendo na maior parte das vezes aplicadas as metodologias de reciclagem a frio em técnicas in situ.



Figura 4 - Fases de reciclagem em central a frio com emulsão betuminosa (Baptista et. al, 2007)

A principal vantagem da reciclagem a frio em centrais fixas é a possibilidade de armazenamento da mistura reciclada, já que, por ser produzida a frio, não necessita ser aplicada imediatamente. As principais desvantagens são os problemas de armazenamento, como a aglomeração das partículas do material fresado armazenado, e custo de transporte do material fresado até a central e do material reciclado da central até a obra (DAU, 2001).

#### 2.3.4. Reciclagem a frio no local ou in situ

Na reciclagem a frio no local ou in situ, há uma redução drástica quanto ao controlo de qualidade do fabrico das misturas betuminosas recicladas, pois por se tratar de um processo de reciclagem no local,

esta está mais sujeita as condições externas do ambiente e conseqüentemente as condições dos agentes climáticos que atuam sobre o local da reabilitação (Curado, 2019).

Dado que a produção e aplicação dessas misturas ocorrem em temperatura ambiente, sua utilização resulta em uma diminuição considerável no consumo de energia e na emissão de poluentes. O emprego desta técnica, por sua vez, contribui para reduzir custos e tempos de transporte, além de facilitar o uso de agregados locais (Batista, 2005).

Neste tipo de reciclagem, o agente reciclador mais utilizado é emulsão asfáltica, sendo que a quantidade de emulsão a ser aplicada é proporcional à quantidade de material fresado utilizado. Este tipo de reciclagem é realizado com a utilização de máquinas recicladoras grandes e potentes, sendo que a sua peça principal é o rotor fresador e misturador, equipado com uma grande quantidade de ferramentas de corte. Essas máquinas permitem reciclar camadas espessas em uma única passagem. A utilização desta técnica possibilita melhorar o conforto ao rolamento, aumentar a largura do pavimento e minimizar os problemas com o transporte (Wirtgen, 2004).

Os equipamentos necessários à realização da técnica de reciclagem *in situ* a frio são no mínimo uma máquina recicladora, cisternas para água e ligantes, motoniveladora e cilindros, os quais formam um comboio, frequentemente denominado por “comboio de reciclagem”, tal como se mostra na Figura 5.



Figura 5 - “Comboio” de reciclagem *in situ* a frio (Wirtgen, 2009)

O processo de reciclagem no local a frio, possibilita ao projetista a escolha de diferentes tipos de ligantes a serem utilizados na formulação de uma solução final de pavimento, sendo que o seu comportamento

estará diretamente ligado a essa escolha. Entre os principais ligantes para este tipo de técnica pode citar-se os seguintes:

- Reciclagem no local a frio com espuma de betume;
- Reciclagem no local a frio emulsão betuminosa;
- Reciclagem no local a frio com cimento.

A definição do ligante a ser utilizado deve ser previamente definida em fases iniciais de estudo e planejamento da obra, pois a sua escolha acaba por determinar o comportamento estrutural final do pavimento, o que acaba por condicionar em espessuras e formulações de misturas que serão aplicadas sobre a camada reciclada, que representa a última etapa do processo de reciclagem (Curado, 2019).

De entre as vantagens da reciclagem a frio in situ de pavimentos, pode-se citar a eliminação das operações de escavação, carga e transporte para remoção de materiais da estrada; eliminação da necessidade de equipamentos para beneficiação de materiais e de áreas de armazenamento; processo não poluente e possui tempo de construção mais curto em relação a outros métodos. Como desvantagem pode-se citar a necessidade de equipamentos de grande porte para realização da técnica, o que pode ser muito oneroso, inviabilizando a mesma (Castro, 2003). Além disso, outros pontos negativos incluem a limitação da espessura da camada que pode ser reciclada, associada às capacidades dos equipamentos, e a dependência das condições climáticas para execução eficaz da técnica.

### **2.3.5. Reciclagem temperada**

As misturas betuminosas temperadas possibilitam uma diminuição significativa na temperatura de produção, reduzindo-a entre 30 a 50°C em comparação com as misturas betuminosas a quente. Essa redução térmica resulta em menor emissão de gases para a atmosfera, o que contribui para uma redução na poluição e no consumo de energia durante o aquecimento dos materiais. Além disso, cria condições de trabalho mais seguras para os que a manuseiam, já que as altas temperaturas estão associadas a uma maior produção de fumos prejudiciais à saúde (Bessa, 2016).

A essência tecnológica das misturas recicladas temperadas envolve a aplicação de aditivos químicos, orgânicos ou técnicas de formação de espuma para reduzir a viscosidade do ligante através de alterações reológicas. O ligante empregado pode ser o betume convencional ou betumes modificados com polímeros ou borracha (Dinis-Almeida, 2010).

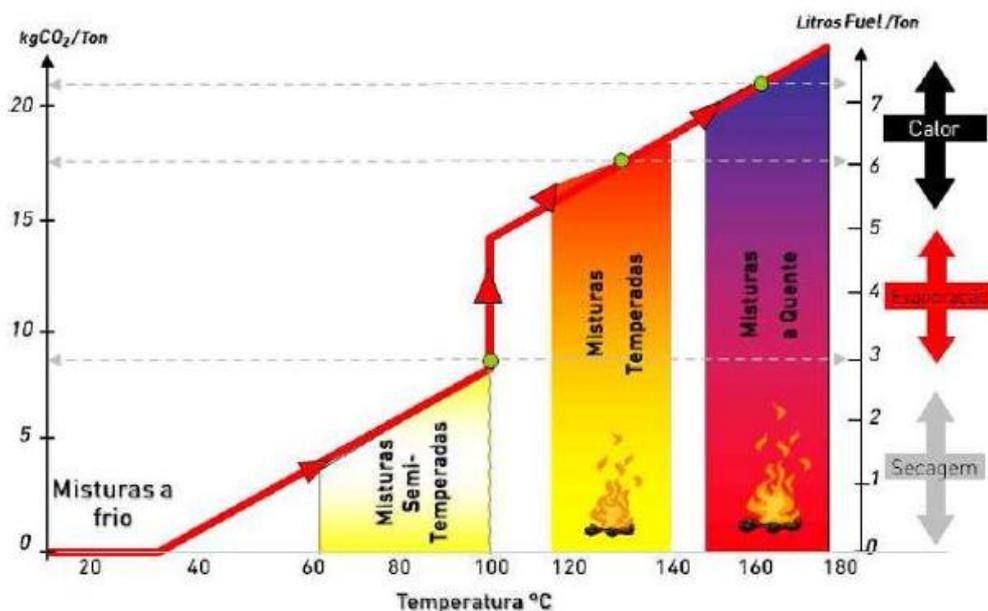


Figura 6 - Categorização de tecnologias para a produção de misturas asfálticas com base na temperatura de fabricação (Ferreira, 2009).

As tecnologias das misturas asfálticas temperadas envolvem temperaturas acima de 100°C, o que resulta em uma baixa quantidade de água remanescente na mistura. Diversas técnicas são empregadas para reduzir a viscosidade efetiva do ligante, garantindo a completa cobertura dos agregados e a subsequente compactação em temperaturas mais baixa. Essas técnicas incluem o uso de aditivos orgânicos, aditivos químicos e a formação de espuma de betume (EAPA, 2014).

## 2.4. INFLUÊNCIA DA LEGISLAÇÃO NO INCENTIVO À RECICLAGEM DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

O Decreto-Lei nº. 46/2008, de 12 de março, estabeleceu o regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras ou demolições de edificações ou de derrocadas, abreviadamente designados “resíduos de construção e demolição” ou “RCD”, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação.

Mais recentemente, o novo Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR) introduz normas relativas à prevenção da produção de resíduos, bem como medidas com vista à promoção da reutilização dos produtos. O Decreto-Lei nº 102-D/2020, de 10 de dezembro, transpõe para o direito nacional as metas relativas à preparação para reutilização, reciclagem e valorização estabelecidas na diretiva quadro dos resíduos, e prevê disposições específicas relativas aos resíduos de construção e demolição (RCD).

De entre as principais novidades introduzidas com o referido Decreto-Lei, e implicações que daí decorrem para as empresas do setor da construção, destacam-se a obrigação da utilização de pelo menos 10% (anteriormente era 5% e não era obrigatório) de materiais reciclados ou que incorporem matérias recicladas, relativamente à quantidade total de matérias-primas usadas em obra, no âmbito da contratação de empreitadas de construção e de manutenção de infraestruturas ao abrigo do Código dos Contratos Públicos, e a obrigação de os materiais reciclados ou que incorporem reciclados serem certificados por entidades competentes.

No que se refere às disposições específicas para os RCD, destacam-se:

- A responsabilidade pela gestão dos RCD atribuída ao produtor do resíduo, com a possibilidade de corresponsabilização de todos os intervenientes no ciclo de vida dos produtos;
- A opção do dono de obra de delegar sua responsabilidade de gestão para o empreiteiro por meio contratual;
- A exigência de triagem dos RCD na obra, pelo menos para uma fileira específica de materiais;
- A responsabilidade do diretor de obra ou do responsável pela obra na utilização de RCD na obra;
- A obrigatoriedade, em empreitadas de obras públicas, de apresentação do plano de prevenção e gestão de RCD junto com o projeto de execução;
- A condição para que os resíduos valorizados, incluindo os reciclados, deixem de ser considerados resíduos, desde que cumpram determinadas condições;
- A implementação de um sistema de registo eletrónico para monitorizar a gestão de resíduos;
- A criação de um regime de contraordenações ambientais, com definição das entidades fiscalizadoras.

A nova Diretiva Quadro Resíduos, transposta pelo RGGR, dispõe que os Estados Membros deverão monitorizar e avaliar o impacto da execução das suas medidas em matéria de reutilização efetuando a sua medição com base na metodologia comum estabelecida na decisão de execução (UE) 2021/19, de 18 de dezembro. Os dados obtidos devem ser apresentados anualmente à Comissão, para as categorias de produtos (têxteis, equipamentos elétricos e eletrónicos, mobiliário e materiais e produtos de construção) e de acordo com modelo de relatório definidos na referida decisão de execução (APA, 2021).

Além disso, a nova legislação objetiva em 2025, reduzir em 5% a quantidade de resíduos não urbanos por unidade de produto interno bruto (PIB), em particular no setor de construção civil e obras públicas, face aos valores de 2018, e em 2030, reduzir em 10% a quantidade de resíduos não urbanos por unidade de PIB, em particular no setor de construção civil e obras públicas, face aos valores de 2018.

## **2.5. UTILIZAÇÃO DE REJUVENESCEDOR EM MISTURAS RECICLADAS**

Durante a vida útil dos pavimentos, a camada de desgaste degrada-se gradualmente e perde a sua funcionalidade. Para reabilitar o pavimento, as camadas que já não têm utilidade devem ser removidas e substituídas por novas. Neste sentido, a reutilização de pavimento fresado torna-se uma prática viável e sustentável. Porém, devido ao longo período de serviço, o ligante presente neste tipo de material encontra-se altamente oxidado e conseqüentemente o rácio de maltenos/asfaltenos em níveis muito baixos (Zang *et al.*, 2019).

Quanto maior a percentagem de material fresado numa nova mistura betuminosa, maior será o benefício em termos ambientais e económicos. Porém, nem sempre é viável a utilização de uma grande quantidade, pois poderá afetar negativamente o seu comportamento mecânico (Mogawer, 2016).

O uso de rejuvenescedores pode ser uma excelente opção para prolongar a vida útil do asfalto recuperado. No entanto, é importante entender que o rejuvenescimento é apenas uma parte de um processo mais amplo de conservação de pavimentos rodoviários.

Os agentes rejuvenescedores são fabricados a partir de diversas matérias-primas, oferecendo uma ampla variedade de produtos, tais como óleos vegetais, óleos derivados de resíduos, produtos de engenharia e óleos básicos refinados, entre outros. De acordo com o *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), há várias categorias de agentes rejuvenescedores disponíveis comercialmente, classificados em cinco grupos distintos (conforme apresentado na Tabela 1).

Os agentes rejuvenescedores, também conhecidos como agentes de reciclagem, rejuvenescedores ou agentes de recuperação, são formulados com características químicas e físicas específicas, visando a restauração das propriedades químicas, reológicas e de desempenho do ligante que são afetadas ao longo do tempo devido ao processo de envelhecimento. O papel desses agentes é revitalizar o ligante, restabelecendo as suas características originais e melhorando a sua eficiência e funcionalidade (Almeida Júnior, 2022).

A utilização de rejuvenescedores tem como objetivo devolver ou aproximar o comportamento da mistura reciclada ao da sua mistura original ou de outra mistura produzida com materiais virgens. Normalmente, os rejuvenescedores possuem um alto teor de maltenos e melhoram a suscetibilidade térmica bem como de endurecimento das misturas.

Tabela 1 - Tipos comuns de agentes rejuvenescedores (Arámbula-Mercado *et al.*, 2018)

<b>Categoria</b>	<b>Tipos</b>	<b>Descrição</b>
<i>Paraffinic Oils</i> (óleos parafínicos)	Resíduo de óleo de motor (WEO) Resíduo de óleo de motor fundo (WEOB) Valero VP 165 Storbit	Óleos lubrificantes utilizados
<i>Aromatic Extracts</i> (Extratos aromáticos)	Hydrolene Reclamite Cyclogen L Valero 130 <sup>a</sup>	Produtos refinados de petróleo com componentes polares de óleo aromático;
<i>Naphthenic Oils</i> (Óleos naftênicos)	SonneWarmix RJTM Ergon Hyprene	Hidrocarbonetos projetados para modificação de ligantes;
<i>Triglycerides &amp; Fatty Acids</i> (Triglicerídeos e ácidos graxos)	Resíduo de óleo vegetal Resíduo vegetal Graxa Graxa marrom Delta S*	Derivado de óleos vegetais; *Possui outros elementos químicos importantes, além triglicerídeos e ácidos graxos;
<i>Tall Oils</i> (Óleo de pinho)	Sylvaroad RP1000 Hydrogreen	Subprodutos da indústria de papel. Mesma família química de agentes antiderrapantes e emulsificantes líquidos;

No presente estudo, os rejuvenescedores foram escolhidos como uma estratégia para melhorar as propriedades das misturas recicladas, visando aprimorar sua durabilidade e resistência. A utilização desses aditivos foi fundamentada na necessidade de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos para as misturas de pavimentos, especialmente em termos de resistência ao envelhecimento e capacidade de suportar as condições de serviço.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo, será feita uma descrição detalhada dos materiais e métodos, tendo por base as normas que preconizam cada ensaio realizado na condução deste trabalho. Além disso, serão abordados os procedimentos adotados para a obtenção de betume do material fresado e caracterização dos materiais, bem como a formulação das misturas betuminosas através do método Marshall e da sensibilidade à água das misturas. Adicionalmente, serão abordados os ensaios reológicos e ensaios mecânicos realizados para uma análise aprofundada e abrangente das propriedades das misturas betuminosas estudadas.

#### **3.1. MATERIAIS UTILIZADOS**

##### **3.1.1. Material Fresado**

A parte experimental deste trabalho foi realizada com recurso a um conjunto de materiais fornecidos pela empresa Socorpena S.A. Assim, para além dos agregados naturais e dos ligantes virgens, foi também fornecido o material fresado, tendo este sido obtido da fresagem de um pavimento degradado de uma autoestrada na região norte de Portugal. Este material foi retirado exclusivamente da camada de desgaste do pavimento, o que facilita a sua incorporação em novas misturas betuminosas pois é bastante homogêneo. No entanto, para uma adequada formulação da mistura reciclada e para garantir um adequado desempenho da mesma, o primeiro passo do estudo é a caracterização completa do material fresado, como se apresenta neste capítulo. Na Figura 7 pode observar-se uma amostra do material fresado utilizado neste trabalho.



Figura 7 - Amostra do material fresado

Posteriormente, as amostras foram separadas e submetidas a processos de caracterização, como análise granulométrica, determinação da percentagem de betume e caracterização do betume envelhecido.

### **3.1.2. Betume**

A extração do ligante do material fresado (designado por *reclaimed asphalt pavement*, RAP, na nomenclatura anglo-saxónica) foi realizada com recurso a um solvente (tolueno) e uma centrífugadora Rotarex, seguido do método de destilação sob vácuo com o evaporador rotativo. Adicionalmente, serão utilizados betumes da classe 35/50 para as misturas de controlo e 50/70 para as misturas recicladas.

No estudo de rejuvenescimento do ligante envelhecido foram usadas as seguintes numerações e nomenclaturas para os ligantes investigados:

- (1) RAP (betume recuperado do RAP);
- (2) RAP + 50/70;
- (3) RAP + 50/70 + 0,2% Rej;
- (4) RAP + 50/70 + 0,4% Rej;
- (5) RAP + 50/70 + 0,6% Rej.

### **3.1.3. Rejuvenescedor**

Nesta dissertação, empregou-se o rejuvenescedor denominado ITERLENE ACF 2000 GREEN, cuja composição é uma mistura de óleos vegetais. Trata-se de um aditivo capaz de promover o rejuvenescimento das características do betume envelhecido, proveniente do material fresado.

Esse aditivo foi escolhido especificamente para revitalizar o ligante do material fresado, restaurando as suas propriedades originais e permitindo a sua incorporação eficiente no processo de produção de misturas betuminosas recicladas para reabilitação de pavimentos rodoviários.

Além das características anteriormente mencionadas, o rejuvenescedor tem a capacidade de modificar tanto quimicamente quanto fisicamente a estrutura do betume envelhecido. Isso resulta em um betume mais flexível e resiliente, melhorando suas características mecânicas e prolongando sua vida útil.

Adicionalmente, o rejuvenescedor desempenha um papel crucial ao promover a adesão entre o agregado e o betume. Isso aprimora a coesão da mistura asfáltica, resultando em uma pavimentação de melhor qualidade e durabilidade. Também melhora significativamente a trabalhabilidade do material, tornando-o mais fácil de manusear e aplicar durante o processo de pavimentação

Outra característica importante do rejuvenecedor é sua capacidade de reduzir a rigidez das novas misturas betuminosas produzidas com material proveniente de fresagem. Embora essa redução no módulo possa tornar as misturas mais suscetíveis a deformações permanentes, no geral, essa flexibilidade adicional pode contribuir para pavimentos mais resilientes e duráveis.

### **3.2. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS LABORATORIAIS**

#### **3.2.1. Obtenção de amostra representativa do material fresado**

Para realizar os ensaios de caracterização das amostras betuminosas após receber o material fresado, foi essencial obter uma amostra representativa do material coletado. Assim, dividiu-se a amostra em pequenas porções utilizando método de esquartelamento (Figura 8).



Figura 8 - Seleção da amostra representativa do material fresado.

Em seguida, selecionou-se algumas porções menores da amostra que representem de forma mais fiel possível o material fresado original, considerando suas características físicas e visuais, para os vários ensaios de caracterização deste material.

#### **3.2.2. Obtenção do betume contido no material fresado**

A centrífuga Rotarex (Figura 9) foi o primeiro equipamento utilizado na preparação dos betumes para as respectivas caracterizações. Neste equipamento faz-se a extração do betume por solvente. Primeiramente, as amostras do material fresado são pesadas e colocadas num recipiente específico dentro da centrífuga. Em seguida, é adicionado um solvente, que tem a capacidade de dissolver os betumes presentes no material fresado.



Figura 9 - Centrifugadora Rotarex.

Este equipamento realiza a extração de forma contínua e com agitação, garantindo uma boa eficiência na separação do betume dos agregados. Após entrar em contato com o material fresado, o solvente é centrifugado juntamente com o betume e algumas partículas finas de agregado, passando por um sistema de refluxo que permite sua recirculação no processo. Esse ciclo de extração é mantido até que o betume seja completamente removido das amostras de material fresado.

Após a etapa de extração na centrifugadora Rotarex, o próximo passo foi utilizar uma segunda centrifugadora de tubos (RotoFix) de alta velocidade de rotação, capaz de separar a fase líquida (solvente e betume dissolvido) dos elementos sólidos (agregado fino), como se apresenta na Figura 10.

Durante a centrifugação, a força centrífuga age sobre a solução, fazendo com que as partículas mais pesadas oriundas do material fresado, sejam empurradas para o fundo do recipiente do RotoFix, formando uma camada sedimentada. A camada superior, composta pelo solvente e outras partículas mais leves, é cuidadosamente removida e coletada para ser tratada adequadamente.



Figura 10 - Centrifugadora de tubos (RotoFix)

Finalmente, o solvente contendo o betume é submetido a um processo de destilação no evaporador rotativo (Figura 11), em conformidade com a EN 12697-3. Esse equipamento contém um sistema de rotação e aquecimento controlados para garantir a evaporação cuidadosa do solvente, assegurando a recuperação do betume em sua forma mais pura.



Figura 11 - Evaporador Rotativo

O evaporador rotativo funciona de maneira eficiente sob pressão controlada, o que permite ajustar as condições de evaporação de acordo com as necessidades do processo. O solvente é aquecido gradualmente, e a rotação do equipamento garante que o líquido seja espalhado numa camada fina nas paredes internas do evaporador. Esse processo aumenta significativamente a área de superfície de contato entre o solvente e o ar, acelerando a evaporação do solvente.

O ensaio foi executado diversas vezes até se obtivesse a quantidade de betume suficiente para realização de todos os ensaios pretendidos.

### **3.2.3. Preparação das misturas betuminosas**

Após a realização de todos os procedimentos que visaram a extração e recuperação do ligante contido no material fresado, foram produzidas amostras para a realização dos ensaios físicos e reológicos, a fim de avaliar as suas propriedades e desempenho.

Inicialmente, procedeu-se à análise da formulação da mistura com base na granulometria, examinando os diversos materiais empregados e as quantidades consideradas para a produção da mesma.

Subsequentemente, foi feito um ajuste da fórmula AC20 bin da mistura convencional para que posteriormente se procedesse à réplica da sua curva granulométrica, utilizando a mesma percentagem de betume, para que as misturas convencional e reciclada pudessem ser comparáveis. Isso resultou na obtenção de uma curva granulométrica que se encontra dentro dos parâmetros especificados no caderno de encargos para esse tipo de mistura, como se verifica através da análise da Figura 12.

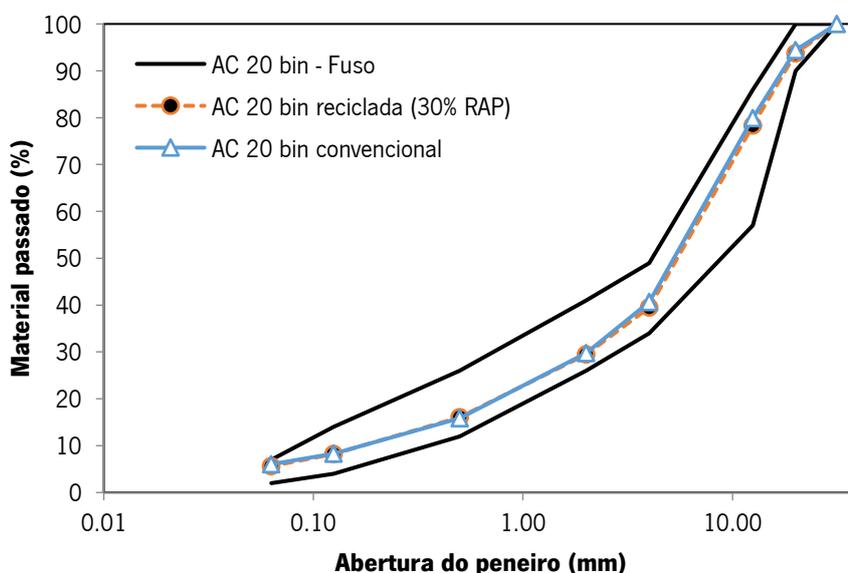


Figura 12 - Gráfico de conformidade granulométrica aos limites de uma mistura AC20 bin

O objetivo principal foi assegurar que as curvas granulométricas da mistura reciclada e da mistura convencional fossem o mais semelhantes possível. Dessa forma, assegura-se a substituição de uma mistura convencional por uma mistura reciclada, mantendo a granulometria compatível com as especificações estabelecidas. Observando o gráfico, é perceptível que existem duas curvas quase sobrepostas uma à outra, a convencional e a reciclada, ou seja, em termos granulométricos as misturas são equivalentes.

Na Tabela 2 apresenta-se a fórmula da mistura convencional AC20 normalmente utilizada na produção de misturas betuminosas para camadas de ligação.

Tabela 2 - Fórmula para mistura AC20 convencional

<b>Material</b>	<b>Quantidade (kg)</b>
Brita 2 - 11/22	172
Brita 1 - 4/14	363
Pó de pedra - 0/4	401
Filer comercial	19
Betume 35/50	45
<b>MISTURA AC20 Convencional</b>	<b>1000</b>

De maneira a obter uma composição idêntica da mistura reciclada, tomou-se como base a percentagem de betume do RAP e chegou-se à fórmula por tonelada de mistura. O rejuvenescimento do betume foi feito com uma determinada percentagem de aditivo rejuvenescedor em função da massa de material fresado na mistura final e com a adição de um betume virgem do tipo 50/70. Assim, a composição utilizada para produzir a mistura AC20 com 30% RAP e betume 50/70 com a adição do rejuvenescedor foi a apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Fórmula para mistura AC20 com 30% RAP

<b>Material</b>	<b>Quantidade (kg)</b>
Brita 2 - 11/22	182
Brita 1 - 4/14	287
Pó de pedra - 0/4	181
Filer comercial	19
Fresado (RAP)	300
Betume 50/70 + rejuvenescedor	31
<b>MISTURA AC20 Reciclada (30% RAP)</b>	<b>1000</b>

### 3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO

#### 3.3.1. Caracterização Granulométrica

Para se obter informações sobre como as partículas de um agregado se distribuem em termos de tamanho, é necessário realizar um ensaio chamado análise granulométrica seguindo o preconizado pela norma EN 933-1:2012. Nesse ensaio, o agregado é peneirado através de uma série de peneiros padronizados, cada um com uma abertura de malha específica. O objetivo desse ensaio é entender a distribuição granulométrica do agregado e representá-la por meio de uma curva, o que possibilita a verificação da adequação das suas características físicas ao tipo de mistura betuminosa pretendida.

A Figura 13 mostra a composição do material fresado, separado pelas diversas frações, após a obtenção de uma amostra representativa. Depois disso, o material foi introduzido numa mufla para incineração do betume e voltou a realizar-se a análise granulométrica apenas aos agregados, como se apresenta na Figura 14. Os resultados deste ensaio são apresentados no Capítulo 4.



Figura 13 - RAP após ensaio de granulometria



Figura 14 - Amostras após ensaio de teor de betume e ensaio de granulometria

### 3.3.2. Percentagem de betume

A percentagem de ligante presente no material fresado é um dos parâmetros mais influentes na formulação de uma mistura reciclada. Ao determinar com precisão a quantidade de betume no material fresado, pode-se calcular com mais rigor a quantidade necessária de betume novo a adicionar (Fonseca et. al, 2013).

Este ensaio utiliza uma técnica de extração que depende do calor para remover o ligante da amostra. Nesse procedimento, a amostra é submetida a uma combustão por convecção, geralmente numa mufla. Algumas muflas possuem um dispositivo interno para medição de massa, o que facilita o acompanhamento do processo de queima. Além disso, é fundamental que a mufla possua um sistema de exaustão para minimizar a emissão de fumos e evitar a dispersão de odores desagradáveis no laboratório, garantindo a segurança e a saúde do operador (Leal, 2020).

Como referido, a análise da percentagem de betume presente na amostra foi realizada por meio da incineração em mufla seguindo as normas estabelecidas pela EN 12697-39:2004. Assim, o processo iniciou-se por aferir a massa do conjunto formado pela cesta e bandeja. Em seguida, foram selecionadas amostras de material fresado de aproximadamente 2000 g cada e adicionadas ao conjunto cesta-bandeja.

Após essa etapa, o conjunto com a amostra foi novamente pesado e submetido à queima do ligante betuminoso na câmara da mufla, tendo o cuidado de evitar o contato da bandeja com as laterais da câmara (Figura 15). Para esse processo, foi definida uma temperatura de 540°C, conforme preconiza a norma, seguindo a taxa de crescimento previamente definida no equipamento.



Figura 15 - Mufla utilizada para determinação da percentagem de betume

Depois de arrefecida, a amostra é retirada da estufa pesada novamente. A diferença entre o peso inicial e o peso final da amostra é usada para determinar a quantidade de betume presente no material fresado. Esse valor é depois expresso como uma percentagem do peso total da mistura.

### **3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE BETUMES**

Os betumes utilizados neste trabalho foram caracterizados de acordo com um conjunto de ensaios padronizados para aferição das suas características básicas e reológicas, como se apresenta de seguida.

### 3.4.1. Temperatura de amolecimento

O ensaio de anel e bola, preconizado pela norma EN 1427:2015, mede o ponto de amolecimento que é uma medida empírica determinada pela menor temperatura a partir da qual o betume possui uma determinada consistência, podendo originar deformações permanentes no pavimento.

Neste ensaio, duas bolas de aço com peso e dimensões especificadas são posicionadas no centro de um anel metálico padronizado, cada. O conjunto é colocado dentro de um gobelé contendo água a uma temperatura reduzida.

A água contida no gobelé é aquecida a uma taxa controlada a fim de provocar o amolecimento do ligante betuminoso. Ao amolecer, o ligante deixa de suportar o peso da bola, fazendo com que a mesma se desloque para o fundo do gobelé e anota-se a temperatura à qual a esfera toca a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio (Figura 16).

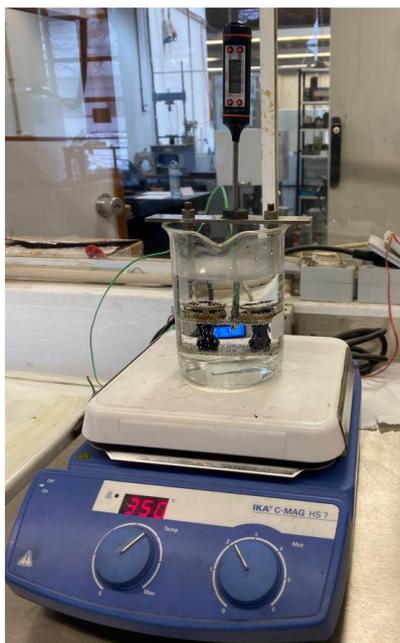


Figura 16 - Equipamento utilizado no ensaio de “Anel e bola”

O ensaio é realizado com um conjunto de dois anéis preenchidos com betume e duas esferas. Caso a diferença de temperatura entre as duas amostras exceda 2°C, o ensaio deve ser repetido.

### 3.4.2. Penetração de betumes

O ensaio de penetração em ligantes betuminosos, preconizado pela norma EN 1426:2015, é um método utilizado para avaliar a consistência dos betumes às temperaturas normais de serviço. Ele consiste na penetração de uma agulha padronizada numa amostra de betume, sob determinadas condições de

temperatura e tempo. O resultado obtido é expresso em décimas de milímetro (0,1 mm), e é utilizado para classificar o betume de acordo com sua dureza.

Tabela 4 - Condições de ensaio para determinação da penetração da agulha (EN 1426)

<b>Intervalo de penetração</b>	<b>Condições de ensaio</b>
Pen $\leq$ 330 $\times$ 0,1mm	Temperatura de ensaio, 25 °C Carga aplicada, 100g Duração de aplicação de carga, 5s
Pen $>$ 330 $\times$ 0,1mm	Temperatura de ensaio, 15 °C Carga aplicada, 100g Duração de aplicação de carga, 5s

O procedimento foi realizado para se obter três medidas individuais de penetração, a média é aceita se a diferença entre as medidas desses três valores encontrados não excederem o limite especificado em norma. É observado que quanto menor a penetração da agulha, menor será a consistência do material. A Figura 17 mostra o equipamento utilizado para a realização desse ensaio.



Figura 17 - Aparelho utilizado para realização do ensaio de penetração

### **3.4.3. Viscosidade rotacional**

O ensaio de viscosidade rotacional, preconizado pela norma EN 13702:2018, permite determinar a viscosidade dos ligantes a determinadas temperaturas. Esta propriedade é importante para as análises relacionadas com as operações de bombagem e armazenamento dos ligantes betuminosos, assim como para produção e aplicação das misturas no pavimento. A partir dos dados obtidos neste ensaio é possível obter-se a curva viscosidade-temperatura. Neste ensaio utilizou-se um controlador de temperatura,

juntamente ao viscosímetro rotacional (Figura 18), o qual permitiu fazer a medição do torque necessário para que a haste de prova (*spindle*) rodasse ao ser mergulhado no ligante à temperatura de ensaio sob velocidade constante e uniforme. A rotação obtida determinou uma força necessária para vencer a resistência que a viscosidade do material fluido oferece ao movimento rotacional.



Figura 18 - Viscosímetro rotacional

#### 3.4.4. Reologia

Para uma caracterização mais avançada dos ligantes betuminosos é possível utilizar um reómetro dinâmico de corte (dynamic shear rheometer, DSR), como o apresentado na Figura 19, para medir as suas propriedades reológicas, seguindo o que preconiza a norma EN 14770:2012. Segundo Shiroma (2012), estes são aparelhos que possibilitam a escolha de análise através de diferentes métodos (tensão ou extensão controlada), a realização de ensaios dinâmicos oscilatórios e que permitem a obtenção de várias medidas num único ensaio.



Figura 19 - Reómetro dinâmico de corte

Os parâmetros mais comuns que se obtêm através desse equipamento são o módulo complexo de corte ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados. O reómetro possui alta sensibilidade, alto controlo da temperatura e extensão, obtendo assim resultados com uma grande precisão.

### **3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS**

#### **3.5.1. Estudo de Formulação de Misturas Betuminosas**

A formulação das misturas betuminosas utilizadas neste trabalho baseou-se no Método de Marshall, uma abordagem amplamente empregada para o desenvolvimento de misturas betuminosas. Este método, concebido na década de 1930 pelo engenheiro americano Bruce Marshall, baseia-se na compactação de provetes cilíndricos com dimensões especificadas, que são posteriormente submetidos a ensaios de resistência à compressão.

Em Portugal, é prática comum empregar o Método de Marshall para formular misturas asfálticas convencionais. As diretrizes da norma NP EN 13108-1 baseiam-se em uma abordagem empírica, considerando parâmetros de composição e requisitos para os materiais constituintes, complementados por ensaios relacionados ao desempenho.

A formulação das misturas envolve cinco percentagens distintas de betume, com variações de 0,5% em torno de uma percentagem ótima de betume previamente determinada. As frações de agregados são doseadas ponderalmente, secas e aquecidas em estufa à temperatura desejada, enquanto o betume é aquecido para facilitar a mistura. Os materiais constituintes são combinados em uma misturadora elétrica, conforme as diretrizes da norma EN 12697-35.

Os provetes são compactados, arrefecidos e desmoldados. Antes de iniciar os ensaios, é necessário esperar pelo menos 4 horas após a desmoldagem. As alturas dos provetes são medidas de acordo com a EN 12697-29 (Duarte, 2010). Em seguida determinam-se os valores de algumas variáveis. Umas consistem em parâmetros volumétricos (baridade, porosidade e VMA) e outras são obtidas através do ensaio (mecânico) de compressão Marshall.

Apesar disso, neste trabalho procurou replicar-se uma composição da mistura reciclada que se aproximasse o máximo possível da mistura convencional. Assim, a percentagem de betume utilizada não foi determinada com base no estudo completo de Marshall, mas sim na percentagem de betume da

mistura convencional utilizada para controlo. Deste modo, o ensaio de Marshall foi apenas utilizado para comparação dos resultados de estabilidade e deformação na rotura de ambas as misturas estudadas.

### **3.5.2. Sensibilidade à água de misturas betuminosas**

A avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas é crucial para aferir a durabilidade de misturas betuminosas usadas nos pavimentos flexíveis. A água pode causar a perda de ligação entre o agregado e o betume, resultando na redução da coesão e resistência do material (Nunes, 2010). O método mais comumente utilizado, conforme a norma europeia EN 12697-12, baseia-se na resistência à tração indireta por compressão diametral, conhecido como método A (Batista *et al.*, 2008).

Para este estudo, preparou-se uma mistura betuminosa com a percentagem de betume otimizada e compactaram-se seis provetes cilíndricos semelhantes aos utilizados no método de Marshall. Foram testados dois conjuntos de provetes, diferindo nas condições de condicionamento antes dos ensaios de resistência, de acordo com a norma EN 12697-12. A compactação foi realizada utilizando um compactador de impacto para alcançar a baridade desejada.

Antes do ensaio de compressão diametral, os provetes foram acondicionados durante um tempo e temperatura definidos, dependendo do grupo em que se inserem. A divisão dos provetes em grupos resulta nos seguintes conjuntos:

- O primeiro grupo, denominado por grupo de provetes “a seco”, é acondicionado ao ar a uma temperatura de  $20 \pm 5$  °C, sobre o qual se determina posteriormente o parâmetro ITS<sub>d</sub>;
- O segundo grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “imersos”, é submetido a um condicionamento em água durante um determinado período de tempo, sobre o qual se determina posteriormente o parâmetro ITS<sub>w</sub>.

De acordo com a norma EN 12697-29, a avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas envolve a medição de quatro alturas (h) e seis diâmetros ( $\emptyset$ ) dos provetes. No condicionamento em pressão negativa, os provetes são submersos em água destilada a  $20 \pm 5$  °C após uma submersão inicial de  $10 \pm 1$  minutos, sob uma pressão negativa de  $6,7 \pm 0,3$  kPa durante  $30 \pm 5$  minutos. Em seguida, a pressão é gradualmente reduzida à pressão atmosférica (aproximadamente 100 kPa) antes de medir a variação de volume dos provetes.

Os provetes do grupo "imersos" são posteriormente acondicionados em um banho de água a  $40 \pm 1^\circ\text{C}$  por 68 a 72 horas. Após esse período, os provetes são ajustados à temperatura de ensaio desejada, seguido por um período de pelo menos 2 horas de acondicionamento.

Após esse acondicionamento, o ensaio de tração indireta é realizado na prensa universal, aplicando uma força que submete os provetes à compressão diametral de acordo com a norma EN 12697-23. A resistência à tração indireta é calculada com base nas cargas máximas dos provetes, resultando numa resistência média para cada grupo.

Posteriormente, calcula-se o índice de resistência conservada em tração indireta (ITSR), a fim de comparar a resistência média dos provetes "imersos" com a dos provetes acondicionados ao ar, à temperatura de ensaio, conforme a norma EN 12697-12.

### **3.5.3. Resistência à deformação permanente**

O ensaio de pista, internacionalmente conhecido como *wheel tracking*, é empregue globalmente para avaliar a capacidade de misturas betuminosas de resistir à deformação permanente causada pela ação dos pneus dos veículos. Realizado sob temperaturas elevadas, este ensaio simula as condições de tráfego veicular, aplicando cargas rolantes sobre o material. Diversas entidades desenvolveram diferentes equipamentos para conduzir esse ensaio, variando em aspetos como o tipo de roda, frequência de movimento, velocidade da roda, pressão exercida sobre o material, entre outros, embora todos compartilhem o princípio de aplicação de cargas rolantes simulando o tráfego veicular (Capitão, 2003).

O ensaio de pista está normalizado pela EN 12697-22, na qual são mencionados três equipamentos para a execução deste ensaio: o equipamento de pequenas dimensões, o de grandes dimensões e o extra grande. Em todos os tipos de equipamento o objetivo baseia-se em avaliar a profundidade da deformação atingida a partir das passagens repetidas de uma roda, a temperatura constante.

Para a realização do ensaio com o equipamento pequeno, a norma recomenda a preparação de 2 provetes (lajetas), com um comprimento mínimo de lado medindo 305 mm. A altura do provete, com um valor máximo de 80 mm, varia consoante a dimensão máxima dos agregados da mistura. O número de provetes a efetuar depende do equipamento utilizado. O modo de produção de mistura é idêntico ao referido para os provetes cilíndricos, mas as lajes são moldadas num molde próprio com as dimensões pretendidas.

A compactação foi realizada de acordo com a EN 12697-33, utilizando um dos métodos de compactação indicados na norma, por exemplo através de um rolo metálico liso (Figura 20). De modo a ser iniciado o ensaio, as lajetas foram previamente acondicionadas à temperatura de ensaio, a qual varia entre 40 °C e 60 °C, no interior da câmara do próprio equipamento por um período de 4 a 24 horas.



Figura 20 - Equipamentos de compactação de lajetas de mistura betuminosa

Após a colocação da laje no equipamento, é iniciada a aplicação de cargas através da roda do equipamento para este procedimento, que ocorre durante 10000 ciclos, correspondendo cada ciclo a duas passagens da roda. A norma de ensaio EN 12697-22 recomenda a aplicação de uma carga de cerca de 700 N ao provete, o que equivale, a uma tensão de contacto da roda de, aproximadamente, 700 kPa.



Figura 21 - Equipamento de ensaio de pista (*wheel tracking*)

O próprio equipamento, através do software de controlo, regista leituras de deformações em cada ciclo, permitindo graficamente obter como resultado uma curva que relaciona o tempo de ensaio (ciclos) com a deformação do provete.

Segundo Gardete (2006), é possível distinguir três fases na curva resultante:

- Fase 1: Que resulta numa variação rápida e acentuada da inclinação da curva, nesta fase verifica-se alguma densificação da mistura devido à ação da roda;
- Fase 2: A velocidade de deformação é inferior à da fase 1 e toma um valor constante. Nesta fase a curva de deformação é quase linear, pelo que a velocidade de deformação obtida nesta fase é usualmente o indicador utilizado para a caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente;
- Fase 3: Nesta fase a velocidade de deformação cresce rapidamente sofrendo o provete deformações apreciáveis. Esta fase é associada à rotura do provete.

A análise dos valores resultantes deste ensaio permite a determinação de vários parâmetros, os quais avaliam a resistência da mistura betuminosa à deformação permanente. Os parâmetros medidos são a percentagem de profundidade média da rodeira ( $PRD_{AIR}$  - *Proportional Ruth Depth in air*), expressa em mm, e o valor da taxa de deformação média ( $WTS_{AIR}$  - *Wheel Tracking Slope*), expressa em mm/10<sup>3</sup> ciclos. Em termos numéricos, a percentagem de profundidade média da rodeira,  $PRD_{AIR}$  é calculada através de uma média da percentagem de profundidade média da rodeira de cada conjunto de duas lajes.

#### **3.5.4. Módulo de Rigidez**

O ensaio de módulo de rigidez de misturas betuminosas, obtido através do ensaio de flexão em 4 pontos, foi realizado de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma EN 12697-26.

Durante a realização do ensaio, uma amostra da mistura betuminosa é submetida a cargas repetitivas em condições de flexão. O equipamento utilizado consiste num suporte que mantém o provete (a amostra da mistura betuminosa) fixo nas extremidades e dois pontos de carregamento na zona central (Figura 22). Durante o ensaio, o provete é submetido a ciclos de carregamento sinusoidais repetidos, nos quais a flexão é aplicada de forma controlada (na maior parte dos casos, em extensão controlada).

Os pontos de carga criam uma flexão no provete, com o objetivo de avaliar como o material responde a essas cargas repetitivas. O ensaio regista dados relacionados à deformação e ao carregamento, permitindo a análise das propriedades de módulo de rigidez da mistura betuminosa. Esta propriedade é

de fundamental importância para entender o desempenho da mistura em condições reais de serviço, onde ela está sujeita a cargas de tráfego repetitivas.

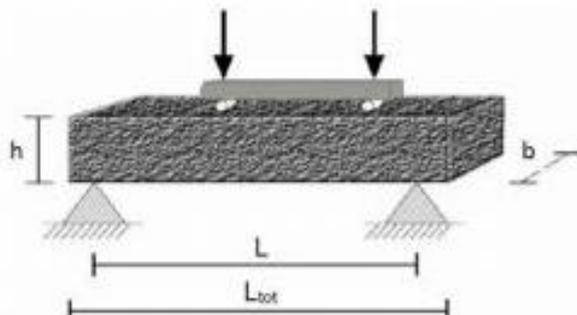


Figura 22 - Ensaio de flexão em 4 pontos (Afonso, 2015)

Com base nos dados de carga e deformação obtidos durante o ensaio, é possível calcular o módulo de rigidez da mistura betuminosa, bem como o seu ângulo de fase.

### 3.5.5. Resistência à fadiga por flexão a 4 pontos

O ensaio de fadiga por flexão a 4 pontos é um ensaio mecânico utilizado para avaliar a resistência à fadiga de materiais sob cargas repetitivas na forma de flexão.

Seguindo a norma EN 12697-24, esse teste é realizado em provetes submetidos a ciclos de carregamento até que ocorra a ruptura dos mesmos. Além disso, essa norma estabelece diversos métodos para avaliar a resistência à fadiga de misturas asfálticas, por meio de ensaios como flexão, tração direta e tração indireta. Nesses testes utilizam amostras compactadas de material betuminoso e cargas sinusoidais ou controladas.

O principal objetivo é classificar as misturas asfálticas com base na sua resistência à fadiga, fornecer orientações para avaliar o desempenho das misturas nas estradas e obter dados para estimar o comportamento estrutural dos pavimentos, seguindo as especificações aplicáveis.

A importância da realização desse ensaio dá-se pelo facto de que no processo de dimensionamento de um pavimento é de fundamental importância a verificação dos critérios de ruína. Uma das principais causas de ruínas em pavimentos se dá através do fendilhamento por fadiga, processo esse que pode ser mensurado pela simulação da tensão e deformação ocasionada pelas cargas oriundas do tráfego.

Os principais fatores a se levar em consideração quando se analisa a fadiga de misturas betuminosas são a percentagem de betume e a porosidade da mistura. De forma resumida, quanto maior for a

percentagem de betume e quanto menor a quantidade de vazios, maior será a capacidade da mistura em resistir à fadiga.

Neste trabalho, os ensaios de fadiga realizaram-se com recurso a um equipamento servo-hidráulico como se apresenta na Figura 23, que foi também utilizado no ensaio para a determinação do módulo de rigidez.



Figura 23 - Equipamento servo-hidráulico utilizado nos ensaios de flexão a 4 pontos

Devido ao comportamento rígido (menos flexível) do betume envelhecido presente nos materiais fresados, a incorporação de RAP em novas misturas betuminosas normalmente acarreta a um aumento da sua rigidez e conseqüentemente a uma diminuição na sua resistência à fadiga, uma vez que as misturas se tornam mais frágeis. Assim, este ensaio é muito importante para avaliar o desempenho de misturas recicladas, por comparação com o comportamento das misturas convencionais de referência.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos com cada um dos métodos em estudo, bem como a respetiva análise detalhada em cada fase da etapa experimental.

Deste modo, de seguida apresenta-se a caracterização do material fresado e respetivo betume, bem como a caracterização do rejuvenescimento do mesmo com a adição de diferentes percentagens de rejuvenescedor e, posteriormente a caracterização mecânica das misturas produzidas.

### 4.1. PROPRIEDADES DO MATERIAL FRESADO

#### 4.1.1. Caracterização granulométrica

A Figura 24 exibe os resultados gráficos da análise granulométrica realizada com a amostra do material fresado. Adicionalmente, é também demonstrada a distribuição granulométrica das amostras após a extração do ligante asfáltico.

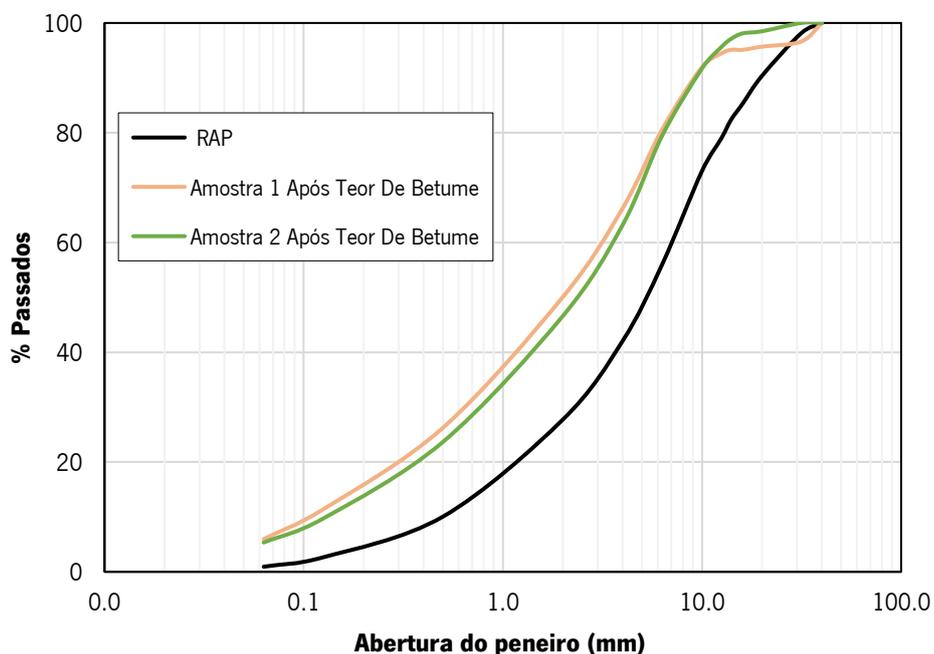


Figura 24 - Distribuição granulométrica do material fresado

Percebe-se que a curva referente à amostra do material fresado possui muito material classificado como grosso (acima de 2 mm) e uma grande escassez de material fino na sua composição, abaixo dos 0,063 mm (0,9%), como resultado da aglomeração de partículas envolvidas pelo betume envelhecido.

No entanto, após o ensaio de percentagem de betume, repetiu-se a análise granulométrica, na qual se nota que após ser retirada a película de betume, a percentagem de finos aumentou de 2,6% para 11,4%.

Essa notável elevação na presença de partículas finas e a subsequente diminuição da proporção de agregados de maior dimensão na amostra, observadas após a remoção do betume, são consequências diretas do processo de separação dos grumos previamente constituídos pelo ligante betuminoso.

Após o ensaio de percentagem de betume, ocorre a desagregação das estruturas coesas, resultando no desprendimento dos agregados, o que acarreta um incremento proporcional na fração de partículas finas. O valor médio da percentagem de passados em cada peneiro das amostras de agregados do RAP foi usado para ajustar a curva granulométrica da mistura reciclada à da mistura convencional, conforme já foi referido.

#### 4.1.2. Percentagem de Betume

Os resultados obtidos para a percentagem de betume das amostras de material fresado são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de percentagem de betume

<b>Propriedade</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
Massa de material fresado (g)	2131,00	1954,00	1981,50
Massa do fresado após extração (g)	2014,50	1842,90	1867,40
Percentagem de Betume (%)	5,32	5,54	5,61
Percentagem de Betume Média (%)	5,49		

Conforme se pode observar na Tabela 5, a percentagem média de betume ainda existente no material fresado é de 5,49%. Este valor é considerado aceitável quando comparado com a percentagem de betume utilizada em misturas aplicadas em camadas de desgaste.

## 4.2. PROPRIEDADES DOS BETUMES

### 4.2.1. Ponto de Amolecimento

O resultado do ensaio realizado para determinar a temperatura de amolecimento das diferentes amostras de betume é apresentado na Tabela 6. Nesta parte do trabalho apresentam-se os resultados do estudo de rejuvenescimento do ligante envelhecido (recuperado do material fresado), através da adição de betume novo da classe de penetração 50/70, e de diferentes percentagens de aditivo rejuvenescedor.

Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de ponto de amolecimento (anel e bola)

Ref. <sup>a</sup> amostra	RAP		RAP + 50/70		RAP + 50/70 + 0,2% Rej		RAP + 50/70 + 0,4% Rej		RAP + 50/70 + 0,6% Rej	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
<b>Proвете</b>	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
<b>Temp. amol. (°C)</b>	66,4	66,3	56,4	56,1	54,7	55,0	53,1	53,1	50,8	51,4
<b>Média</b>	<b>66,4</b>		<b>56,3</b>		<b>54,9</b>		<b>53,1</b>		<b>51,1</b>	

Sendo,

- RAP: Betume recuperado;
- RAP + 50/70: Betume recuperado + betume 50/70;
- RAP + 50/70 + 0,2% Rej: Betume recuperado + betume 50/70 + 0,2% de Rejuvenescedor;
- RAP + 50/70 + 0,4% Rej: Betume recuperado + betume 50/70 + 0,4% de Rejuvenescedor;
- RAP + 50/70 + 0,6% Rej: Betume recuperado + betume 50/70 + 0,6% de Rejuvenescedor.

Os resultados obtidos no ensaio de ponto de amolecimento (Figura 25) permitem observar que quanto maior a percentagem de rejuvenescedor, maior é a redução o ponto de amolecimento da mistura betuminosa. Tal fenómeno fundamenta-se na capacidade intrínseca do rejuvenescedor em restabelecer algumas características originais do betume, tornando-o menos rígido e mais suscetível à deformação plástica em temperaturas de serviço elevadas.

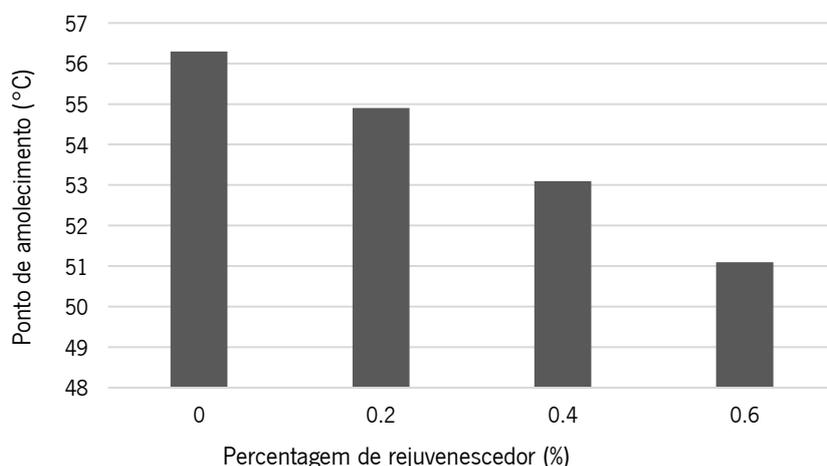


Figura 25 - Variação do ponto de amolecimento com a adição de rejuvenescedor

#### 4.2.2. Penetração de Betume

Os resultados referentes ao ensaio de penetração de betume, realizado às amostras dos mesmos betumes apresentados na secção anterior, encontram-se sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de penetração de betumes

Ref. <sup>a</sup> amostra	RAP	RAP + 50/70	RAP + 50/70 + 0.2% Rej	RAP + 50/70 + 0.4% Rej	RAP + 50/70 + 0.6% Rej
1ª Penetração	9,9	29,4	43,0	44,3	49,7
2ª Penetração	6,9	27,5	35,1	43,7	52,1
3ª Penetração	10,2	26,6	36,0	44,3	49,5
4ª Penetração	11,1	27,0	36,0	44,6	52,7
5ª Penetração	12,2	28,0	31,3	45,1	53,8
<b>Média</b>	<b>10,4</b>	<b>27,0</b>	<b>35,7</b>	<b>44,4</b>	<b>50,4</b>

A análise do gráfico (Figura 26) gerado a partir dos resultados obtidos no ensaio de penetração revela um padrão notável nas cinco amostras. Observou-se uma correlação direta e coerente entre o aumento da percentagem de rejuvenescedor e o aumento correspondente no ensaio de penetração. Conforme a adição do rejuvenescedor foi intensificada, houve um acréscimo perceptível na profundidade de penetração da agulha de ensaio.

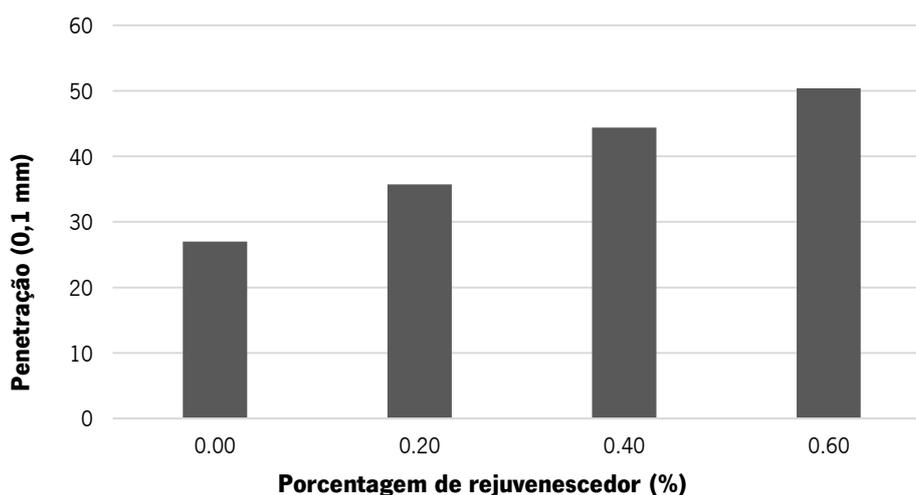


Figura 26 - Variação da penetração com a adição de rejuvenescedor

Tal tendência é explicada pelas modificações na viscosidade do ligante, que contribuem para tornar o material mais maleável e tornando-o mais suscetível à penetração.

Com base nos resultados obtidos é possível verificar que a percentagem de rejuvenescedor necessária para se obter um betume final da mistura reciclada equivalente ao betume virgem da mistura convencional (35/50) será da ordem dos 0,2% a 0,4%.

#### 4.2.3. Viscosidade dinâmica

A viscosidade do betume a temperaturas elevadas é um parâmetro importante para o controlo das condições de produção, aplicação e compactação das misturas betuminosas. A título de exemplo, na

Figura 27 apresenta-se o gráfico de viscosidade de dois dos betumes avaliados: o betume recuperado e o betume produzido com a adição de 30% de betume recuperado, 70 % de betume novo (50/70) e 0,2% de rejuvenescedor.

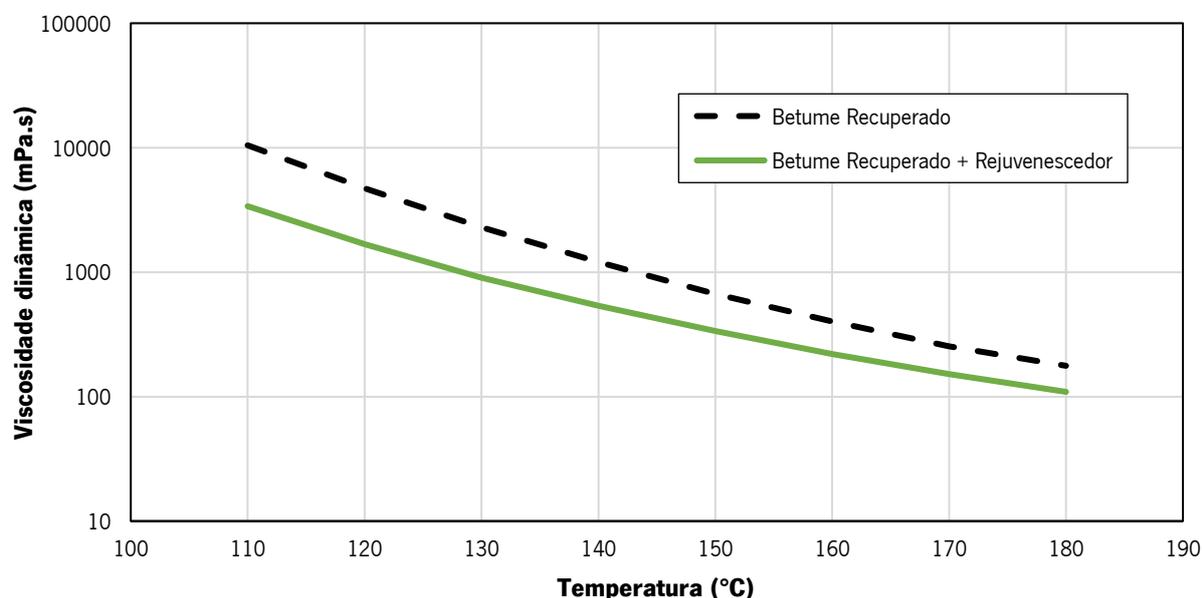


Figura 27 - Resultados de viscosidade do betume recuperado e de um betume rejuvenescido

Onde,

- RAP: Betume Recuperado;
- RAP + Rej: Betume recuperado + 0,2% de Rejuvenescedor.

Ambas as curvas estão relacionadas com a temperatura e é evidente que a curva correspondente ao betume com rejuvenescedor exibe consistentemente valores de viscosidade inferiores em comparação com a curva do betume recuperado, em todas as temperaturas testadas.

Essa diferença de comportamento nas curvas de viscosidade pode ser explicada pelo facto de que o rejuvenescedor é adicionado com o propósito específico de restaurar as propriedades do ligante asfáltico, neste caso diminuindo a viscosidade, que pode ter sido comprometida devido ao envelhecimento do betume. Esse resultado mostra que o aditivo influencia diretamente na diminuição das temperaturas de fabrico, aplicação e compactação das misturas betuminosas.

Portanto, a curva correspondente ao betume recuperado com o rejuvenescedor apresenta valores de viscosidade mais baixos devido à ação positiva do rejuvenescedor e betume 50/70, o que torna a mistura mais adequada para a aplicação em pavimentos. Essa diferença é significativa, pois indica que a adição de rejuvenescedor resulta numa mistura com propriedades reológicas mais desejáveis, promovendo

eficiência no processo de reciclagem e reutilização de materiais betuminosos, bem como melhorias no desempenho do pavimento a ser reparado.

O Viscosímetro de *Brookfield* auxilia na análise da incorporação do rejuvenescedor no ligante na perspectiva do comportamento mecânico do RAP, visto que a viscosidade influencia na trabalhabilidade do ligante. Quanto mais rígido, a adesividade do material nos agregados diminui, diminuindo a aglutinação da mistura. Em suma, o rejuvenescedor reduziu a temperatura de mistura e compactação, auxiliando na economia de energia do aquecimento do ligante.

#### 4.2.4. Módulo complexo de corte

O principal resultado dos ensaios reológicos é apresentado na Figura 28, com a representação da evolução do módulo complexo dos diferentes tipos de betume utilizados neste trabalho. Neste gráfico é possível observar as curvas que representam o comportamento reológico de um betume obtido a partir de material fresado, com a adição de diferentes percentagens de rejuvenescedor. As curvas mostram a relação entre o módulo complexo e a frequência equivalente, fornecendo uma visão abrangente das propriedades reológicas dos betumes estudados numa gama de condições de carregamento mais alargada.

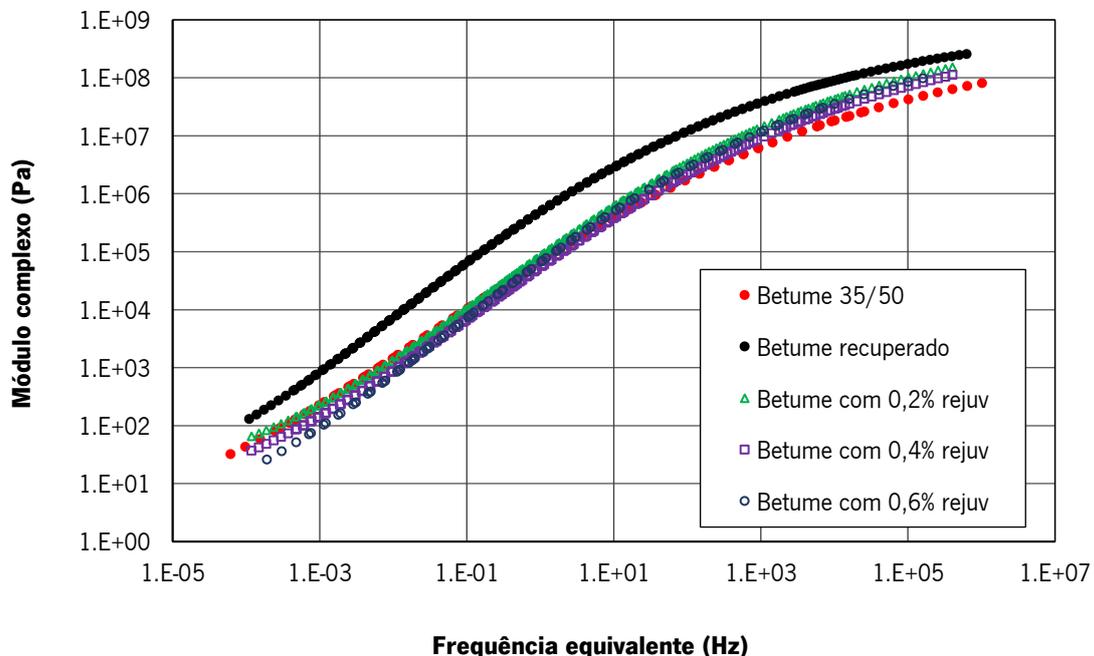


Figura 28 - Resultados do ensaio de reologia

Ao analisar o gráfico, percebe-se que a curva preta, representando o betume recuperado, apresenta características mais rígidas a qualquer frequência de ensaio, ou seja, ele tem valor de módulo complexo mais alto. Este comportamento é indicativo da elevada dureza do betume recuperado, resultante do

processo de envelhecimento. A curva vermelha representa o betume 35/50, que é o betume de referência com as propriedades que se procura obter no ligante final da mistura reciclada.

Nota-se que em temperaturas mais altas/frequências mais baixas, o betume com 0,2% de rejuvenescedor está muito próximo ao betume 35/50, mas em temperaturas mais baixas/frequências mais altas, ele ainda está bastante duro, estando mais próximo do betume recuperado do que do betume 35/50 de referência.

Se analisarmos a curva referente ao betume com 0,4% de rejuvenescedor, vemos que em temperaturas mais altas/frequências mais baixas, a sua curva está abaixo da curva de 35/50, e em temperaturas mais baixas/frequências mais altas, apresenta valores acima da curva de 35/50, porém estando já mais abaixo do que a de 0,2%.

Tendo em consideração os resultados dos vários ensaios de caracterização de betumes, a percentagem de rejuvenescedor que origina um betume final mais próximo de um betume do tipo 35/50 estaria compreendida entre os 0,2% e os 0,4%. Deste modo, as misturas betuminosas recicladas foram produzidas numa primeira fase com uma percentagem de rejuvenescedor da ordem dos 0,3%.

### **4.3. CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS BETUMINOSAS**

#### **4.3.1. Estabilidade Marshall**

No âmbito deste trabalho, foram produzidas amostras representativas das misturas betuminosas em estudo, nomeadamente, a mistura convencional com agregados naturais e betume 35/50 e a mistura reciclada com 30% de material fresado e utilizando um betume novo do tipo 50/70 com 0,3% de rejuvenescedor. Adicionalmente, foram avaliados os resultados para amostras com a incorporação de 0,25% de rejuvenescedor, de modo a avaliar a possibilidade de reduzir o impacto ambiental da utilização deste tipo de produto químico, bem como o custo acrescido do mesmo. As amostras de mistura foram posteriormente compactadas em provetes cilíndricos, seguindo rigorosamente os procedimentos padronizados estabelecidos pelo ensaio de Marshall.

Após a preparação dos provetes, os mesmos foram submetidos a um ensaio de carga axial empregando uma máquina de ensaio de Marshall devidamente calibrada. Durante o processo de ensaio, foram meticulosamente registados dois parâmetros críticos: a estabilidade, que quantifica a resistência da mistura à deformação, representando a força exigida para provocar a rotura do provete; e a deformação, que fornece uma medida precisa da quantidade de deformação que ocorreu no provete durante a

aplicação da carga até à rotura. Na Tabela 8 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de Marshall realizado a provetes da mistura convencional e da mistura reciclada com 0,3% e 0,25% de rejuvenescedor.

Tabela 8 - Resultados obtidos no ensaio de Marshall para as misturas em estudo

Mistura	Ref.	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força máx. (kN)	Estabilidade (kN)	Def. corrigida média (mm)
Convencional	C1	102,0	62,8	20,9		
	C2	102,0	62,5	17,7	19,5	4,0
	C3	102,0	62,5	19,9		
Reciclada + 0,3% Rej	I1	102,0	62,2	18,3		
	I2	102,0	63,0	18,4	17,5	3,8
	I3	102,0	62,4	15,7		
Reciclada + 0,25% Rej	I4	102,0	62,9	17,9		
	I5	102,0	63,4	17,5	17,6	4,0
	I6	102,0	62,5	17,5		

Ao analisar os resultados do ensaio com uma percentagem inicial de rejuvenescedor de 0,3%, é possível observar que a estabilidade Marshall foi inferior à da mistura convencional, indicando uma menor resistência. Diante dessa constatação, avaliou-se a possibilidade de reduzir ainda mais a quantidade de rejuvenescedor, ajustando-a para 0,25%.

No entanto, mesmo com essa redução adicional, observou-se que o valor de estabilidade não sofreu uma alteração substancial, o que deixa implícito que é possível reduzir a percentagem de rejuvenescedor sem que isso origine uma maior fragilidade da mistura, devida à dureza do betume final.

Assim, após os primeiros ensaios da mistura reciclada, chegou-se à conclusão de que a mistura poderia ser produzida com a incorporação de 0,25% de rejuvenescedor, o que também resulta em vantagens económicas.

#### 4.3.2. Sensibilidade à água

Para aferir se a redução da percentagem de rejuvenescedor poderia afetar os resultados de durabilidade da mistura reciclada, optou-se por estudar a resistência conservada no ensaio de sensibilidade à água de misturas recicladas produzidas com as duas percentagens de rejuvenescedor (0,3% e 0,25%), comparando-as com o comportamento da mistura convencional.

A Figura 29 apresenta os provetes ensaiados de cada uma das misturas, onde se pode observar que o tipo de rotura das três misturas em análise foi muito semelhante entre si.



Figura 29 - Provetes utilizados no ensaio de sensibilidade à água

Os resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água para a mistura convencional e para as misturas recicladas com 0,3% e 0,25% apresentam-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura convencional e das misturas recicladas com 0,3% e 0,25% de rejuvenecedor

Grupo	Ref.	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força máx. (kN)	Def. de pico (mm)	Def. média (mm)	ITS (kPa)	ITS média (kPa)	ITSR
<b>Conv. secos</b>	c3	102,0	62,7	29,4	2,5		2923		84%
	c5	102,0	61,3	27,9	2,3	2,3	2845	2672	
	c7	102,0	63,0	25,2	2,1		2498		
<b>Conv. imersos</b>	c1w	102,0	61,8	23,1	2,7		2337		
	c2w	102,0	62,5	22,5	2,6	2,6	2248	2327	
	c9w	102,0	62,6	24,0	2,5		2395		
<b>Rec. 0,3% secos</b>	l2	102,0	62,5	25,4	2,8		2535		95%
	l5	102,0	62,8	25,3	2,7	2,6	2516	2574	
	l8	102,0	62,5	26,8	2,4		2672		
<b>Rec. 0,3% imersos</b>	l4w	102,0	62,0	23,6	2,3		2372		
	l6w	102,0	61,9	26,5	2,6	2,3	2672	2452	
	l9w	102,0	63,7	23,6	2,2		2311		
<b>Rec. 0,25% secos</b>	l22	102,0	62,4	27,0	2,8		2698		83%
	l24	102,0	63,6	30,6	2,2	2,6	3005	2760	
	l27	102,0	63,6	26,3	3,0		2577		
<b>Rec. 0,25% imersos</b>	l21w	102,0	62,3	23,4	2,4		2340		
	l29w	102,0	63,5	23,3	2,2	2,4	2291	2303	
	l23w	102,0	63,7	23,3	2,7		2277		

A avaliação da sensibilidade à água por meio da razão de resistência à tração indireta (ITSR), juntamente com as resistências dos provetes secos (ITSd) e dos provetes imersos (ITSw) permite comparar o desempenho das misturas em estudo.

Com base nos resultados de ITSR é possível concluir que a redução da quantidade de rejuvenescedor de 0,3% para 0,25% tem um efeito negativo na resistência conservada. No entanto, por comparação com os resultados obtidos para a mistura convencional, verifica-se que o desempenho da mistura reciclada com 0,25% de aditivo apresenta valores idênticos. Adicionalmente, verifica-se que os valores de ITSd e ITSw da mistura reciclada com 0,25% de rejuvenescedor são também bastante próximos da mistura convencional. Assim, ponderando a poupança ambiental e económica que essa redução permite obter e o desempenho dessa mistura por comparação com a mistura de referência, optou-se por prosseguir o trabalho relativo aos ensaios de desempenho mecânico da mistura reciclada com a dosagem de 0,25% de aditivo rejuvenescedor.

#### 4.3.3. Resistência à deformação permanente

Os resultados do ensaio de deformação permanente (*Wheel Tracking Test*) para duas formulações de misturas betuminosas em análise apresentam-se na Figura 30, na qual uma curva corresponde à mistura convencional, e outra curva representa a mistura reciclada com a adição de 0,25% de rejuvenescedor.

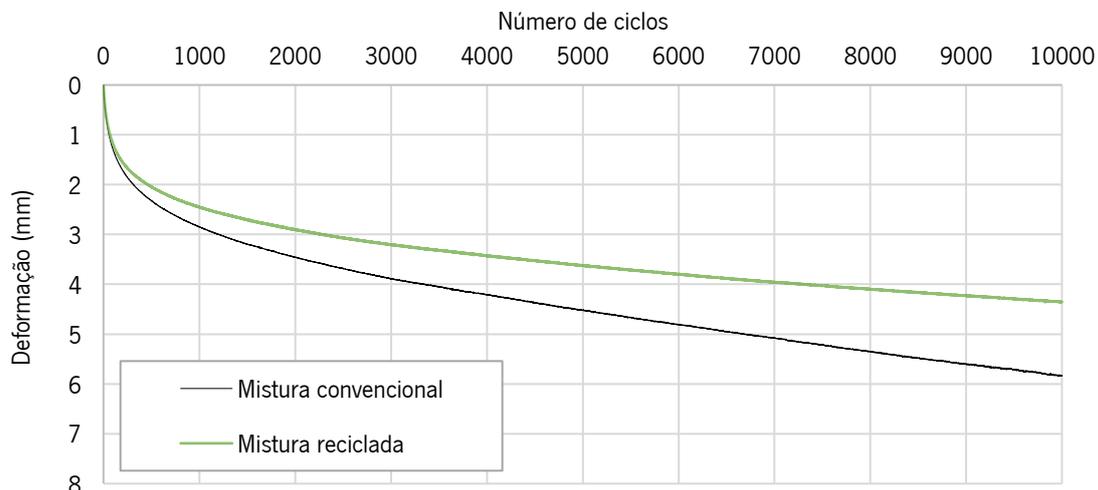


Figura 30 - Resultados do Ensaio de Pista

Os resultados da análise das curvas obtidas a partir do ensaio de deformação permanente revelam a existência de uma similaridade entre os comportamentos das misturas estudadas. Notavelmente, a mistura reciclada demonstra um desempenho ligeiramente superior em relação à mistura convencional.

Essa observação confirma o bom desempenho das misturas recicladas ao nível da sua resistência à deformação permanente quando comparadas com as misturas convencionais.

Ao analisar o gráfico, é evidente que a curva que representa a mistura convencional, apresenta valores de deformação superiores em comparação com a curva que corresponde à mistura com a inclusão de rejuvenescedor. Essa diferença de comportamento nas curvas pode ser atribuída a diversos fatores influenciados pela ação do rejuvenescedor e pela maior rigidez do betume envelhecido.

A mistura acrescida do rejuvenescedor possui uma melhor ligação entre o betume e os agregados que, associada à maior rigidez do betume do material fresado, origina um melhor desempenho mecânico da mistura, tornando-a mais resistente à deformação permanente e mais durável. Essa diferença substancial realça a vantagem da reciclagem de misturas betuminosas com a incorporação de rejuvenescedores na melhoria do desempenho das misturas betuminosas, prolongando a vida útil dos pavimentos e reduzindo a necessidade de manutenção precoce.

#### 4.3.4. Módulo de Rigidez

Um dos parâmetros que tem maior influência no dimensionamento de pavimentos é o módulo de rigidez das misturas betuminosas utilizadas num determinado pavimento. Assim, para aferir a adequação da mistura reciclada para substituir a mistura convencional na reabilitação de pavimentos, foi conduzido o ensaio de Módulo de Rigidez de ambas. Nas Figuras 31 e 32 apresentam-se os gráficos que representam a relação entre a frequência de aplicação de cargas e o Módulo de Rigidez, bem como a relação entre a frequência e o ângulo de fase.

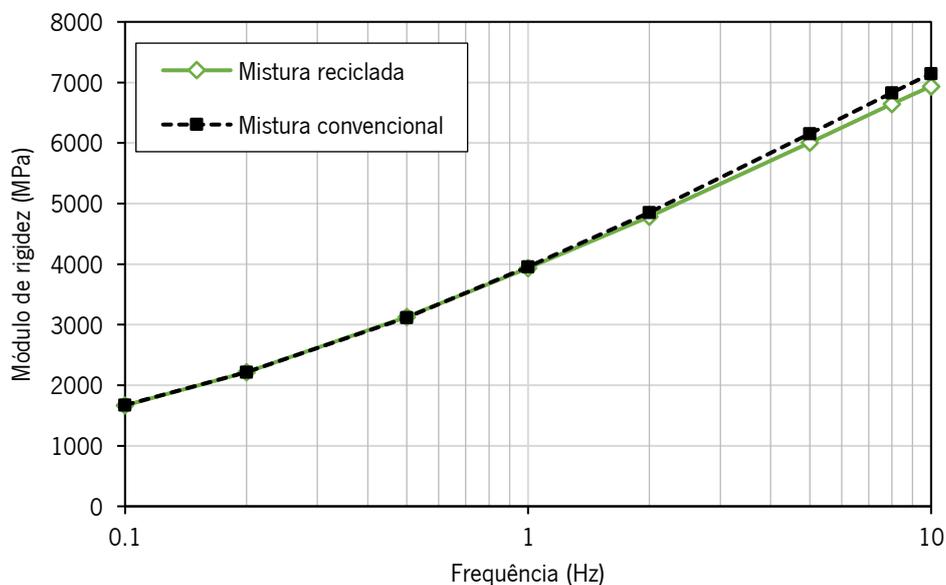


Figura 31 - Variação do módulo de rigidez com a frequência de aplicação de cargas

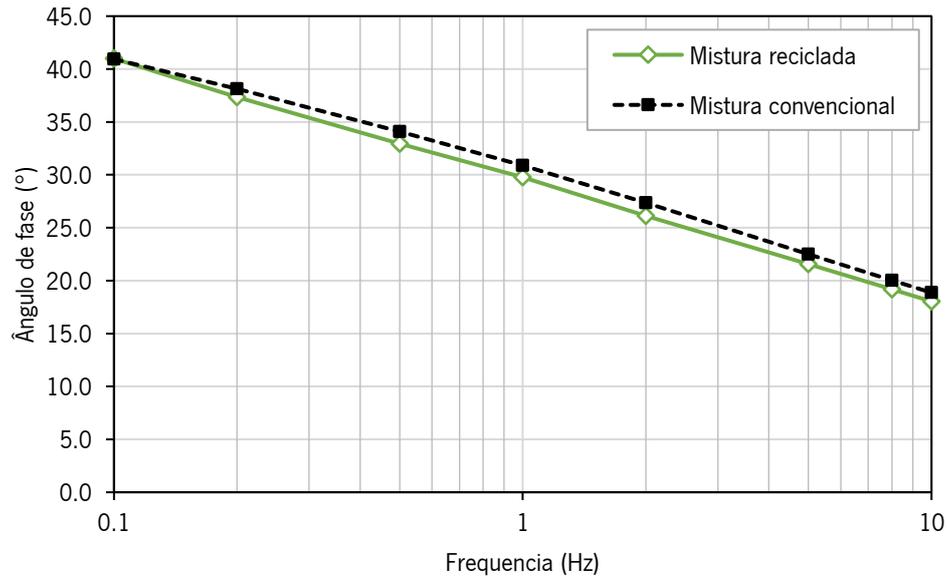


Figura 32 - Variação do ângulo de fase com a frequência de aplicação de cargas

Em ambas as análises, observa-se que as curvas que representam a mistura convencional e a mistura com adição de 0,25% de rejuvenescedor estão quase sobrepostas, sugerindo que não houve uma diferença significativa nos resultados obtidos.

Mais especificamente, ao observarmos o gráfico que relaciona o módulo de rigidez com a frequência, percebe-se que, na mistura reciclada, em frequências mais elevadas, o módulo de rigidez apresenta resultados ligeiramente mais baixos em comparação com a mistura convencional. Entretanto, vale destacar que essa diferença não demonstra expressão significativa, o que sugere uma semelhança notável entre as duas formulações em termos de resposta mecânica.

Este comportamento é coerente com a compreensão de que, à medida que a frequência de carregamento aumenta, o módulo de rigidez tende a aumentar. No entanto, a diferença entre as formulações permanece relativamente constante, não afetando substancialmente a capacidade de resistência à deformação e rigidez das misturas.

#### 4.3.5. Resistência à fadiga

Os resultados dos ensaios de resistência ao fendilhamento por fadiga apresentam-se na Figura 33. Este é um dos principais parâmetros que permite aferir o desempenho das misturas betuminosas sob a ação das cargas repetidas do tráfego. Com este ensaio é possível verificar se a utilização de misturas alternativas pode ser considerada equivalente à das misturas convencionais de referência. Como se pode observar, as linhas ajustadas aos resultados do ensaio (vulgarmente designadas de Leis de fadiga) estão muito próximas uma da outra, o que demonstra que a mistura reciclada tem um comportamento idêntico

ao da mistura convencional. De facto, se o nível de extensão instalado no pavimento for mantido em valores baixos, a mistura reciclada apresenta uma maior resistência à fadiga do que a mistura convencional. Tal como já referido no ensaio de resistência à deformação permanente, o efeito do aditivo rejuvenescedor na promoção da adesividade entre o betume e os agregados poderá ser considerada como a principal razão para este comportamento superior.

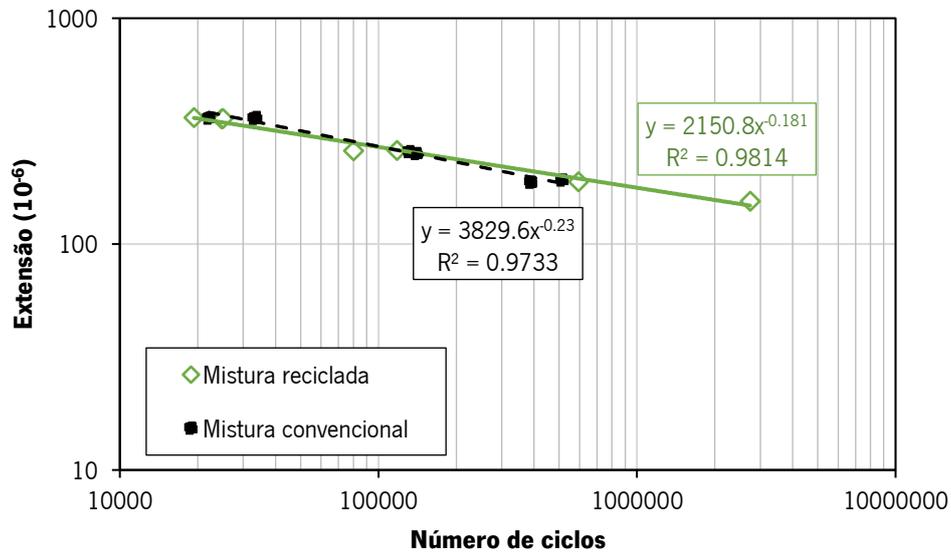


Figura 33 - Resistência à fadiga das misturas em estudo

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que a substituição de 30% de material virgem por material fresado na produção de misturas betuminosas não tem nenhum inconveniente do ponto de vista mecânico, desde que se assegure um estudo adequado do rejuvenescimento do ligante envelhecido e defina adequadamente a composição da mistura.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1. CONCLUSÕES**

A partir dos ensaios realizados, observa-se que a adição de rejuvenescedor desempenha um papel importante na reciclagem de materiais fresados de pavimentos reciclados, proporcionando benefícios substanciais para a economia circular no âmbito da pavimentação rodoviária. Com base nos resultados, fica evidente que a adição de rejuvenescedor à mistura betuminosa proveniente de um pavimento degradado tem um impacto significativo nas suas propriedades.

Inicialmente, observou-se que o aumento da quantidade de rejuvenescedor resultou em uma redução do ponto de amolecimento da mistura, o que indica a capacidade do rejuvenescedor de restaurar a fluidez do betume envelhecido. Além disso, o ensaio de penetração de betume revelou uma correlação direta entre o aumento da percentagem de rejuvenescedor e uma maior penetração, indicando um aumento na capacidade de penetração do betume, o que é fundamental para a restauração das propriedades do ligante, que por sua vez influenciam o desempenho da mistura.

No ensaio de viscosidade, ficou evidente que a adição do rejuvenescedor é essencial para reduzir os valores de viscosidade do betume recuperado. A incorporação do material fresado com um betume muito duro (envelhecido) poderia comprometer a flexibilidade da mistura e o seu comportamento, para além de dificultar o seu manuseamento e aplicação.

No ensaio reológico, notou-se que a mistura com 0,2% de rejuvenescedor se aproximou das propriedades desejadas do betume 35/50 em frequências mais baixas (temperaturas mais altas). Entretanto, em frequências mais altas (ou temperaturas mais baixas), ainda apresentou uma elevada rigidez, aproximando-se mais do betume recuperado do que do betume 35/50. Já a mistura com 0,4% de rejuvenescedor mostrou um desempenho inferior ao do betume 35/50 em temperaturas mais altas/frequências mais baixas, mas apresentou um desempenho superior em temperaturas mais baixas/frequências mais altas quando comparada à mistura com 0,2% de rejuvenescedor. Essa análise sugeriu que a percentagem ótima estaria próxima dos 0,3% de aditivo rejuvenescedor.

Em seguida, analisando os resultados dos ensaios com provetes Marshall, utilizando uma percentagem inicial de rejuvenescedor de 0,3%, notou-se uma redução da estabilidade no ensaio de Marshall em comparação com a mistura convencional, indicando menor resistência. Esse facto promoveu a

averiguação da possibilidade de reduzir ligeiramente a quantidade de rejuvenescedor para tentar aproximar mais a resistência da mistura reciclada à da mistura convencional. Assim, produziu-se uma mistura com 0,25% de rejuvenescedor, tendo-se observado que essa alteração não teve um efeito muito significativo no valor de estabilidade Marshall.

Objetivando uma economia em recursos e redução de custos, após o ensaio com provetes Marshall, conduziu-se o ensaio de sensibilidade à água a fim de comparar os resultados entre 0,3 e 0,25% de aditivo rejuvenescedor. A avaliação de sensibilidade à água mostrou que as misturas recicladas com 0,25% de rejuvenescedor eram equivalentes às misturas convencionais em termos de desempenho, tanto em condições secas quanto húmidas. Isso indica que a adição de rejuvenescedor não comprometeu a resistência da mistura ao efeito da água, um fator crítico para a durabilidade do pavimento.

No ensaio de pista para aferição da resistência à deformação permanente (*Wheel Tracking Test*), a mistura reciclada com adição de 0,25% de rejuvenescedor demonstrou um desempenho superior, com valores de deformação reduzidos em comparação com a mistura convencional. Isso indica que o efeito combinado da ação do rejuvenescedor com a presença de material fresado (cujo betume é bastante duro) otimizou as propriedades mecânicas da mistura, tornando-a mais resistente à deformação permanente e mais durável.

O ensaio de Módulo de Rigidez mostrou que a mistura com 0,25% de rejuvenescedor não apresentou diferenças significativas em comparação com a mistura convencional, o que mostra ser um resultado bastante positivo. Da mesma forma, a resistência à fadiga de ambas as misturas em estudo pode ser considerada equivalente, com a mistura reciclada a ter um desempenho ligeiramente superior ao da mistura convencional para valores mais baixos de extensão.

Em conclusão, os resultados dos ensaios sugerem que a adição de rejuvenescedor é uma abordagem vantajosa para a reutilização de material fresado de pavimentos degradados. Esta prática não apenas restaura as propriedades do betume envelhecido, mas também melhora o desempenho da mistura, tornando-a mais durável e resistente à deformação.

Além disso, a equivalência demonstrada em relação às misturas convencionais, tanto em termos de sensibilidade à água, quanto de módulo de rigidez e resistência à fadiga, sugere que essa abordagem é compatível com os padrões de qualidade.

Portanto, a utilização de taxas de reciclagem mais elevadas conjugada com a adição de aditivos rejuvenescedores pode ser considerada uma contribuição valiosa para a economia circular, promovendo

a sustentabilidade e prolongando a vida útil dos pavimentos, o que, por sua vez, reduz a necessidade de manutenção precoce, o descarte de materiais betuminosos e o consumo de recursos naturais cada vez mais escassos.

## **5.2. TRABALHOS FUTUROS**

O trabalho aqui realizado pode ser considerado como um contributo valioso para a promoção da reciclagem de misturas betuminosas. No entanto, tratando-se de um estudo laboratorial, este carece de uma validação em obra, pelo que se sugere a possível construção de um trecho experimental onde esta mistura possa ser aplicada, em conjunto com a mistura convencional de referência. Dessa forma será possível avaliar as particularidades da transposição do estudo do laboratório para a central de produção de misturas betuminosas, bem como analisar eventuais dificuldades de produção associadas ao manuseamento de grandes quantidades de material fresado em conjunto com os agregados naturais.

Por outro lado, a viabilidade de utilizar outras taxas de incorporação de material fresado ou de outros aditivos rejuvenescedores seriam estudos importantes a realizar para assegurar um melhor conhecimento no domínio da reciclagem de misturas betuminosas, de forma a promover um desenvolvimento sustentável, reduzindo os impactes ambientais da atividade de construção e reabilitação rodoviária e os custos associados a este tipo de intervenções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, V. H. S. (2020). *Uma visão geral sobre a aplicação da economia circular no setor de transporte rodoviário urbano*. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET.
- Afonso, M. L. (2015). *Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betumes Temperados*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Albuquerque, T. L. M., Mattos, C. A., Scur, G., & Kissimoto, K. (2019). *Life cycle costing and externalities to analyze Circular Economy Strategy: Comparison between aluminum packaging and tinplate*. Journal of Cleaner Production.
- Almeida Junior, P. (2022). *Reciclagem de Misturas 100% Rap: Investigação de Parâmetros Para Avaliação e Dosagem de Agentes Rejuvenescedores Com Foco Na Fadiga*. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria.
- Alvarez, A. E., Martin, A. E., Estakhri, C. K., Button, J. W., Glover, C. J., & Jung, S. H. (2006). Report No. FHWA/TxDOT Report 0-5262-1: Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Courses. Texas Transportation Institute, 7(2), 86.
- Andrade, R. M. A. (2015). *Caracterização laboratorial de misturas betuminosas com incorporação de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa
- APA, Agencia Portuguesa do Ambiente, *Reutilizacao de produtos e materiais*. <https://apambiente.pt/residuos/reutilizacao-de-produtos-e-materiais>; Acedido em 18 de novembro de 2021.
- Arambula-Mercado E., Kaseer F., Martin A., Yin F., Cucalon L., (2018). *Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents*. Construction and Building Materials, v. 158, p. 432- 442, 2018.

- Batista, F.A., Antunes, M.L., Fonseca, P. (2008). *Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha*. V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”, CRP, Estoril, Portugal.
- Batista, F. (2005). *Novas técnicas de reabilitação, Ação de Formação: Conservação de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Baptista, A. & Picado Santos, Luis. (2007). *Método de Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente*.
- Bessa, J. F. (2016). *Betão Betuminoso Temperado com Betume Aditivado em Refinaria com Incorporação de Misturas Betuminosas Recicladas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra.
- Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra. ISBN 972-40-2648-5
- Castro, Luciana Nogueira de. (2003). *Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto*. Tese de pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Capitão, S. (2003). *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade – Volume 1*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Chen, M. C., Ho, T. P., & Jan, C. G. (2006). *A System Dynamics Model of Sustainable Urban Development: Assessing Air Purification Policies at Taipei City*. Asian Pacific Planning Review, v. 4, n. 1, p. 1.
- CTCV (2020). *Centro de Recursos Economia Circular*. <https://www.ctcv.pt/economiacircular/acerca.html> acedido em Agosto de 2022.
- Cunha, C. M. (2010). *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem*. Tese de Mestrado - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Curado, L. A. (2019). *Estudo sobre reabilitação de pavimentos flexíveis por meio de técnicas de reciclagem*. Relatório Final da Dissertação apresentado à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

- Dau, F. N. (2001). *Uma avaliação técnico/econômica da reciclagem de revestimentos asfálticos em usina em área urbana*. Dissertação de mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Duarte, R. (2010). *Aplicação das Normas Europeias nas Misturas Betuminosas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Dinis-Almeida M. (2010). *Caracterização e formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas em central*. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- EAPA (2014). The use of warm mix asphalt. Position Paper, European Asphalt Pavement Association, January. Disponível em: [https://eapa.org/the-use-of-warm-mix-asphalt-2014/#flipbook-df\\_13658/5/](https://eapa.org/the-use-of-warm-mix-asphalt-2014/#flipbook-df_13658/5/). Acedido em 24 de outubro de 2023.
- Esteves, S. F. (2014). *Reciclagem De Pavimentos Betuminosos, Influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio com emulsão*. Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- EPA, Wastes - *Resource Conservation - Reduce, Reuse, Recycle, United States Environmental Protection Agency*, <https://www.epa.gov/recycle/reducing-and-reusing-basics>; Acedido em 24 de outubro de 2023.
- Ferreira, C. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Guimarães.
- FHWA (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. Federal Highway Administration, USA.
- Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H. M. R. D., Oliveira, J. R. M., Abreu, L., (n.d.) *Misturas betuminosas a quente com altas taxas de reciclagem*.
- Fonseca, P. (2002). *Reciclagem de pavimentos rodoviários*. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- Gardete, D. (2006). *Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. Journal of Cleaner Production, v. 114, p. 11–32.
- Henesan, U. (2013). *Effect of the Repeated Recycling on Hot Mix Asphalt Properties*. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham.
- Kandhal, P. (1997). *Recycling of Asphalt Pavements-an Overview*. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT, USA, v.66.
- Leal, K., Almeida, M., Souza, T., Silva, F., Costa, W., (2020). *Avaliação da eficiência da mufla na extração de ligantes de misturas asfálticas densas*. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET.
- Mazzuco, A., Schuster, B. S., Taboni Junior, L. R., Viotto, H. G. F., Soares, A. C. V. (2019). *O estado da arte da reciclagem de pavimentos asfálticos no Brasil*. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.
- Mogawer, W., Fini, E., Austerman, A., Booshehrian, A., Zada, B. (2016). *Performance characteristics of high reclaimed asphalt pavement containing bio-modifier*. Road Materials and Pavement Design, Volume 17, 753-767.
- Nunes, T. (2010). *Marcação CE de Misturas Betuminosas: A Experiência Portuguesa*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Jesus, C.M.G., Abreu, L.P.F., Fernandes, S.R.M. (2013). *Pushing the Asphalt Recycling Technology to the Limit*. Int. J. Pavement Research & Technology, Vol. 6 (2), pp. 109-116.
- Pais, J.C.; Pereira, Paulo A. A; Minhoto, M.J.C. (2008). *Reciclagem de pavimentos utilizando betume modificado com borracha*. In Estrada 2008 - Proceedings do V Congresso Rodoviário Português. Estoril.
- Pereira, F. (2009). *Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

- Pereira P.; Miranda V. (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho, Braga.
- Saidani, M., Kendall, A., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2019). *Management of the End-of-Life of Light and Heavy Vehicles in the U.S.: Comparison with the European Union in a Circular Economy Perspective*. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 21, n. 6, p. 1449–1461.
- Sengoz, B., Oylumluoglu, J. (2013). *Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen*. *Construction and Building Materials*. 45, pp. 173-183.
- Seroka-Stolka, O., & Ociepa-Kubicka, A. (2019). *Green Logistics and Circular Economy*. *Transportation Research Procedia*, v. 39, p. 471–479.
- Smart Waste Portugal (2017). *A transição para a economia circular: a colaboração entre entidades e as novas oportunidades de negócios*. [https://pq-ue.ani.pt/content/eventos/7464\\_apresentacao-smart-waste-portugal.pdf](https://pq-ue.ani.pt/content/eventos/7464_apresentacao-smart-waste-portugal.pdf). Acedido em 19 de agosto de 2023.
- Viet, H. M. (2012). *Reciclagem de metais metálicos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Wirtgen. (2023). *Manual de reciclagem a frio*. 2. ed. A WIRTGEN GROUP COMPANY, Alemanha.
- Zhang, J., Sun, H., Jiang H., Xu, X., Liang, M., Hou, Y., Yao, Z. (2019). *Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator*. *Construction and Building Materials*, 215, 660 -679.