

**Avaliação do desempenho dum mistura betuminosa temperada
com betume aditivado para tal**

Vanessa Filipa Dias Valente

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador

Professor Luís Guilherme de Picado Santos

Júri

Presidente: Professora Maria do Rosário Maurício Ribeiro Macário

Orientador: Professor Luís Guilherme de Picado Santos

Vogal: Professor José Manuel Coelho das Neves

Setembro de 2019

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

RESUMO

Nos últimos anos têm-se registado uma crescente preocupação com as questões ambientais, sendo a diminuição do consumo de combustíveis fósseis e consequente redução da emissão de gases com efeito de estufa, um dos principais desafios da sociedade atual. É neste contexto que surgem as misturas betuminosas temperadas que, por serem produzidas e compactadas a temperaturas inferiores, face às misturas betuminosas convencionais, envolvem menor consumo de energético e, consequentemente, menores impactos ambientais.

Para que as misturas betuminosas temperadas sejam implementadas é necessário comprovar que o seu desempenho é melhor ou, pelo menos semelhante, ao das misturas equivalentes convencionais. Assim, esta dissertação tem como objectivo o estudo do desempenho duma mistura betuminosa temperada feita com betume comercial aditivado para tal e a sua comparação com o desempenho duma mistura betuminosa convencional equivalente.

As misturas em estudo são do tipo AC 14 Surf 35/50 (BBr) e o seu desempenho foi avaliado através da execução de ensaios laboratoriais. Inicialmente foi realizado o estudo de Marshall, para determinação da percentagem óptima betume, e posteriormente, foram realizados os ensaios de sensibilidade à água (ITSR), de deformabilidade, de fadiga e de pista (Wheel Tracking).

Os resultados obtidos demonstraram que o comportamento mistura betuminosa com betume convencional é, em geral, melhor. No entanto, nada obsta a que se possa optar pela utilização do betume temperado no sentido de poupar recursos energéticos e portanto ser mais conforme ambientalmente ou até usar esse tipo de mistura em condições climáticas mais frias tirando partido das suas mais baixas temperaturas de compactação.

Palavras-Chave

Pavimentos Rodoviários

Betume Aditivado

Misturas Betuminosas Temperadas

Misturas Betuminosas Convencionais

Desempenho

ABSTRACT

Over the last few years there has been a growing concern for environmental issues, resulting in a demand for scaling down fossil fuels consumption, and subsequent reduction of greenhouse emissions, one of the main challenges of modern society. It is in this context that warm-mix asphalt mixtures appear. Due to lower production and compaction temperatures, these mixtures have lower energy consumption and therefore lower environmental impact.

Currently, for these mixtures to be accepted it is necessary to prove that their performance is better or equally good to that of the equivalent conventional mixtures. Therefore, this dissertation aims to study the performance of a warm mix asphalt mixture with terminal blend bitumen and provide a comparative analysis of their performance against an equivalent conventional asphalt mixture.

The mixtures in study are of type AC 14 Surf 35/50 (BBr) and their performance was evaluated through the execution of laboratory tests. Initially, the Marshall study was carried out to determine the optimum bitumen percentage, and subsequently, water sensitivity (ITSR), stiffness, resistance to fatigue and wheel tracking tests were performed.

The results obtained proved that the performance of bituminous mixture with conventional bitumen is generally better. However, there is no reason to prevent the use of tempered bitumen in terms of saving energy resources and therefore it being more environmentally friendly, or even using this type of mixture in cooler climatic conditions, taking advantage of its lower compaction temperatures.

Key words:

Road pavements
Modified bitumen
Hot Mix Asphalt
Warm Mix Asphalt
Performance

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Metodologia	2
1.4.	Estrutura.....	3
2.	Misturas Betuminosas Temperadas com Ligantes Especiais	4
2.1.	Considerações iniciais.....	4
2.2.	Misturas betuminosas	5
2.3.	Misturas betuminosas temperadas.....	8
2.3.1.	Tecnologias de produção	9
2.3.2.	Vantagens das MBT's	10
2.3.3.	Desvantagens das MBT's.....	11
2.4.	Avaliação do desempenho de misturas betuminosas.....	12
2.4.1.	Ensaio de caracterização do betume – Anel e bola e Penetração.....	12
2.4.2.	Ensaio de Marshall	14
2.4.3.	Ensaio de sensibilidade à água	15
2.4.4.	Ensaio de deformabilidade.....	16
2.4.5.	Ensaio de Fadiga	17
2.4.6.	Ensaio de pista – Wheel Tracking.....	18
2.4.7.	Ensaio para avaliação da textura – Técnica volumétrica da mancha de areia e Pêndulo britânico	18
3.	Estudo experimental e análise dos resultados.....	21
3.1.	Considerações iniciais.....	21
3.2.	Caracterização dos componentes da mistura	21
3.2.1.	Betumes.....	21
3.2.2.	Materiais Granulares.....	22

3.3.	Estudo Marshall.....	25
3.4.	Ensaio de sensibilidade à água (ITSR).....	28
3.5.	Ensaio de deformabilidade.....	31
3.6.	Ensaio de Fadiga.....	36
3.7.	Ensaio de pista – Wheel Tracking.....	39
3.8.	Técnica Volumétrica da Mancha de Areia e Pêndulo Britânico	42
4.	Conclusão	45
4.1.	Principais inferências deste estudo.....	45
4.2.	Trabalhos futuros	46
	Referências Bibliográficas	48
	Anexos.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura de um pavimento flexível (adaptado de Antunes et al. 2006)	5
Figura 2.2 – Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura (Alconada, 2011)	6
Figura 2.3 - Tecnologias de produção das misturas betuminosas temperadas	9
Figura 2.4 - Equipamento para ensaio de penetração	13
Figura 2.5 - Equipamento para ensaio de anel e bola	13
Figura 2.6 - Amostras em banho termostático no decorrer do ensaio	13
Figura 2.7 – Esquema de montagem usado no ensaio de compressão Marshall (Branco et al., 1998)	14
Figura 2.8 - Provetes em banho termostático	15
Figura 2.9 – Proвете colocado no estabilómetro para realização do ensaio de Marshall	15
Figura 2.10 – Esquema do ensaio de ITSr (adaptado de CEN _a , 2003)	16
Figura 2.11 - Mancha de areia obtida sobre a laje V12	19
Figura 2.12 - Pêndulo britânico (retirado de engenhariacivil.tecnilab.pt)	20
Figura 3.1 - Curva granulométrica dos agregados	23
Figura 3.2 - Curva granulométrica da mistura e limites impostos pela norma europeia	24
Figura 3.3 – Provetes da mistura MR após ensaio ITSr e tipo de rotura – grupo “dry” (à esquerda) “wet” (à direita)	30
Figura 3.4 – Provetes da mistura MV após ensaio ITSr e tipo de rotura – grupo “dry” (à esquerda) “wet” (à direita)	30
Figura 3.5 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR1	31
Figura 3.6 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR2	32
Figura 3.7 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR3	32

Figura 3.8 - Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR4.....	32
Figura 3.9 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV7.....	33
Figura 3.10 - Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV8.....	33
Figura 3.11 - Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV9.....	33
Figura 3.12 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV10.....	34
Figura 3.13 – Critério de rotura para ensaios de flexão em 4 pontos com extensão controlada (Pais e Fonseca, 2004)	37
Figura 3.14 – Representação gráfica da lei da fadiga de MR e MV.....	39
Figura 3.15 – Ensaio de pista da mistura de referência (MR).	41
Figura 3.16 - Ensaio de pista da mistura em estudo (MV)	41

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Propriedades dos betumes em estudo com base nas respectivas fichas técnicas.....	22
Quadro 3.2 – Resultado dos ensaios de penetração e anel e bola para a mistura MB	22
Quadro 3.3 - Composição granulométrica do agregado	23
Quadro 3.4 – Composição granulométrica da mistura e limites impostos pela norma europeia	24
Quadro 3.5 - Caracterização dos provetes de Marshall	25
Quadro 3.6 – Caracterização física dos provetes	27
Quadro 3.7 - Resultados experimentais obtidos no ensaio de Marshall	28
Quadro 3.8 – Caracterização física dos provetes para ensaio ITSr.....	29
Quadro 3.9 – Resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água	29
Quadro 3.10 - Módulos de deformabilidade (Mpa) dos provetes da mistura de referência (MR).....	35
Quadro 3.11 - Módulos de deformabilidade (MPa) dos provetes da mistura em estudo (MV).....	35
Quadro 3.12 - Valores médios dos módulos de deformabilidade de MR e MV por frequência.....	36
Quadro 3.13 – Resultados obtidos no ensaio de fadiga para MR e para MV	38
Quadro 3.14 – Parâmetros estatísticos, por extensão, referentes ao ensaio de fadiga para MR e MV.....	38
Quadro 3.15 – Valores de ϵ_6 obtidos para MR e MV	39
Quadro 3.16 – Resultados obtidos no ensaio de pista para ambas as misturas.....	40
Quadro 3.17 - Caracterização física das lajes produzidas	42
Quadro 3.18 - Resultados do ensaio da técnica volumétrica da mancha de areia	43
Quadro 3.19 – Altura de areia mínima (EP, 2014)	43
Quadro 3.20 – Resultados do PTV obtidos pelo ensaio de pêndulo britânico.....	44

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino

a- Constante, parâmetro característico dos materiais

A- Teor de absorção

b- Constante, parâmetro característico dos materiais

B – Percentagem de betume do provete

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

D - Máxima dimensão do agregado

d₅₀₀₀ - Profundidade da rodeira após 5000 ciclos

d₁₀₀₀₀ - Profundidade da rodeira após 10000 ciclos

d_m – diâmetro médio

e- Espessura do provete

E_i - Módulo de deformabilidade inicial

E_m- Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa

F – Deformação sofrida pelo provete

H_m- Altura do provete de ensaio

h_m – altura média

H₂- Hidrogénio

IPen- índice de penetração do betume

L- Comprimento efetivo do provete de ensaio

m₁ - Massa do provete seco

m'₁ – Massa do recipiente onde se realiza o ensaio

m₂ - Massa do provete imerso

m'₂ – Massa do recipiente onde se realiza o ensaio com a mistura no interior

m₃ - Massa do provete com superfície seca

m'₃ – Massa do recipiente onde se realiza o ensaio cheio com a mistura no interior

N- Número de ciclos

Pen 25- Penetração em décimas de milímetro (10⁻¹mm) do betume a 25 °C

S – Força de rotura

S_b- Rigidez do betume

T- Temperatura

T_{ab}- Temperatura de ponto de amolecimento de anel e bola do betume antes de aplicado na mistura

t_b - Teor em betume

t_c – Tempo de carregamento

V- Volume

V_a – Percentagem volumétrica do agregado no volume total

V_{ar} – Percentagem volumétrica de ar no volume total

V_b - Percentagem volumétrica de betume

V_m – Porosidade

V_{pic} – Volume do picnómetro

V_v - Percentagem volumétrica de vazios

Alfabeto Grego

ϵ - Extensão de tração

ϵ_6 - Extensão de tração para um milhão de ciclos de carregamento

η - Porosidade

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio

ρ_{bssd} – Baridade aparente

ρ_b – Massa volúmica do betume

ρ_{geo} – Baridade geométrica

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica

ABREVIATURAS

AC- Asphalt Concrete

BB- Betão Betuminoso

BBr- Betão Betuminoso Rugoso

bin- Binder course

CEN- Comité Européen de Normalisation

EAPA- European (Norm) Standard

EP- Estradas de Portugal, S.A.

GEE - Gases com Efeito de Estufa

IPQ- Instituto Português da Qualidade

ITS_d - média dos valores de ITS dos provetes “dry”

ITSR - Indirect Tensile Strength Ratio (resistência conservada em tração indireta)

ITS_w - média dos valores de ITS dos provetes “wet”

LEA - Low Energy Asphalt

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LVCT - Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes

MB- Macadame Betuminoso

MBT – Mistura Betuminosa Temperada

MR- Mistura betuminosa AC14 Surf 35/50 com betume convencional

MV - Mistura betuminosa AC 14 Surf 35/50 com betume modificado

NAPA- National Asphalt Pavement Association

NP- Norma Portuguesa

PRD_{AIR}- Proportional Rut Depth in air

PTV – Pendulum Test Value

Reg - Regulating course

RD_{AIR}- Rut Depth in air

Surf- Surface course

VMA- Volume de vazios no agregado compactado

WMA- Warm Mix Asphalt

WTS_{AIR} - Wheel Tracking Slope in air

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Nos últimos anos têm-se registado uma crescente preocupação com as questões ambientais, sendo a diminuição do consumo de combustíveis fósseis e conseqüente redução da emissão de gases com efeito de estufa, um dos principais desafios da sociedade atual.

É em resposta a essa preocupação que vários países uniram esforços e criaram o Protocolo de Quioto, onde todos países signatários se comprometeram a reduzir as emissões dos gases com efeito de estufa nos anos que se seguiram (Kyoto Protocol, 2012, Paris Agreement, 2015). Para que tal fosse possível, foi necessário desenvolver tecnologias alternativas em vários setores, tais como a construção, e neste caso, mais concretamente, no campo das infraestruturas rodoviárias.

Os pavimentos rodoviários têm um ciclo de vida que pode dividir-se em quatro fases – produção, construção, manutenção e demolição, contribuindo cada uma destas fases para o impacto/dano final que o pavimento representa a nível ambiental. De acordo com Park et al. (2003), a fase que representa maior carga ambiental é a da produção das misturas betuminosas, por esse motivo e no sentido de atenuar os impactos negativos advindos dessa fase surgem as misturas betuminosas temperadas (MBT). Estas misturas são produzidas a uma temperatura inferior (100 a 140° C) à das misturas convencionais, e por isso acarretam um menor consumo de combustível que por consequência resulta numa redução das emissões de GEE's. Esses fatores representam também um argumento forte do ponto de vista económico pois existindo um menor encargo com a energia há conseqüentemente uma diminuição dos custos de produção. Para além disso as MBT's oferecem um leque variado de vantagens que se enunciam mais pormenorizadamente nos capítulos seguintes.

No que respeita às características das MBT, verifica-se um aumento da trabalhabilidade para temperaturas inferiores, face às misturas convencionais, o que facilita a aplicação e compactação das mesmas. O decréscimo da temperatura de produção provoca também um menor envelhecimento do betume, que resulta em melhorias ao nível da resistência térmica e estrutural do pavimento (EAPA, 2010).

Contudo, as MBT não ofereceram grande alteração nas quantidades de combustíveis fósseis envolvidas na produção, assim, atendendo ao aumento global dos custos energéticos e à intensa busca petrolífera tem vindo a impulsionar-se o desenvolvimento de tecnologias que permitam poupar recursos.

Os ligantes alternativos surgem como uma opção que pode ajudar a reduzir o consumo de energia e os recursos naturais envolvidos na produção de misturas betuminosas, na medida em que permitem modificar/reduzir a quantidade de betume (aditivos) ou substituí-lo por completo.

Este trabalho trata-se do estudo comparativo de um ligante tradicional com um outro que advém dos tradicionais mas que foi modificado de forma a ser mais ecológico. Este trabalho pretende apresentar uma análise comparativa das características do betume em estudo face ao tradicional pois, para além da necessidade de analisar a viabilidade económica e comercial destes ligantes, o primeiro passo é averiguar se as características mecânicas e de serviço sofrem alguma melhoria ou, no mínimo, se mantêm.

A motivação para a realização deste trabalho surge devido às preocupações ambientais cada vez mais marcadas na sociedade atual. A procura de soluções deve ser um interesse de todos pois é nela que reside a evolução. A alteração de comportamentos deve verificar-se em todas as áreas, não sendo o setor da construção exceção.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal o estudo do desempenho duma mistura betuminosa temperada feita com betume comercial aditivado para tal e a sua comparação com o desempenho duma mistura betuminosa convencional equivalente.

1.3. Metodologia

Metodologicamente, a presente dissertação dividiu-se em duas fases:

1. A primeira fase consistiu na pesquisa bibliográfica sobre o tema e a sua envolvente. Nesta fase, o principal objetivo foi aprofundar o conhecimento sobre a temática, nomeadamente no que diz respeito às misturas betuminosas temperadas em geral, a sua aplicação e o estudo laboratorial envolvido para testar novas misturas.
2. A segunda fase engloba todos os ensaios experimentais realizados para caracterizar as misturas betuminosas em estudo e subdivide-se em duas partes desenvolvidas em paralelo ao longo do capítulo: o tratamento e apresentação dos resultados obtidos e a análise comparativa dos dados que permite inferir sobre a viabilidade da utilização da mistura alternativa.

1.4. Estrutura

Este trabalho está dividido em 4 capítulos que se descrevem sucintamente abaixo:

1. Introdução

Neste capítulo é feito o enquadramento do trabalho e são apresentados, de forma geral, os principais aspetos do tema. O capítulo inclui também os objetivos, a metodologia adotada e a estrutura do trabalho.

2. Misturas betuminosas temperadas

Neste capítulo são apresentados os conceitos e aspetos relacionados com o presente trabalho. O capítulo inclui uma exposição inicial sobre misturas betuminosas em geral, debruçando-se, posteriormente e de forma mais minuciosa, sobre as misturas betuminosas temperadas para as quais são apresentadas as principais tecnologias de produção e as vantagens e desvantagens do uso das mesmas face às misturas convencionais. Por fim, são apresentados e descritos os ensaios necessários para avaliação do desempenho de misturas betuminosas.

3. Estudo experimental e análise de resultados

Neste capítulo faz-se uma caracterização das misturas betuminosas em causa, apresentam-se os procedimentos adotados em cada ensaio, os resultados obtidos e a respetiva análise comparativa, entre a mistura betuminosa convencional e a mistura betuminosa temperada, para todos os ensaios laboratoriais realizados na execução deste trabalho.

4. Conclusão

Este capítulo está dividido em duas partes, na primeira é feita uma breve síntese do trabalho e são apresentadas as conclusões resultantes do estudo realizado, enquanto na segunda parte são referidas as limitações do presente estudo, as suas causas e algumas sugestões que permitem ultrapassar essas mesmas limitações, demonstrando qual o caminho a percorrer para melhor inferir sobre as potencialidades das misturas betuminosas temperadas.

2. Misturas Betuminosas Temperadas com Ligantes Especiais

2.1. Considerações iniciais

Um pavimento rodoviário é uma estrutura de suporte de tráfego, cuja função principal é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança durante um determinado período de tempo (vida do pavimento), sob as ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram (Branco et al, 2011). Para tal, devem exigir-se aos mesmos dois tipos de qualidades: a qualidade funcional, relacionada com o conforto e segurança dos utentes, e a qualidade estrutural, relacionada com a capacidade do pavimento para suportar cargas sem sofrer alterações para além dos limites pré-estabelecidos (Branco et al, 2011).

Os pavimentos rodoviários são sistemas considerados multiestratificados, formados por várias camadas de espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural, que pode ou não ter coroamento de qualidade melhorada (Branco et al, 2011). Assim, podem classificar-se em função do tipo de materiais e da deformabilidade, em três tipos de pavimentos: os rígidos, os semirrígidos e os flexíveis.

Os pavimentos rígidos são pavimentos pouco deformáveis que se caracterizam por terem como camada superior uma laje de betão de cimento, armado ou não, que assume as funções da camada de desgaste e de base. As camadas subjacentes são constituídas por materiais granulares que podem ou não ser estabilizadas com ligante hidráulico (Branco et al, 2011).

Os pavimentos semirrígidos apresentam características comuns aos outros dois tipos de pavimento. Possuem uma ou duas camadas superiores de misturas betuminosas, seguida de uma camada de agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo ainda dispor de uma camada granular na sub-base (Branco et al, 2011).

Os pavimentos flexíveis são os mais usados em Portugal, apresentando as camadas superiores – camada de desgaste e de regularização, formadas por misturas betuminosas, seguidas de uma ou duas camadas de material granular – camada de base e sub-base (Branco et al, 2011) como ilustra a Figura 2.1.

A camada de desgaste é a camada do topo do pavimento e é responsável não só por garantir a segurança e o conforto na circulação como também por manter as características funcionais da superfície e assegurar a impermeabilização de toda a estrutura do pavimento (Branco et al, 2011).

A camada de regularização serve essencialmente para garantir boas condições para a execução da camada de desgaste, funcionando também como uma segunda camada impermeabilizante.

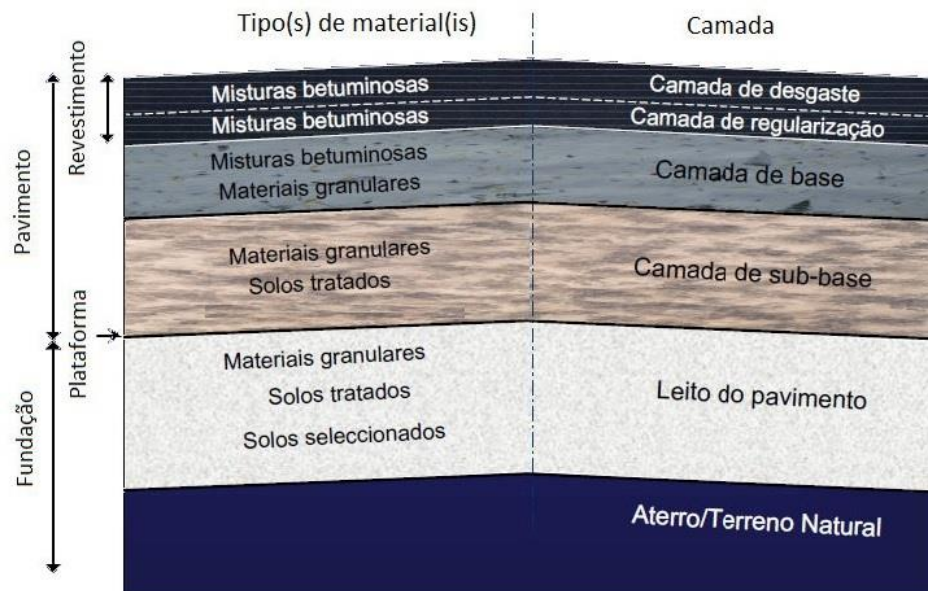


Figura 2.1 - Estrutura de um pavimento flexível (adaptado de Antunes et al. 2006)

A camada de base tem como função distribuir e reduzir as tensões para que estas sejam compatíveis com a capacidade da sub-base e do solo de fundação.

A camada de sub-base tem como função assegurar o apoio da base e permitir a sua adequada compactação, executando ainda uma ação drenante e anticontaminante (evitando que os finos penetrem na camada de base) (Branco et al, 2011).

As camadas subjacentes são o leito do pavimento e o solo de fundação. O papel do leito do pavimento é evitar a deformação do solo, garantir a homogeneidade das características mecânicas da fundação, servir de plataforma construtiva e possibilitar a compactação das camadas sobrejacentes em condições adequadas, enquanto o solo de fundação tem como função suportar o pavimento (INIR, 2011).

2.2. Misturas betuminosas

As misturas betuminosas, como referido, podem ser utilizadas nas camadas de desgaste e regularização e base, e são constituídas por agregados, betume e ar, sendo as características

intrínsecas e as proporções relativas desses materiais que ditam as propriedades de cada mistura (Neves, 2010).

O betume asfáltico é um material termoplástico cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura. À temperatura ambiente apresenta-se em estado semissólido, sendo necessário aquecê-lo para ser utilizado na produção da mistura e permitir a trabalhabilidade da mesma.

Os agregados são materiais granulares obtidos por extração direta ou por britagem de rochas de diferentes naturezas. A incorporação destes materiais na mistura tem como objetivo a formação de um esqueleto pétreo que resista à ação do tráfego.

No entanto, as misturas betuminosas diferem entre si não só devido à dosagem dos materiais envolvidos mas também devido processo de fabrico. As misturas betuminosas podem ser classificadas de acordo com a gama de temperatura a que foram produzidas e equivalente consumo de combustível, dividindo-se em 4 tipos de misturas betuminosas como representado na Figura 2.2.

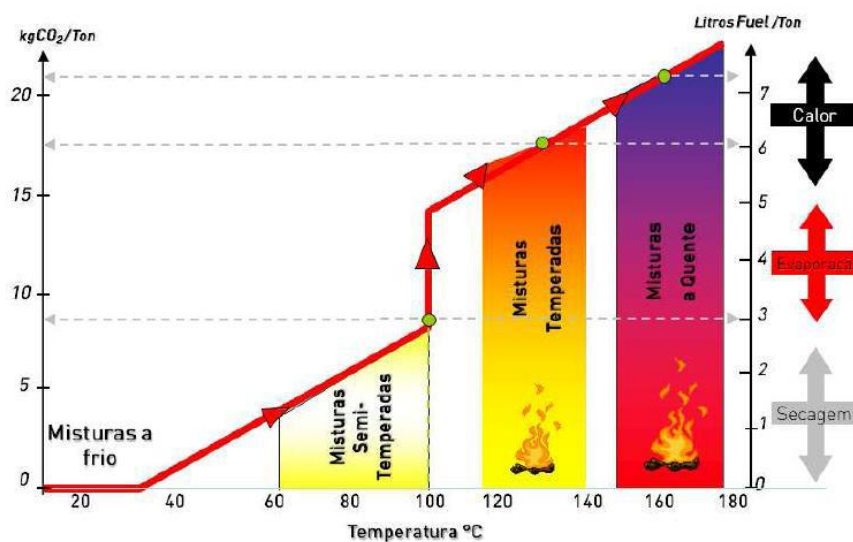


Figura 2.2 – Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura (Alconada, 2011)

As misturas betuminosas a frio são obtidas à temperatura ambiente e usam como ligante emulsões betuminosas ou espumas de betume (Vaitkus, 2009). Desta forma, a redução da viscosidade do betume não é feita através do aumento da temperatura mas sim através da sua emulsão com água que recorre ao auxílio de emulsionantes para facilitar e garantir a estabilidade da dispersão.

As misturas betuminosas semitemperadas são obtidas a temperaturas inferiores a 100°C. Os agregados são aquecidos a temperaturas entre os 60 e os 100°C e como ligante pode ser usado

betume ou emulsões betuminosas. Estas misturas podem ser produzidas, por exemplo, com emulsão betuminosa ou betume-espuma como ligante.

As misturas betuminosas temperadas são obtidas a temperaturas entre 100 e 140°C, e usam como ligante o betume, o que só é possível com a incorporação de aditivos que permitam essa redução de temperatura quer durante o fabrico quer aquando da sua compactação.

As misturas betuminosas a quente, ou misturas convencionais, são fabricadas a temperaturas elevadas, entre os 150 e 180°C, devido ao ligante ser betume convencional. Este aumento de temperatura, quer para aquecimento do betume quer dos agregados, implica um consumo de energia e combustível bastante mais elevado, comparativamente com as restantes misturas, e gera uma maior emissão de gases para a atmosfera.

Para além dos critérios inerentes às funções da camada em que serão implementadas, as misturas betuminosas devem garantir critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução. Em geral, para qualquer tipo de mistura betuminosa, são exigidas características como a estabilidade, a durabilidade, a flexibilidade, a resistência à fadiga, a aderência, a impermeabilidade e a trabalhabilidade definidas em seguida de acordo com *Branco et al (2011)*.

A estabilidade é a propriedade que garante que a mistura tem capacidade adequada para resistir, com pequenas deformações, às cargas a que fica sujeita em serviço. Esta propriedade depende essencialmente do atrito interno dos materiais e da sua coesão. Assim, para que a mistura seja considerada estável é necessário assegurar uma granulometria adequada e evitar o uso excessivo de betume que pode provocar lubrificação das partículas causando, conseqüentemente, redução do atrito.

A durabilidade é a propriedade que representa a resistência à desintegração da mistura quando sujeita às ações do tráfego e do clima.

A flexibilidade é a propriedade que exprime a capacidade de adaptação da mistura aos movimentos graduais do suporte (assentamentos diferenciais) permitindo evitar o fendilhamento. Esta propriedade é favorecida pelo aumento da percentagem de betume e pelo uso de uma granulometria aberta.

A resistência à fadiga é a propriedade que mede a capacidade da mistura suportar as cargas induzidas pela passagem repetida de veículos. Este tipo de cargas induz nos materiais extensões de tração compostas por uma componente elástica e por uma componente plástica, que podem resultar na abertura de fendas.

A aderência relaciona-se com a textura da superfície do pavimento, sendo por isso favorecida pela boa drenagem superficial do pavimento e pelo recurso a agregados com superfície rugosa e boa resistência ao desgaste.

A impermeabilidade é a capacidade da mistura de impedir a entrada de água, variando inversamente com a quantidade de vazios e a interligação existente entre os mesmos.

A trabalhabilidade é a propriedade que traduz a facilidade de manuseamento da mistura (transporte, colocação e compactação). Por norma, os problemas de trabalhabilidade das misturas podem e devem ser resolvidos por ajustes na formulação da mesma.

2.3. Misturas betuminosas temperadas

As misturas betuminosas temperadas são as misturas a abordar neste trabalho. Como já foi referido, são misturas obtidas a temperaturas entre 100 e 140°C, e vieram a adquirir maior importância para dar resposta às preocupações ambientais despertadas a partir dos anos 90 do século passado.

No entanto, a produção de misturas a temperaturas mais baixas data de algumas décadas antes. No início de 1956, o Professor Ladis Csanyi avaliou o potencial da espuma de betume como ligante de solos e desenvolveu um processo que consistia na introdução de vapor de água no betume quente, permitindo reduzir a temperatura da mistura (*Chowdhury et al, 2008*). Esta descoberta foi posteriormente patenteada pela Mobil Oil em 1968, que modificou o método original de produção de betume-espuma, passando a injetar água fria ao invés de vapor de água (*Kristjansdottir et al, 2007*).

A partir da década de 70 começaram a surgir os manuais sobre as metodologias de dimensionamento, formulação e produção de misturas estabilizadas com emulsões, o que potenciou um crescimento no uso deste tipo de misturas.

Em 1994, Maccarone et al. estudaram as misturas betuminosas a frio com betume-espuma como ligante e as misturas betuminosas com elevados conteúdos de emulsão concluindo que as mesmas ofereciam ganhos ao nível da eficiência energética e da redução das emissões. Assim, surgindo em resposta às preocupações ambientais da época foram construídas, em 1995, as primeiras estradas com misturas betuminosas temperadas na Europa.

Nos anos que se seguiram, tendo como principal objetivo alcançar as metas exigidas pelo Protocolo de Quioto – redução da produção de CO₂ em pelo menos 5.2% face aos níveis atingidos em 1990, no período de 2008 a 2012 – começam a surgir inúmeros estudos e tecnologias que permitem melhorar a produção e o desempenho deste tipo de mistura.

Em 1997, começa a ser comercializado, pela *Sasol Wax International AG*, o *Sasobit*, um aditivo orgânico usado como auxiliar na compactação de misturas betuminosas (*Sasol, 2004*) com um crescimento significativo até aos dias de hoje.

Em 1999, Jenkins explora um novo processo, que consiste no aquecimento prévio dos agregados a uma temperatura inferior a 100°C (Jenkins et al, 1999) fator que, segundo o autor, potencia o envolvimento das partículas, a coesão, a resistência à tração e a compactação (Jenkins, 2000).

Em 2002, a NAPA – National Asphalt Pavement Association, viajou até à Europa com intuito de estudar e analisar o comportamento das misturas betuminosas temperadas e, a partir desse momento, esta tecnologia passou a ser implementada também nos EUA, desencadeando assim o crescimento exponencial da mesma (Ferreira, 2009).

2.3.1. Tecnologias de produção

Existem diversas tecnologias para produção da MBT's, por isso, de acordo com vários autores (EAPA, 2010; D'Angelo et al, 2008) é possível enquadrá-las a todas nos três grupos representados na Figura 2.3.

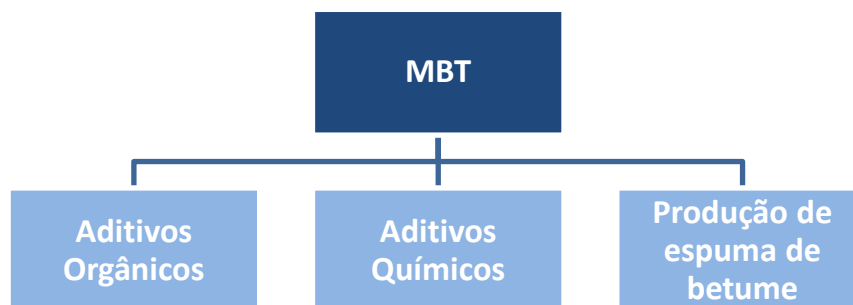


Figura 2.3 - Tecnologias de produção das misturas betuminosas temperadas

Os aditivos orgânicos são ceras que podem ser adicionadas à mistura ou ao ligante e que possibilitam uma redução de temperatura entre 20 a 30°C (EAPA 2010). As ceras atuam provocando uma redução na viscosidade do betume que se mantêm durante o processo de produção e compactação, e acabam por cristalizar com o arrefecimento do pavimento, oferecendo ao mesmo um aumento de rigidez e uma maior resistência à deformação (Barbosa, 2012).

Os aditivos químicos funcionam como agentes surfactantes ou tensoativos, atuando ao nível da interface betume/agregado favorecendo o recobrimento, mesmo a baixas temperaturas (Hurley and Prowell, 2006). Este tipo de aditivos permite reduzir as temperaturas de produção e compactação em cerca de 20 a 30°C (EAPA 2010).

A produção de espuma de betume tem duas variantes: espuma de betume por injeção de água e espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais. Em qualquer dos casos o processo consiste na expansão do betume, causando um aumento de volume e diminuição da viscosidade, tornando possível a mistura à temperatura e humidade ambiente, posteriormente, o betume retoma as condições iniciais por abaixamento gradual do volume adquirido. Este processo permite, no caso da injeção de água, uma diminuição de temperatura entre os 20 e os 30°C, e no caso dos minerais sintéticos ou naturais atingem-se reduções na ordem dos 30°C (EAPA 2010).

2.3.2. Vantagens das MBT's

As misturas betuminosas temperadas oferecem vantagens económicas, ambientais e sociais evidentes a curto, médio e longo prazo (Nymas, 2009).

1. Redução nos consumos energéticos

O abaixamento da temperatura tem por consequência uma redução do consumo de combustível, estimando-se que reduções na ordem dos 28°C resultem em poupanças de aproximadamente 11% (Prowell e Hurley, 2012).

2. Reduções das emissões de poluentes

O abaixamento da temperatura origina também uma redução na quantidade de gases produzida e lançada para a atmosfera. Para além disso, há que contabilizar a redução de emissões que se deve à redução de consumos, isto é, o combustível que foi economizado e os consequentes gases que a queima do mesmo iria gerar.

3. Possibilidade de aumento da distância de transporte

A mistura por ser formulada a menores temperaturas tem uma taxa de arrefecimento menor, possibilitando o transporte a maiores distâncias sem que a trabalhabilidade seja comprometida (Capitão et al, 2012).

4. Maior facilidade de aplicação em épocas frias

Como foi referido em 3., as menores diferenças de temperatura entre a mistura betuminosa e o ar implicam uma diminuição na taxa de arrefecimento que vem facilitar o processo de compactação.

5. Maior rapidez na abertura ao tráfego

A aplicação das misturas a menores temperaturas permite que se atinjam mais rapidamente as condições necessárias para a circulação de veículos.

6. Melhores condições de trabalho

A redução da temperatura traz benefícios para os trabalhadores pois permite aos mesmos trabalhar a temperaturas mais agradáveis e com odores menos intensos e, devido à redução da emissão de gases poluentes, deixa-os menos expostos à poluição (Prowell e Hurley, 2012).

7. Possibilidade de haver maior proximidade entre as centrais betuminosas e os centros urbanos

Havendo redução nas emissões de gases, e conseqüente redução na poluição, torna-se possível aproximar as centrais aos centros urbanos.

8. Redução do envelhecimento do betume

Durante a produção das misturas dá-se o envelhecimento do betume devido à oxidação. Este processo pode ser minorado por redução da temperatura, reduzindo conseqüentemente o endurecimento da mistura e aumentando a resistência à fadiga e a durabilidade do pavimento a longo prazo (Newcomb, 2007).

9. Melhor comportamento em serviço

Face às misturas betuminosas a frio, certas misturas temperadas apresentaram melhores comportamentos em serviço devido ao melhor e mais eficaz envolvimento do agregado pelo ligante (Capitão et al, 2012).

10. Possibilidade de incorporar maior quantidade de fresados

As temperaturas mais baixas favorecem a adição de maiores percentagens de fresado devido à redução da viscosidade do ligante e à redução no envelhecimento do betume que é favorável ao betume existente no fresado. Assim, garante-se um aumento da vida à fadiga e minoram-se os problemas de fissuração (Olard e Romier, 2011; Prowell e Hurley, 2008; Ferreira, 2009). Para além da vantagem ambiental, a menor utilização de materiais virgens origina uma redução nos custos.

2.3.3. Desvantagens das MBT's

Como é expectável este tipo de misturas também traz algumas desvantagens, são exemplo disso:

1. Custos globais de produção

O facto das MBT's oferecerem redução nos custos por uso de menor quantidade de combustível não oferece necessariamente uma diminuição no custo global de produção pois o uso de aditivos para redução da temperatura de produção representa um acréscimo ao custo global que pode não ser vantajoso.

2. Emissões de gases geradas pela produção de aditivos

Também ao nível das emissões, a redução conseguida pela diminuição da temperatura pode não ser compensatória se se contabilizar as emissões inerentes ao processo de produção dos aditivos.

3. Presença da água

A incorporação de água no início da produção pode permitir, devido à vaporização não se dar na totalidade, a presença de água residual na fase de mistura e pavimentação, o que pode causar problemas de descasque e assentamento prematuro do pavimento (Zaumanis, 2010).

4. Comportamento de misturas com aditivos orgânicos a baixas temperaturas

As misturas que incorporam aditivos orgânicos podem ter um comportamento diferente do que seria expectável para um mistura a quente, devido à possível cristalização das ceras que tende a aumentar a viscosidade e a rigidez do betume (Zaumanis, 2010).

2.4. Avaliação do desempenho de misturas betuminosas

As misturas betuminosas e os materiais que as formam (betume e agregados) antes de serem implementadas são obrigatoriamente testadas de forma a garantir que os requisitos mecânicos e de segurança impostos pelas entidades competentes são cumpridos. Como tal, são realizados vários ensaios que permitem avaliar as principais características que influenciam o comportamento mecânico e funcional das misturas betuminosas e algumas das características do betume. Em seguida faz-se uma breve descrição desses ensaios de acordo com as normas europeias em vigor.

2.4.1. Ensaios de caracterização do betume – Anel e bola e Penetração

Os ensaios de anel e bola e penetração são ensaios de caracterização do betume e fornecem resultados relativamente à temperatura de amolecimento do betume e à penetração do mesmo.

O ensaio de penetração é desenvolvido de acordo com a norma EN 1426 (CEN, 2007). O ensaio consiste na recolha de uma amostra de betume que é aquecida 80 a 90°C acima do seu ponto de amolecimento e transferida para o recipiente de teste. O recipiente de teste é preenchido até conter uma espessura 10mm superior ao ponto expectável de ser atingido pela agulha à temperatura do ensaio e coberto para arrefecer à temperatura ambiente durante 60 a 90 minutos. A agulha de penetração é limpa e a amostra colocada em banho termostático, a 25°C, totalmente submersa, Figura 2.4. Desce-se lentamente a agulha até que a ponta da mesma toque o seu reflexo na superfície da amostra, definindo o ponto de zero penetração e solta-se a agulha registando o valor obtido.



Figura 2.4 - Equipamento para ensaio de penetração

O ensaio de anel e bola é desenvolvido de acordo com a norma EN 1427 (CEN_b, 2007) e consiste na transferência da amostra de betume para os anéis e colocação dos mesmos na posição de ensaio, cobertos com água até 50mm acima da sua superfície. Em seguida, são colocadas as esferas de aço, e todo o conjunto é arrefecido até à temperatura de 5°C, mantendo-se a essa temperatura durante 15 minutos para estabelecer a temperatura inicial do ensaio. Posicionam-se as esferas de aço sobre cada guia e inicia-se o aquecimento do banho termostático (Figuras 2.5 e 2.6) até que o betume de cada conjunto anel e esfera toque no fundo. Nesse momento, regista-se a temperatura indicada pelo termómetro para cada conjunto.



Figura 2.5 - Equipamento para ensaio de anel e bola



Figura 2.6 - Amostras em banho termostático no decorrer do ensaio

2.4.2. Ensaio de Marshall

O estudo de Marshall é desenvolvido de acordo com a norma EN 12697-34 (CEN_a, 2004) e tem como objetivo a definição da percentagem ótica de betume a incorporar em cada mistura betuminosa.

O estudo requer a produção de 4 provetes cilíndricos por cada percentagem de betume a considerar, de acordo com a norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004). Para tal, os agregados são previamente aquecidos em estufa, posteriormente misturados com o betume a 160°C e compactados no compactador de impacto com uma energia de compactação de 75 pancadas em cada face.

Após a desmoldagem dos provetes são determinadas, para cada conjunto de provetes, a baridade aparente (ρ_{bssd}), a baridade máxima teórica (ρ_{mv}), a porosidade (V_m) e o volume de vazios da mistura de agregados (VMA) de forma a caracterizar fisicamente cada conjunto.

Posteriormente, no período de tempo decorrente entre as 4 e as 32 horas imediatas à desmoldagem, todos os provetes são submetidos ao ensaio de compressão de Marshall. Este ensaio pretende determinar a estabilidade e a deformação dos provetes por ação duma carga a velocidade constante. O ensaio é realizado com recurso a um equipamento que incorpora o estabilómetro de Marshall e cujo esquema de montagem se ilustra na Figura 2.7.

Para a realização do ensaio, os provetes são inicialmente aquecidos em banho termostático, a uma temperatura de 60°C durante cerca de 50 minutos, como se ilustra na Figura 2.8. A cabeça do estabilómetro é limpa, lubrificada e também colocada no banho termostático durante 30 minutos. Após o banho, o provete é colocado no estabilómetro (Figura 2.9) e é aplicada a carga a uma velocidade de 50mm/minuto, até se atingir a rotura do provete.

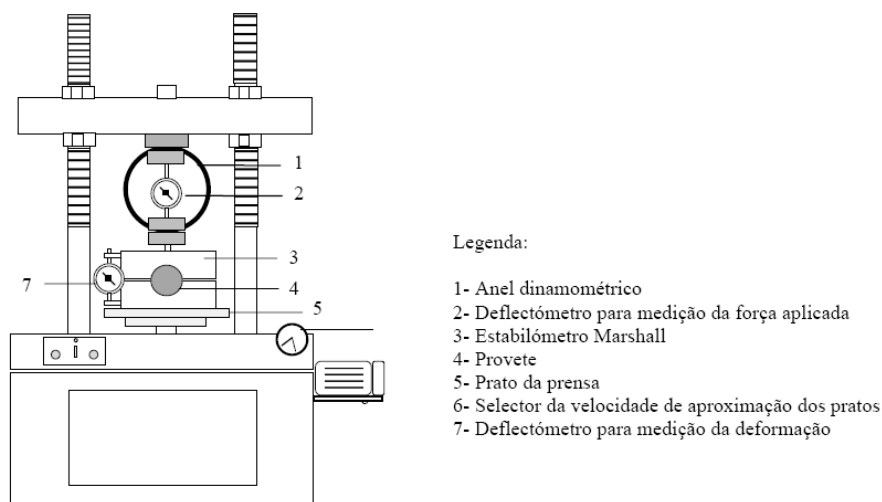


Figura 2.7 – Esquema de montagem usado no ensaio de compressão Marshall (Branco et al., 1998)



Figura 2.8 - Provetes em banho termostático



Figura 2.9 – Provete colocado no estabilômetro para realização do ensaio de Marshall

Por fim, são registadas as leituras dadas pelo equipamento e determinados os valores da estabilidade e deformação. Com base nesses valores e nos valores obtidos anteriormente para as baridades aparente e máxima teórica e para as porosidades (volume de vazios em provete compactado e VMA, volume de vazios no esqueleto do agregado compactado sem considerar o ligante) é possível determinar qual a percentagem ótima de betume a incorporar.

2.4.3. Ensaio de sensibilidade à água

O ensaio de sensibilidade à água é realizado com base na norma EN 12697-12 (CEN, 2008) e pretende avaliar a suscetibilidade das misturas betuminosas à presença da água.

Para a realização deste ensaio é necessário compactar, de acordo com a norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004), 6 provetes cilíndricos. Numa primeira fase é feita a caracterização volumétrica dos provetes de acordo com as normas EN 12697-29 (CEN_a, 2002) e NP EN 12697-6 (IPQ, 2003). Posteriormente, os provetes são divididos em dois grupos – “wet” e “dry” – de três exemplares cada, por semelhança de dimensão e baridade de forma a não se registar uma diferença de dimensão superior a 5mm nem de baridade superior a 15 kg/m³.

Os provetes do grupo “dry” são armazenados à temperatura ambiente, sobre uma superfície plana, enquanto os provetes do grupo “wet” são colocados no picnómetro de vácuo com água a 20°C até 20mm acima da face superior e submetidos ao vácuo de forma a obter uma pressão de 6.7 kPa em 10 minutos. Os provetes “wet” permanecem nestas condições durante 30 minutos e retomam lentamente à pressão atmosférica por mais 30 minutos. Os provetes são retirados do picnómetro e

faz-se nova caracterização volumétrica, de acordo com a norma EN 12697-29 (CEN_a, 2002), para determinar o volume de cada provete. O aumento de volume pré e pós-vácuo não deve exceder 2% ou o provete em causa é rejeitado. Por fim, colocam-se os provetes “wet” em banho termostático a 40°C durante 72 horas.

Antes do ensaio, todos os provetes são colocados na câmara de temperatura controlada a 15°C durante 2 horas. O ensaio consiste na compressão do provete por aplicação de uma carga diametral (Figura 2.10), a velocidade constante (50 mm/minuto) até atingir o pico de carga e posterior rotura física do provete.

Finalizado o ensaio regista-se o tipo de rotura, o estado dos agregados à superfície e calcula-se o ITS_d, ITS_w e ITS_R de acordo com a equação [2.1].

$$ITS_R (\%) = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad [2.1]$$

Onde,

ITS_w – média dos valores de ensaio obtidos para os provetes “wet” em kPa;

ITS_d – média dos valores de ensaio obtidos para os provetes “dry” em kPa.

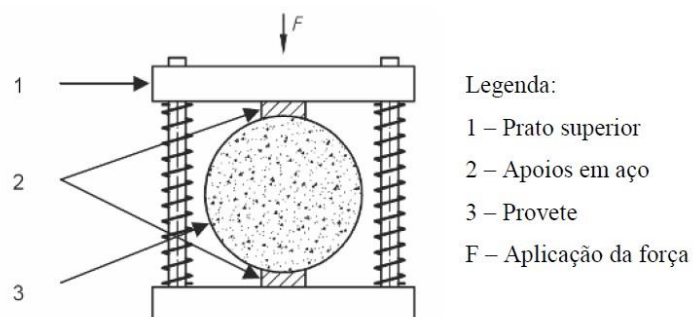


Figura 2.10 – Esquema do ensaio de ITS_R (adaptado de CEN_a, 2003)

2.4.4. Ensaio de deformabilidade

O ensaio de deformabilidade é um ensaio classificado como de desempenho base pois os resultados obtidos têm relação direta com as propriedades em serviço das misturas betuminosas.

O ensaio tem como objetivo final a obtenção do módulo de deformabilidade (ou módulo de rigidez) que, em serviço, depende não só das características dos materiais que constituem a mistura betuminosa, mas também das condições climáticas e da velocidade do tráfego. Estes últimos fatores são, durante o ensaio, simulados através da temperatura definida e da frequência de

carregamento. Assim, o ensaio consiste em sujeitar um provete à aplicação de uma carga cíclica sinusoidal sobre determinadas condições de temperatura, frequência e modo de carregamento.

A temperatura, como já foi referido, é um fator bastante importante na avaliação da propriedades dos materiais betuminosos pois influencia fortemente o tipo de comportamento elástico, viscoso ou visco-elástico dos mesmos e registam-se variações significativas do módulo de deformabilidade para diferentes temperaturas.

A frequência de aplicação de carga é um parâmetro importante pois pretende simular as ações do tráfego no pavimento. A norma propõe o uso de frequências entre 0.1 e 50Hz, não devendo o provete ser sujeito a mais de 3000 ciclos, valor a partir do qual poderia sofrer danos por fadiga prematuros.

No que diz respeito ao modo de carregamento, é possível optar entre dois modos de carregamento: extensão controlada ou tensão controlada.

O ensaio é realizado de acordo com a norma EN 12697-26 (CEN_b, 2004), onde são definidos oito tipos de ensaio, que diferem consoante a forma dos provetes, os equipamentos utilizados e a configuração da carga.

2.4.5. Ensaio de Fadiga

O ensaio de resistência à fadiga pretende avaliar a resistência à fadiga dos provetes em função da extensão máxima suportada pelos mesmos em cada ciclo de carga. O ensaio é realizado de acordo com a norma EN 12697-24 (CEN_c, 2004) e, à semelhança do ensaio de deformabilidade que se vai usar, é um ensaio de flexão em quatro pontos (2 pontos de apoio e dois pontos de aplicação de carga na parte central de vigas prismáticas da mistura betuminosa). O ensaio decorre a 20° C e consiste na aplicação de uma carga sinusoidal até que se atinja 50% do módulo de deformabilidade inicial, ponto que é considerado como de rotura (início do fendilhamento), determinando o número de ciclos de carregamento a que o provete é submetido até atingir essa rotura.

A frequência de carregamento mais usual neste tipo de ensaios é de 10 Hz pois, sendo a frequência o inverso do tempo de carregamento, esta frequência representa uma velocidade média da corrente de tráfego na ordem dos 60km/h, de acordo com a abordagem de Van der Poel (Shell, 2015).

2.4.6. Ensaio de pista – Wheel Tracking

O ensaio de pista pretende avaliar a suscetibilidade à deformação de materiais betuminosos e é realizado de acordo com a norma EN 12697-22 (CEN, 2003).

O ensaio pressupõe a criação de dois provetes paralelepípedicos (lajes) com dimensões aproximadas de 400x300x60 mm³, de acordo com a norma EN 12697-22, e consiste na medição da profundidade da rodeira formada após passagens sucessivas de uma carga sobre o provete, a temperatura constante.

Este ensaio, segundo consta na norma, pode ser realizado de 6 formas diferentes, recorrendo a diferentes tipos de equipamento e acondicionamentos. Dependendo do tipo de procedimento escolhido são obtidos diversos parâmetros, nomeadamente, a média proporcional da profundidade da rodeira (PDR), a profundidade média da rodeira (RD) e os parâmetros necessários ao cálculo da variação de deformação permanente (WTS) obtido através da equação [2.3].

$$WTS = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad [2.3]$$

Onde,

d_{10000} – profundidade da rodeira após 10000 ciclos, em mm;

d_{5000} – profundidade da rodeira após 5000 ciclos, em mm.

2.4.7. Ensaio para avaliação da textura – Técnica volumétrica da mancha de areia e Pêndulo britânico

Os ensaios de medição da profundidade da macrotextura através da técnica volumétrica da mancha de areia e de pêndulo britânico permitem avaliar, respetivamente, a macro e microtextura do pavimento em causa. São parâmetros particularmente importantes para misturas destinadas a camada de desgaste pois estão diretamente relacionados com o contacto pneu/pavimento.

A macrotextura é um parâmetro que melhora o escoamento rápido dos pavimentos, permitindo melhor contacto do pneu com a superfície e, conseqüentemente, reduzindo a possibilidade de aquaplanagem. Este parâmetro é avaliado através da técnica volumétrica da mancha de areia, realizado de acordo com a norma EN 13036-1 (CEN, 2010) e que consiste em espalhar sobre a superfície da laje de pavimento um volume conhecido de areia/microesferas de vidro, obtendo uma mancha semelhante à exibida na Figura 2.11. Para a realização deste ensaio é necessário garantir que a laje ensaiada se encontre limpa e seca, que as microesferas sejam do tamanho padronizado e com grau de esfericidade superior a 90%.



Figura 2.11 - Mancha de areia obtida sobre a laje V12

O tamanho da mancha criada é medido em 4 zonas distintas, calcula-se a média dos resultados obtidos (d_m), e em seguida, calcula-se a altura média de areia de acordo com a equação [2.2].

$$h_m = \frac{4V}{\pi * d_m^2} \quad [2.2]$$

Onde,

h_m – altura de areia média, em mm;

d_m – diâmetro médio da mancha de areia, em mm;

V – volume de esferas utilizado, em mm^3 .

A microtextura depende das propriedades dos agregados da mistura betuminosa e é o parâmetro que permite caracterizar uma superfície em termos de rugosidade. Esta característica é importante na caracterização do pavimento pois é a principal responsável pela resistência à derrapagem.

Este parâmetro é avaliado através do ensaio do pêndulo britânico, realizado de acordo com a norma EN 13036-4 (CEN, 2011), e serve para determinar o coeficiente de atrito da superfície ensaiada. As características do pêndulo permitem que este simule o desempenho de um veículo, à velocidade de 50 km/h, a travar sobre uma superfície de pavimento molhada. A grandeza obtida com este ensaio é o valor PTV – Pendulum test value, que representa indiretamente o atrito longitudinal (Menezes, 2008).

O ensaio consiste em colocar o equipamento ilustrado na Figura 2.12 sobre uma superfície horizontal e fazer deslizar a superfície de borracha do mesmo sobre a superfície do pavimento. O ensaio tem como objetivo a medição localizada do coeficiente de atrito cinemático, através da avaliação da energia absorvida por atrito, quando a superfície de borracha do pêndulo desliza sobre

o pavimento. O equipamento é fixo no local de ensaio, move-se o braço do pêndulo até uma posição horizontal e, depois de molhar a superfície, liberta-se o braço do pêndulo para que a superfície de borracha deslize sobre o pavimento. A altura de máxima elevação é identificada por uma agulha posicionada verticalmente na frente do pêndulo, e indica a leitura do valor de teste do pêndulo (PTV).



Figura 2.12 - Pêndulo britânico (retirado de engenhariacivil.tecnilab.pt)

Para cada ponto do pavimento, realiza-se uma série de cinco ensaios, registando-se em cada uma leitura, arredondada à unidade. Quando a diferença entre as cinco leituras for superior a três unidades PTV deve repetir-se o ensaio até que se obtenham três observações consecutivas com o mesmo valor, adotando esse valor como o resultado do ensaio.

3. Estudo experimental e análise dos resultados

3.1. Considerações iniciais

Na presente dissertação desenvolveu-se um estudo laboratorial com o objetivo de avaliar o desempenho de um ligante aditivado apropriado para o fabrico de misturas temperadas (CEPSASFALT BT 35/50 aditivado) face a um ligante tradicional (CEPSASFALT BT 35/50). Para tal, foram realizados todos os ensaios fundamentais à análise do comportamento mecânico de misturas betuminosas com estes ligantes de forma a concluir se o ligante aditivado será, ou não, adequado para utilização em misturas betuminosas destinadas a camada de desgaste.

É fundamental compreender quais as principais implicações da alteração de temperatura de compactação em termos de comportamento da mistura. Para tal, foram efetuados ensaios que permitem avaliar as principais características que influenciam o comportamento mecânico das camadas de desgaste – módulo de deformabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente.

Este capítulo inicia-se com a formulação das misturas betuminosas a analisar, abordando a sua composição granulométrica e o estudo de Marshall para escolha da percentagem ótima de betume. Numa segunda fase apresentam-se todos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais executados para caracterização das misturas em causa e posterior análise dos mesmos.

As misturas estudadas são de acordo com a norma NP EN 13108-1 (IPQ, 2008) do tipo AC 14 Surf ligante (BBr) e constituídas por agregados graníticos.

3.2. Caracterização dos componentes da mistura

As misturas betuminosas em estudo resultam da combinação de materiais granulares com dois tipos de betume distintos: um betume tradicional, que resulta na mistura de referência (MR) e um betume de baixa temperatura, que dá origem à mistura em estudo (MV).

3.2.1. Betumes

Para os betumes em estudo optou-se por realizar apenas os ensaios laboratoriais de penetração e de anel e bola, no caso do betume de baixa temperatura pois é este betume que se pretende avaliar em comparação ao betume tradicional. No Quadro 3.1 encontram-se evidenciados os dados obtidos através das fichas técnicas dos betumes em estudo (Anexos).

Quadro 3.1 – Propriedades dos betumes em estudo com base nas respetivas fichas técnicas

	BT 35/50 [convencional] (MR)	BT 35/50 [modificado] (MV)
Temperatura da mistura (°C)	160 – 165	130 – 140
Temperatura do ligante (°C)	160 – 165	130 – 140
Temperatura de compactação (°C):	150 – 160	110 – 130
Penetração a 25° C (mm)	45	
Anel e Bola (°C)	51.6	
Índ. Penetração	-1.00	

Os resultados obtidos nos ensaios de penetração e anel e bola encontram-se evidenciados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Resultado dos ensaios de penetração e anel e bola para a mistura MB

	BT 35/50 (MV)
Penetração a 25° C (mm)	45
Anel e Bola (°C)	50.1
Índ. Penetração	-1.45

A análise dos quadros acima permite perceber que o valor registado no Quadro 3.1 para ensaio de anel e bola, obtido através da ficha técnica do produto, é superior ao valor obtido nos ensaios realizados (Quadro 3.2). A temperatura de amolecimento influencia o índice de penetração e portanto, o valor do mesmo é também menor. Esta alteração é expectável pois, tendo em conta que o índice de penetração varia entre -3, para betumes muito suscetíveis a temperaturas elevadas, e 7 para betume muito suscetível a baixas temperaturas, pode acontecer que um betume temperado seja um pouco mais suscetível a temperaturas elevadas do que um betume convencional.

3.2.2. Materiais Granulares

A composição granulométrica das misturas a estudar foi obtida por combinação de três tipos de materiais granulares de origem granítica, cuja curva granulométrica se encontra na Figura 3.1.

As misturas estudadas são, de acordo com a norma NP EN 13108-1 (IPQ, 2008), do tipo AC14 surf ligante (BBr) e a sua granulometria resulta da combinação dos materiais granulares acima referidos na proporção indicada no Quadro 3.3.

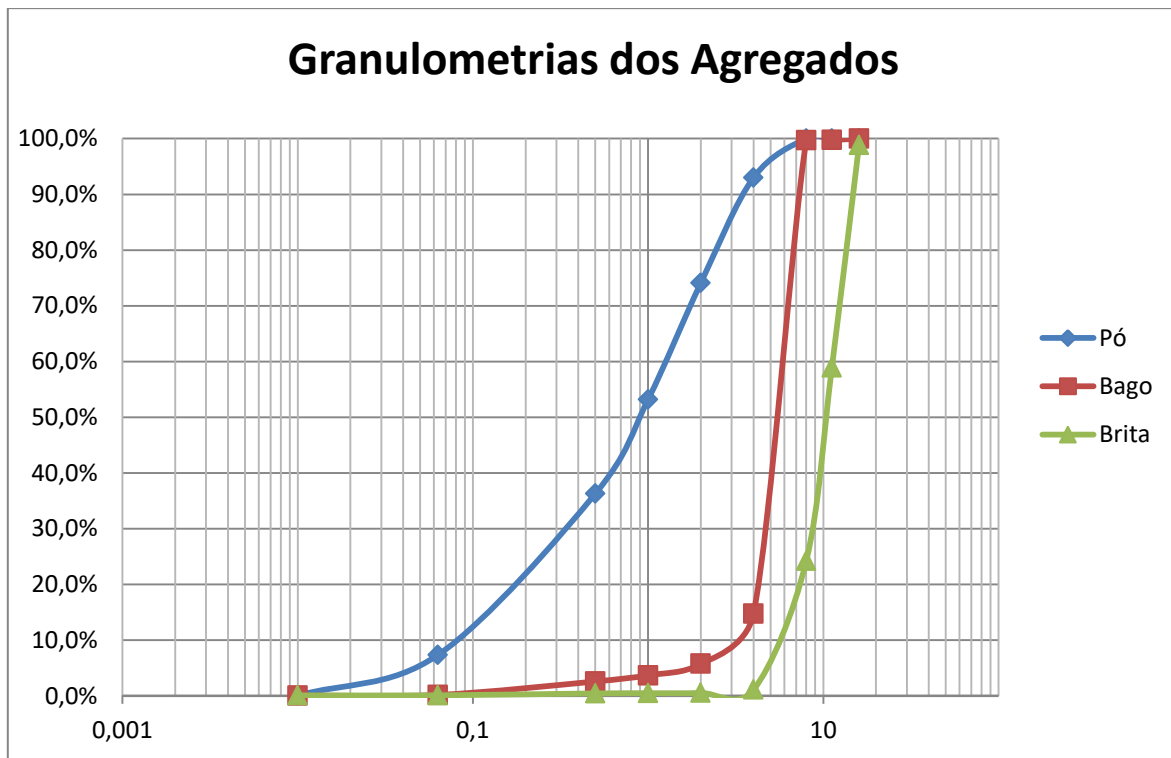


Figura 3.1 - Curva granulométrica dos agregados

Quadro 3.3 - Composição granulométrica do agregado

Agregados	Percentagem (%)
Brita 2 (12,5-16)	42
Brita 1 (8-12,5)	28
Pó	30

No Quadro 3.4 apresenta-se a composição granulométrica das misturas em estudo e na Figura 3.2 a curva granulométrica correspondente e respetivos limites.

Quadro 3.4 – Composição granulométrica da mistura e limites impostos pela norma europeia

# Peneiros (mm)	% passados	
	MR e MV	EN 13108-1
20	-	100% - 100%
16	96,5%	-
14	-	90% - 100%
11,2	76,6%	-
10	-	67% - 77%
8	55,9%	-
4	30,2%	30% - 40%
2	24,0%	22% - 30%
0,5	15,1%	12% - 21%
0,125	-	7% - 13%
0,063	6,5%	4% - 9%

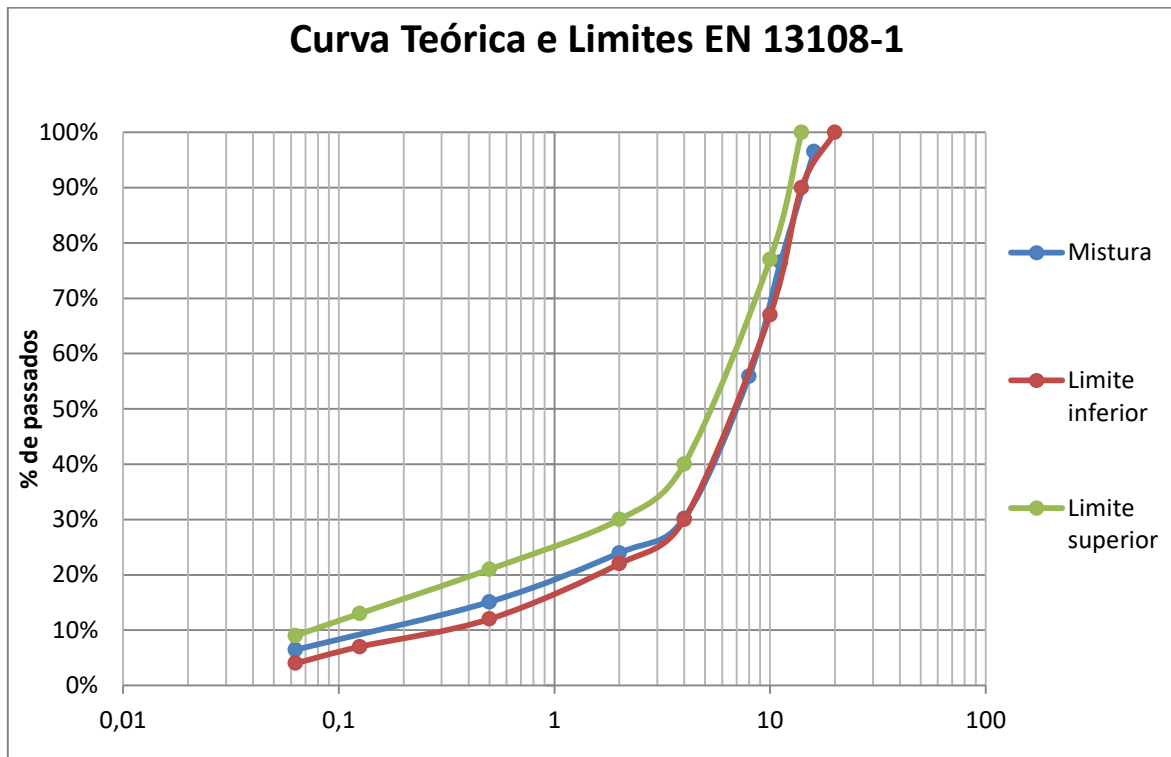


Figura 3.2 - Curva granulométrica da mistura e limites impostos pela norma europeia

3.3. Estudo Marshall

Para o estudo de Marshall, tendo por base a composição granulométrica apresentada em 3.2 e o betume de referência, foram produzidos 20 provetes cilíndricos. Optou-se por realizar o estudo de Marshall apenas com o ligante tradicional pois o objetivo do ensaio é determinar a percentagem ótima de betume a incorporar nas misturas, sendo essa percentagem igual para ambas de forma tornar possível estabelecer uma análise comparativa. Por este motivo apenas era necessário realizar o estudo para um dos betumes em estudo, assim, escolheu-se o betume de referência.

A produção dos provetes decorreu como explicitado em 2.4.2. e a caracterização dos mesmos encontra-se no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Caracterização dos provetes de Marshall

% Betume	Provete	Altura Média (mm)	Massa (g)
4,0%	R05	66,05	1213,25
	R06	64,79	1203,10
	R07	65,69	1215,20
	R08	65,28	1212,70
4,5%	R09	65,10	1208,40
	R10	65,86	1207,15
	R11	66,05	1218,00
	R12	66,71	1212,55
5,0%	R01	65,25	1203,95
	R02	66,24	1207,50
	R03	65,40	1213,05
	R04	66,70	1211,25
5,5%	R13	65,06	1216,10
	R14	64,76	1210,75
	R15	64,12	1204,95
	R16	63,99	1204,15
6,0%	R17	63,42	1214,85
	R18	64,25	1203,15
	R19	63,41	1203,30
	R20	64,23	1212,20

Após a desmoldagem dos provetes foi determinada, para cada provete, a baridade aparente (ρ_{bssd}) de acordo com a norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2003), método B – SSD. Este método envolve a determinação de três massas: a massa do provete seco (m_1), a massa do provete imerso durante 30 minutos (m_2) e a massa do provete após imersão com superfície seca (m_3). Com estas grandezas é possível determinar a baridade aparente do provete de acordo com a equação [3.1].

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad [3.1]$$

Onde ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura do ensaio, expressa em kg/m^3 .

Nas circunstâncias a que o ensaio foi desenvolvido, a água em que os provetes foram imersos encontrava-se a 17°C e portanto a densidade da água a considerar é de 998.8 kg/m^3 , de acordo com fator de correção referido em NP EN 12697-6 (IPQ, 2003).

A baridade máxima teórica (ρ_{mv}) foi determinada conforme o procedimento A da norma EN 12697-5 (CEN_b, 2002). Este método começa por pesar o recipiente onde se vai realizar o ensaio (m'_1) e o mesmo recipiente já com a mistura betuminosa no seu interior (m'_2). Posteriormente enche-se o recipiente com água até um máximo de 30 mm abaixo da junta superior e extrai-se o ar residual. Por fim, enche-se o recipiente na totalidade e procede-se a nova pesagem (m'_3). Com base nestes valores obtém-se a baridade máxima teórica da amostra através da equação [3.2].

$$\rho_{mv} = \frac{m'_2 - m'_1}{1000 * \left(V_{pic} * \frac{m'_3 - m'_2}{\rho_w} \right)} \quad [3.2]$$

Onde,

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura do ensaio, expressa em kg/m^3 ;

V_{pic} é o volume do picnómetro expresso em m^3 .

Procedeu-se também ao cálculo da porosidade (V_m) e do volume de vazios da mistura de agregados (VMA) de acordo com a norma NP 12697-8 (CEN_c, 2003), com recurso às equações [3.3] e [3.4], respetivamente:

$$V_m(\%) = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} * 100 \quad [3.3]$$

$$VMA(\%) = V_m + B * \frac{\rho_{bssd}}{\rho_b} \quad [3.4]$$

Onde,

B é a percentagem de ligante presente na mistura;

ρ_b é a baridade do ligante expressa em kg/m^3 .

A caracterização física dos provetes, de acordo com os resultados obtidos para as quatro grandezas anteriores, encontra-se no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Caracterização física dos provetes

% Betume	Bar. Aparente (kg/m^3)	Bar. Máx. Teórica (kg/m^3)	Porosidade (%)	VMA (%)
4,0%	2344,967	2507,708	6,49%	15,61%
4,5%	2335,919	2510,827	6,97%	17,19%
5,0%	2345,315	2499,037	6,15%	17,56%
5,5%	2380,152	2469,325	3,61%	16,34%
6,0%	2386,919	2458,524	2,91%	16,84%

Após a caracterização física realizada, os provetes foram submetidos ao ensaio de compressão de Marshall, de acordo com o procedimento referido em 2.4.2, os resultados obtidos encontram-se no Quadro 3.7.

A percentagem ótima de betume para a mistura betuminosa estudada calcula-se através da média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade para a mistura em estudo. O valor encontrado deverá ainda respeitar os limites máximos impostos para a deformação e o VMA.

Com base em todos os critérios acima referidos obteve-se o valor da percentagem ótima de betume para a mistura em estudo – 4.5%.

Quadro 3.7 - Resultados experimentais obtidos no ensaio de Marshall

% Betume	Provete	Força de Rotura		Deformação	
		(S - KN)	Média	F (mm)	Média F
4,0%	R05	11,79	12,19	5,26	5,43
	R06	11,21		5,52	
	R07	12,63		5,28	
	R08	13,13		5,66	
4,5%	R09	14,63	14,39	5,43	5,15
	R10	14,15		5,19	
	R11	14,67		5,02	
	R12	14,12		4,95	
5,0%	R01	9,78	10,02	5,44	5,62
	R02	9,66		5,80	
	R03	12,62		5,55	
	R04	8,02		5,67	
5,5%	R13	10,25	10,75	6,08	6,20
	R14	11,17		6,59	
	R15	11,33		6,11	
	R16	10,26		6,02	
6,0%	R17	10,25	10,52	5,99	6,68
	R18	10,71		7,19	
	R19	12,07		7,33	
	R20	9,04		6,19	

3.4. Ensaio de sensibilidade à água (ITSR)

O ensaio de sensibilidade à água foi realizado de acordo com o procedimento referido em 2.4.3. Como tal, foram compactados 12 provetes cilíndricos, 6 relativos à mistura MR (R21 a R26) e 6 relativos à mistura MV (V1 a V6) cuja caracterização física se encontra no Quadro 3.8.

Após realização do ensaio foi possível determinar o índice de tração indireta (ITSR – Indirect Tensile Strength Ratio) através da equação [2.1], cujos resultados se encontram no Quadro 3.9.

Para além dos resultados foi feito o registo fotográfico dos provetes de forma a ser possível avaliar o tipo de rotura e o estado dos agregados à superfície - Figuras 3.3 e 3.4.

Quadro 3.8 – Caracterização física dos provetes para ensaio ITSR

Mistura	Provetes	Altura média (mm)	Peso Seco (g)	Baridade Aparente (Kg/m ³)
MR	R21	67,49	1214,8	2336,5
	R22	68,09	1218,1	2309,2
	R23	68,85	1211,1	2301,6
	R24	66,5	1212,6	2338,2
	R25	67,42	1221,8	2318,8
	R26	67,32	1246,2	2350,1
MV	V1	69,51	1203,8	2286,0
	V2	70,32	1191,5	2270,9
	V3	69,35	1222,2	2293,3
	V4	67,57	1199,7	2301,1
	V5	69,28	1206,9	2297,9
	V6	65,94	1147,3	2286,9

Quadro 3.9 – Resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água

	ITS _w (kPa)		ITS _d (kPa)		ITRS (%)
MR	7,671	7,770	10,696	11,476	68%
	7,107		12,366		
	8,533		11,367		
MV	5,460	5,125	9,422	10,100	51%
	4,783		9,942		
	5,131		10,936		

Por observação das Figuras 3.3 e 3.4 é possível perceber que, para ambas as misturas, na rotura dos provetes do grupo “dry” existe fracturação dos agregados, obtendo-se uma superfície de rotura praticamente lisa. Contrariamente, a superfície de rotura dos provetes do grupo “wet” é mais irregular pois não ocorre fracturação dos agregados, devendo-se a rotura à quebra da ligação betume-agregado. Esta diferença na rotura regista-se para ambas as misturas e deve-se ao condicionamento a que foram sujeitos os provetes, sendo possível afirmar que o contacto com a água torna a ligação betume-agregado menos eficaz, resultando num menor grau de fracturação dos agregados.



Figura 3.3 – Provetes da mistura MR após ensaio ITSR e tipo de rotura – grupo “dry” (à esquerda) “wet” (à direita)

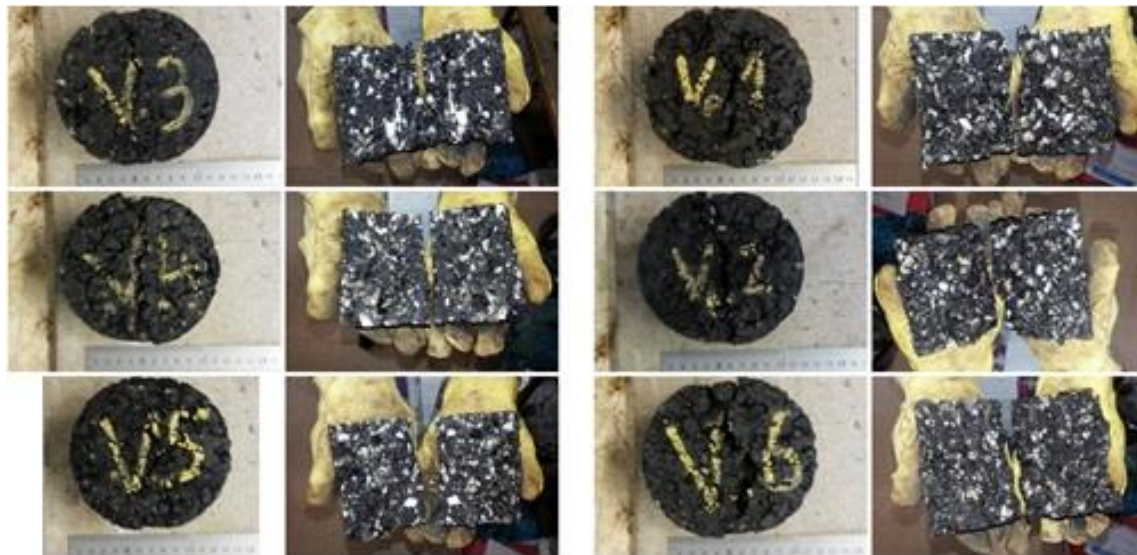


Figura 3.4 – Provetes da mistura MV após ensaio ITSR e tipo de rotura – grupo “dry” (à esquerda) “wet” (à direita)

Analisando os resultados obtidos no Quadro 3.9, pode afirmar-se que a resistência à acção da água é superior para a mistura MR (ITSR – 68%) em cerca de 30%. Como os valores da baridade aparente dos provetes são similares para ambas as misturas (Quadro 3.8) e de acordo com as conclusões obtidas pelo registo fotográfico dos provetes pós-rotura, pode afirmar-se que a diminuição de resistência à acção da água de MV se deve, provavelmente, às menores temperaturas de fabrico e compactação dos provetes, que acabam por resultar numa menor eficiência para a aderência betume-agregado. Como, de qualquer modo, o resultado de MR também não é muito elevado, poderá haver razões de afinidade agregado-betume que podem estar a contribuir com importância para estes resultados.

3.5. Ensaio de deformabilidade

Neste trabalho, recorreu-se ao ensaio de flexão em quatro pontos onde o provete prismático é colocado sobre quatro apoios que impedem o deslocamento vertical do mesmo, permitindo livre translação horizontal e rotação, de forma a não originar tensões adicionais. Este equipamento está inserido numa câmara climática e conectado a um sistema de aplicação de carga através dos apoios internos que permita a aquisição automática dos parâmetros do ensaio.

No que diz respeito ao modo de carregamento optou-se pelo ensaio a extensão controlada com amplitude máxima de deformação de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ pois havia necessidade de preservar a integridade dos provetes para ensaios posteriores, nomeadamente o ensaio de fadiga.

O ensaio foi realizado à temperatura de 20° C pois encontra-se dentro dos limites impostos pela norma e está de acordo com as temperaturas a que se realizaram ensaios anteriores.

Neste trabalho optou-se por utilizar as frequências 1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz e 1Hz novamente, perfazendo um total de 700 ciclos. A escolha de não utilizar as frequências mais elevadas deve-se ao facto destas poderem dar origem a fenómenos de ressonância e não representarem convenientemente a velocidade de circulação dos veículos pesados.

Para realização do ensaio foram produzidas quatro lajes de cada mistura que posteriormente foram cortadas dando origem a 5 provetes prismáticos cada. Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 3.5 a 3.12 e nos Quadros 3.10 e 3.11. Na obtenção dos resultados foram desprezados os valores dos ciclos iniciais de cada frequência devido à maior dispersão desses resultados.

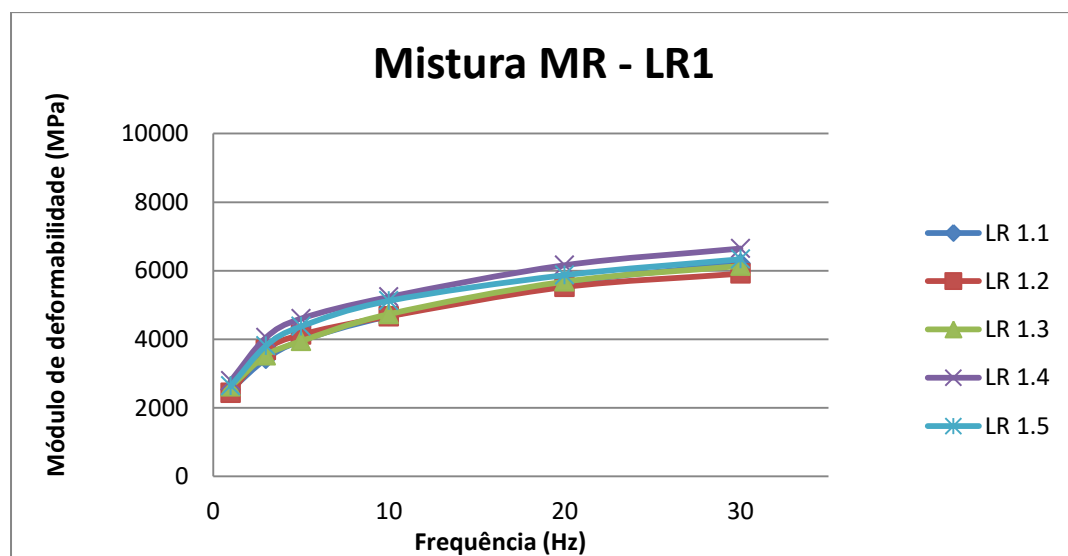


Figura 3.5 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR1

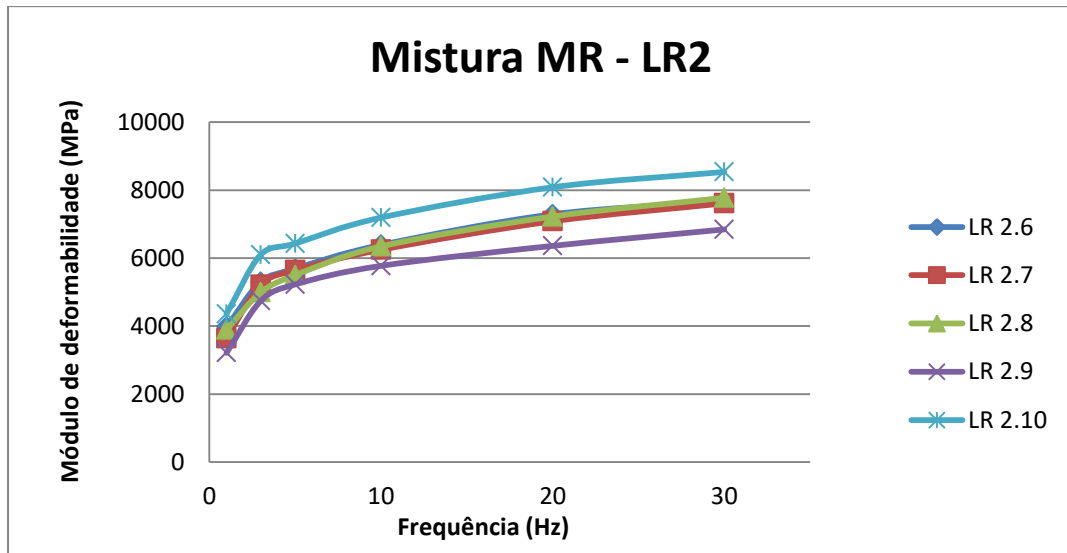


Figura 3.6 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR2

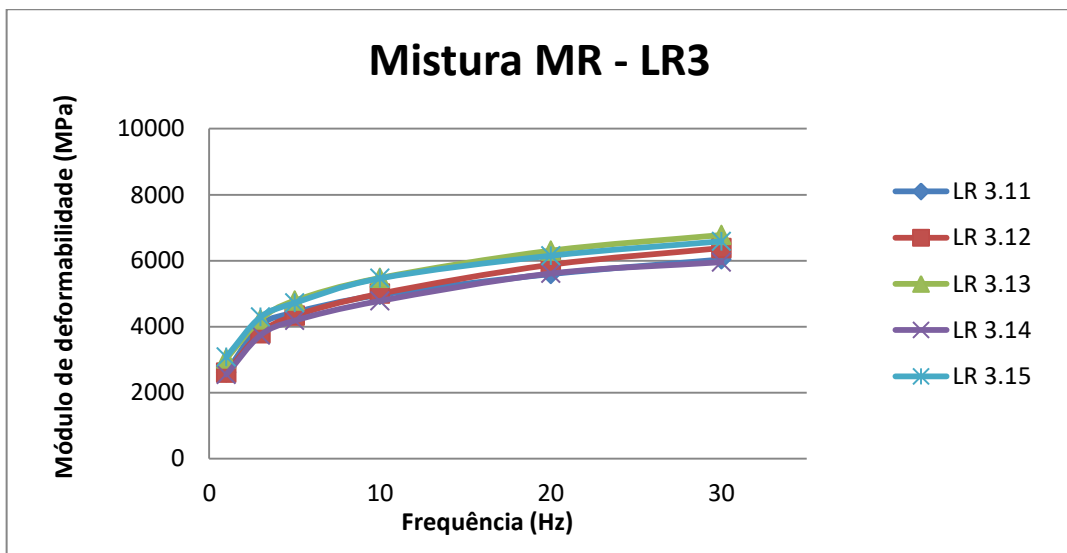


Figura 3.7 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR3

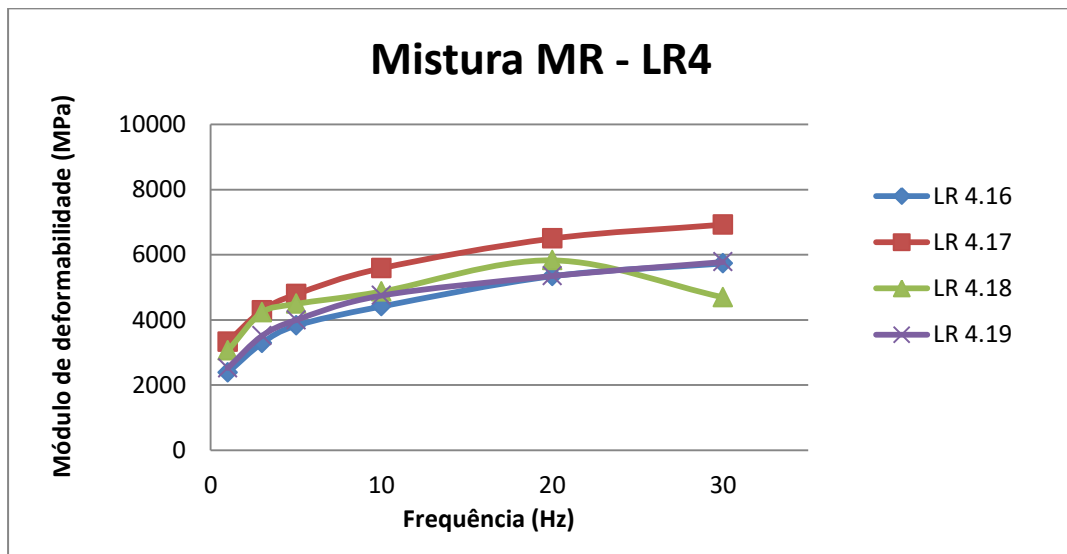


Figura 3.8 - Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LR4

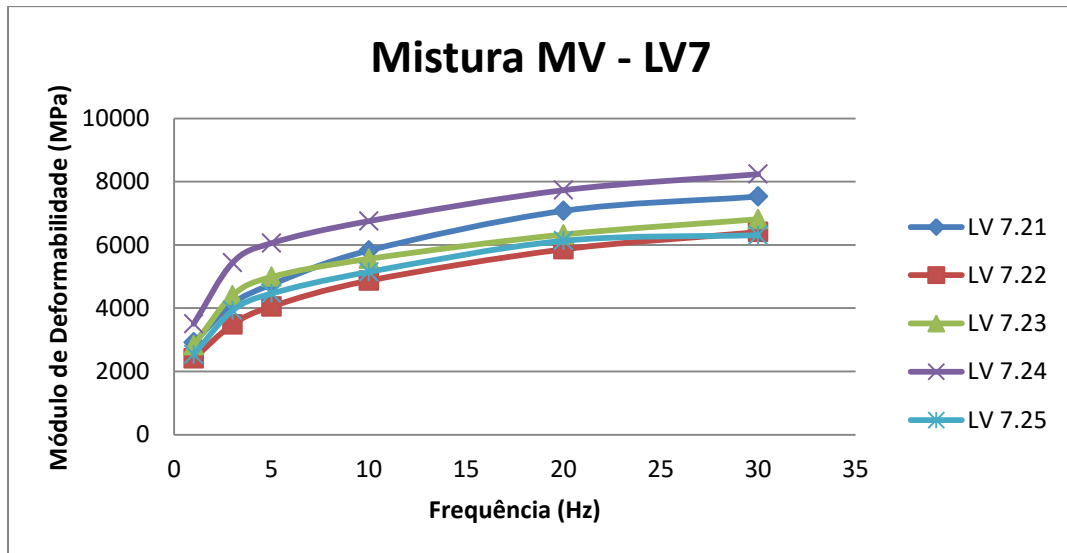


Figura 3.9 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV7

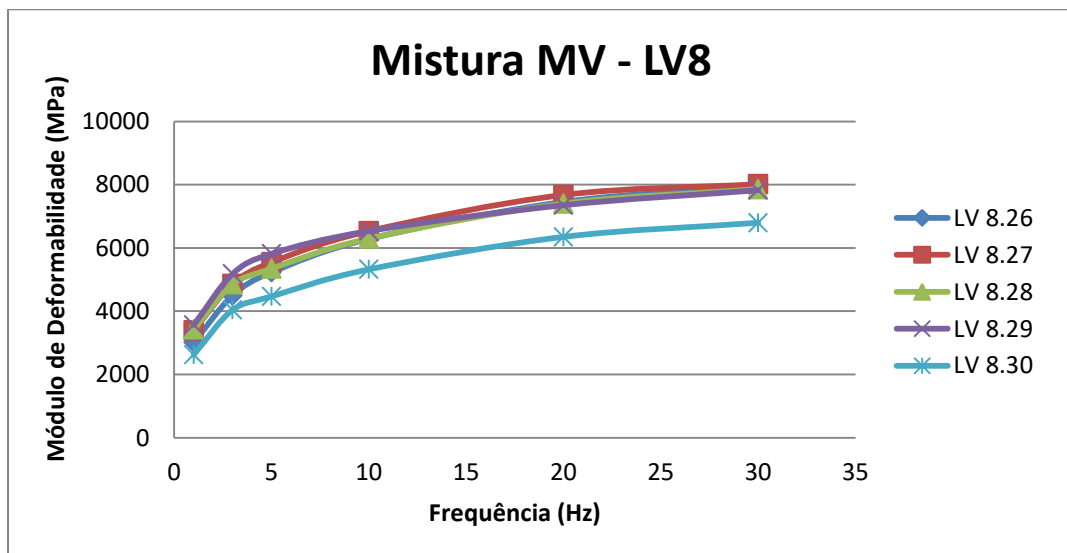


Figura 3.10 - Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV8

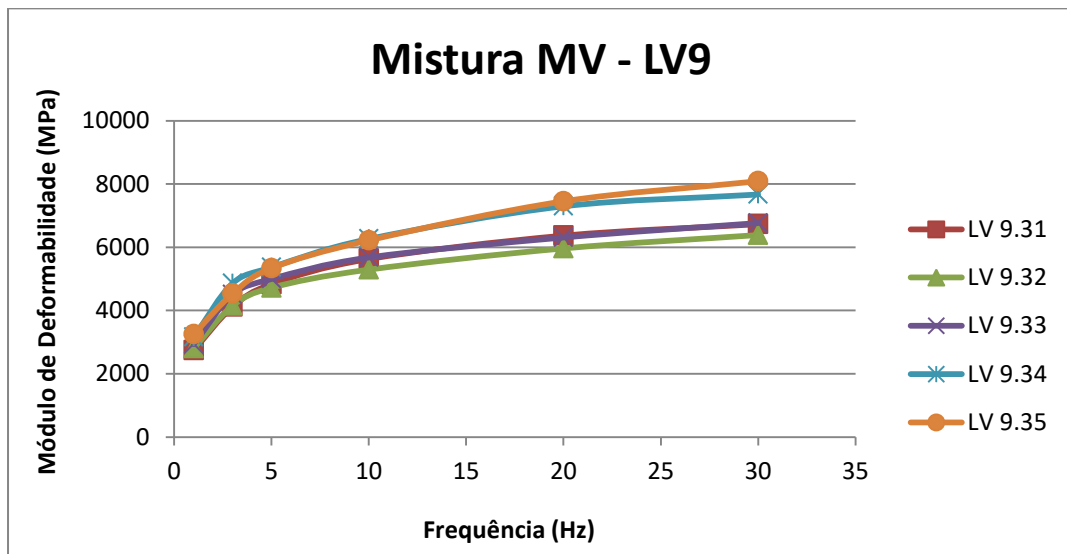


Figura 3.11 - Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV9

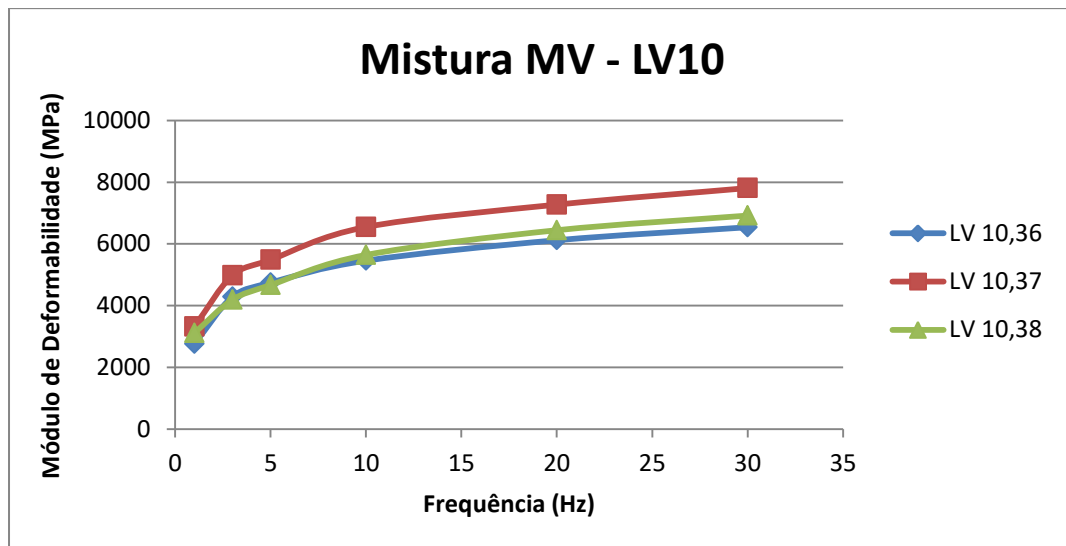


Figura 3.12 – Módulos de deformabilidade dos provetes da laje LV10

Analisando os gráficos presentes nas Figuras 3.5 a 3.12 verifica-se que a evolução do módulo de rigidez com a frequência é semelhante para as duas misturas em estudo. A análise desses mesmos gráficos a par dos Quadros 3.10 e 3.11 permite concluir que a mistura MV apresenta valores ligeiramente superiores para o módulo de rigidez do que a mistura MR mas de qualquer modo em linha com os obtidos por este tipo de mistura. Decidiu-se não se mostrar os resultados do ângulo de fase porque não acrescentam na comparação já que tiveram resultados alinhados com o esperado a partir dos resultados do módulo de deformabilidade: basicamente maiores módulos de deformabilidade induziram menores ângulos de fase (comportamento mais elástico à mesma temperatura).

No Quadro 3.12 apresentam-se os resultados médios, por frequência, de ambas as misturas, assim como a média global dos resultados obtidos e o desvio padrão correspondente.

A análise do Quadro 3.12 permite evidenciar as diferenças registadas entre as misturas para cada frequência. Assim, é possível verificar que, para as mesmas condições de ensaio, a mistura MV apresenta melhor comportamento à deformabilidade, não só para a frequência de 10 Hz que é a mais habitual para efeito de comparação de resultados, mas também para todas as restantes frequências ensaiadas. No caso de 10 Hz, tem-se em média uma diferença de cerca de 10%.

Quadro 3.10 - Módulos de deformabilidade (Mpa) dos provetes da mistura de referência (MR)

Frequência (Hz)	LR 1,1	LR 1,2	LR 1,3	LR 1,4	LR 1,5	LR 2,6	LR 2,7	LR 2,8	LR 2,9	LR 2,10	LR 3,11	LR 3,12	LR 3,13	LR 3,14	LR 3,15	LR 4,16	LR 4,17	LR 4,18	LR 4,19
1	2530	2439	2621	2791	2638	3977	3644	3891	3213	4359	2618	2602	3028	2546	3083	2385	3328	3056	2524
3	3426	3684	3529	4049	3811	5302	5214	4996	4744	6102	4038	3800	4212	3739	4290	3287	4288	4230	3509
5	3957	4133	3945	4605	4377	5688	5644	5499	5227	6429	4428	4330	4787	4184	4716	3825	4787	4492	3998
10	4674	4671	4735	5235	5123	6388	6246	6344	5773	7192	4962	4999	5477	4780	5463	4413	5587	4868	4748
20	5647	5525	5682	6160	5871	7288	7084	7224	6361	8084	5593	5876	6304	5611	6151	5342	6499	5830	5348
30	6211	5914	6139	6647	6335	7670	7612	7775	6844	8536	6036	6383	6778	5954	6588	5733	6926	4696	5778
1	2451	2474	2444	2739	2588	3725	3577	3672	3154	4236	2500	2595	3017	2427	2822	2285	3076	2781	2361

Quadro 3.11 - Módulos de deformabilidade (MPa) dos provetes da mistura em estudo (MV)

Frequência (Hz)	LV 7.21	LV 7.22	LV 7.23	LV 7.24	LV 7.25	LV 8.26	LV 8.27	LV 8.28	LV 8.29	LV 8.30	LV 9.31	LV 9.32	LV 9.33	LV 9.34	LV 9.35	LV 10,36	LV 10,37	LV 10,38
1	2913	2407	2826	3505	2537	3013	3395	3427	3565	2627	2747	2808	2937	3163	3255	2758	3319	3111
3	4147	3487	4405	5439	3928	4496	4860	4849	5181	4043	4121	4154	4507	4863	4536	4285	4982	4194
5	4747	4054	4987	6059	4464	5230	5545	5346	5818	4467	4834	4723	4997	5365	5340	4744	5486	4669
10	5825	4871	5561	6753	5148	6283	6533	6299	6535	5323	5629	5295	5677	6262	6220	5457	6547	5642
20	7078	5861	6330	7732	6131	7455	7676	7405	7352	6350	6367	5964	6310	7295	7452	6120	7272	6444
30	7530	6406	6813	8236	6309	7948	8017	7861	7826	6796	6729	6388	6767	7669	8089	6539	7809	6918
1	2877	2374	2624	3414	2497	3034	3304	3267	3252	2625	2727	2750	2821	3179	3256	2638	3204	2918

Quadro 3.12 - Valores médios dos módulos de deformabilidade de MR e MV por frequência

Frequência (Hz)	Módulos de deformabilidade	
	MR (Mpa)	MV (Mpa)
1	3014	3017
3	4224	4471
5	4687	5049
10	5351	5881
20	6183	6811
30	6556	7258
1	2891	2931
Média	4701	5060
Desvio Padrão	1331	1587

A média e desvio padrão globais permitem fazer uma análise para um espectro de comportamentos significativo e inferir sobre a variabilidade dos resultados obtidos por mistura. Assim, é possível concluir que MV apresenta melhor comportamento à deformabilidade do que MR apesar de MR apresentar menor variabilidade nos resultados obtidos. Em suma, os valores do módulo de rigidez obtidos para a mistura temperada são superiores aos da mistura convencional para todas as frequências, o que permite concluir que, neste caso, as misturas temperadas oferecem uma melhoria na resistência à deformabilidade, embora com uma diferença limitada se se considerarem todos os efeitos externos que podem induzir variabilidade de resultados.

A 10 Hz, frequência de comparação habitual (correspondente a uma velocidade de média de cerca de 60km/h), os resultados globais mantêm-se o que permite afirmar que MV representa uma melhor opção.

3.6. Ensaio de Fadiga

O ensaio de resistência à fadiga é o último ensaio a realizar por envolver rotura física dos provetes.

O ensaio foi realizado de acordo com o referido em 2.4.5, e neste caso, para ensaios a extensão controlada, o critério de rotura a adotar é a redução do módulo de deformabilidade inicial para 50% do seu valor (Figura 3.13). De acordo com a norma, devem ser definidos pelo menos três

níveis de extensão que garantam que a rotura por fadiga dos provetes ocorre entre os 10^4 e 2×10^6 ciclos, sendo ensaiados 6 provetes para cada nível de extensão, num total de 18 provetes por mistura.

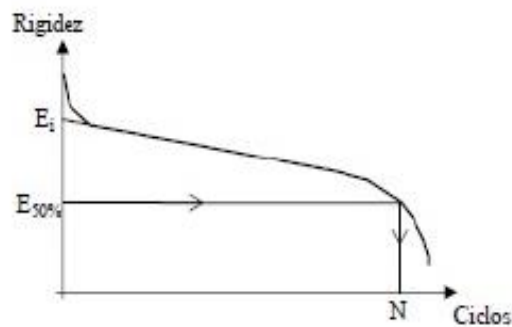


Figura 3.13 – Critério de rotura para ensaios de flexão em 4 pontos com extensão controlada (Pais e Fonseca, 2004)

De acordo com o referido, ensaiaram-se os 18 provetes de cada mistura betuminosa às extensões de $150 \mu\text{m/m}$, $250 \mu\text{m/m}$ e $350 \mu\text{m/m}$, à temperatura (20°C) e frequência (10 Hz) recomendados, obtendo os resultados presentes no Quadro 3.13.

No Quadro 3.14 encontram-se registados os valores da média global e do desvio padrão, por extensão, de forma a evidenciar as diferenças nos resultados obtidos para ambas as misturas.

As leis da fadiga das misturas foram obtidas, de acordo com os resultados dos Quadros 3.13 e 3.14, por regressão, tendo sido obtidas as equações [3.5] e [3.6], respetivamente. A representação da regressão obtida pode ser observada nas Figura 3.14.

$$\varepsilon_t = 1573.2 \times N^{-0.156} \quad [3.5]$$

$$\varepsilon_t = 2436.4 \times N^{-0.214} \quad [3.6]$$

No Quadro 3.15 apresentam-se os parâmetros obtidos na regressão linear (a, b) e os valores da deformação inicial correspondente a uma vida, ou seja 10^6 ciclos (ε_6), para o critério de rotura, temperatura e frequência adotados, de cada mistura. Os resultados obtidos para este último parâmetro são importantes na medida em que permitem inferir sobre a qualidade de cada mistura, sendo a resistência à fadiga das mesmas tanto maior quanto o valor de ε_6 .

Por análise dos Quadros 3.13 e 3.14 e tendo em conta o referido no parágrafo anterior, é possível concluir que o comportamento à fadiga das misturas em análise difere bastante para todas as extensões ensaiadas. Apesar dos resultados obtidos para MV não estarem completamente fora de resultados normais e por esse motivo não serem em causa a possibilidade de utilização desta mistura, os resultados obtidos para a mistura de referência, MR, são bastante superiores. Desta forma, analisando todas as extensões ensaiadas e conseqüente valor final de ε_6 , extensão para um

milhão de ciclos, é possível concluir que a mistura MR apresenta uma resistência à fadiga bastante superior.

Quadro 3.13 – Resultados obtidos no ensaio de fadiga para MR e para MV

Viga	Extensão (micro)	N	Viga	Extensão (micro)	N
1,1	350	50711	7,21	350	14724
1,2	150	2066834	7,22	150	571472
1,3	350	5441	7,23	350	17716
1,4	250	91714	7,24	250	47576
1,5	150	3388362	7,25	150	531594
2,6	350	21884	8,26	350	8722
2,7	250	87969	8,27	250	49578
2,8	250	364286	8,28	250	80116
2,9	150	4704496	8,29	150	902898
2,10	350	26910	8,30	350	9592
3,11	350	36537	9,31	350	7463
3,12	-	-	9,32	150	148460
3,13	250	44 104	9,33	250	41065
3,14	250	90104	9,34	250	28802
3,15	150	917413	9,35	150	200385
4,16	150	3189953	10,36	150	283780
4,17	250	92816	10,37	250	56999
4,18	350	33582	10,38	350	5354
4,19	150	6 165 391	10,39	-	-
4,20	-	-	10,40	-	-

Quadro 3.14 – Parâmetros estatísticos, por extensão, referentes ao ensaio de fadiga para MR e MV

Extensão	MR		MV	
	Média	Desvio P.	Média	Desvio P.
150	3 405 408	1 861 921	439 765	285 224
250	128 499	117 014	50 689	17 253
350	29 178	15 225	10 595	4 681

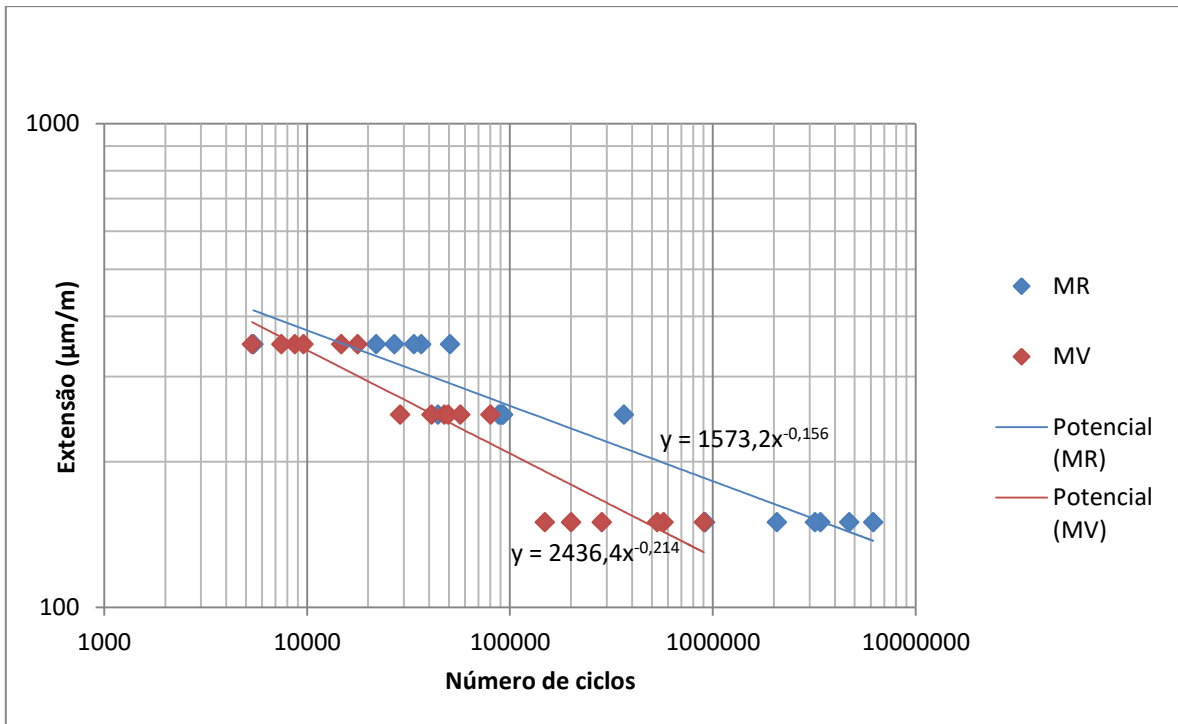


Figura 3.14 – Representação gráfica da lei da fadiga de MR e MV

Quadro 3.15 – Valores de ϵ_6 obtidos para MR e MV

Mistura	a	b	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)
MR	1573.2	-0.156	182
MV	2436.4	-0.214	127

3.7. Ensaio de pista - Wheel Tracking

O ensaio de pista foi realizado como descrito em 2.4.6. e para este trabalho foi adotado o procedimento B, em que o acondicionamento é feito ao ar e se utiliza o equipamento pequeno. Para tal, a norma define a aplicação de 10000 ciclos de carga a um mínimo de 2 provetes, sendo que o ensaio se dá como concluído após este número de ciclos ou quando se atinge uma profundidade de rodeira de 20 mm. Para provetes acondicionados ao ar os resultados obtidos são a média da variação de deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}), a média proporcional da profundidade da rodeira nos 2 provetes (PRD_{AIR}) e a profundidade média da rodeira (RD_{AIR}).

O ensaio foi realizado a 60° C, temperatura sugerida pela norma EN 12697-22 (CEN_b, 2003), e os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 3.16.

Quadro 3.16 – Resultados obtidos no ensaio de pista para ambas as misturas

	Laje	Massa (g)	Final do ensaio		RD _{AIR} (mm)		PRD _{AIR} (%)		WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	
			Dur. (min)	Nº ciclos						
MR	LR5	16770	383	10 000	1,8	1,9	2,9	3,1	0,024	0,041
	LR6	16760	383	10 000	2,1		3,4		0,058	
MV	LV11	16779	383	10 000	3,5	3,9	5,7	6,4	0,120	0,137
	LV12	16677	383	10 000	4,4		7,2		0,154	

Nas Figuras 3.15 e 3.16 é possível visualizar a progressão da deformação ao longo dos ensaios. A análise dos mesmos permite perceber que o assentamento tende a estabilizar a partir dos 2000 ciclos para a mistura MR, o que não acontece para o caso da mistura MV até aos 10000 ciclos.

Analisando o Quadro 3.16 e tendo em conta a evolução dos gráficos presentes nas Figuras 3.15 e 3.16, é possível verificar que os resultados obtidos, em termos de assentamento, para a mistura MV são perto do dobro dos obtidos para MR. Logo, pode concluir-se que MR oferece uma melhor resistência à deformação permanente. Como todos os provetes têm características geométricas e físicas semelhantes, esta diferença pode dever-se ao facto da temperatura de amolecimento do betume, se encontrar perto dos 50° C para ambos os casos, fazendo com que a resistência à deformação permanente dependa essencialmente da disposição do agregado de cada provete.

No entanto, importa referir que os resultados de ambas as misturas se encontram dentro da gama de valores aceitáveis e portanto não oferecem qualquer limitação à sua implementação, sendo possível afirmar que ambas as misturas constituem boas opções para aplicação em camada de desgaste.

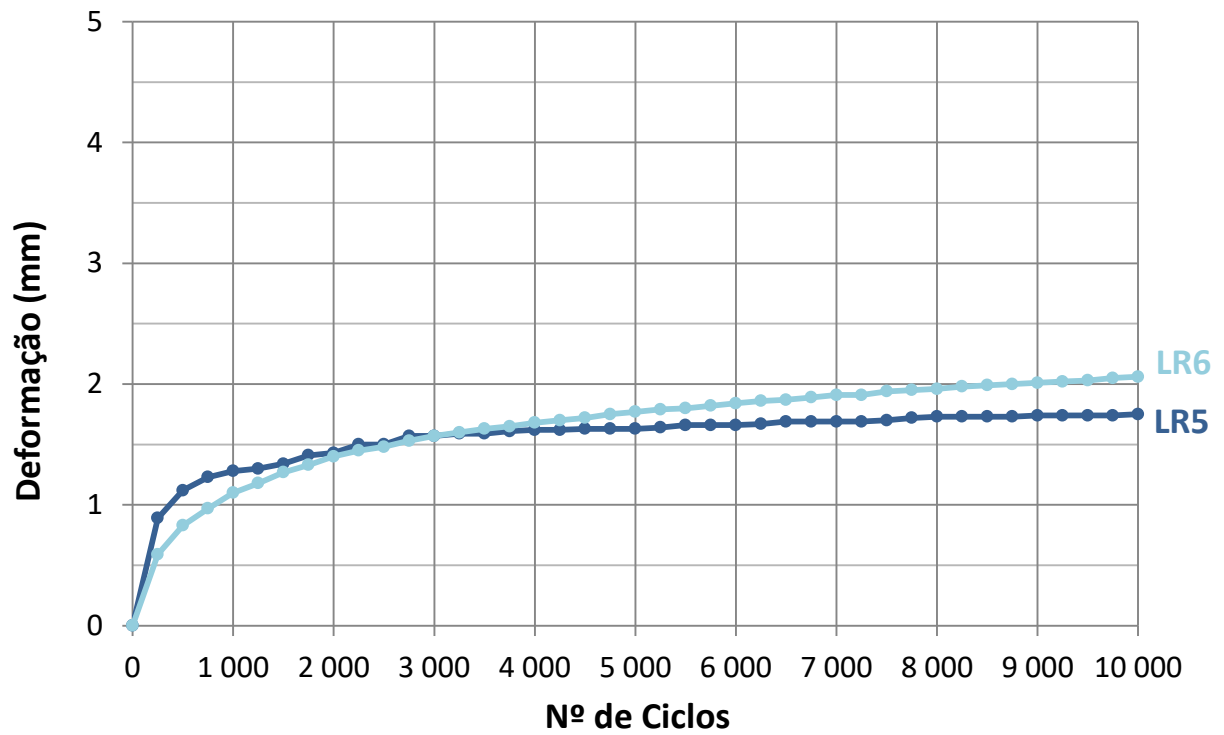


Figura 3.15 – Ensaio de pista da mistura de referência (MR).

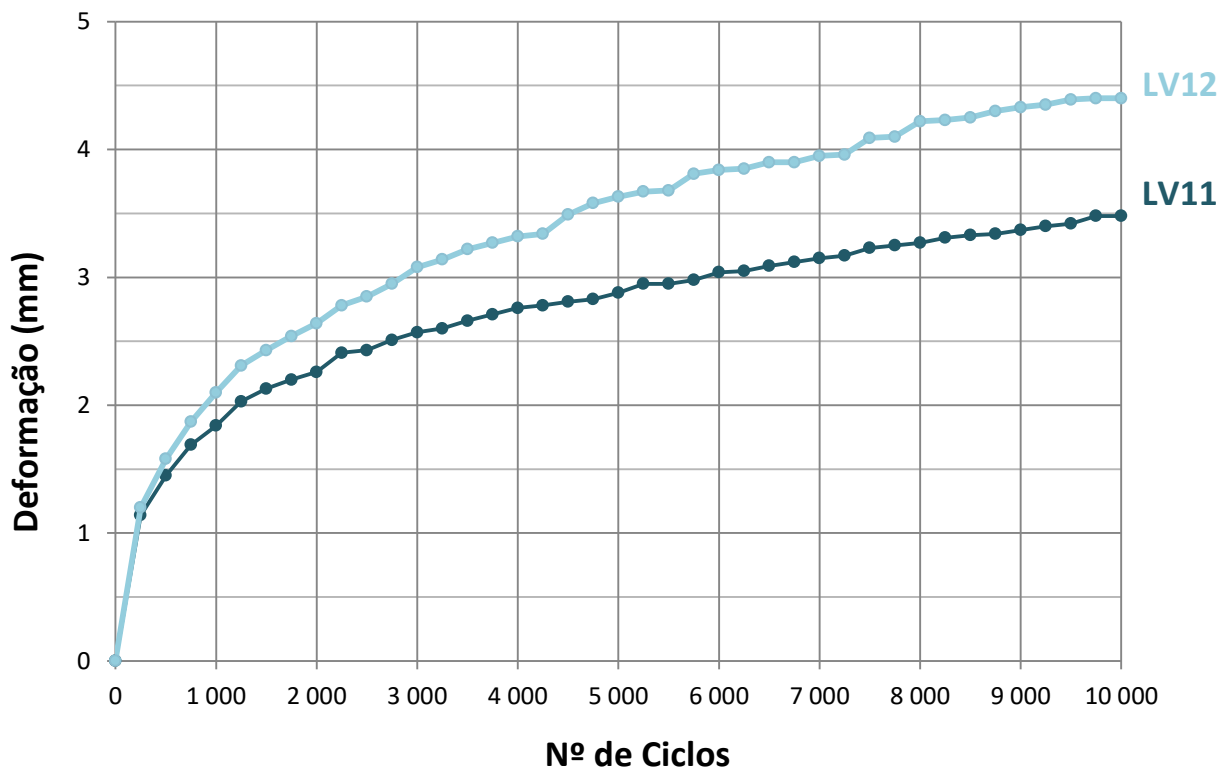


Figura 3.16 - Ensaio de pista da mistura em estudo (MV)

3.8. Técnica Volumétrica da Mancha de Areia e Pêndulo Britânico

Para realização dos ensaios de pista, deformabilidade e fadiga, abordados nos próximos subcapítulos, foi necessária a produção de seis lajes de cada mistura betuminosa cuja caracterização física se encontra no Quadro 3.17. Todas as lajes apresentadas foram submetidas aos ensaios da técnica volumétrica da mancha de areia e de pêndulo britânico para avaliação da textura.

Quadro 3.17 - Caracterização física das lajes produzidas

		Laje	Altura média (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
MR	Ensaio de Deformabilidade e Fadiga	LR1	49,91	300	400
		LR2	49,62	300	400
		LR3	50,11	300	400
		LR4	49,98	300	400
	Ensaio de pista	LR5	60,83	300	400
		LR6	60,35	300	400
MV	Ensaio de Deformabilidade e Fadiga	LV7	50,66	300	400
		LV8	50,62	300	400
		LV9	53,44	300	400
		LV10	53,15	300	400
	Ensaio de pista	LV11	60,92	300	400
		LV12	60,92	300	400

O ensaio da técnica volumétrica da mancha de areia realizou-se como descrito em 2.4.7. e os resultados da medição das “manchas de areia” criadas nas 12 lajes, assim como os valores de h_m obtidos de acordo com a equação [2.2], encontram-se no Quadro 3.18.

Os resultados deste ensaio permitem perceber o tipo de aplicação à qual o pavimento em causa melhor se adequa. No Quadro 3.19 encontram-se os valores recomendados de h_m de acordo com o tipo de mistura a implementar para camada de desgaste. Tendo esses valores como referência, é possível afirmar que ambas as misturas, MR e MV, possuem uma macrotextura passível de ser implementada em qualquer tipo de via.

Quadro 3.18 - Resultados do ensaio da técnica volumétrica da mancha de areia

			Mancha de Areia (mm)				d _m (mm)	h _m (mm)	Média h _m (mm)
MR	Ensaio Deformabilidade e Fadiga	LR1	174	172	168	173	171,8	1,08	1.14
		LR2	163	180	151	171	166,3	1,15	
		LR3	185	168	158	145	164,0	1,18	
		LR4	200	194	173	165	183,0	0,95	
	Ensaio de pista	LR5	175	173	158	160	166,5	1,15	
		RL6	160	148	150	164	155,5	1,32	
MV	Ensaio Deformabilidade e Fadiga	LV7	155	160	150	157	155,5	1,32	1.31
		LV8	163	165	180	154	165,5	1,16	
		LV9	140	144	138	145	141,75	1,58	
		LV10	148	125	139	130	135,5	1,73	
	Ensaio de pista	LV11	180	165	170	170	171,25	1,09	
		LV12	185	174	193	170	180,5	0,98	

Quadro 3.19 – Altura de areia mínima (EP, 2014)

Tipo de mistura betuminosa	Altura de areia (mm)
Betão betuminoso	Aa > 0.6
Betão betuminoso drenante	Aa > 1.2
Micro-betão rugoso	Aa > 1.0
Argamassa betuminosa	Aa > 0.4
Mistura betuminosa de alto módulo	Aa > 0.4

O ensaio do pêndulo britânico realizou-se como descrito em 2.4.7. e foram feitas 5 repetições para cada laje, estando os valores obtidos no ensaio dispostos no Quadro 3.20.

O valor de referência para os resultados obtidos neste ensaio, de acordo com EP, 2014, é de 55 PTV portanto, pode concluir-se que apesar dos resultados serem superiores para a mistura MV, qualquer das misturas em estudo apresenta resultados bastante satisfatórios.

Quadro 3.20 – Resultados do PTV obtidos pelo ensaio de pêndulo britânico

		PTV					Média		
MR	LR1	65	90	90	90	90	85	85	
	LR2	90	85	80	80	79	83		
	LR3	85	85	85	82	82	84		
	LR4	80	95	85	85	87	86		
	LR5	75	80	80	78	75	78		
	LR6	90	97	97	92	90	93		
MV	LV7	90	93	89	83	86	88	92	
	LV8	96	94	90	92	92	93		
	LV9	96	95	92	94	94	94		
	LV10	97	93	96	95	92	95		
	LV11	98	95	94	91	91	94		
	LV12	88	90	87	88	87	88		

4. Conclusão

4.1. Principais inferências deste estudo

Nas últimas décadas, a sociedade atual tem sido confrontada com desafios ambientais cada vez mais difíceis de superar, entre eles as questões relacionadas com a sustentabilidade e a poluição atmosférica. Para dar resposta a estas questões têm-se registado, a nível global e nas mais variadas áreas, uma busca por energias mais limpas e por novas formas de obtenção da mesma que permitam maior independência dos combustíveis fósseis e conseqüente redução de emissões de gases poluentes.

Estes desafios, ao nível da construção e mais concretamente no setor das infraestruturas de transporte têm levado ao estudo das misturas betuminosas temperadas - MBT's. Como alternativa às misturas convencionais, as MBT's oferecem vantagens do ponto de vista ambiental, no entanto, é necessário perceber quais as alterações ao nível do comportamento mecânico das mesmas face às convencionais. É neste sentido que surge esta dissertação, constituindo mais uma contribuição para o estudo do comportamento deste tipo de misturas betuminosas.

Neste trabalho optou-se por testar dois tipos de betume da petrolífera CEPESA, um betume convencional e um betume alterado pela própria CEPESA de forma a permitir temperaturas de fabrico e compactação inferiores. As fichas de produto dos betumes em estudo são em tudo semelhantes diferindo apenas na temperatura de fabrico e compactação, e portanto, este estudo tentou perceber quais as alterações ao nível do comportamento das misturas betuminosas obtidas com os respetivos betumes.

O estudo teve início com a realização do ensaio de Marshall sobre a mistura produzida com o betume convencional, para determinar a percentagem ótima de betume que se igualou à usada para a mistura temperada. Posteriormente, para analisar o comportamento mecânico de cada uma das misturas realizaram-se os ensaios de resistência conservada em tração indireta (ITSR), de pista de laboratório (wheel tracking) para determinar a resistência à deformação permanente, de deformabilidade (flexão em 4 pontos) para determinação do módulo de deformabilidade ou de rigidez, e de fadiga para verificação do comportamento ao fendilhamento. Também se fizeram os ensaios de mancha de areia e de pêndulo britânico para determinação da textura e resistência à derrapagem. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Vias e Comunicação do Instituto Superior Técnico.

No estudo de Marshall para a determinação da melhor composição foi determinada a percentagem ótima de betume para fabrico de ambas as misturas de 4.5%.

No ensaio de sensibilidade à água (ITSR) os resultados mostraram que MR é menos suscetível à ação da água do que MV, embora ambas tenham apresentado um comportamento sensível o que pode dever-se à fraca ligação agregado-betume, devido ao tipo de agregado usado, de origem granítica.

Os resultados do ensaio de deformabilidade a 20°C, mostram que a mistura MV apresenta maiores módulos de deformabilidade em cerca de 10% em média para 10 Hz de frequência de realização do ensaio. Trata-se dum resultado interessante mas apesar de tudo não muito distante da mistura de referência

Os resultados do ensaio de fadiga permitiram perceber que a mistura MR tem um comportamento à fadiga bastante mais robusto que MV, o que é evidenciado pelo bastante maior valor de ϵ_6 obtido (cerca de 40% acima). No entanto, importa referir que o valor de ϵ_6 de MV (127), apesar de inferior ao de MR (182), é ainda um valor aceitável para uso em camada de desgaste.

Os resultados do ensaio de pista são bastante satisfatórios para ambas as misturas em termos do resultado global (rodeira) mas a mistura convencional apresenta, num nível baixo de deterioração para ambas as misturas, um melhor desempenho tendo rodeira e uma evolução da velocidade de deformação mais baixas que MV.

Os resultados dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico foram semelhantes em ambas as misturas, cumprindo as referências necessárias que as especificações apontam.

Apesar de MR, em geral, ter apresentado um comportamento mais robusto pode dizer-se que nada neste estudo obsta, do ponto de vista do desempenho, a que se possa optar pela utilização do betume temperado no sentido de poupar recursos energéticos e portanto ser mais conforme ambientalmente (menos poluição e menos emissões a provocar gases de estufa) aquando do fabrico das misturas, ou usar esse tipo de mistura em condições climáticas mais frias tirando partido das suas mais baixas temperaturas de compactação. Agora, de acordo com o fabricante e fornecedor dos betumes, o preço de comercialização do betume aditivado é cerca de 5% mais caro que o tradicional, pelo que uma solução destas tem de ser acompanhada de maior imposição por parte da tutela governativa deste setor, caso contrário as soluções mais amigas do ambiente terão dificuldade em se impor.

4.2. Trabalhos futuros

Este trabalho teve várias limitações que não permitem um pronunciamento definitivo sobre a bondade do uso do betume aditivado:

- Não se conhece a composição desse betume e portanto não há possibilidade de interferir na sua composição nem perceber alguns dos resultados à luz dessa composição;
- É possível melhorar a análise laboratorial efetuada com outras condições para os ensaios de desempenho usados e eventualmente para outros tipos de misturas betuminosas, permitindo ser mais definitivo em relação a desempenho na sua globalidade, visto deste ponto de vista;
- É necessário realizar trechos de aplicação real para perceber as vantagens e desvantagens do uso desta solução de misturas com betume aditivado em relação a misturas convencionais, tanto do ponto de vista da aplicação como do ponto de vista do seu desempenho (aqui visto depois de fabricado e aplicado em condições reais).
- É necessário também que a comparação possa ser estendida a outras soluções ambientalmente amigáveis no sentido de perceber o que é mais efetivo usar, em termos de fabrico e colocação, desempenho e custos no ciclo de vida.

Pode finalmente afirmar-se que as limitações assinaladas indicam qual o caminho que falta percorrer para se poder afirmar, para lá de qualquer entrave principal, que potencialidade tem efetivamente este produto testado no âmbito desta dissertação.

Referências Bibliográficas

Alconada, I. B., 2011. “Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Mornas”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Antunes, M. L.; Baptista, F.; Fontul, S.; Domingos, P. (2006). “Elementos bibliográficos de apoio ao curso: Conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários”. FUNDEC, Lisboa.

Barbosa, F. C. A. T. (2012). “Contribuição para o Estudo do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Branco, F. E., Picado Santos, L. & Dias Capitão, S. (1998). “Vias de Comunicação. Volume 2”. LUTVC, 1ª Edição, Coimbra.

Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L., 2011. “Pavimentos Rodoviários”. Edições Almedina, 4ª Reimpressão, Coimbra.

Capitão, S. D., Picado-Santos, L.G., Martinho, F. (2012). “Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt”. Construction and Building Materials, Vol. 36, Elsevier, pp. 1016-1024.

CEN_a (2002). “EN 12697-29 Bituminous mixtures. Test method for hot mix asphalt. Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen.” Brussels.

CEN_b (2002). “EN 12697-5 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density”. Brussels.

CEN_a (2003) “EN 12697-23 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens”

CEN_b (2003). “EN 12697-22 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking”. Brussels.

CEN_c (2003). “EN 12697-8 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens.” Brussels.

CEN_a (2004). “EN 12697-34 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test.” Brussels.

CEN_b (2004). "EN 12697-26 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness". Brussels.

CEN_c (2004). "EN 12697-24 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 24: Resistance to fatigue". Brussels.

CEN_a (2007) "EN 1426 Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration". Brussels.

CEN_b (2007) "EN 1427 Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and Ball method". Brussels.

CEN (2008). "EN 12697-12 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens." Brussels.

CEN (2010) "EN 13036-1 Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique". Brussels.

CEN (2011) "EN 13036-4 Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test". Brussels.

Chowdhury, A. & Button, J. W. (2008). "A Review of Warm Mix Asphalt". Texas Transportation Institute. Report no. SWUTC/08/473700-00080-1.

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

EAPA (2010). "The use of warm mix asphalt – EAPA position paper". Brussels: European Asphalt Pavement Association.

EP (2014). "Pavimentação: Características dos materiais". EP (actual IP), Volume V: 03 - Pavimentação, Almada.

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

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

INIR (2011). “Diretivas para a Concepção de Pavimentos. Critérios de Dimensionamento”. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, IP, Lisboa.

IPQ (2003). “NP EN 12697-6 Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 6: Determinação da baridade de provetes betuminosos”. Portugal.

IPQ (2004). “NP EN 12697-30 Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 30: Preparação de provetes por compactador de impacto”. Portugal.

IPQ (2008). “NP EN 13108-1 Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso.” Portugal.

Jenkins, K. J., J. L. A. de Groot, M.F.C. van de Ven, and A.A.A. Molenaar. (1999) “HalfWarm Foamed Bitumen Treatment, a New Process”. 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), Victoria Falls, Zimbabwe.

Jenkins, K. J. (2000). “Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen”. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Stellenbosch, South Africa.

Kristjánsdóttir, Ó., Muench, S.T., Michal, L., Blurke, G. (2007). “Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2040, Issue 1, pp. 91-99.

Kyoto Protocol (2012). <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>. United Nations Framework Convention on Climate Change (página internet oficial), Bonn, Germany.

Maccarrone, S., Holleran, G., Ky, A. (1994). “Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hot Mix”. 9th AAPA International Asphalt Conference, Australian Asphalt Pavement Association, Surfers Paradise, Australia.

Menezes, M. V. P. (2008). “Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Neves, J. M. C. (2010). “Aula T7 – Pavimentos”. Slides da disciplina *Construção e Manutenção de Infraestruturas de Transportes*, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Newcomb, D. (2007). “An Introduction to Warm-mix Asphalt”. National Asphalt Pavement Association.

Nynas (2009). "Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de la sostenibilidad". Nynas Bitumen Magazine: Performance, Issue 1.

Olard, F.; Romier, A., 2011. "Low emissions and low energy asphalts for sustainable road construction: The European experience of LEA process". < www.lea-uk.biz> [Ficheiro obtido a 30 de Setembro de 2017]

Pais, J.; Fonseca, P., 2004. "Influência do tipo de agregado e ligante no comportamento das misturas betuminosas". 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Paris Agreement (2015). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/d2hhdC1pcy>. United Nations Framework Convention on Climate Change (página internet oficial), Bonn, Germany.

Park, J.H., Seo, K.K. (2003). "Approximate life cycle assessment of product concepts using multiple regression analysis and artificial neural networks". KSME International Journal, Vol. 17, Issue 12, pp. 1969-1976.

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

Sasol (2004). "The Bitumen Additive for Highly Stable Easily Compactable Asphalts". Sasobit® Product Information 124, Sasol Wax GmbH, Hamburg.

Shell (2015). "Shell Bitumen Handbook". Shell International Petroleum Company Ltd., 6th edition, 788 pp, ISBN 978-0-7277-5837-8.

Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Ziliute, L., (2009). "The Research on the use of warm mix asphalt for asphalt pavement structures". XXVII International Baltic Road Conference, 24-26 August, Riga.

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

Anexos



Fecha: 20/01/2014

Cepsasfalt BT 35/50

Referencia: 93-IP-13

CARACTERÍSTICA	Unidad	Norma UNE	Resultado	Especificación	
				mín	máx
Betún Original					
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	0,1 mm	1426	45	35	50
Punto de reblandecimiento	°C	1427	51,6	50	58
Índice de penetración	-	12591	- 1,0	-1.5	0.7


CEDSA
 PRODUCTOS ASPÁLTICOS, S.A.
 TÉCNICO DESARROLLO Y C.G.
 DE LIGANTES MODIFICADOS



CEPSASFALT BT 35/50

DEFINITION:

Asphalt bitumen, especially designed to work at lower temperatures during production and application of the bituminous mix, which complies with the specifications in the national annex of the standard UNE EN 12591 for the bitumen 35/50.

CHARACTERISTICS:

Characteristic	Unit	Standard	MIN	MAX
Fresh binder				
Penetration(25 °C)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Penetration index	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Softening point (R&B)	°C	EN 1427	50	58
Fraass point	°C	EN 12593	-	-5
Solubility in xylene	%	EN 12592	99,0	-
Flash point	°C	EN ISO 2592	240	-
Resistance to hardening at 163 °C (EN 12607-1)				
Mass loss	%	EN 12607-1	-	0,5
Retained penetration	%	EN 1426	53	-
Increase in softening point (R&B)	°C	EN 1427	-	11

RECOMMENDED WORKING TEMPERATURES (*):

- Minimum mixing temperature (°C): 125
- Binder temperature(°C): 155-160
- Minimum compaction temperature (°C): 120

(*) Depending on the characteristics of the mix

APPLICATIONS:

- Warm mixes
- Mixes with long transportation times or long application times in the worksite
- Conventional mixes