

RICARDO RIBEIRO DE CAMPOS

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA COM A
AVALIAÇÃO DA RECICLAGEM FUTURA DOS MATERIAIS

Orientador: Prof. Doutor Vítor Filipe Silva Antunes

Coorientador: Doutora Ana Cristina Ferreira Oliveira Rosado Freire

Versão final

Universidade Lusófona

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2023

RICARDO RIBEIRO DE CAMPOS

ECONOMIA CIRCULAR NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA COM A
AVALIAÇÃO DA RECICLAGEM FUTURA DOS MATERIAIS

Dissertação defendida em provas públicas na Universidade Lusófona no dia 03/02/2023, perante o júri, nomeado pelo Despacho de Nomeação n.º: 142/2023, de 31 de janeiro de 2023, com a seguinte composição:

Presidente: Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo

Vogal: Prof. Doutor José Manuel Coelho das Neves

Orientador: Prof. Doutor Vítor Filipe Silva Antunes

Versão final

Universidade Lusófona

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente tenho de agradecer a Deus pela minha vida e saúde, que me fez chegar até aqui.

Em seguida, agradeço a todos que participaram comigo nesta caminhada e que foram importantes para a conclusão deste meu ciclo, dos quais devo citar alguns nomes em especial e não o vou fazer em ordem de importância, pois cada um foi fundamental na sua maneira de contribuição.

Aos orientadores, o Professor Vítor Antunes e a Doutora Ana Cristina, por todo o conhecimento transmitido, a disponibilidade, e os esforços aplicados em disponibilizar os equipamentos para os ensaios.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e os seus colaboradores, por ceder o espaço e os equipamentos que foram necessários para a realização dos ensaios, em especial ao Sr. Reimão, Sr. João Costa e Sr. Carlos Calado, que me ajudaram nos ensaios e pela convivência durante os meses em que estivemos juntos.

A minha esposa, Priscilla Vasconcelos, por me apoiar e incentivar desde o início, com gestos e palavras nos momentos necessários, e pela compreensão do que tivemos de abdicar em vários momentos.

Aos meus familiares no Brasil, que mesmo distantes me incentivaram, e em especial a minha mãe, Rosângela Campos, e o meu pai, Fernando Campos, que desde sempre me ensinaram que através dos estudos podemos transformar nossas vidas.

RESUMO

As substituições de pavimentos rodoviários têm associados elevados orçamentos anuais aliados a uma enorme produção de resíduos, e consequentemente um grande consumo de recursos naturais. Desta forma, a multi-reciclagem de mistura betuminosa reciclada (MBR) apresenta-se como solução para parte de um problema, evitando assim a sua classificação como resíduo.

Ao longo dos sucessivos ciclos de reciclagem é necessário a utilização de rejuvenescedores para recuperar as propriedades da fração de betume presente na MBR, logo se for utilizado rejuvenescedores diferentes a sua interação necessita de ser avaliada.

De forma, a avaliar a interação entre dois rejuvenescedores de diferentes origens considerando dois ciclos de reciclagem de MBR em misturas com elevadas taxas de incorporação (75%) para camadas de desgaste para pavimentos rodoviários, foram realizados ensaios de caracterização do betume rejuvenescido, de comportamento mecânico, das características superficiais e das propriedades Marshall e volumétricas.

Os resultados foram comparados com um caso de estudo anterior que utilizou três tipos de misturas betuminosas e sempre o mesmo rejuvenescedor para recuperá-las. Portanto, a interação entre dois rejuvenescedores diferentes, de amostras similares, no mesmo ciclo de reciclagem, não apresentou grandes variações nos ensaios e nas características da MBR, demonstrando uma boa compatibilidade entre os rejuvenescedores.

ABSTRACT

The replacement of road pavements has associated high annual budgets combined with a huge production of waste, and consequently a large utilization of natural resources. In this way, the multi-recycling of recycled bituminous mix (MBR) presents itself as a solution to part of a problem, thus avoiding its classification as waste.

Throughout the successive recycling cycles, it is necessary to use rejuvenators to recover the properties of the bitumen fraction present in the MBR, so if different rejuvenators are used, their interaction needs to be evaluated.

In order to evaluate the interaction between two rejuvenators of different origins considering two MBR recycling cycles in mixtures with high incorporation rates (75%) for wear layers for road pavements, tests were carried out to characterize the rejuvenated bitumen, with behavior mechanical properties, surface characteristics and Marshall and volumetric properties.

The results were compared with a previous case study that used three types of bituminous mixtures and always the same rejuvenator to recover them. Therefore, the interaction between two different rejuvenators, from similar samples, in the same recycling cycle, did not show great variations in the tests and characteristics of the MBR, demonstrating a good compatibility between the rejuvenators.

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviações

0% MBR – Mistura betuminosa com 0% de adição de MBR.

75% MBR-1 – Mistura betuminosa com 75% de adição de MBR no primeiro ciclo de reciclagem.

75% MBR-2 – Mistura betuminosa com 75% de adição de MBR no segundo ciclo de reciclagem.

75% MBR-2.1 – Mistura betuminosa com 75% de adição de MBR no segundo ciclo de reciclagem, e o uso de rejuvenescedor diferente do primeiro ciclo.

AC – *Asphalt Concrete* (Betão Betuminoso)

BMT – Baridade Máxima Teórica

CETO – Caderno de Encargos Tipo Obra

CO₂ – Dióxido de carbono

COP26 – *Climate Change Conference 26°* (26° Conferência das Mudanças Climáticas)

IP – Infraestruturas de Portugal

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

m_{a_N} – Massa de agregado novo

m_{a_R} – Massa de agregados da mistura reciclada

m_{a_V} – Massa de betume velho

m_{b_N} – Massa de betume novo

m_{b_R} – Massa de ligante total da mistura reciclada

MBR – Mistura betuminosa recuperada

m_{b_V} – Massa de betume velho

MQB – Misturas Betuminosas a Quente

m_{t_R} – Massa total da mistura reciclada

mt_v – Massa total de material velho

NCAT – *National Center for Asphalt Technology*

ODM – Objetivos do Desenvolvimento do Milênio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PNGR – Programa Nacional de Gestão de Resíduos

PRD_{air} – Percentagem de Profundidade de Rodeira

PTV – *Pendulum Test Value* (Valor de teste de pêndulo)

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement* (Mistura Betuminosa Recuperada)

R_{dair} – Deformação Máxima

RPM – Rotações Por Minuto

RWM – *Resource and Waste Management*

TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação

UE – União Europeia

V_{aR} – Volume de agregado da mistura reciclada

V_{bR} – Volume de ligante da mistura reciclada

V_{maR} – Volume de vazios no esqueleto do agregado da mistura reciclada

V_{tR} – Volume total da mistura reciclada

V_{VR} – Volume de vazios da mistura reciclada

WT – *Wheel Tracking* (Ensaio de Pista)

WTS_{air} – Taxa de Deformação

ÍNDICE CONTEÚDOS

1. Introdução	1
1.1 Motivação e enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Plano de Trabalho	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1 Reciclagem de Mistura Betuminosa.....	6
2.2 Mistura Betuminosa.....	11
2.3 Rejuvenescedores	14
3. Materiais e Metodologia.....	17
3.1 Materiais	17
3.2 Metodologias	17
3.2.1. Ensaaios para caracterização da MBR	18
3.2.2. Extração e recuperação do ligante	18
3.2.2.1. Penetração	19
3.2.2.2. Anel e bola	20
3.2.2.3. Determinação da percentagem de rejuvenescedor.....	21
3.2.3. Moldagem de provetes cilíndricos.....	22
3.2.4. Moldagem de lajetas.....	24
3.2.5. Pêndulo britânico	25
3.2.6. Macrotextura.....	26
3.2.7. Baridade (massa volúmica aparente).....	27
3.2.8. Baridade máxima	27
3.2.9. Ensaio de pista (<i>Wheel tracking</i>).....	28
3.2.10. Ensaio Marshall	29
3.2.11. Ensaio de rigidez	29
3.2.12. Ensaio de fadiga.....	29

4. Resultados e Discussão	31
4.1 Características do betume rejuvenescido.....	31
4.2 Propriedades Marshall e volumétricas.....	32
4.3 Comportamento mecânico	33
4.3.1. Deformação permanente.....	33
4.3.2. Módulo de Rigidez	35
4.3.3. Comportamento à fadiga	38
4.4 Características superficiais	40
5. Conclusão	43
5.1 Conclusões.....	43
5.2 Desenvolvimentos futuros	44
Bibliografia.....	45
Anexo	I
A.1 – Resultados da deformação permanente	I
A.2 – Resultados módulo de rigidez.....	VI
A.3 – Resultados da deformação por fadiga.....	IX

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Utilizações de misturas betuminosas (EAPA, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020).....	10
Quadro 2.2 – Tipos de betume e exigências de conformidade (CEN, 2011b)	14
Quadro 3.1 – Percentagem de rejuvenescedor.....	22
Quadro 3.2 – Quantidades da mistura para provete cilíndrico	23
Quadro 3.3 – Quantidades da mistura para lajeta pequena.....	25
Quadro 3.4 – Quantidades da mistura para lajeta grande	25
Quadro 4.1 – Resultados rejuvenescedor	32
Quadro 4.2 – Propriedades Marshall e volumétricas.....	33
Quadro 4.3 – Parâmetros do ensaio Wheel Tracking	34
Quadro 4.4 – Parâmetros obtidos pela lei da fadiga	40
Quadro A.1-1– Resultados wheel tracking.....	I
Quadro A.2-1– Valores médios da rigidez e ângulo de fase	VI
Quadro A.2-2 – Valores médios das componentes E1 e E2	VII
Quadro A.2-3 – Valores médios de E1/E2	VIII
Quadro A.3-1 – Resultados do ensaio de fadiga.	IX

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Conceito de economia circular (Humana Portugal, 2019).....	4
Figura 2.2 - 17 objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (ONU, 2022)	5
Figura 2.3 – Comparação entre economia linear (esquerda) e economia circular (direita)	6
Figura 2.4 – Pavimento em bom estado	7
Figura 2.5 – Pavimento com patologias	7
Figura 2.6 – Percentagem de MBR usada por país (EAPA, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020).....	9
Figura 2.7 - Taxa máxima de incorporação de MBR	11
Figura 2.8 – Relação Volume e Massa - Adaptado de (Baptista, 2006).....	12
Figura 3.1 – Mistura Betuminosa Recuperada	17
Figura 3.2 – Centrifugadora	19
Figura 3.3 – Centrifugadora de tubos	19
Figura 3.4 – Rotavapor.	19
Figura 3.5 – Betume em banho-maria	20
Figura 3.6 – Ensaio de penetração.....	20
Figura 3.7 – Ensaio de Anel e Bola.....	21
Figura 3.8 – Mistura betuminosa para moldagem do provete cilíndrico.....	23
Figura 3.9 – Compactação do provete cilíndrico.....	23
Figura 3.10 – Provetes cilíndricos	24
Figura 3.11 – Mistura sem compactação	24
Figura 3.12 – Mistura para as lajetas.....	25
Figura 3.13 – Compactação das lajetas	25
Figura 3.14 – Pêndulo Britânico.....	26
Figura 3.15 – Macrotextura	26
Figura 3.16 – Amostras submersas.....	27
Figura 3.17 – Picnómetro de vácuo	28
Figura 3.18 – Ensaio de pista (Wheel tracking)	28
Figura 3.19 – Vigas ensaiadas	29
Figura 3.20 – Ensaio de rigidez e fadiga	30
Figura 4.1 – Deformação medida no ensaio Wheel Tracking	34
Figura 4.2 – Gráfico de Rigidez x Frequência.....	36

Figura 4.3 – Evolução do ângulo de fase com a frequência	36
Figura 4.4 – Diagrama de Black	37
Figura 4.5 – Diagrama de Cole-Cole	37
Figura 4.6 – Evolução da componente elástica (E_1) com a frequência	38
Figura 4.7 – Evolução da componente viscosa (E_2) com a frequência.....	38
Figura 4.8 – Gráfico de fadiga.....	39
Figura 4.9 – Ensaio de macrotextura	40
Figura 4.10 – Ensaio de microtextura.....	41

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e enquadramento do tema

A motivação inicial para o começo das pesquisas foi em relação ao reaproveitamento de material gerado para descarte, quando é necessário se fazer a substituição do pavimento, pois em um momento em que vivemos um apelo mundial para a reciclagem e a redução de produtos de utilização única, há neste tema uma maneira de se aplicar o conceito de economia circular e a diminuição da extração de recursos naturais. A reciclagem do pavimento, que já é utilizada desde a década de 70 em grande escala, é um trabalho importante a nível ambiental e económico que já foi houve bastantes avanços de pesquisas sobre o comportamento e desempenho do mesmo desde então, e o estudo da multi-reciclagem do pavimento segue o mesmo intuito, porém visando a utilização ao máximo da mistura betuminosa reciclada (MBR) de modo que continuem a possuir as características necessárias, durante o seu uso, para sua aplicação seja viável por diversas vezes.

Para se fazer a multi-reciclagem da MBR é preciso conhecer as barreiras que limitam o seu uso, e uma delas está na sua heterogeneidade, pois em uma pilha de mistura betuminosa recuperada podem-se encontrar materiais provenientes de diferentes origens, diferentes tempos de exposição em uso, e o desconhecimento das características das MBR usadas anteriormente. Um ponto importante na incorporação da MBR em uma mistura betuminosa virgem é conseguir perceber o comportamento entre o betume virgem e o betume envelhecido (Chaves, Soares, & Lucas Júnior, 2021). Nos últimos anos, estudos têm sido realizados para avaliar a viabilidade da incorporação da MBR em novas misturas betuminosas. Misturas betuminosas que contenham MBR, uma taxa de incorporação superior a 15% na sua constituição, geralmente, apresentam um aumento no módulo de deformabilidade e na resistência à fadiga (Antunes, Freire, & Neves, 2019, 2020).

1.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo principal avaliar a capacidade de multi-reciclagem da MBR e a interação entre dois rejuvenescedores de diferentes origens considerando dois ciclos de reciclagem de MBR em misturas betuminosas a quente com elevadas taxas de incorporação para camadas de desgaste para pavimentos rodoviários.

Neste sentido, foram feitos ensaios laboratoriais que permitiram simular as condições de fabrico e utilização do pavimento, para então ser possível analisar os resultados e comparar com estudos anteriores.

1.3 Plano de Trabalho

Esta dissertação está dividida em capítulos da seguinte maneira:

Capítulo 1, o presente capítulo é uma introdução da dissertação, onde é apresentado o motivo, o objetivo e a forma como todo o trabalho está organizado.

No capítulo 2 é feita uma abordagem geral sobre o tema, em que foi feita uma revisão bibliográfica sobre a economia circular, mistura betuminosa, a reciclagem de mistura betuminosa, e os rejuvenescedores.

No capítulo 3 é apresentado quais os materiais e metodologias foram aplicados ao longo do trabalho desenvolvido no laboratório, desde a recuperação do betume até os ensaios dos provetes, com as referências das normas utilizadas.

No capítulo 4 é feita a apresentação e a discussão dos resultados obtidos e comparado com resultados de outro autor em que o processo da mistura betuminosa reciclada já havia passado por um ciclo de reciclagem com a utilização de um rejuvenescedor diferente do utilizado neste trabalho.

No capítulo 5 é apresentada as conclusões desta dissertação e sugerida a continuação dos estudos com possíveis trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A economia circular parte de um princípio da reutilização dos produtos por uma ou mais vezes, de modo que se prolongue ao máximo a sua utilidade e consequentemente que se prolongue o seu valor, seja o produto destinado para o mesmo fim ao qual foi concebido, para outros fins ou até com o reaproveitamento parcial de alguns materiais, se possível. Portanto, quando um produto ou solução está na fase de fim de vida, este pode ser reutilizado na sua forma integral ou os materiais que o constituem são reintroduzidos no ciclo como um recurso em vez de serem descartados (C. Santos, 2019). A ideia central associada à economia circular é a gestão eco-eficiente de resíduos e recursos, passando os primeiros a serem classificados como subprodutos, em substituição do atual modelo de economia linear, que pode ser descrita de maneira simplificada do seguinte modo, extrair – produzir – utilizar – descartar, onde os produtos ou soluções possuem um curto período de vida e em pouco tempo são descartados.

Uma preocupação inicial na implementação da economia circular começa com o desenho dos produtos, ou o projeto a ser elaborado, que está inserido no início do ciclo, conforme demonstrado na imagem abaixo (Figura 2.1), pois com este conceito na idealização, este modelo mantém materiais valiosos no sistema, projetando produtos que podem-se adaptar e são produzidos para durar (RSA, 2013).

A produção de resíduos é verificada em duas vertentes: inicialmente em cada etapa da cadeia produtiva, uma vez que em muitos casos os recursos não conseguem ser incorporados nos produtos e assim não agregam valor; e na geração de resíduos pós-consumo, seja das embalagens, seja dos próprios produtos após sua vida útil. Há que se considerar neste contexto que a reciclagem só possui índices significativos em algumas regiões e para alguns materiais específicos, em 2010 a Europa reaproveitou menos de 40% dos 2,7 bilhões de toneladas de resíduos gerados, já no ano de 2020 a percentagem subiu para os 60% do reaproveitamento dos resíduos (European Commission - Eurostat, 2022; Ribeiro & Kruglianskas, 2014).

Em 2020 a União Europeia (UE) adotou um novo Plano de Ação da Economia Circular (Comissão Europeia, 2020), o qual apresenta iniciativas ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, de modo a que os recursos utilizados permaneçam dentro da economia da UE pelo máximo de tempo possível. Os principais objetivos apresentados foram os seguintes: (i) fazer com que os produtos sustentáveis passem a fazer parte da norma na UE, com a proposta de uma nova legislação em matéria de sustentabilidade dos produtos; (ii) capacitar os consumidores, através de informações sobre a durabilidade e reparabilidade dos produtos, e assim ajudar os consumidores a fazerem uma escolha sustentável para o meio ambiente; (iii) Concentrar a ação

quando o crescente imposto sobre aterros sanitários foi introduzido, os custos de eliminação, incluindo o imposto à taxa normal, aumentaram mais de 450% em termos reais. Ao longo deste tempo, foi possível observar que as empresas intensificaram os esforços para evitar resíduos na fonte e aumentaram sua taxa de reciclagem.

No ano de 2000 a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu 8 Objetivos do Desenvolvimento do Milênio (ODM) para o ano de 2015 que visava o desenvolvimento rápido dos países, sobretudo os menos desenvolvidos, sendo o primeiro objetivo a erradicação da extrema pobreza e da fome, e dentre outros garantir a qualidade e vida e respeito ao meio ambiente, e estabelecer parcerias para o desenvolvimento. Com o fim do prazo do ODM, em 2015 a ONU se reuniu novamente para estabelecer novos objetivos por mais 15 anos, e então foram estabelecidos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 2.2), um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade (ONU, 2022).



Figura 2.2 - 17 objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (ONU, 2022)

A economia circular na pavimentação rodoviária, presente nesta dissertação, pode ser aplicada no processo de reutilizar a camada de desgaste do pavimento por mais de uma vez, conforme demonstrado na Figura 2.3 uma comparação entre a economia linear e a economia circular, sendo possível o reaproveitamento de materiais de origem natural e a redução do descarte de materiais precocemente. A mistura betuminosa pode ser 100% reciclada sem que sua funcionalidade seja reduzida, o reaproveitamento desse material em novas misturas betuminosas faz com que o conceito de economia circular ideal seja aplicado em todo o ciclo (Antunes et al., 2019).

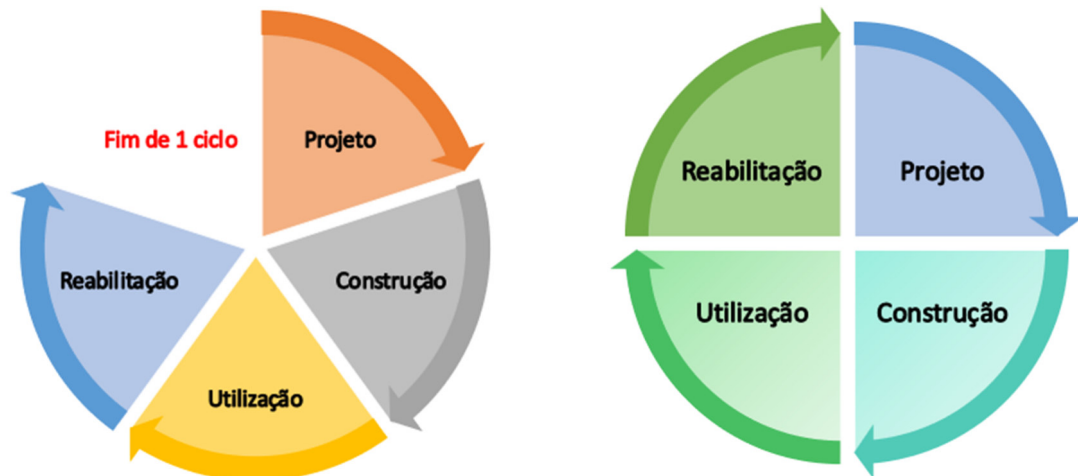


Figura 2.3 – Comparação entre economia linear (esquerda) e economia circular (direita)

2.1 Reciclagem de Mistura Betuminosa

Todo pavimento deve ser dimensionado visando um tempo limite de utilização, de forma a garantir o seu desempenho mecânico e funcional. Anualmente são alocados avultados orçamentos para a realização de ações de manutenção e reabilitação da rede de infraestrutura rodoviária, de forma a garantir a segurança e o conforto dos seus utilizadores e a sua condição estrutural (Figura 2.4), uma vez que as suas camadas apresentam um período de vida limitado. Em resultado das patologias que ocorrem ao longo do tempo (Figura 2.5) são necessárias intervenções, como manutenções preventivas e de reabilitação em consequência do estado de degradação em que se encontra o pavimento. Mesmo com ações de manutenção preventiva durante o ciclo de vida do pavimento, é necessário proceder à substituição da camada de desgaste, o que leva à produção de elevadas quantidades de Mistura Betuminosa Recuperada (MBR) (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement* na língua inglesa). A reciclagem da MBR tem um importante papel visando a reutilização de um material, de elevado valor económico e ambiental, que seria rejeitado, pois é possível fazer o reaproveitamento dos seus materiais constituintes: agregados, betume e outros aditivos que possam estar presentes (Antunes, Neves, & Freire, 2021).



Figura 2.4 – Pavimento em bom estado



Figura 2.5 – Pavimento com patologias

A MBR, pode ser definida como toda a mistura betuminosa obtida por fresagem de camadas de mistura betuminosa aplicada (CEN, 2016b). A utilização da MBR em larga escala surgiu da necessidade em reduzir os custos de aplicação de mistura betuminosa em pavimentos na época em que o petróleo apresentou uma escalada exponencial do preço, nos anos de 1970, devido ao embargo feito pelos países árabes (Suzuki, 2019). Além desta vantagem, a utilização da MBR implica a redução do uso matéria-prima para a construção de pavimento, como a extração de rochas e de betume, que é um subproduto da indústria da refinação do petróleo, além da redução de zonas de depósito.

A necessidade crescente de uma maior consciencialização ambiental e sustentável do planeta, além de fatores económicos e restrições ambientais, faz com que novas soluções sejam estudadas para satisfazer essas necessidades e a utilização da MBR na construção e reabilitação dos pavimentos betuminosos apresenta-se como uma solução, segundo (de Mesquita Lopes Genesseeux, 2015; Valdés, Pérez-Jiménez, & Miró, 2020). Considerando o valor deste subproduto e a necessidade crescente de aplicações com maior sustentabilidade, a utilização da MBR tem crescido ao longo dos anos em diversos países, seja ao ser utilizado como material de base ou sub-base, em camada desligada, ou ainda ser beneficiado, com o uso de rejuvenescedores, para a utilização em camada de desgaste.

O processo inicial de produção da MBR ocorre quando uma camada de desgaste de mistura betuminosa é removida por máquinas fresadoras gerando um material fresado. Essa técnica é aplicada dentro de um processo de reabilitação de pavimentos deteriorados, para não aumentar a espessura da camada de desgaste e assim evitar problemas como, o aumento da cota do pavimento e consequentemente problemas de drenagem, bem como para atenuar a propagação de fendas (de Mesquita Lopes Genesseeux, 2015), pois quando aplicada uma camada de mistura betuminosa sobre outra camada que apresente fendilhamento, poderá ocorrer a propagação de fendas à camada sobrejacente. Após a obtenção do material fresado,

este pode ser incorporado numa nova mistura betuminosa, podendo ela ser produzida a quente, temperada ou a frio, tanto em central como *in-situ*.

As quantidades a serem inseridas de MBR na mistura betuminosa final deve obedecer às especificações, cadernos de encargos definidos pelos donos de obra e legislação existente em cada país (Antunes et al., 2019; Valdés et al., 2020). Nos países onde a MBR já vem sendo utilizado há mais anos, como EUA e Canadá, cada país, sendo que no caso dos Estados Unidos cada estado, definem as percentagens máximas de incorporação de acordo com a camada onde a mistura com MBR irá ser aplicada (Bedoya, 2021).

No ano de 2018 com o uso da MBR, os Estados Unidos economizaram 4,1 milhões de toneladas de ligante betuminoso virgem e 78 milhões de toneladas de agregados virgens (Tarsi, Tataranni, & Sangiorgi, 2020), demonstrando a importância da MBR dentro do conceito de economia circular. Nos últimos anos a MBR proveniente dos pavimentos flexíveis tornou-se o material mais reciclado nos Estados Unidos, com quantidades duas vezes superior ao somatório dos principais materiais como o papel, o vidro, o plástico e o alumínio, 80 milhões de toneladas contra 40 milhões de toneladas (Prowell, Hurley, & Crews, 2007).

Em um momento em que o aumento das temperaturas médias gera grandes preocupações acerca das alterações climáticas, houveram acordos recentes na COP26 (*Climate Change Conference 26º*) entre as nações que decidiram reduzir ainda mais as emissões de CO₂. No ano de 2011 em levantamento feito pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), a meta dos EUA era incorporar 25% de MBR nas misturas betuminosas novas, permitindo assim reduzir em cerca de 1,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano (de Mesquita Lopes Gennesseaux, 2015).

Na Europa, em 2003, as misturas betuminosas recuperadas lideravam a lista de materiais reciclados, superando a sucata de ferro, e representava mais do que a soma de todos os restantes materiais reciclados (vidro, plástico, jornais e revistas). Nos EUA, também as misturas betuminosas representavam uma percentagem elevada de material reciclado, cerca de 80% (Baptista, 2006), no ano 2005.

As quantidades apresentadas no Quadro 2.1 referem-se às quantidades geradas de MBR e a sua utilização em alguns países da Europa entre os anos de 2014 a 2020.

Conforme demonstrado na Figura 2.6, a incorporação da MBR na produção de uma nova mistura betuminosa a quente ou temperada é ainda muito variável, se comparado dentro do continente europeu, entre os anos de 2014 a 2020. Há países que tem um aumento anual na

taxa de aplicação, outros apresentam uma variação a cada ano, e no caso da Finlândia foi reutilizada toda a MBR produzida.

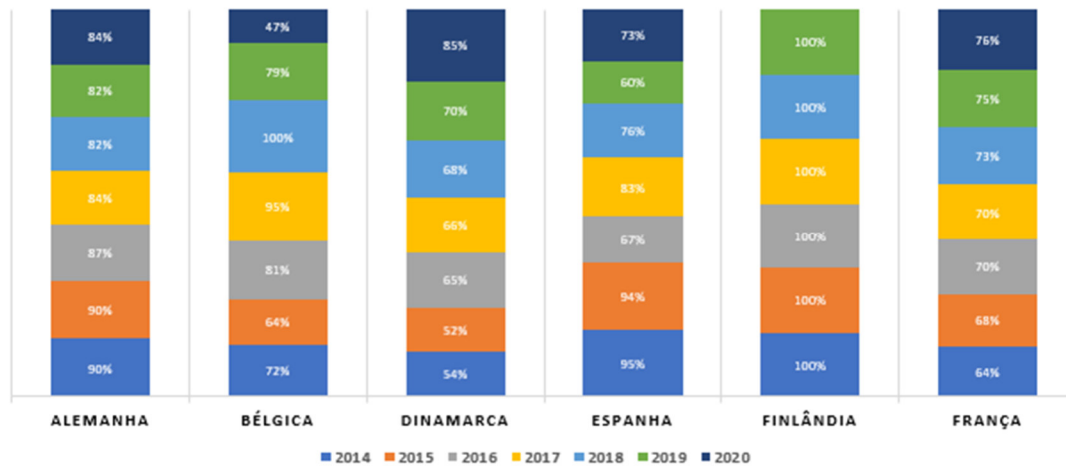


Figura 2.6 – Percentagem de MBR usada por país (EAPA, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020)

No Quadro 2.1 abaixo é possível verificar as quantidades geradas de MBR por cada país e então fazer uma conexão com a Figura 2.6, visto que a Finlândia utiliza toda a MBR produzida, porém gera quantidades bem inferiores se comparado com outros países como Alemanha e França. A maior percentagem da MBR é utilizada na produção de mistura betuminosa a quente.

Quadro 2.1 - Utilizações de misturas betuminosas (EAPA, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020)

Misturas betuminosas (Milhões de toneladas)												
Ano	Alemanha		Bélgica		Dinamarca		Espanha		Finlândia		França	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
2014	39.00	10.90	5.20	1.50	3.70	1.30	14.50	0.39	4.70	1.00	31.90	7.00
2015	39.00	11.00	5.00	1.55	3.70	1.30	16.40	0.41	5.40	1.16	31.50	7.00
2016	41.00	12.00	5.10	1.24	3.80	1.15	13.10	0.49	5.90	1.15	33.60	6.37
2017	42.00	13.00	5.60	1.03	4.00	1.17	15.20	0.49	6.40	1.20	33.70	6.40
2018	41.00	13.00	5.80	1.69	3.90	1.19	16.00	1.17	6.10	1.30	35.00	7.82
2019	40.00	13.00	5.20	1.64	3.50	1.26	18.80	1.49	5.50	1.50	35.80	8.07
2020	38.00	11.60	4.30	1.98	3.90	1.16	17.10	1.90	7.60	*	31.90	6.04
(1) Misturas Betuminosas Novas												
(2) MBR												
* Sem dados												

A partir dos dados do Quadro 2.1, podemos supor que se toda a MBR gerada fosse incorporada nas misturas betuminosas novas, a taxa de MBR presente em misturas betuminosas novas ficaria abaixo de 50% em todos os países entre os anos analisados. Na Figura 2.7 é possível verificar a cada ano qual seria a percentagem máxima de MBR introduzida em misturas betuminosas novas caso toda a MBR fosse incorporada em novas misturas.

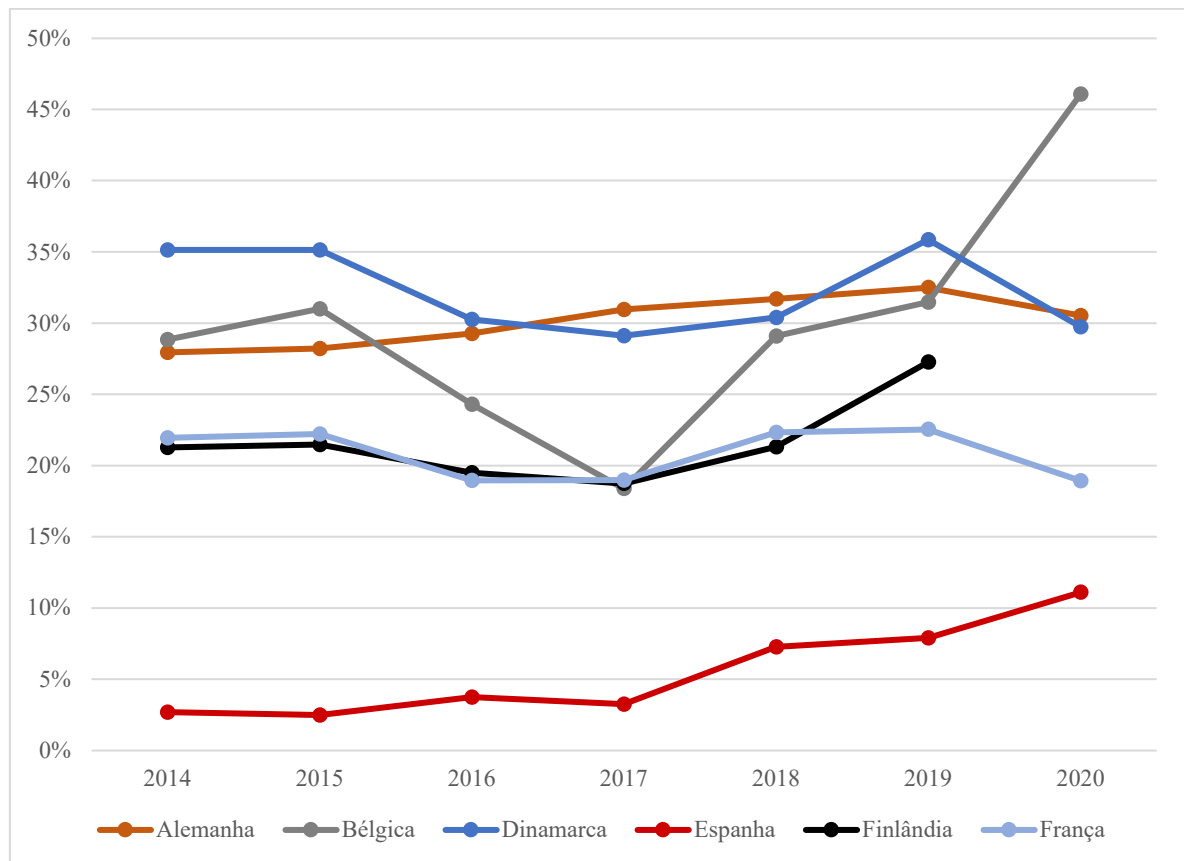


Figura 2.7 - Taxa máxima de incorporação de MBR

Uma das limitações ao uso da MBR está na sua heterogeneidade, pois em uma pilha de mistura betuminosa recuperada podem-se encontrar materiais provenientes da mesma obra ou de diferentes obras ou trechos. Com isso, provavelmente, haverá também diferentes tipos de agregados e ligantes dentro de uma mesma pilha de mistura recuperada, o que pode fazer com que ocorra incompatibilidade entre os componentes da mistura aquando da sua reciclagem (de Mesquita Lopes Gennesseaux, 2015). Contudo, existem formas de homogeneização e/ou fracionamento da MBR sendo estudadas com o objetivo de minimizar essa heterogeneidade (Villena, Gadler, Kabemba, & Miranda, 2013). A MBR que será usada deve ser tratada e misturada até obter um produto homogeneizado, os lotes de materiais que seja visível suas contaminações, devem ser descartados (Bedoya, 2021).

2.2 Mistura Betuminosa

A mistura betuminosa é produzida a partir da mistura de várias frações de agregados, filer e de betume. O betume é um subproduto derivado do petróleo obtido após processos de destilação do petróleo bruto, que possui propriedades aglutinantes, sendo responsável pela ligação das partículas de agregados.

Os agregados disponíveis usados em misturas betuminosas podem ser de origem natural, extraídos de pedreiras, e reciclados, que proveem da reutilização dos materiais fresados do pavimento. Em Portugal os agregados mais utilizados são rochas graníticas e calcárias por serem mais abundante no país e constituir características que permitam suas aplicações nas camadas de pavimento (Rosa & Santos, 2000; Sardão, Capitão, Almeida, & Picado-Santos, 2013). E no caso de uma MBR com uma taxa de incorporação menor que 100%, usa-se o agregado virgem misturado com o agregado reciclado (Figura 2.8).

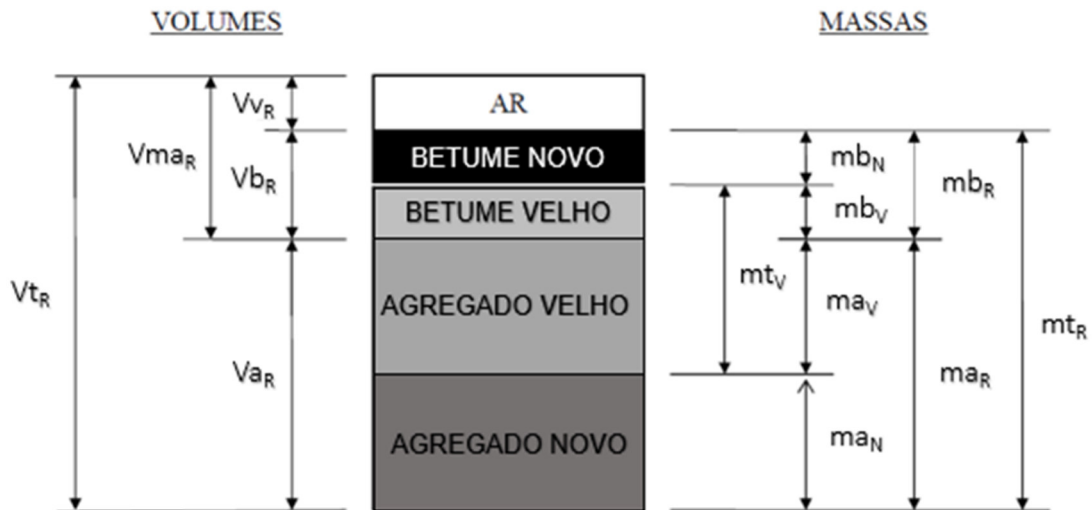


Figura 2.8 – Relação Volume e Massa - Adaptado de (Baptista, 2006)

V_{tR} – Volume total da mistura reciclada (cm^3);

V_{maR} – Volume de vazios no esqueleto do agregado da mistura reciclada (cm^3);

V_{VR} – Volume de vazios da mistura reciclada (cm^3);

V_{bR} – Volume de ligante da mistura reciclada (cm^3);

V_{aR} – Volume de agregado da mistura reciclada (cm^3);

m_{tR} – Massa total da mistura reciclada (g);

m_{bR} – Massa de ligante total da mistura reciclada (g);

m_{aR} – Massa de agregados da mistura reciclada (g);

m_{bN} – Massa de betume novo (g);

m_{bV} – Massa de betume velho (g);

m_{aV} – Massa de betume velho (g);

m_{aN} – Massa de agregado novo (g);

m_{tV} – Massa total de material velho (g).

Podendo a mistura betuminosa ser classificada de acordo com a temperatura na qual ela é produzida, sendo, quente, temperada ou a frio. A mistura betuminosa a quente, à qual será dada maior ênfase nesta dissertação, pode-se utilizar em camadas de desgaste, de ligação, de regularização e de base. As misturas betuminosas a quente (MBQ) normalmente são aplicadas em pavimentos flexíveis, sendo comum a utilização em pavimentos rodoviários e aeroportuários (Pimentel, 2013).

O fabrico de uma mistura betuminosa a quente, normalmente acontece em central, com temperaturas muito superiores à temperatura ambiente, onde são misturados todos os elementos que a constituem, nomeadamente o agregado e o ligante, que são aquecidos em separado e depois misturados, e ainda o ar que faz parte dos vazios. Os aditivos também são comuns de se encontrarem nas misturas betuminosas durante o processo de fabrico, pois podem acrescentar características complementares necessárias, como exemplo, a redução da viscosidade do ligante, no caso de aditivos orgânicos, maior durabilidade e consequentemente uma maior resistência ao envelhecimento, um melhor recobrimento do agregado pelo ligante, no caso de aditivos químicos, e melhorias no sistema funcional (Ferreira, 2009; Sá Maia, 2018).

Antes de se iniciar o fabrico de misturas betuminosas é preciso ter em consideração a composição da mistura, a caracterização dos agregados em relação às suas propriedades físicas e mecânicas, tais como granulometria, resistência ao desgaste, limpeza, entre outras e as propriedades do betume a ser utilizado, conforme Quadro 2.2, assim como a relação massa/volume, proporções dos materiais, e o tipo de fabrico. Para a utilização da MBR na mistura betuminosa é preciso também fazer a caracterização dos materiais, tais como, o teor ótimo de betume, através do ensaio Marshall, propriedades volumétricas, e percentagem do rejuvenescedor a ser inserido, pois é de grande importância ter esse conhecimento para determinar a melhor composição das frações de cada material. Normalmente as características da mistura betuminosa com percentagem de MBR deve apresentar as mesmas propriedades que uma mistura betuminosa virgem, pois as exigências são as mesmas (Baptista, 2006). Portanto, antes de se aplicar a mistura betuminosa, a mesma deve passar por ensaios de qualidade para a avaliação do comportamento mecânico.

Quadro 2.2 – Tipos de betume e exigências de conformidade (CEN, 2011b)

Propriedades (Condições de ensaio)		Tipos de betumes								
			Pen 10/20	Pen 20/30	Pen 35/50	Pen 50/70	Pen 70/ 100	Pen 100/ 150	Pen 160/ 220	Pen 250/ 330
Penetração (0,1mm) (25°C; 100g; 5s)		Min.	10	20	35	50	70	100	160	250
		Máx.	20	30	50	70	100	150	220	330
Temperatura de amolecimento (°C)		Min.	63	55	50	46	43	39	35	30
		Máx.	76	63	58	54	51	47	43	38
Viscosidade cinemática (mm2/s) (135 °C)		Min.	1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		Min.	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Temperatura de inflamação (°C)		Min.	250	240	240	230	230	230	220	220
*Resistência ao endurecimento	Variação de massa (%)	Máx.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
	Penetração (%) **	Min.	60	55	53	50	46	43	37	35
	Temp. amolecimento (°C)	Min.	65	57	52	48	45	41	37	32
	Aumento temp. amolecimento (°C)	Máx.	8	10	11	11	11	12	12	12

2.3 Rejuvenescedores

A mistura betuminosa perde parte de suas propriedades ao longo do tempo, causadas pelo seu envelhecimento, e a escolha do rejuvenescedor é necessária para fornecer ao pavimento as propriedades que foram perdidas a curto prazo e a longo prazo (Zaumanis, Mallick, Poulidakos, & Frank, 2014). O envelhecimento da mistura betuminosa a curto prazo acontece nas etapas de produção, transporte, espalhamento e compactação da mistura, devido ao efeito da temperatura durante esses processos. O envelhecimento a longo prazo ocorre durante a fase de utilização com as ações do tráfego, condições climáticas e a radiações ultravioletas e pelas variações de temperaturas, que causam o seu endurecimento (Antunes, Freire, & Neves, 2021). O endurecimento por oxidação tem sido considerado como a principal causa de envelhecimento de betumes. O envelhecimento do ligante é um aspeto importante a ser considerado na

reciclagem de misturas betuminosas, principalmente quando a taxa de incorporação da MBR é alta, pois esse processo torna o ligante mais rígido e influencia no desempenho da mistura (C. Santos, 2019).

Os rejuvenescedores são produtos usados para recuperar as propriedades originais do betume envelhecido, que são perdidas ao longo do tempo durante o processo de envelhecimento (Antunes et al., 2019; Shen, Amirkhanian, & Tang, 2007), pois o que acontece quando há uma redução na proporção entre asfaltenos/maltenos o betume muda suas características de ser um material flexível para um material mais rígido. A dosagem ótima de rejuvenescedor a ser aplicada, deve ser a que faça com que o betume apresente as propriedades finais desejadas de um betume virgem (Antunes, Freire, et al., 2021). Os rejuvenescedores devem reconstituir as propriedades necessárias para amolecer o ligante da MBR e produzir misturas uniformes e trabalháveis a curto prazo, e a longo prazo recuperar as propriedades químicas e físicas do ligante betuminoso envelhecido e manter a estabilidade durante um outro período de serviço (Antunes et al., 2019; Zaumanis et al., 2014). A incorporação desses materiais na reciclagem de MBR em misturas betuminosas permite o aproveitamento do ligante envelhecido, com consequentes impactos ambientais e econômicos (Antunes, Freire, et al., 2021).

A escolha do rejuvenescedor deve ser feita de forma a ter dois fatores importantes em consideração, o efeito a curto e a longo prazo. Segundo (Zaumanis et al., 2014) a curto prazo o rejuvenescedor deve permitir a mistura com alto teor de MBR, difundindo-se rapidamente com o ligante da MBR para produzir uma mistura uniforme, e ainda que reduza a viscosidade do ligante, de forma que produza uma mistura que apresente trabalhabilidade. A longo prazo, o rejuvenescedor deve reconstituir as propriedades químicas e físicas do ligante envelhecido e manter a estabilidade por outro ciclo de utilização.

O rejuvenescedor deve ser adicionado adequadamente de acordo com as propriedades da mistura para satisfazer os critérios de penetração e viscosidade (Shen et al., 2007). Isso é um fator importante para o rejuvenescimento da mistura betuminosa envelhecida que é preciso ser levado em consideração, pois para se escolher um determinado tipo de rejuvenescedor é necessário conhecer o tipo e as propriedades do betume presente na mistura betuminosa a ser recuperada, e que seja o mais homogênea possível, para que haja uma boa interação com o agente rejuvenescedor, de forma a permitir a definição da percentagem de rejuvenescedor.

Um tipo de agente rejuvenescedor que vem sendo bastante estudado são os chamados bio-óleos, que são óleos provenientes de base vegetal, óleos orgânicos e resíduos de óleos de plantas (F. B. Santos & Faxina, 2019). Segundo (Rodrigues, 2019) subprodutos das atividades

humanas têm sido estudados para o uso como rejuvenescedores, como exemplo os óleos usado provenientes da indústria mecânica, tal como os óleos da indústria alimentar. De modo geral, os produtos orgânicos superaram os aditivos à base de petróleo na maioria dos testes, sendo necessário menores quantidades (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2015). Ainda segundo (Antunes et al., 2019; Zaumanis et al., 2015), observou-se que os ensaios de penetração e temperatura de amolecimento podem ser bons indicadores para a seleção inicial da quantidade ideal, uma vez que os resultados fornecem indicações do desempenho da mistura em relação à fadiga e ao módulo de rigidez.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Para a análise da capacidade de multi-reciclagem de uma mistura betuminosa densa, do tipo betão betuminoso, com máxima dimensão do agregado de 14 mm, com um betume de penetração nominal 35/50 para camada de desgaste AC 14 surf 35/50, objeto do estudo, de modo a verificar a interação entre diferentes tipos de rejuvenescedores ao longo dos ciclos de ciclagem em MBR, foram feitos ensaios no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com o auxílio de equipamentos para a verificação do comportamento dos materiais em condições similares às de utilização em uma camada de desgaste de um pavimento rodoviário.

3.1 Materiais

Para os ensaios realizados no laboratório foram utilizados os seguintes materiais:

- MBR – Foi utilizada uma MBR (AC 14 Surf), produzida em laboratório, após um ciclo de reciclagem (Figura 3.1) com as seguintes frações: 0/4,75; 4,75/12,5; 12,5/19 mm.



Figura 3.1 – Mistura Betuminosa Recuperada

- Rejuvenescedores – Foram utilizados dois rejuvenescedores de diferentes origens, um em cada ciclo. Ambos os rejuvenescedores são comerciais e de origem vegetal.
- Agregados naturais virgem – Basalto 10/16, basalto 4/12 e basalto 0/4.
- Betume tradicional de classe de penetração nominal 35/50.

3.2 Metodologias

A primeira fase dos trabalhos no laboratório foi fazer a caracterização do betume recuperado. Para tal foram recuperadas três cápsulas de betume proveniente da MBR, das quais foram feitas três amostras (A, B e C), uma das amostras foi usada para os ensaios de penetração

e de determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel a bola, após a recuperação do betume. Em seguida, em cada amostra de betume foi inserida uma percentagem de rejuvenescedor para a verificação do teor ótimo do rejuvenescedor (Quadro 3.1).

Uma segunda fase compreendeu a caracterização da mistura betuminosa. E para se avaliar o desempenho da mistura betuminosa com taxa de incorporação de 75% de MBR, no seu terceiro ciclo de utilização com a adição de um rejuvenescedor diferente do usado no ciclo anterior, foram moldados provetes cilíndricos e lajetas para a realização de ensaios.

3.2.1. Ensaios para caracterização da MBR

A MBR utilizada foi produzida em laboratório e após passar por um ciclo de reciclagem, a mesma então foi fracionada em 3 tamanhos diferentes, com as seguintes dimensões mínimas e máximas, respetivamente, 0/4,75 mm; 4,75/12,5 mm; 12,5/19 mm.

Os primeiros ensaios realizados foram para extração, recuperação e caracterização do betume rejuvenescido. Foram então moldadas lajetas e provetes cilíndricos, com taxa de incorporação de 75% de MBR, para serem submetidos a ensaios no laboratório. Na sequência foram feitos os ensaios nas amostras para determinar as propriedades Marshall e volumétricas, das características superficiais, e do comportamento mecânico das misturas betuminosas, através dos ensaios de resistência à fadiga, da determinação do módulo de deformabilidade pelo ensaio de 4 pontos e de deformação permanente.

Os materiais provenientes da MBR devem passar pelo mesmo processo de análise do que as misturas betuminosas virgens, a apresentar resultados similares.

3.2.2. Extração e recuperação do ligante

Os ensaios de extração e recuperação do ligante foram realizados de acordo com as normas EN 12697-1 e EN 12697-3:2013+A1 (CEN, 2012a, 2013).

A primeira etapa do ensaio iniciou-se com a MBR, fracionada com granulometria > 19 mm, foi misturada com o solvente, tolueno puro, que ficou em repouso durante uma hora na centrífuga (Figura 3.2), para o tolueno dissolver o betume, e então na sequência foi aplicada na centrífuga uma velocidade de 800 RPM (Rotações Por Minuto), de maneira que a mistura betume + solvente, seja separada dos agregados. O passo seguinte da extração foi feito na centrífuga de tubos (Figura 3.3), para que os materiais finos que passaram junto com o betume e o solvente na etapa anterior, fossem então filtrados.



Figura 3.2 – Centrifugadora



Figura 3.3 – Centrifugadora de tubos

Após a separação dos finos, é iniciada no rotavapor (Figura 3.4) a separação da mistura do betume e solvente por um processo de destilação, de maneira que a mistura é aquecida em uma primeira fase, com a pressão a temperatura de ebulição do tolueno controladas, até a evaporação do tolueno. Na segunda fase, é aumentada a temperatura e reduzida a pressão, para que eliminar algum resíduo que possa ter permanecido na mistura. Ao fim é obtido somente o betume recuperado da mistura inicial.



Figura 3.4 – Rotavapor.

3.2.2.1. Penetração

Este ensaio permite avaliar a consistência do betume, e foi realizado em uma sala com temperatura controlada e de acordo com a norma EN 1426 (CEN, 2015a). Antes de iniciar o

ensaio foi colocada a amostra de betume, dentro de uma cápsula, à temperatura de 25 °C em banho-maria (Figura 3.5), durante 60 minutos, antes de iniciar a penetração com a agulha. Após 5 segundos é feita a medição da penetração da agulha no betume (Figura 3.6), a penetração é expressa em decimas de milímetros. Foram realizadas 3 medições em pontos distintos da amostra.



Figura 3.5 – Betume em banho-maria

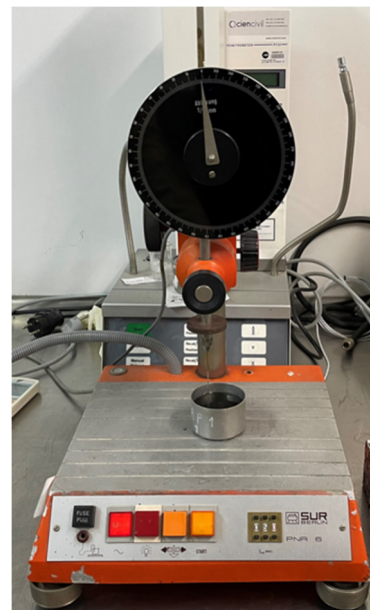


Figura 3.6 – Ensaio de penetração

3.2.2.2. Anel e bola

O ensaio de determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola foi feito de acordo com a norma EN 1427 (CEN, 2015b).

Foram feitos cinco ensaios de anel e bola. O primeiro com a amostra do betume recuperado, e os outros quatro ensaios com a mistura do betume recuperado com a adição do rejuvenescedor, das amostras A, B, C e D.

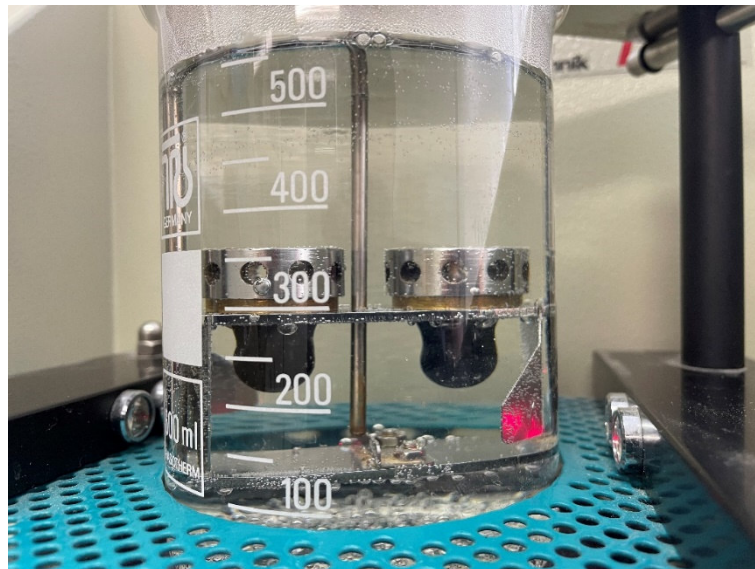


Figura 3.7 – Ensaio de Anel e Bola

3.2.2.3. Determinação da percentagem de rejuvenescedor

Quatro percentagens de rejuvenescedor (3,0%, 5,0%, 6,0% e 7,0%) foram usadas para determinar a dosagem ideal de rejuvenescedor (Quadro 3.1). Os testes foram realizados em amostras recuperadas de betume e foram tratadas com rejuvenescedor de acordo com o seguinte protocolo de mistura, que foi o mesmo adotado por (Antunes, 2021):

1. O betume recuperado da MBR foi colocado em estufa a 135 °C por 60 min, tempo necessário para que fique fluido.
2. Em seguida, a betume recuperado da MBR foi misturado para homogeneização e remoção de qualquer bolha.
3. Determinou-se a massa da MBR e colocou-se o recipiente sobre uma manta de aquecimento entre 100 e 135 °C.
4. A dosagem de rejuvenescedor foi adicionada betume recuperado da MBR e misturada manualmente com uma vareta de vidro por cerca de 30 segundos, verificando-se a sua homogeneidade.
5. O recipiente com a mistura (betume recuperado da MBR + rejuvenescedor) foi colocado na estufa a 135 °C por 10 min e a mistura foi misturado por 30 segundos, ou até que se verificasse uma homogeneização da mistura, em intervalos de 5 minutos.

Após o processo de tratamento, as amostras de betume recuperado da MBR foram ensaiadas quanto aos valores de penetração e ponto de amolecimento. A literatura indica que a percentagem ótima de rejuvenescedor em peso da MBR é aquela que permite atender às

propriedades da percentagem de betume virgem a ser utilizada na mistura a formular com a incorporação da MBR (Antunes, 2021).

Quadro 3.1 – Percentagem de rejuvenescedor

Amostra	Massa (g)	Percentagem de Rejuvenescedor (%)	Massa de Rejuvenescedor (g)	Percentagem de Betume (%)	Massa de Betume (g)
A	50	3,0	1,5	97,0	48,5
B	50	5,0	2,5	95,0	47,5
C	50	6,0	3,0	94,0	47,0
D	50	7,0	3,5	93,0	46,5

3.2.3. Moldagem de provetes cilíndricos

Para a determinação das quantidades de materiais para a moldagem dos provetes cilíndricos, Quadro 3.2, os cálculos tiveram como ponto de partida a percentagem ótima de rejuvenescedor, 6%. A norma seguida para a moldagem dos provetes foi a EN 12697-35 (CEN, 2016a).

Para se fazer as misturas dos materiais, foram seguidas as etapas descritas abaixo:

1. Os agregados virgens foram aquecidos a 205 °C durante 4 h.
2. A MBR foi aquecida a 130 °C durante 2:30 h.
3. O betume virgem foi aquecido a 165 °C durante 3 h.
4. Foi adicionado a MBR, o rejuvenescedor e misturado, em um recipiente também aquecido, por 30 segundos.
5. Em seguida foram adicionados os agregados virgens, e misturados por 60 segundos.
6. Na sequência foi acrescentado na mistura o betume virgem, e misturado por mais 90 segundos.
7. Após o término da mistura, todo o material foi despejado em um molde cilíndrico e aplicado 75 pancadas em cada face para a compactação.

Após a desmoldagem dos provetes, os mesmos foram numerados para em seguida serem realizados os ensaios de baridade e rotura Marshall. Com a mistura sem compactação foi feito o ensaio da baridade máxima teórica.



Figura 3.8 – Mistura betuminosa para moldagem do provete cilíndrico



Figura 3.9 – Compactação do provete cilíndrico

Quadro 3.2 – Quantidades da mistura para provete cilíndrico

Provete cilíndrico					
Betume	(g)	Agregado	(g)	MBR	(g)
Betume incluído na MBR	38,1	Basalto 0/4	161,7	MBR 0/4,75	26,6
Betume virgem	15,6	Basalto 4/12	87,1	MBR 4,75/12,5	480,0
Rejuvenescedor	2,3	Basalto 10/16	62,2	MBR 12,5/19	464,5
Total (a)	17,9	Total (b)	311,0	Total (c)	971,1
Massa total da mistura (a+b+c)			1 300,0 (g)		

A partir das misturas betuminosas preparadas, foram moldados 4 provetes cilíndricos, por compactação e ainda uma mistura descompactada.



Figura 3.10 – Provetes cilíndricos



Figura 3.11 – Mistura sem compactação

3.2.4. Moldagem de lajetas

Foram moldadas 2 lajetas pequenas com as dimensões de 30,5 cm x 30,5 cm e outras 3 lajetas grandes de dimensões 30,5 cm x 40,0 cm. Ao término dos ensaios de características superficiais as lajetas grandes foram cortadas e divididas em 5 partes, para a obtenção de provetes prismáticos, para a avaliação do módulo de rigidez e do comportamento à fadiga, pelo método do 4PBT (acrescentar normas de ensaio de referência). Os métodos de fabricação das 5 lajetas moldadas foram de acordo com as normas EN 12697-33 e EN 12697-35.

As misturas dos materiais seguiram as seguintes etapas:

1. Os agregados virgens foram aquecidos a 205 °C durante 4 h.
2. A MBR foi aquecida a 130 °C durante 2:30 h.
3. O betume virgem foi aquecido a 165 °C durante 3 h.
4. Foi adicionado a MBR, o rejuvenescedor e misturado, na tigela também aquecido, por 30 segundos.
5. Após o término da mistura, todo o material foi despejado em um molde e compactado com vibração.



Figura 3.12 – Mistura para as lajetas



Figura 3.13 – Compactação das lajetas

Quadro 3.3 – Quantidades da mistura para lajeta pequena

Lajeta pequena					
Betume	(g)	Agregado	(g)	MBR	(g)
Betume incluído na MBR	357	Basalto 0/4	1514,3	MBR 0/4,75	249,2
Betume virgem	146	Basalto 4/12	815,4	MBR 4,75/12,5	4494,1
Rejuvenescedor	21,4	Basalto 10/16	582,4	MBR 12,5/19	4349,9
Total (a)	167,4	Total (b)	2912,1	Total (c)	9093,2
Peso Total da mistura (a+b+c)			12 172,7 (g)		

Quadro 3.4 – Quantidades da mistura para lajeta grande

Lajeta grande					
Betume	(g)	Agregado	(g)	MBR	(g)
Betume incluído na MBR	468,3	Basalto 0/4	1985,9	MBR 0/4,75	326,8
Betume virgem	191	Basalto 4/12	1069,4	MBR 4,75/12,5	5893,9
Rejuvenescedor	28,1	Basalto 10/16	763,8	MBR 12,5/19	5704,8
Total (a)	219,1	Total (b)	3819,1	Total (c)	11925,5
Peso Total da mistura (a+b+c)			15 963,7 (g)		

3.2.5. Pêndulo britânico

O ensaio do pêndulo britânico, o qual é medido o atrito superficial para poder determinar a resistência à derrapagem (microtextura), foi feito nas cinco lajetas moldadas. Antes de iniciar o ensaio, o equipamento foi ajustado de maneira que a haste do pêndulo tocasse a superfície da lajeta em um intervalo de 12,6 cm, posteriormente a superfície da lajeta e a ponta de borracha de pêndulo foram molhados, antes de cada leitura. As leituras foram validadas apenas se em um intervalo entre cinco leituras consecutivas não tivesse uma diferença entre o

PVT (*Pendulum Test Value*) maior que 3. O ensaio foi feito de acordo com a norma EN 13036-4 (CEN, 2011a). As condições, de temperatura média, aferidas para o ensaio foi de 22 °C.



Figura 3.14 – Pêndulo Britânico

3.2.6. Macrotextura

O ensaio da macrotextura foi feito de acordo com a norma EN 13036-1 (CEN, 2010), em que um recipiente com volume conhecido, é cheio com esferas de vidro e espalhado sobre a superfície da lajeta com movimentos circulares, após o preenchimento dos vazios é feita a medição do diâmetro em quatro pontos diferentes, e considerada a média das medições. Ao término do ensaio toda a superfície da lajeta foi limpa para dar sequência a outros ensaios.

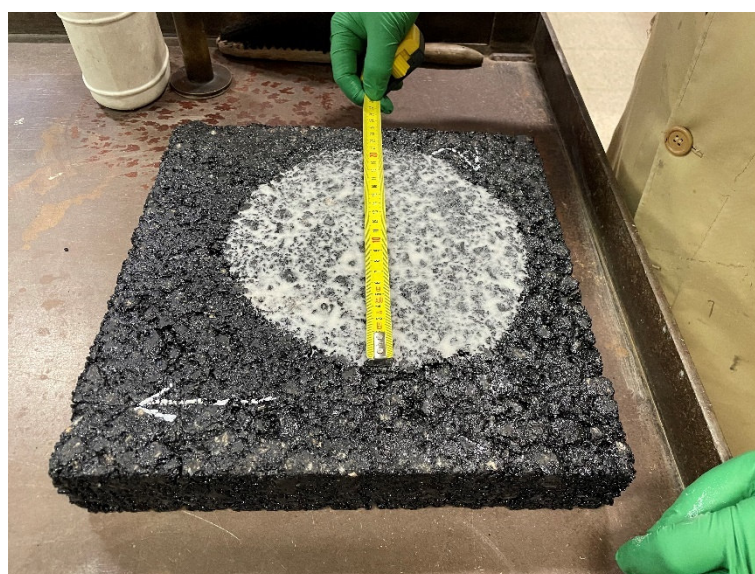


Figura 3.15 – Macrotextura

3.2.7. Baridade (massa volúmica aparente)

O ensaio da baridade foi feito de acordo com a norma EN 12697-6 (CEN, 2020), para determinação das propriedades volumétricas da mistura compactada.

O primeiro passo foi fazer a pesagem das amostras ainda secas, e na sequência a pesagem das amostras imersas na água com uma temperatura conhecida. Depois as amostras foram retiradas da água, uma de cada vez, e secas a sua superfície para determinar a massa da amostra com a superfície seca.



Figura 3.16 – Amostras submersas

3.2.8. Baridade máxima

O ensaio da baridade máxima foi feito de acordo com a norma EN 12697-5 (CEN, 2019).

Antes de se iniciar o ensaio, foi medida a massa do picnómetro vazio com a tampa, a massa do picnómetro com a tampa mais a amostra seca, e posteriormente, a massa do picnómetro com a amostra cheio de água com a tampa. Foi feita a leitura da temperatura da água para se determinar a massa volúmica da água.



Figura 3.17 – Picnómetro de vácuo

3.2.9. Ensaio de pista (*Wheel tracking*)

O ensaio *wheel tracking* foi feito de acordo com a norma EN 12697-22 (CEN, 2007). Foram ensaiadas duas lajetas, ambas com espessura média de 50,7 mm, que ficaram em um período de pré-condicionamento por 6 h com uma temperatura de 60 °C, que é a mesma temperatura usada durante o ensaio. Foram aplicados 10.000 ciclos de uma rodeira e verificada a sua relação com a deformação da lajeta.

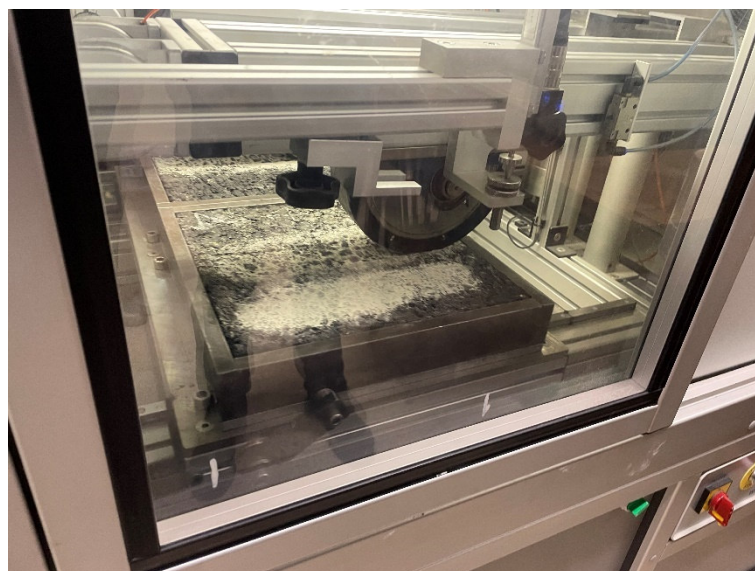


Figura 3.18 – Ensaio de pista (*Wheel tracking*)

3.2.10. Ensaio Marshall

O ensaio Marshall foi feito de acordo com a norma EN 12697-34 (CEN, 2012b). Os 4 provetes cilíndricos que foram ensaiados ficaram mergulhados durante 60 minutos em água a 60 °C antes do início do ensaio, assim como o equipamento, estabilómetro, foi pré-aquecido. A carga é aplicada nos provetes até se atingir o coeficiente de deformação, e continua até a máxima leitura no dispositivo de medição. O ensaio ocorreu a uma velocidade constante de 50 mm/min e a uma temperatura de 21,5 °C.

3.2.11. Ensaio de rigidez

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12697-26 (CEN, 2018b). As 3 lajetas grandes foram serradas de modo que cada lajeta gerou 5 vigas (Figura 3.19), que foram submetidas ao ensaio de rigidez em um equipamento com 4 apoios e com 25 estágios nas frequências de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 1 e 0.1 Hz, sendo 100 ciclos em cada frequência. Os dois últimos estágios (1 e 0.1 Hz) são repetidos para verificar se a viga apresentou algum dano durante o ensaio.

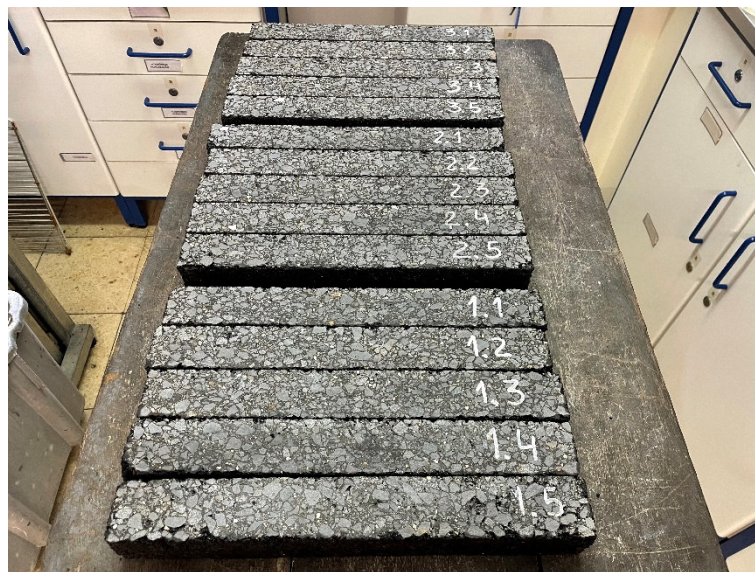


Figura 3.19 – Vigas ensaiadas

3.2.12. Ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga, Figura 3.20, foi realizado de acordo com norma EN 12697-24 (CEN, 2018a), com o método flexão de 4 apoios, com deformação constante, em que cada conjunto de 5 vigas foi submetido a um nível de deformação (200 μ m, 300 μ m e 400 μ m) e uma frequência de 10 Hz. O critério de falha utilizado foi o convencional, quando o valor do módulo de rigidez reduz pela metade do seu valor inicial.

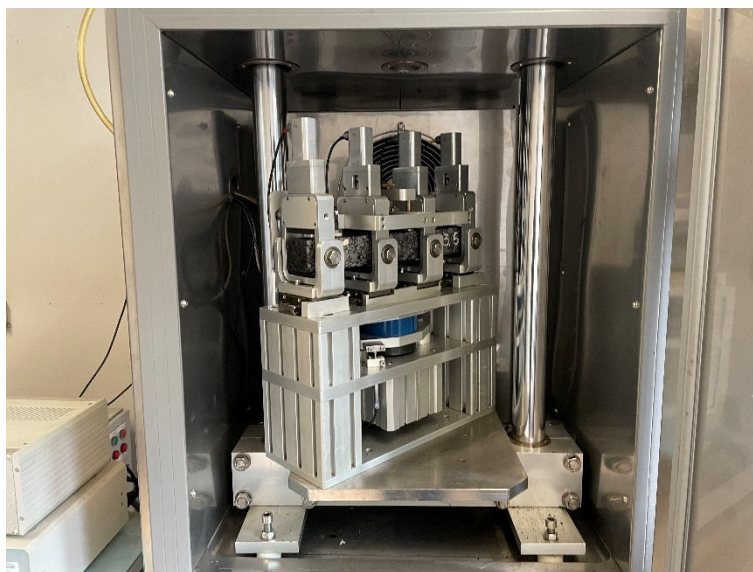


Figura 3.20 – Ensaio de rigidez e fadiga

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios mencionados no capítulo anterior. Estes resultados foram comparados com um estudo anterior (Antunes, 2021), o qual apresenta resultados de estudos comparativos feitos com mistura betuminosa sem a adição de MBR e de misturas betuminosas com taxa de incorporação de 75% de MBR após um e dois ciclos de reciclagem com o uso de um rejuvenescedor de base biológica, sendo o mesmo um subproduto da indústria da produção de papel utilizando madeira de pinheiro.

4.1 Características do betume rejuvenescido

No Quadro 4.1 são apresentadas as leituras feitas nas amostras com quatro diferentes percentagens de rejuvenescedor inserido e uma amostra sem a utilização do rejuvenescedor, durante os ensaios de penetração e anel e bola.

No início dos ensaios, foram feitas quatro cápsulas de amostragem com o betume recuperado para os ensaios de penetração e anel e bola, sendo que uma cápsula não foi adicionada o rejuvenescedor e outras três inseridos 3%, 5% e 7% de rejuvenescedor. Entretanto, para o ensaio de penetração nenhum dos resultados foi satisfatório para a recuperação do betume, com todas as amostras fora do intervalo desejado entre 35 e 50. Já no ensaio de anel e bola, a amostra com 7% de rejuvenescedor esteve dentro dos limites desejados entre 50 °C e 58 °C.

Foi então moldada mais uma cápsula com uma percentagem de rejuvenescedor de 6%, que obteve um resultado satisfatório, tanto no ensaio de penetração como no anel e bola.

Quadro 4.1 – Resultados rejuvenescedor

Penetração					
Leitura	0%	3%	5%	6%	7%
L1	17	29,0	36,0	47,0	49,0
L2	16	27,0	39,0	46,0	54,0
L3	16	26,0	36,0	44,0	53,0
L4	15	28,0	35,0	44,0	53,0
L média	16,00	27,50	36,50	45,25	52,25
Anel e bola					
L direita	70,0	62,5	60,3	54,1	56,7
L esquerda	70,1	62,5	60,4	55,1	56,7
L média	70,05	62,50	60,35	54,60	56,70

4.2 Propriedades Marshall e volumétricas

Após a moldagem dos provetes, foram determinadas as suas propriedades volumétricas e Marshall, conforme consta no Quadro 4.2 abaixo. Como forma de comparação, foram inseridos os dados apresentados na tese do (Antunes, 2021) da mistura betuminosa sem MBR (0% MBR-0), uma mistura betuminosa com 75% de adição de MBR no primeiro ciclo de reciclagem (75% MBR-1).

A mistura betuminosa, em estudo, com 75% de adição de MBR no segundo ciclo de reciclagem (75% MBR-2.1) no ensaio de deformação Marshall verificou-se que a resistência máxima a deformação, após a correção da estabilidade conforme a fórmula (4.1) prevista na norma EN 12697-34 (CEN, 2012b), e o coeficiente de estabilidade estão dentro dos limites exigidos no Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da Infraestruturas de Portugal (IP), contudo, como não é conhecido o tipo de agregado usado na mistura betuminosa com a adição de MBR, pois segundo o CETO para granitoides e agregados provenientes de rochas com predominância de sílica na sua composição a estabilidade máxima deverá ser 21 kN.

O volume de vazios no agregado compactado (VMA), a porosidade, a baridade máxima teórica (BMT) e a baridade imersa foram as propriedades volumétricas apresentadas para análises de comparações com as duas misturas betuminosas de processos anteriores.

$$C = 5,2 \times e^{-0,0258 h} \quad (4.1)$$

Em que:

C – Fator de correção;

h – Altura média do provete (mm);

Quadro 4.2 – Propriedades Marshall e volumétricas

ENSAIO MARSHALL E PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS					
	0% MBR-0	75% MBR-1	75% MBR-2	75% MBR-2.1	Limites (CETO)
Força Máxima (kN)	14,8	21,0	16,7	19,5	7,5 - 15 (21)
Desl. Força Máx. (mm)	3,0	3,2	3,4	3,7	2 - 4
Coeficiente (kN/mm)	4,9	6,6	4,9	3,6	> 3
VMA (%)	15,5	14,2	15,0	13,4	-
Porosidade (%)	3,2	3,4	3,5	1,9	3 - 5
BMT (Mg/m ³)	2,64	2,69	2,71	2,69	-
Baridade imersa (Mg/m ³)	2,56	2,61	2,62	2,64	-

Os resultados mostraram que a amostra produzida para o ensaio Marshall é menos porosa do que o limite permitido, valor que não se constatou para a lajeta produzida para o ensaio de *Wheel Tracking*, o qual obteve uma porosidade de 4,6%. Considerando as dimensões reduzidas do provete Marshall e o elevado número de frações diferentes de material que são incorporadas nestas misturas, existe uma maior variabilidade nos resultados obtidos obtendo-se porosidades abaixo dos limites definidos no CETO da IP. Nas frações mais grossas de MBR, ao incorporar um número reduzido de partículas de cada fração, pode-se por vezes estar a incorporar uma maior percentagem de betume, uma vez que as partículas de MBR são compostas por mástique e agregados, podendo algumas partículas ser compostas exclusivamente por mástique. No caso dos provetes de maior dimensão, como a quantidade de material de cada fração é maior, esta variabilidade é mitigada, obtendo-se assim provetes que cumprem os limites de porosidade pretendidos para a mistura. Já os outros elementos cumprem os limites estabelecidos, não havendo muita variação entre o primeiro e o segundo ciclo de reciclagem da MBR.

4.3 Comportamento mecânico

Nestes capítulos serão apresentados os resultados dos ensaios e analisados os comportamentos mecânicos das misturas 0% MBR, 75% MBR-1, 75% MBR-2 e 75% MBR-2.1.

4.3.1. Deformação permanente

O comportamento à deformação permanente das duas lajetas pequenas, no segundo ciclo de reciclagem, foi avaliado através do ensaio de pista, após a aplicação de 10.000 ciclos de passagem, e comparados com ensaios realizados anteriormente (Antunes, 2021). Os resultados dos parâmetros da deformação máxima (RD_{air}), taxa de deformação (WTS_{air}) e

percentagem de profundidade de rodeira (PRD_{air}) constam no Quadro 4.3 abaixo. Na Figura 4.1 é possível observar e comparar as deformações causadas ao longo dos 10.000 ciclos em uma mistura betuminosa sem a inserção de MBR (0% MBR), em uma mistura betuminosa com taxa de 75% de MBR no primeiro ciclo de reciclagem (75% MBR-1), em uma mistura betuminosa com taxa de 75% de MBR no segundo ciclo de reciclagem (75% MBR-2), e em outra mistura betuminosa com taxa de 75% de MBR no segundo ciclo de reciclagem (75% MBR-2.1), porém usando um rejuvenescedor diferente do aplicado na reciclagem no primeiro ciclo. O Anexo 1 apresenta as características dos provetes e condições de ensaio, dados da preparação, os parâmetros, e resultados a cada 50 ciclos, o equivalente a 100 passagens do rodado da mistura 75% MBR-2.1.

Quadro 4.3 – Parâmetros do ensaio *Wheel Tracking*

PARÂMETROS <i>WHEEL TRACKING</i>			
Lajetas	RD_{air} (mm)	WTS_{air} (mm/10 ³ ciclos)	PRD_{air} (%)
0% MBR	5,90	0,28	11,70
75% MBR-1	2,00	0,03	4,00
75% MBR-2	2,30	0,05	4,50
75% MBR-2.1	2,82	0,07	5,56

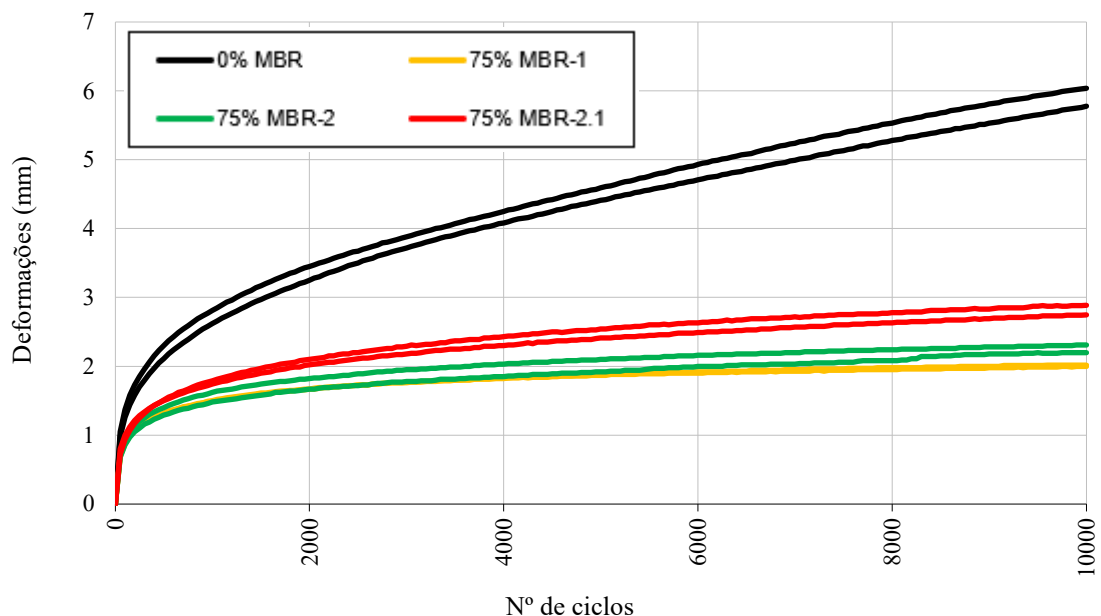


Figura 4.1 – Deformação medida no ensaio *Wheel Tracking*

Após 10.000 ciclos, a mistura 75% MBR-2.1, apresentou uma deformação máxima e uma taxa de deformação maior do que as misturas com MBR usadas nos ciclos anteriores,

porém com uma deformação com aproximadamente 50% inferior a mistura inicial (0% MBR). Contudo, os resultados apontam para uma recuperação das propriedades da mistura 75% MBR-2, face as outras misturas com MBR.

4.3.2. Módulo de Rigidez

Neste ensaio foram analisados e comparados os resultados referentes à rigidez, ao ângulo de fase, que expressa o grau de elasticidade dos materiais viscoelásticos (um ângulo de fase de 0° representa um material elástico puro e um ângulo de fase de 90° representa um material viscoso puro (C. Santos, 2019)), e ao módulo complexo que é definido pela tensão-deformação, que depende da frequência e temperatura, sendo a componente real E1 chamada de módulo elástico, que permite avaliar a parte recuperável da energia armazenada, e a componente imaginária E2 que está associada ao comportamento viscoso irreversível do material (Colpo, 2014). Os valores obtidos são apresentados no Anexo 2.

Ao analisarmos na Figura 4.2 a frequência de 10 Hz, que correspondente aproximadamente a uma carga real aplicada por um veículo a 60 km/h (Neves, Picado, Alves, Martinho, & Barbosa, 2013), pode-se observar um aumento de aproximadamente 10% da rigidez da mistura 75% MBR-2.1, em comparação com a mistura 75% MBR-2, mas em comparação, as misturas 0% MBR e 75% MBR-1 houve uma redução da rigidez da mistura. Portanto, mesmo com a utilização de um rejuvenescedor diferente no segundo ciclo de reciclagem (75% MBR-2.1), conseguiu-se uma recuperação das propriedades de modo quase equivalente ao da mistura 75% MBR-2, não demonstrando incompatibilidade entre os rejuvenescedores.

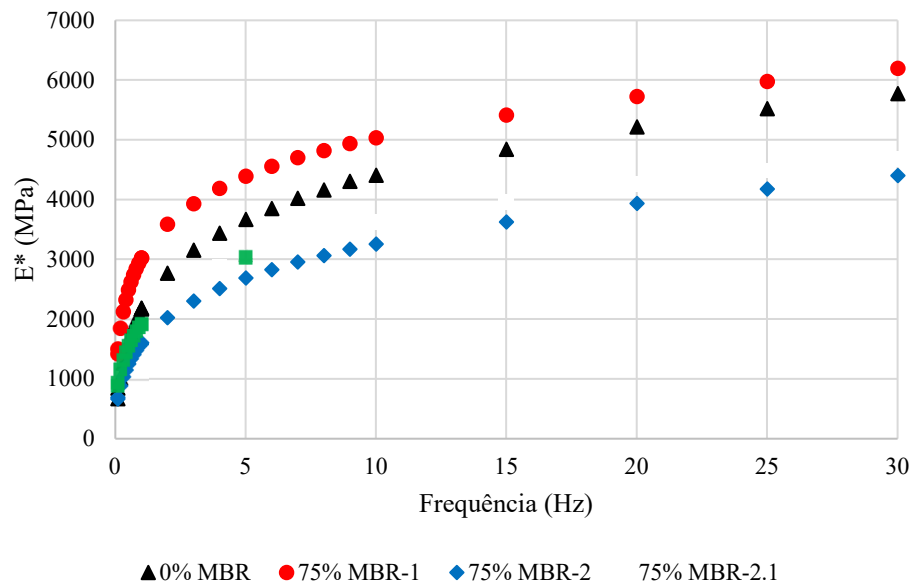


Figura 4.2 – Gráfico de Rigidez x Frequência

Já o ângulo de fase da mistura 75% MBR-2.1 tem a tendência de seguir próximo da mistura inicial (0% MBR) a partir da frequência de 10 Hz, e com um comportamento mais elástico do que o 75% MBR-2, conforme Figura 4.3.

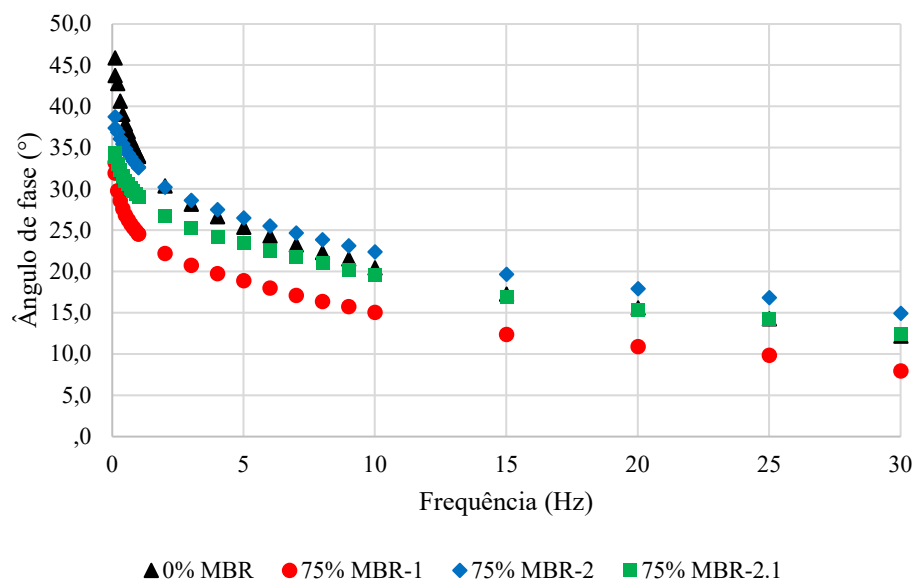


Figura 4.3 – Evolução do ângulo de fase com a frequência

No Diagrama de Black apresentado na Figura 4.4, verificamos que na mistura 75% MBR-2.1 houve uma redução no intervalo no ângulo de fase, se comparado com as demais misturas, assim como na sua rigidez. Sendo um material com menores variações de rigidez e ângulo de fase.

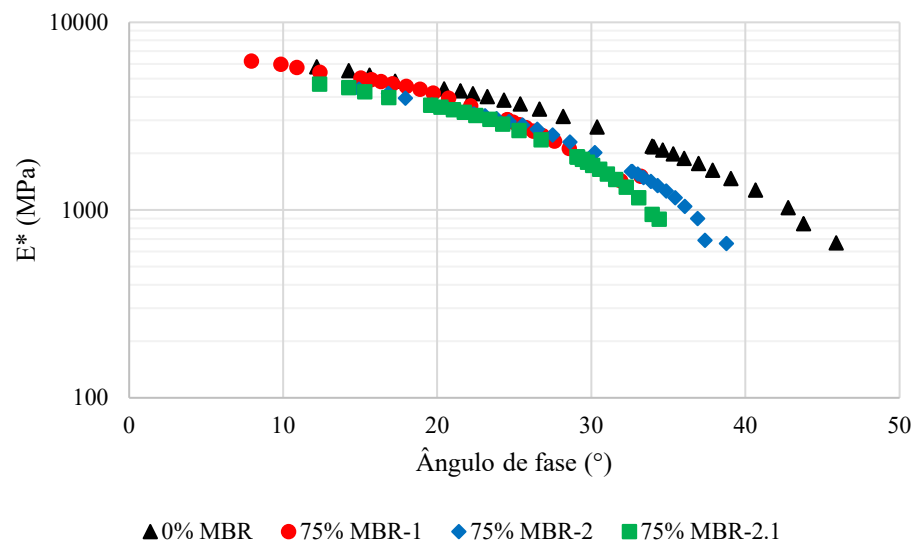


Figura 4.4 – Diagrama de Black

Na Figura 4.5 a relação entre as componentes E_1 (elástica) e E_2 (viscosa) demonstra o comportamento reológico das misturas. Como pode-se observar a mistura 75% MBR-2.1 com um comportamento similar ao da mistura 75% MBR-2, o que indica que as misturas apresentam um comportamento com menos variações viscoelásticas, se comparadas nos dois ciclos anteriores.

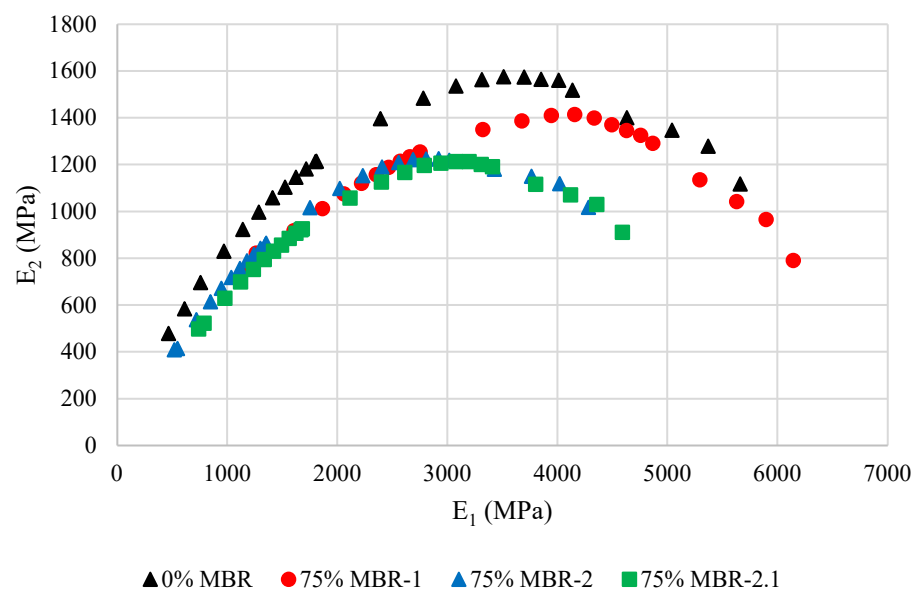


Figura 4.5 – Diagrama de Cole-Cole

Nas Figura 4.6 e Figura 4.7 é possível verificar as reduções das componentes elástica (E_1) e viscosa (E_2) nas misturas 75% MBR-2 e 75% MBR-2.1 ao longo das frequências. O que

indica que o rejuvenescedor tornou as misturas no segundo ciclo de reciclagem menos rígidas e menos viscosas, e com comportamentos similares, quando analisados na frequência de 10 Hz.

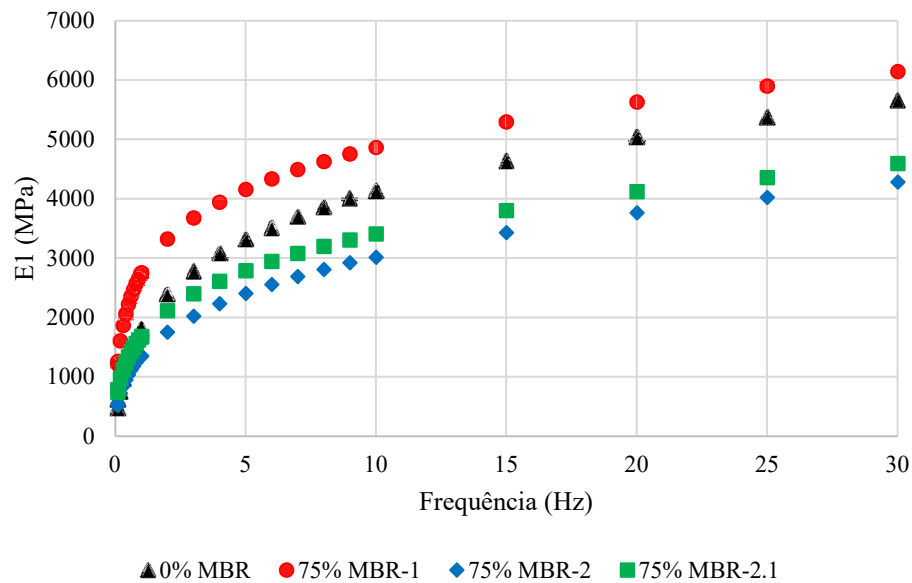


Figura 4.6 – Evolução da componente elástica (E_1) com a frequência

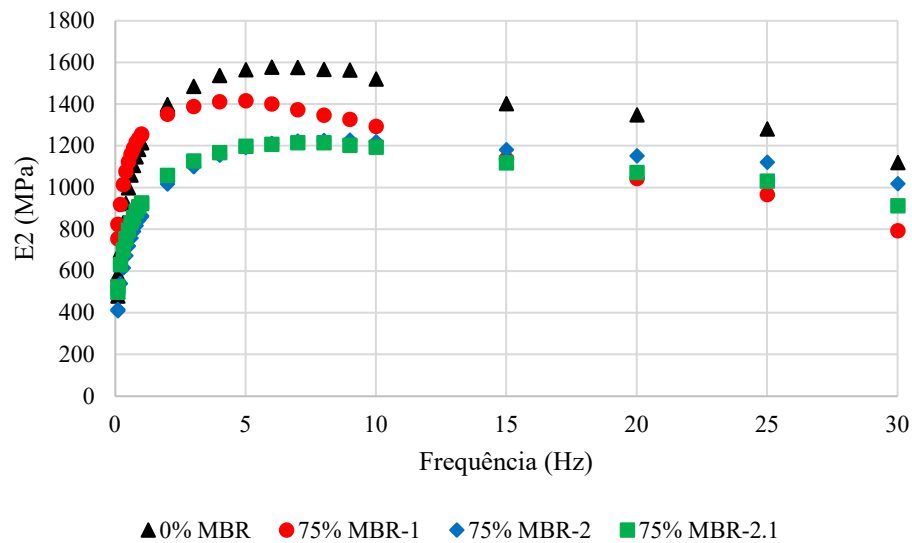


Figura 4.7 – Evolução da componente viscosa (E_2) com a frequência

4.3.3. Comportamento à fadiga

Os números de ciclos das misturas betuminosas estão relacionados com a extensão aplicada, quanto maior a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, maior será o número de ciclos que ela suportará e, consequentemente, maior será a sua durabilidade (Afonso, 2015). Na Figura 4.8 estão representados os resultados das extensões ensaiadas (200 μm , 300 μm e 400 μm) e o máximo número de ciclos suportado em cada extensão. Verifica-se que a

da mistura 75% MBR-2, e com valor de extensão próximo ao da mistura 75% MBR-1, o que indica que houve uma boa recuperação da mistura betuminosa.

Quadro 4.4 – Parâmetros obtidos pela lei da fadiga

Mistura Betuminosa	a	b	R ²	ε ₆
0% MBR	3151,3	-0,211	0,959	170,8
75% MBR-1	2126,7	-0,171	0,829	200,3
75% MBR-2	2393,1	-0,168	0,931	234,9
75% MBR-2.1	2642,4	-0,184	0,909	208,0

4.4 Características superficiais

Os resultados foram obtidos a partir dos ensaios de macrotextura e pêndulo britânico feitos nas 5 lajetas moldadas em laboratório, antes de serem feitos os ensaios de deformações nas mesmas. A macrotextura apresentou um resultado satisfatório com todas as amostras dentro do limite, estipulado na norma EN 13036-1, entre 0,5 mm e 1,2 mm de altura, e com uma média de 0,77 mm de altura, conforme demonstrado Figura 4.9. A altura média foi calculada de acordo com a equação abaixo (4.3).

$$H = \frac{V \times 4}{D^2 \times \pi} \quad (4.3)$$

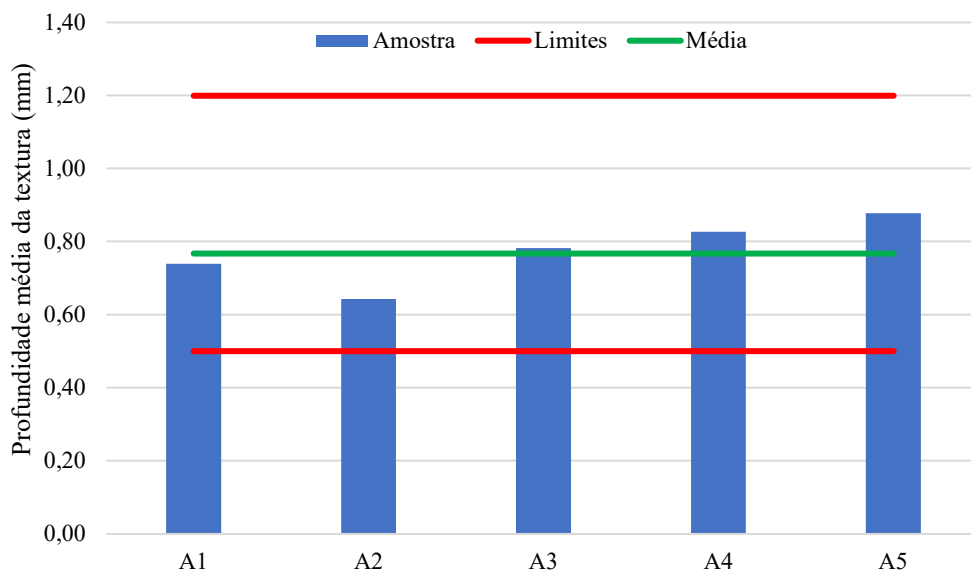


Figura 4.9 – Ensaio de macrotextura

Os resultados obtidos da profundidade média ($P_{\text{média}}$) da textura na mistura betuminosa sem a adição de MBR e no primeiro ciclo da MBR, foram de 0,76 mm e 0,70 mm,

respetivamente, segundo (Antunes, 2021). Portanto, no segundo ciclo da MBR a profundidade média da textura está próxima dos resultados das misturas betuminosas fabricadas anteriormente e com valores aceitáveis.

O ensaio do pêndulo britânico, realizado de acordo com a norma EN 13036-4, para a avaliação da microtextura do pavimento teve um resultado médio de atrito de 54, conforme demonstrado na Figura 4.10, de acordo com o Caderno de Encargos (Estradas de Portugal, 2014) o valor do coeficiente de atrito pontual (PTV) é preciso ser igual ou superior a 60, para um betão betuminoso na camada de desgaste com dimensão máxima do agregado de 14 mm.

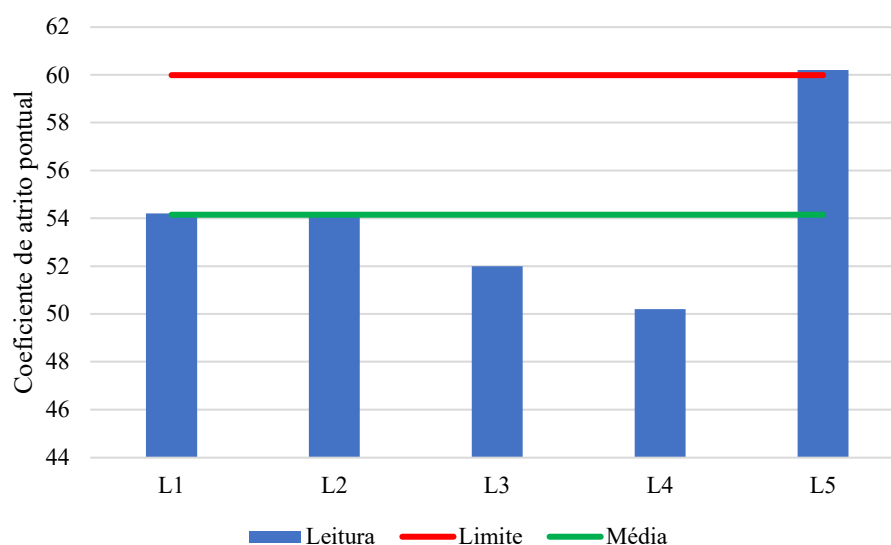


Figura 4.10 – Ensaio de microtextura.

5. CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

Durante essa dissertação foram feitos e analisados ensaios, com mistura betuminosa com uma taxa de incorporação de MBR de 75% no segundo ciclo de reciclagem, para se verificar a interação entre dois rejuvenescedores diferentes, sendo ambos rejuvenescedores comerciais de base natural, um que foi utilizado no primeiro ciclo de reciclagem e outro no segundo ciclo. O rejuvenescedor utilizado no primeiro ciclo de reciclagem resulta de um subproduto da indústria da produção de papel pela utilização de madeira de pinheiro; no caso do rejuvenescedor utilizado no segundo ciclo de reciclagem resulta de óleos de base vegetal, sem discriminação da sua origem. Para efeitos de comparação foram utilizados dados de um estudo anterior realizando por Antunes (2021) onde foram analisadas: uma mistura betuminosa sem a adição de MBR (0% MBR), uma mistura betuminosa com uma taxa de 75% de MBR no primeiro ciclo de reciclagem (75% MBR-1), e uma mistura betuminosa com uma taxa de 75% de MBR no segundo ciclo de reciclagem (75% MBR-2). Com isso foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Para a mistura 75% MBR-2.1 foi necessário o acréscimo de 6% de rejuvenescedor sobre o peso total de betume da mistura, para a viscosidade atingir limites satisfatórios para um betume de penetração nominal 35/50.
- Nos ensaios de avaliação do comportamento mecânico, a utilização de rejuvenescedores diferentes aplicados em ciclos distintos, não apresentou incompatibilidade, apresentando por vezes a mistura 75% MBR-2.1 resultados mais satisfatórios do que a mistura 75% MBR-2, e que se aproximou mais dos resultados da mistura inicial, 0% MBR, demonstrando uma melhor recuperação das propriedades de rigidez, do ângulo de fase, e da componente elástica E1. O comportamento da mistura 75% MBR-2.1, quando submetida a resistência a fadiga, foi inferior ao da mistura 75% MBR-2, suportando menores extensões. Os resultados da deformação permanente da 75% MBR-2.1 mostraram um aumento da deformação em relação as misturas 75% MBR-1 e 75% MBR-2 de 29% e 20%, respetivamente, ao fim de 10,000 ciclos, porém inferior a deformação da mistura inicial.
- As características superficiais da macrotextura e resistência a derrapagem, a mistura 75% MBR-2.1 atingiu resultados satisfatórios, dentro dos limites estabelecidos no Caderno de Encargos Tipo Obra da Infraestruturas de Portugal para uma mistura betuminosa do tipo betão betuminoso com máxima dimensão do agregado de 14 mm e com um betume

35/50 para camada de desgaste (AC 14 surf BB 35/50), e próximos ao da mistura inicial, 0% MBR.

Os resultados evidenciaram que houve uma boa interação entre os dois rejuvenescedores sem grandes alterações nas características da MBR causadas pelos rejuvenescedores, portanto, é possível a utilização desses dois rejuvenescedores em misturas betuminosas, haja vista a compatibilidade entre eles. Sendo a multi-reciclagem uma via sustentável do reaproveitamento das camadas de desgaste dos pavimentos rodoviários, contribuindo assim para mais um ciclo de utilização da MBR de modo a implementar o conceito da economia circular dentro pavimentação rodoviária.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Para o desenvolvimento futuro e para dar continuidade ao estudo da forma como se comportam as misturas betuminosas multi-recicladas ao longo dos ciclos de reutilização, fica a sugestão de se analisar mais ciclos de reciclagens, o comportamento de outras misturas betuminosas a quente com elevadas taxas de MBR, e a análise de um terceiro ciclo de reciclagem com o uso de um terceiro rejuvenescedor diferente. Essa é uma informação importante, porque pode ocorrer de ser necessário fazer a substituição de uma camada de desgaste, que pode ter sido utilizado alguma MBR incorporada, na qual não é conhecido o histórico dos materiais utilizados nas manutenções anteriores, se através de estudos se chegar a conclusões que não há incompatibilidade entre rejuvenescedores, todo o processo de reaproveitar as MBR será mais vantajoso. E uma última sugestão é de se fazer uma análise da viabilidade financeira na aplicação deste estudo em grande escala em rodovias.

BIBLIOGRAFIA

- Afonso, M. L. (2015). Resistência à fadiga de misturas betuminosas com betumes temperados. Covilhã, Portugal: Dissertação de Mestrado. Retrieved from <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3175.0489>
- Ambiente, A. P. do. (2020). Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2030. Retrieved from https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative#la_iniciativa
- Antunes, V. (2021). *Long-term behaviour of multi-recycled reclaimed asphalt pavement mixtures*. Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico.
- Antunes, V., Freire, A. C., & Neves, J. (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Construction and Building Materials*, 211, 453–469. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>
- Antunes, V., Freire, A. C., & Neves, J. (2020). Incorporação de elevadas taxas de mistura betuminosa fresada em misturas betuminosas, 1–10.
- Antunes, V., Freire, A. C., & Neves, J. (2021). Investigating aged binder mobilization and performance of RAP mixtures for surface courses. *Construction and Building Materials*, 271, 121511. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121511>
- Antunes, V., Neves, J., & Freire, A. C. (2021). Performance assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) in road surface mixtures. *Recycling*, 6(2). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/recycling6020032>
- Baptista, A. M. C. (2006). *Misturas betuminosas recicladas a quente em central - Contribuição para seu estudo e aplicação*. Universidade de Coimbra.
- Bedoya, Y. E. J. (2021). Análisis de la información sobre la disponibilidad y las metodologías para determinar las propiedades de pavimento asfáltico recuperado (RAP) para ser utilizado como insumo en la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente, en el área Metropolitana. Bucaramanga, Colômbia: Universidad Santo Tomás.
- CEN. (2007). EN 12697-22:2007. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2010). EN 13036-1:2010. Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2011a). EN 13036-4:2011. Road and airfield surface characteristics - Test methods -

- Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2011b). NP EN 12591:2011. Bitumen and Bituminous Binders. Specification for Paving Grade Bitumens. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2012a). EN 12697-1:2012. Bituminous mixtures - Test methods - Part 1: Soluble binder content. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2012b). EN 12697-34:2012. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2013). EN 12697-3:2013+A1:2018. Bituminous mixtures - Test methods - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2015a). EN 1426:2015. Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2015b). EN 1427:2015. Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2016a). EN 12697-35:2016. Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2016b). EN 13108-8:2016. Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2018a). EN 13697-24:2018. Bituminous mixture - Test methods - Part 24: Resistance to fatigue.
- CEN. (2018b). EN 13697-26:2018. Bituminous mixture - Test methods - Part 26: Stiffness.
- CEN. (2019). EN 12697-5:2019. Bituminous mixtures - Test methods - Part 5: Determination of the maximum density. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2020). EN 12697-6:2020. Bituminous mixtures - Test methods - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. Bruxelas, Bélgica.
- Chaves, A. C. B., Soares, J. B., & Lucas Júnior, J. L. O. (2021). Análise da interação entre ligantes de misturas asfálticas. 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET.
- Colpo, G. B. (2014). Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. Porto Alegre, Brasil: Dissertação de Mestrado.
- Comissão Europeia. (2020). *Mudar a forma como produzimos e consumimos : Novo Plano de Ação para a Economia Circular*. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_20_420?fbclid=IwAR306g8Eo

- 9kkPGLiXtWINuremU0U69Pt-pSTPhM6ODecHRlylG6-LtrdPug%252Fsmo
- de Mesquita Lopes Genesseeaux, M. (2015). *Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Retrieved from <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-14072016-145634/en.php>
- EAPA. (2014). Asphalt in Figures 2014. Bruxelas, Bélgica: European Asphalt Pavement Association.
- EAPA. (2015). Asphalt in Figures 2015. Bruxelas, Bélgica: European Asphalt Pavement Association.
- EAPA. (2016). Asphalt in Figures 2016. Bruxelas, Bélgica: European Asphalt Pavement Association.
- EAPA. (2017). Asphalt in Figures 2017. Bruxelas, Bélgica: European Asphalt Pavement Association.
- EAPA. (2018). Asphalt in Figures 2018. Bruxelas, Bélgica: European Asphalt Pavement Association.
- EAPA. (2019). Asphalt in Figures 2019. Bruxelas, Bélgica: European Asphalt Pavement Association.
- EAPA. (2020). Asphalt in Figures 2020. Bruxelas, Bélgica: European Asphalt Pavement Association.
- Estradas de Portugal. (2014). Caderno de Encargos Tipo Obras - Pavimentação: Métodos Construtivos. Retrieved from http://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/cet/15_03_set_2014.pdf
- European Commission - Eurostat. (2022). Amount of waste recovered increases in 2020. Retrieved 8 October 2022, from <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220913-1>
- Ferreira, C. I. G. (2009). *Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas*. Braga, Portugal: Dissertação de Mestrado.
- Humana Portugal. (2019). *Jornada técnica sobre a economia circular. Humana Circular, Palácio Valenças, Sintra*. Retrieved from http://m.smartwasteportugal.com/fotos/editor2/jornada_economia_circular_programa_provisorio.pdf
- Neves, J., Picado, L., Alves, M., Martinho, F., & Barbosa, F. (2013). Estudo experimental sobre o desempenho de misturas betuminosas temperadas, 1–10.

- ONU. (2022). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Retrieved 28 August 2022, from <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- Otto, G. (2009). Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo. Florianópolis, Brasil: Dissertação de Mestrado.
- Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. (2019). Diretiva (UE) 2019/904. *Jornal Oficial Da União Europeia*. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904&from=PT>
- Pereira, G. (2017). Influência da temperatura na resistência à fadiga da mistura asfáltica e na estimativa da vida útil do pavimento: Abordagem da energia dissipada acumulada e fenomenológica. Florianópolis, Brasil.
- Pimentel, C. A. (2013). Formulação de misturas betuminosas a quente - Contribuição para um novo método de formulação. Lisboa, Portugal: Dissertação de Mestrado.
- Prowell, B. D., Hurley, G. C., & Crews, E. (2007). Field performance of warm-mix asphalt at national center for asphalt technology test track. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998(1), 96–102. Retrieved from <https://doi.org/10.3141/1998-12>
- Ribeiro, F. de M., & Kruglianskas, I. (2014). A Economia Circular no contexto europeu: conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. In *XVI ENGEMA - Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente* (p. 16).
- Rodrigues, C. R. R. (2019). Reciclagem total de misturas betuminosas usando óleo alimentar como rejuvenescedor e resíduos plásticos. *9º Congresso Rodoviário Português*.
- Rosa, L., & Santos, L. P. (2000). Comportamento de materiais xistosos na fundação de pavimentos rodoviários. *Congresso Nacional de Geotecnia, 7, Porto 2000*. Retrieved from <https://doi.org/10.7868/s0869565214210269>
- RSA. (2013). *The Great Recovery: Investigating the role of design in the circular economy*. Retrieved from https://www.thersa.org/globalassets/images/projects/rsa-the-great-recovery-report_131028.pdf
- RWM Ambassadors. (2014). *Ever-decreasing circles: closing in on the circular economy*. *Nature* (Vol. 345).
- Sá Maia, M. M. A. (2018). Influência da Adesividade Agregado / Betume no Desempenho de uma Mistura Betuminosa. Covilhã, Portugal: Dissertação de Mestrado.
- Santos, C. (2019). Laboratory assessment of recycled bituminous mixtures with high RAP

- content Civil Engineering. Lisboa, Portugal: Dissertação de Mestrado.
- Santos, F. B., & Faxina, A. L. (2019). Estudo da incorporação de bio-óleos à base de soja como agentes rejuvenescedores de ligantes asfálticos. Balneário Camboriú, Brasil: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET.
- Sardão, E., Capitão, S., Almeida, A., & Picado-Santos, L. (2013). Atrito superficial de camadas betuminosas que incorporam agregados de seixo britado. *Conference: Actas Do 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa*.
- Shen, J., Amirkhanian, S., & Tang, B. (2007). Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures. *Construction and Building Materials*, 21(5), 958–964. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.03.006>
- Suzuki, K. Y. (2019). Avaliação de misturas asfálticas usinadas a quente com diferentes teores de material fresado. São Paulo, Brasil: Dissertação de Mestrado.
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. *Materials*, 13(18), 4052. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma13184052>
- Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., & Miró, R. (2020). Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). Barcelona, Espanha.
- Villena, J., Gadler, F., Kabemba, D., & Miranda, L. F. R. (2013). Misturas asfálticas recicladas à quente: Aspectos relevantes discutidos na literatura (Vol. 1, pp. 442–447). Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - Vol. 5: Congestas 2017.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2015). Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(8), 2475–2488. Retrieved from <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0332-5>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 71, 538–550. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>

ANEXO

A.1 – Resultados da deformação permanente

Quadro A.1-1 – Resultados *wheel tracking*

Nº passagens	Deformação (mm)		Temperatura (°C)		Nº de ciclos
	1	2	1	2	
0	0	0	59,9	59,5	0
100	0,72	0,8	60,8	60,6	50
200	0,94	1	60	60,1	100
300	1,07	1,12	60,3	60,3	150
400	1,17	1,21	60,3	60,2	200
500	1,25	1,28	60	60,1	250
600	1,32	1,34	60,2	60,1	300
700	1,38	1,39	60	60	350
800	1,43	1,43	60	60	400
900	1,47	1,47	60	60	450
1000	1,51	1,5	60,1	60,1	500
1100	1,55	1,53	60	59,9	550
1200	1,58	1,56	60,1	60,1	600
1300	1,62	1,59	59,9	59,9	650
1400	1,64	1,61	59,9	59,9	700
1500	1,67	1,64	60	60	750
1600	1,7	1,66	60,2	60,1	800
1700	1,73	1,68	59,9	59,9	850
1800	1,75	1,7	59,8	59,9	900
1900	1,77	1,72	59,8	59,8	950
2000	1,79	1,74	59,9	59,9	1000
2100	1,81	1,76	59,9	59,9	1050
2200	1,83	1,78	59,9	59,8	1100
2300	1,85	1,79	59,9	59,9	1150
2400	1,87	1,81	60,1	60	1200
2500	1,89	1,83	59,9	59,8	1250
2600	1,91	1,84	59,8	59,8	1300
2700	1,92	1,86	59,9	59,9	1350
2800	1,94	1,87	59,8	59,9	1400
2900	1,95	1,88	59,8	59,8	1450
3000	1,97	1,9	59,8	59,7	1500
3100	1,99	1,91	60	59,9	1550
3200	2	1,92	59,9	59,8	1600
3300	2,01	1,94	59,9	59,9	1650
3400	2,03	1,95	59,8	59,8	1700
3500	2,04	1,96	59,9	59,9	1750
3600	2,05	1,98	59,8	59,8	1800
3700	2,06	1,99	59,9	59,9	1850
3800	2,08	1,99	59,9	59,8	1900
3900	2,09	2,01	60	59,9	1950
4000	2,1	2,02	59,8	59,8	2000

Nº passagens	Deformação (mm)		Temperatura (°C)		Nº de ciclos
	1	2	1	2	
4100	2,11	2,03	60	59,9	2050
4200	2,12	2,04	59,9	59,9	2100
4300	2,13	2,05	59,8	59,8	2150
4400	2,15	2,06	59,9	59,9	2200
4500	2,15	2,06	59,8	59,8	2250
4600	2,17	2,07	59,8	59,8	2300
4700	2,18	2,08	60	59,9	2350
4800	2,18	2,09	59,9	59,8	2400
4900	2,2	2,1	60	59,9	2450
5000	2,2	2,11	59,9	59,9	2500
5100	2,21	2,12	60	59,9	2550
5200	2,22	2,12	59,8	59,8	2600
5300	2,23	2,13	59,8	59,8	2650
5400	2,24	2,14	59,8	59,8	2700
5500	2,25	2,15	59,9	59,9	2750
5600	2,26	2,15	59,9	59,9	2800
5700	2,26	2,16	59,8	59,8	2850
5800	2,28	2,17	59,8	59,8	2900
5900	2,28	2,17	59,8	59,7	2950
6000	2,29	2,18	59,9	59,8	3000
6100	2,31	2,19	60,1	59,9	3050
6200	2,3	2,19	60	59,9	3100
6300	2,31	2,2	59,9	59,9	3150
6400	2,32	2,21	59,8	59,7	3200
6500	2,32	2,22	59,8	59,8	3250
6600	2,33	2,23	60	59,9	3300
6700	2,34	2,23	59,9	59,9	3350
6800	2,34	2,24	60	59,9	3400
6900	2,36	2,25	59,8	59,8	3450
7000	2,37	2,25	60,1	60	3500
7100	2,37	2,25	59,9	59,8	3550
7200	2,38	2,26	59,9	59,9	3600
7300	2,39	2,26	60	59,9	3650
7400	2,39	2,27	60	59,9	3700
7500	2,39	2,27	59,9	59,8	3750
7600	2,41	2,29	59,8	59,8	3800
7700	2,41	2,29	59,8	59,8	3850
7800	2,42	2,29	60	59,9	3900
7900	2,42	2,3	60	59,9	3950
8000	2,43	2,3	59,8	59,7	4000
8100	2,44	2,31	59,9	59,8	4050
8200	2,44	2,31	60	59,9	4100
8300	2,45	2,32	59,8	59,7	4150
8400	2,46	2,33	59,8	59,8	4200
8500	2,46	2,34	59,9	59,8	4250
8600	2,47	2,33	59,9	59,9	4300
8700	2,47	2,35	60	59,9	4350

Nº passagens	Deformação (mm)		Temperatura (°C)		Nº de ciclos
	1	2	1	2	
8800	2,48	2,35	59,9	59,9	4400
8900	2,49	2,35	59,8	59,8	4450
9000	2,5	2,36	59,7	59,7	4500
9100	2,5	2,37	59,7	59,7	4550
9200	2,49	2,37	59,9	59,8	4600
9300	2,5	2,37	59,8	59,8	4650
9400	2,51	2,38	59,8	59,8	4700
9500	2,52	2,38	59,9	59,8	4750
9600	2,52	2,39	60	59,9	4800
9700	2,52	2,39	59,9	59,8	4850
9800	2,53	2,39	59,8	59,8	4900
9900	2,53	2,4	59,8	59,8	4950
10000	2,54	2,41	59,9	59,9	5000
10100	2,54	2,41	59,8	59,7	5050
10200	2,55	2,41	59,8	59,8	5100
10300	2,56	2,42	59,8	59,8	5150
10400	2,56	2,42	59,9	59,8	5200
10500	2,57	2,43	59,8	59,7	5250
10600	2,57	2,43	59,9	59,9	5300
10700	2,58	2,43	59,7	59,7	5350
10800	2,58	2,44	59,7	59,7	5400
10900	2,59	2,44	59,8	59,8	5450
11000	2,6	2,45	59,9	59,8	5500
11100	2,6	2,45	59,9	59,9	5550
11200	2,6	2,46	59,8	59,8	5600
11300	2,61	2,46	59,7	59,7	5650
11400	2,6	2,46	59,8	59,8	5700
11500	2,61	2,47	59,7	59,7	5750
11600	2,62	2,48	59,8	59,7	5800
11700	2,62	2,48	59,9	59,8	5850
11800	2,63	2,48	59,9	59,8	5900
11900	2,63	2,48	59,9	59,8	5950
12000	2,63	2,49	59,9	59,9	6000
12100	2,64	2,49	59,9	59,8	6050
12200	2,64	2,5	59,8	59,7	6100
12300	2,65	2,5	60	59,9	6150
12400	2,65	2,5	59,8	59,8	6200
12500	2,66	2,51	59,8	59,8	6250
12600	2,67	2,51	59,7	59,7	6300
12700	2,66	2,51	59,9	59,8	6350
12800	2,67	2,52	59,8	59,8	6400
12900	2,67	2,52	60	59,9	6450
13000	2,68	2,53	59,7	59,7	6500
13100	2,69	2,53	59,8	59,7	6550
13200	2,69	2,53	59,9	59,8	6600
13300	2,69	2,54	60	59,9	6650
13400	2,69	2,54	59,7	59,8	6700

Nº passagens	Deformação (mm)		Temperatura (°C)		Nº de ciclos
	1	2	1	2	
13500	2,7	2,54	59,8	59,8	6750
13600	2,7	2,55	59,9	59,9	6800
13700	2,7	2,56	59,9	59,9	6850
13800	2,71	2,56	60	59,9	6900
13900	2,71	2,56	59,9	59,9	6950
14000	2,72	2,57	59,9	59,8	7000
14100	2,71	2,57	59,9	59,9	7050
14200	2,72	2,57	60	60	7100
14300	2,72	2,58	59,8	59,7	7150
14400	2,73	2,58	59,9	59,8	7200
14500	2,73	2,58	59,8	59,7	7250
14600	2,73	2,58	59,8	59,8	7300
14700	2,74	2,59	59,9	59,8	7350
14800	2,74	2,6	59,9	59,8	7400
14900	2,75	2,6	60	59,8	7450
15000	2,75	2,6	59,8	59,8	7500
15100	2,75	2,6	59,9	59,9	7550
15200	2,75	2,61	59,7	59,8	7600
15300	2,76	2,61	59,9	59,9	7650
15400	2,76	2,61	59,9	59,9	7700
15500	2,76	2,62	59,8	59,8	7750
15600	2,76	2,62	60	59,9	7800
15700	2,76	2,62	59,8	59,8	7850
15800	2,77	2,63	59,8	59,8	7900
15900	2,77	2,63	59,8	59,8	7950
16000	2,78	2,63	59,8	59,8	8000
16100	2,78	2,64	59,9	59,8	8050
16200	2,78	2,64	59,9	59,9	8100
16300	2,79	2,64	59,8	59,8	8150
16400	2,79	2,65	59,9	59,8	8200
16500	2,79	2,65	59,8	59,8	8250
16600	2,79	2,65	59,8	59,7	8300
16700	2,8	2,65	59,9	59,8	8350
16800	2,81	2,66	59,8	59,8	8400
16900	2,81	2,66	59,8	59,8	8450
17000	2,81	2,66	59,8	59,8	8500
17100	2,81	2,67	59,8	59,8	8550
17200	2,82	2,67	59,8	59,8	8600
17300	2,82	2,67	60,1	60	8650
17400	2,82	2,67	59,7	59,8	8700
17500	2,82	2,67	59,7	59,7	8750
17600	2,83	2,68	60	59,9	8800
17700	2,84	2,69	59,9	59,8	8850
17800	2,83	2,68	59,9	59,8	8900
17900	2,83	2,69	59,8	59,8	8950
18000	2,83	2,69	59,8	59,8	9000
18100	2,84	2,7	60	59,9	9050

Nº passagens	Deformação (mm)		Temperatura (°C)		Nº de ciclos
	1	2	1	2	
18200	2,85	2,7	60	59,9	9100
18300	2,85	2,7	59,9	59,9	9150
18400	2,85	2,71	60	59,9	9200
18500	2,85	2,71	59,7	59,8	9250
18600	2,85	2,71	60	59,9	9300
18700	2,85	2,71	59,8	59,8	9350
18800	2,86	2,72	59,8	59,7	9400
18900	2,87	2,72	59,8	59,8	9450
19000	2,87	2,72	59,9	59,9	9500
19100	2,88	2,73	60	59,9	9550
19200	2,87	2,73	59,9	59,8	9600
19300	2,87	2,73	60	59,9	9650
19400	2,88	2,73	59,8	59,8	9700
19500	2,87	2,73	59,9	59,8	9750
19600	2,87	2,74	59,9	59,9	9800
19700	2,88	2,74	59,9	59,9	9850
19800	2,88	2,74	59,8	59,7	9900
19900	2,88	2,74	60	59,8	9950
20000	2,89	2,75	59,9	59,8	10000

A.2 – Resultados módulo de rigidez

Quadro A.2-1 - Valores médios da rigidez e ângulo de fase

Frequência (Hz)	Rigidez (MPa)				Ângulo de fase (°)			
	0% MBR	75% MBR-1	75% MBR-2	75% MBR-2.1	0% MBR	75% MBR-1	75% MBR-2	75% MBR-2.1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
0,1	668,83	1429,30	689,16	947,15	45,87	31,90	37,36	33,92
0,2	1028,39	1849,46	899,25	1163,31	42,76	29,79	36,87	33,06
0,3	1276,73	2121,50	1046,33	1322,66	40,64	28,55	36,06	32,24
0,4	1467,58	2323,93	1161,25	1450,10	39,04	27,59	35,43	31,56
0,5	1627,13	2486,23	1259,59	1555,21	37,85	26,84	34,84	31,02
0,6	1763,79	2622,95	1346,30	1646,97	36,95	26,23	34,29	30,53
0,7	1881,13	2738,31	1419,09	1722,87	36,00	25,75	33,85	30,06
0,8	1987,20	2843,82	1487,77	1796,33	35,30	25,33	33,37	29,74
0,9	2083,50	2931,60	1550,42	1860,72	34,62	24,91	33,00	29,40
1	2170,68	3016,59	1605,08	1919,92	34,04	24,52	32,65	29,04
2	2767,97	3583,98	2023,21	2364,76	30,35	22,16	30,21	26,73
3	3151,89	3930,33	2301,33	2651,22	28,15	20,71	28,60	25,28
4	3438,09	4187,16	2510,41	2860,61	26,63	19,73	27,47	24,23
5	3663,63	4389,69	2684,14	3035,49	25,36	18,86	26,46	23,40
6	3849,15	4554,90	2827,12	3180,12	24,31	17,98	25,52	22,49
7	4018,43	4697,12	2952,58	3308,58	23,23	17,08	24,65	21,73
8	4156,93	4817,94	3061,35	3419,41	22,30	16,34	23,84	21,03
9	4305,07	4936,49	3165,99	3518,72	21,49	15,72	23,09	20,23
10	4407,20	5032,83	3251,84	3613,33	20,42	15,03	22,36	19,55
15	4837,73	5413,55	3623,96	3961,99	17,25	12,37	19,63	16,84
20	5215,68	5724,21	3934,07	4255,44	15,59	10,88	17,92	15,27
25	5518,21	5972,75	4173,45	4478,64	14,24	9,83	16,82	14,24
30	5770,04	6192,17	4400,14	4680,24	12,15	7,93	14,90	12,35
1	2180,50	3025,32	1598,96	1908,95	33,92	24,53	32,57	29,08
0,1	846,24	1508,16	662,57	891,88	43,75	33,20	38,74	34,38

Quadro A.2-2 - Valores médios das componentes E1 e E2

E1 (MPa)					E2 (MPa)			
Frequência (Hz)	0% MBR	75% MBR-1	75% MBR-2	75% MBR-2.1	0% MBR	75% MBR-1	75% MBR-2	75% MBR-2.1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
0,1	466,01	1213,71	547,36	787,51	479,59	754,32	415,30	523,88
0,2	755,41	1605,21	719,46	976,67	697,61	918,23	539,21	629,85
0,3	969,25	1863,63	845,98	1120,50	830,78	1013,45	615,51	700,46
0,4	1140,25	2059,76	946,27	1236,62	923,65	1075,80	672,88	753,71
0,5	1285,13	2218,54	1033,87	1334,27	997,75	1121,89	719,30	796,08
0,6	1409,97	2352,91	1112,48	1420,19	1059,16	1158,84	758,06	831,42
0,7	1522,27	2466,55	1178,68	1492,46	1104,87	1189,02	790,09	857,88
0,8	1622,31	2570,54	1242,64	1561,01	1147,36	1216,10	817,92	885,85
0,9	1715,01	2658,92	1300,42	1622,36	1182,83	1234,23	844,01	908,21
1	1799,13	2744,64	1351,62	1679,23	1214,20	1251,38	865,49	926,64
2	2389,39	3319,55	1749,02	2112,84	1397,02	1350,81	1016,79	1058,50
3	2780,27	3676,81	2021,55	2397,98	1484,48	1388,42	1099,51	1126,80
4	3075,23	3942,20	2229,02	2609,91	1537,02	1410,78	1154,63	1167,32
5	3312,89	4155,21	2405,38	2787,61	1563,97	1415,22	1190,89	1197,33
6	3511,06	4334,21	2554,63	2940,33	1577,15	1400,30	1210,71	1207,09
7	3696,77	4492,11	2687,78	3076,13	1574,96	1371,91	1221,90	1213,93
8	3850,82	4625,77	2805,41	3195,20	1565,24	1346,70	1225,12	1214,87
9	4011,40	4754,78	2918,63	3305,30	1562,29	1326,48	1226,48	1201,92
10	4136,13	4864,00	3014,51	3408,42	1519,91	1292,03	1219,15	1192,81
15	4629,98	5292,95	3425,83	3799,98	1401,89	1135,88	1181,50	1117,29
20	5038,26	5628,33	3761,82	4116,63	1348,26	1042,74	1150,99	1072,16
25	5367,33	5893,89	4020,20	4356,66	1280,45	966,65	1120,24	1030,82
30	5660,28	6141,19	4280,56	4589,29	1119,20	792,20	1018,46	912,40
1	1809,84	2752,25	1347,64	1669,94	1215,87	1255,69	860,35	922,85
0,1	611,58	1262,02	516,61	737,89	584,72	823,15	409,75	498,40

Quadro A.2-3 - Valores médios de E1/E2

E1/E2 (MPa)				
Frequência (Hz)	0% MBR	75% MBR-1	75% MBR-2	75% MBR-2.1
	Média	Média	Média	Média
0,1	0,97	1,61	1,32	1,50
0,2	1,08	1,75	1,33	1,55
0,3	1,17	1,84	1,37	1,60
0,4	1,23	1,91	1,41	1,64
0,5	1,29	1,98	1,44	1,68
0,6	1,33	2,03	1,47	1,71
0,7	1,38	2,07	1,49	1,74
0,8	1,41	2,11	1,52	1,76
0,9	1,45	2,15	1,54	1,79
1	1,48	2,19	1,56	1,81
2	1,71	2,46	1,72	2,00
3	1,87	2,65	1,84	2,13
4	2,00	2,79	1,93	2,24
5	2,12	2,94	2,02	2,33
6	2,23	3,10	2,11	2,44
7	2,35	3,27	2,20	2,53
8	2,46	3,43	2,29	2,63
9	2,57	3,58	2,38	2,75
10	2,72	3,76	2,47	2,86
15	3,30	4,66	2,90	3,40
20	3,74	5,40	3,27	3,84
25	4,19	6,10	3,59	4,23
30	5,06	7,75	4,20	5,03
1	1,49	2,19	1,57	1,81
0,1	1,05	1,53	1,26	1,48

A.3 – Resultados da deformação por fadiga

Quadro A.3-1 – Resultados do ensaio de fadiga.

Extensão (μm)	0% MBR	75% MBR-1	75% MBR-2	75% MBR- 2.1
	Número de ciclos			
200	420.018	268.883	2.931.748	925.620
200	287.655	392.084	1.982.934	919.385
200	588.359	415.705	4.325.393	1.224.100
200	-	-	1.411.744	1.560.256
200	-	-	-	1.146.431
300	81.521	92.997	223.440	65.698
300	101.085	-	227.283	120.667
300	83.380	135.663	283.886	200.857
300	-	85.560	-	76.452
400	18.149	9.942	36.052	23.809
400	12.545	40.412	64.575	23.221
400	21.580	26.979	38.451	31.377
400	-	-	-	41.689
400	-	-	-	74.182