



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas **Validação de uma nova metodologia de formulação**

Ana Rita Fidalgo Pais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

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

Covilhã, junho de 2013

Aos meus pais e irmã

AGRADECIMENTOS

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

A realização deste trabalho contou com a colaboração de diversas pessoas e entidades, a quem a autora deseja expressar os seus agradecimentos:

De uma forma especial à Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida, orientadora científica, pelos ensinamentos e valiosas sugestões, pelo acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho, pelo permanente incentivo e disponibilidade.

À CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A. pelo fornecimento dos ligantes betuminosos em particular à Engenheira Teresa Carvalho pela troca de conhecimentos.

À *Proas Betunes CEPSA* pela análise do material fresado.

Ao Engenheiro José Simões pelo fornecimento de material fresado e troca de informações.

Ao Prof. Clemente pelo auxílio prestado.

Ao Sr. Albino e ao Sr. Félix, assistentes técnicos dos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior pela grande ajuda prestada na execução do trabalho experimental.

À minha família e amigos pelo apoio e encorajamento.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento especial aos meus pais pelo constante acompanhamento e motivação ao longo do meu percurso académico.

RESUMO

No âmbito da produção de misturas betuminosas, a redução da temperatura de produção aliada com a reciclagem de pavimentos resulta numa tecnologia bastante sustentável e promissora. Ao seguir este raciocínio tem-se uma mistura betuminosa reciclada temperada, ou seja, uma mistura mais sustentável e menos poluente. Este tipo de misturas apresenta vantagens a nível social, ambiental e económico. Destacando-se a redução da emissão de gases de efeito de estufa e do consumo de energia e a melhoria das condições de trabalho.

O presente estudo pretende validar a metodologia de formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas desenvolvida por Dinis-Almeida na sua Tese de Doutoramento. Esta metodologia baseia-se no módulo de rigidez por tração indireta em compressão diametral para determinar o teor ótimo de ligante da mistura final. Para confirmação do teor ótimo de ligante foram realizados os seguintes ensaios de desempenho: resistência à deformação permanente, resistência à fadiga e sensibilidade à água).

No presente trabalho é feita uma descrição da evolução das misturas betuminosas e uma breve apresentação das principais técnicas de reciclagem de pavimentos, dando ênfase à reciclagem em central temperada com emulsão e à reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa. Posteriormente apresentam-se os métodos de formulação existentes para as diversas misturas betuminosas, seguindo-se a descrição e avaliação da metodologia de formulação usada. Neste ponto será descrita toda a componente prática realizada: produção das misturas betuminosas com diferentes teores de emulsão betuminosa, determinação do teor ótimo de ligante através do módulo de rigidez por tração indireta e confirmação deste valor através dos ensaios de avaliação de desempenho.

Por fim, serão discutidas as principais conclusões do trabalho e feitas algumas propostas para trabalhos futuros. Considera-se que a metodologia de formulação é válida e que fornece resultados seguros e concisos bem como que as misturas com incorporação de material fresado até uma taxa de 100% possuem um bom desempenho.

Palavras-chave

Material fresado

Misturas betuminosas temperadas

Formulação de misturas betuminosas

Módulo de rigidez por tração indireta

Desempenho das misturas betuminosas

ABSTRACT

In the context of the production of bituminous mixtures, the reduction of the production temperature combined with pavement recycling results in a very sustainable and promising technology. Following this idea it was obtained warm mix recycled asphalt, in other words a mixture more sustainable and cleaner. Such type of mixtures has social, environmental and economic benefits. Highlighting the emission reduction of greenhouse gases, the energy consumption reduction and improvement of working conditions.

The present study aims to assess the design method of warm mix recycled asphalt developed by Dinis-Almeida in her PhD thesis. This methodology is based on stiffness modulus by indirect tensile in diametrical compression to determine the optimum binder content of the final mixture. For confirmation of the optimum binder content tests were conducted the following performance tests: resistance to permanent deformation, resistance to fatigue and water sensitivity.

This work describes the evolution of bituminous mixtures and presents some of the main technologies for pavements recycling, focusing on warm recycling with bitumen emulsion in plant and “recycling in situ” with bitumen emulsion. It was presented the existing design method for the several bituminous mixtures, followed by the description and review of the design methodology used.

At this point, will be describing all practical components that are concerning the bituminous mixtures production with different amounts of bitumen emulsion, determining the optimum binder content through the stiffness modulus by indirect tensile and the confirmation of this value through the performance evaluation tests.

Finally, will be discussing the main conclusions of the work and presented some proposals for future work. Finally it is considered that the design method is valid and provides reliable and concise results as well as the mixtures with reclaimed asphalt pavement to a rate of 100 % have a good performance.

KEYWORDS

Reclaimed asphalt pavement

Warm mix asphalt

Bituminous Mix Design

Stiffness modulus by indirect tensile

Performance of Bituminous mixtures

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO	3
1.1 - Enquadramento temático.....	3
1.2 - Objetivo.....	4
1.3 - Estrutura do trabalho.....	4
2 - MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS TEMPERADAS	9
2.1 - Introdução.....	9
2.2 - Temperatura de produção de misturas betuminosas.....	9
2.3 - Evolução das misturas betuminosas temperadas.....	10
2.4 - Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas.....	11
2.4.1 - Aditivos orgânicos.....	12
2.4.2 - Aditivos químicos.....	12
2.4.3 - Formação de espuma de betume.....	12
2.5 - Vantagens das misturas betuminosas temperadas.....	13
2.6 - Desvantagens das misturas betuminosas temperadas.....	14
2.7 - Custos comparativos.....	15
2.8 - Reciclagem de pavimentos.....	15
3 - MÉTODOS DE FORMULAÇÃO	21
3.1 - Introdução.....	21
3.2 - Métodos de formulação para misturas betuminosas recicladas a quente.....	21
3.2.1 - Métodos de formulação existentes.....	21
3.2.2 - Metodologia geral de formulação.....	23
3.2.3 - Método do <i>Asphalt Institute</i>	25
3.2.4 - Método do <i>Superpave</i>	26
3.3 - Método de formulação para misturas betuminosas recicladas temperadas com base no módulo de rigidez.....	26
4 - TRABALHO EXPERIMENTAL	39
4.1 - Introdução.....	39
4.2 - Caracterização dos materiais usados.....	39
4.2.1 - Ligantes betuminosos.....	39
4.2.2 - Material fresado.....	40
4.2.3 - Agregados naturais.....	41

4.2.4 - Massa volúmica.....	42
4.2.5 - Absorção de água.....	42
4.2.6 - Resistência à fragmentação.....	43
4.2.7 - Análise granulométrica.....	43
4.3 - Composição granulométrica.....	44
4.4 - Estimativa do conteúdo de ligante da mistura final.....	47
4.5 - Determinação da percentagem ótima de emulsão.....	50
4.6 - Ensaio de desempenho.....	55
4.6.1 - Ensaio de deformação permanente (<i>wheel tracking</i>).....	55
4.6.2 - Ensaio de fadiga (flexão em 4 pontos).....	59
4.6.3 - Ensaio de sensibilidade à água.....	61
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
5.1 - Principais conclusões.....	67
5.2 - Trabalhos futuros.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ACERVO NORMATIVO.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões de gases (Dinis-Almeida, 2010).....	9
Figura 3.1 - Organograma da metodologia geral de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Baptista, 2006).....	23
Figura 3.2 - Organograma da metodologia de formulação proposta por Dinis-Almeida (2010).....	27
Figura 3.3 - Esquema do equipamento usado na realização do ensaio do módulo de rigidez (adaptado da EN 12697-26).....	29
Figura 3.4 - Princípio de carregamento e deformação do provete durante o ensaio de tração indireta (Neves e Correia, 2006).....	30
Figura 3.5 - Zonas climáticas em Portugal Continental (Baptista, 1999).....	32
Figura 3.6 - Princípios básicos do equipamento de ensaio de 4PBT-PR (EN 12697-24, Anexo D).....	33
Figura 3.7 - Tipo de rotura do provete para o ensaio de tração indireta (EN 123697-23).....	35
Figura 4.1 - Determinação da percentagem de betume envelhecido.....	40
Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados.....	44
Figura 4.3 - Curvas granulométricas das misturas betuminosas.....	46
Figura 4.4 - Compactador de impacto.....	51
Figura 4.5 - Provetes para o ensaio de módulo de rigidez.....	51
Figura 4.6 - Ensaio de módulo de rigidez.....	52
Figura 4.7 - Resultados do módulo de rigidez para as MBRT com 100% de incorporação de material fresado.....	54
Figura 4.8 - Resultados do módulo de rigidez para as MBRT com material fresado e agregado natural.....	54
Figura 4.9 - Resultados do módulo de rigidez para a mistura betuminosa a quente.....	54
Figura 4.10 - Equipamento wheel tracking de pequenas dimensões (small size device)..	56
Figura 4.11 - Principais etapas da produção dos provetes para o ensaio wheel tracking.	56
Figura 4.12 - Resultados do ensaio de deformação permanente em pista.....	55
Figura 4.13 - Compactação das lajetas com cilindro de rolos.....	57
Figura 4.14 - Leis de fadiga.....	59
Figura 4.15 - Tipo de rotura do provete para o ensaio de tração indireta (EN 123697-23).....	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Recomendações para a seleção do betume novo (adaptado de McDaniel e Anderson, 2001).....	26
Quadro 3.2 - Propriedades do material fresado e seus constituintes (Baptista, 2006).....	27
Quadro 3.3 - Temperaturas a adotar no estudo da deformação permanente de pavimentos em Portugal Continental (Freire, 2002).....	32
Quadro 4.1 - Características relativas ao betume usado (Betume asfáltico 35/50, CPP)....	39
Quadro 4.2 - Características da emulsão betuminosa usada (RECIEMUL 90, CPP).....	40
Quadro 4.3 - Percentagem de ligante envelhecido.....	41
Quadro 4.4 - Caracterização do betume envelhecido do MF-A23 (AS, 2010).....	41
Quadro 4.5 - Caracterização do betume envelhecido do MF-EN346 (<i>PROAS Betunes CEPSA</i>).....	41
Quadro 4.6 - Massa volúmica dos agregados.....	42
Quadro 4.7 - Absorção de água dos agregados naturais.....	43
Quadro 4.8 - Resistência à fragmentação - Coeficiente de Los Angeles.....	43
Quadro 4.9 - Análise granulométrica dos agregados.....	44
Quadro 4.10 - Fuso granulométrico para material betuminoso recuperado (EP, 2009).....	45
Quadro 4.11 - Limites do fuso granulométrico para AC20 Base (MB) (EP, 2009).....	45
Quadro 4.12 - Nomenclatura adotada e descrição das misturas betuminosas produzidas...	46
Quadro 4.13 - Composição das misturas betuminosas (%)......	46
Quadro 4.14 - Percentagem de ligante da mistura final (PbR) e de ligante novo (PbN).....	48
Quadro 4.15 - Percentagem de emulsão a adicionar à mistura.....	48
Quadro 4.16 - Resultados do estudo de penetração do ligante final das MBRT.....	49
Quadro 4.17 - Densidade da água em função da temperatura (EN 12697-6: 2003).....	51
Quadro 4.18 - Baridade saturada com superfície seca.....	52
Quadro 4.19 - Parâmetros usados na realização do ensaio de módulo de rigidez.....	53
Quadro 4.20 - Módulo de rigidez médio (média de 3 provetes) [MPa].....	53
Quadro 4.21 - Baridade média das lajetas (média de 3 lajetas MBRT e 2 lajetas MBQ).....	57
Quadro 4.22 - Resultados do ensaio de deformação permanente.....	58
Quadro 4.23 - Declive máximo da rodeira a 60 °C para o ensaio de deformação permanente (OC, 2008).....	58
Quadro 4.24 - Baridade média das vigotas (média de 6 vigotas).....	60
Quadro 4.25 - Número de ciclos até à rotura.....	60
Quadro 4.26 - Coeficientes obtidos para as leis de fadiga.....	61
Quadro 4.27 - Baridade média e altura média dos grupos de provetes (média de 3 provetes).....	62

Quadro 4.28 - Resultados do ensaio de tração indireta.....	62
--	----

LISTA DE ACRÓNIMOS

4PBT-PR	Four-point bending test
a	Proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 2,36 mm
A, B	Coefficientes determinados experimentalmente
AAPA	Australian Asphalt Pavement Association
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
APAO	Asphalt Pavement Association of Oregon
AS	Aurélio Martins Sobreiro & Filhos, S.A.
ASEFMA	Asociación Española de fabricantes de mezclas asfálticas
b	Proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 2,36 mm
CPP	CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.
d	Deformação total segundo a direção diametralmente perpendicular ao plano de atuação da carga
D	Diâmetro do provete
d_{10 000}	Deformação após 10 000 ciclos de carga
d_{5 000}	Deformação após 5 000 ciclos de carga
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EP	Estradas de Portugal, S.A.
EUA	Estados Unidos da América
F	Amplitude da carga
FHWA	Federal Highway Administration

h	Altura do Provete
IT-CY	Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens
ITS	Indirect tensile strength
ITS_d	Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes “a seco”
ITSR	Indirect tensile strength ratio
ITS_w	Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes imersos
K	Constante em função da quantidade de material que passa no peneiro nº 200
LVDT	Linear variable differential transformers
MBF	Misturas betuminosas a frio
MBQ	Misturas betuminosas a quente
MBRQ	Misturas betuminosas recicladas a quente
MBRT	Misturas betuminosas recicladas temperadas
MF	Material fresado
MF-A23	Material fresado proveniente da A23
MF-EN346	Material fresado proveniente da EN346
N	Número de aplicações de carga até à rotura
N₁₀₀	Resistência à fadiga para a extensão de 100 µm/m
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NAT	Nottingham Asphalt Test
P	Resistência máxima média
P₂₀₀	Proporção ponderal de elementos de dimensão inferior a 0,075 mm
Pb_F	Percentagem de betume das misturas betuminosas recuperadas
Pb_N	Percentagem de betume novo expressa como percentagem da massa total da mistura

Pb_R	Estimativa da percentagem de betume total da mistura reciclada em relação à massa total da mistura
pen_F	Penetração do ligante envelhecido do material fresado
pen_N	Penetração do ligante novo
pen_R	Penetração do ligante final da mistura reciclada
PG	Performance grade
RA	Mistura betuminosa recuperada
R_D	Profundidade média da rodeira no final do ensaio
RT	raise time
S_m	Módulo de rigidez
Tab_F	Temperatura de amolecimento do ligante envelhecido do material fresado
Tab_N	Temperatura de amolecimento do ligante novo
Tab_R	Temperatura de amolecimento do ligante final da mistura reciclada
TR	Taxa de reciclagem
TRb	Taxa de reciclagem de betume
UBI	Universidade da Beira Interior
WTS_{air}	Declive máximo da rodeira
ε	Extensão de tração
ε₆	Extensão para uma resistência à fadiga de 1 milhão de ciclos
ν	Coefficiente de Poisson do provete à temperatura de ensaio

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Enquadramento temático

Numa época de grande preocupação ambiental, a Engenharia Rodoviária prima por estudar técnicas menos agressivas e mais benéficas para o meio ambiente, como é exemplo as misturas betuminosas temperadas. Este tipo de misturas é produzido 20 a 40 °C abaixo das misturas betuminosas a quente (MBQ). Desta forma, várias tecnologias têm sido desenvolvidas por forma a possibilitar a sua produção. O objetivo destas tecnologias é a obtenção de agregado totalmente revestido a uma temperatura de produção menor e a obtenção de misturas betuminosas com desempenho equivalente ou melhor do que as misturas betuminosas convencionais. O revestimento completo dos agregados é conseguido através da redução da viscosidade do ligante ou através do uso de aditivos que promovem a secagem completa do agregado a baixas temperaturas (Croteau e Tessier, 2008).

Em 1987, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável com a publicação de *Our Common Future* pela *United Nations' World Commission on Environment and Development* como sendo “o desenvolvimento que satisfaz a necessidade do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (APAO, 2006). O conceito engloba três áreas interdependentes: desenvolvimento económico, desenvolvimento social e proteção ambiental.

Na Europa várias foram as associações e agências governamentais que adotaram o conceito de desenvolvimento sustentável, sendo as misturas betuminosas temperadas e as suas tecnologias de produção baseadas neste conceito (FHWA, 2008). Desde então a perceção de que os recursos da natureza são escassos e de que qualquer forma de desenvolvimento só será sustentável se se promover o equilíbrio entre as necessidades económicas e sociais das populações e a proteção do meio ambiente, possibilitou que os impactos ambientais tivessem cada vez mais importância nas decisões relacionadas com a construção e exploração/conservação das estradas (Batista, 2004).

Desde a década de 90 que se verifica em Portugal um aumento das obras de conservação/requalificação dos pavimentos rodoviários em consequência do aumento de tráfego pesado (Baptista, 2006). A reciclagem é uma das soluções para a reabilitação de pavimentos muito degradados tendo tido início nos anos 70, nos EUA. A partir daí várias técnicas de reciclagem têm surgido, podendo ser distinguidas quanto à localização dos trabalhos de reciclagem (*in situ* ou em central), quanto ao ligante utilizado (betume, emulsão betuminosa ou cimento) e quanto à temperatura de fabrico da mistura betuminosa (a quente ou a frio).

O presente trabalho insere-se neste contexto pois consiste na validação de uma metodologia de formulação para misturas betuminosas temperadas com possibilidade de incorporação de até 100 % de material fresado proveniente de pavimentos degradados. É necessário o estudo deste tipo de misturas betuminosas e a sua integração nas especificações normativas, para que se promova a implementação e difusão das mesmas. Pois a sua produção assenta numa tecnologia bastante promissora a nível económico, ambiental e técnico.

1.2 - Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é validar uma nova metodologia de formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas com emulsão betuminosa, visando a utilização de material reciclado até 100%. Este método baseia-se na determinação do módulo de rigidez obtido por tração indireta com compressão diametral, segundo a norma europeia EN 12697-26: 2004 (*Bituminous mixtures, Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*).

A avaliação prática do desempenho e a caracterização das misturas produzidas em laboratório durante o trabalho experimental tem como objetivo a validação da metodologia de formulação anteriormente referida.

O presente trabalho tem também como objetivo contribuir para a difusão e implementação desta técnica inovadora, que apesar dos inegáveis benefícios que acarreta, não é prática habitual em Portugal. Assim, pretende-se com este trabalho contribuir para um melhor conhecimento desta técnica para que futuramente possa constituir uma boa alternativa em obras de reabilitação dos pavimentos rodoviários.

1.3 - Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. No capítulo 1 é feito um enquadramento do tema em estudo e uma abordagem genérica aos principais conceitos e à sua importância. É também feita uma síntese da estruturação adotada para o trabalho antecedida da apresentação dos objetivos a alcançar.

No capítulo 2 (Misturas betuminosas recicladas temperadas) é feita uma descrição da reciclagem de pavimentos, salientando as técnicas correntemente utilizadas. Descrevem-se também as misturas betuminosas, apresentando-se as tecnologias de produção mais usuais, os benefícios associados e ainda um breve resumo histórico das mesmas.

No capítulo 3 (Métodos de formulação) descrevem-se os principais métodos de formulação para misturas betuminosas a quente que serviram de base ao desenvolvimento da metodologia de formulação para misturas betuminosas recicladas temperadas a validar no presente trabalho, assim como a descrição de todas as etapas que a constituem.

No capítulo 4 (Trabalho experimental) apresenta-se todo o trabalho experimental executado que pode ser dividido em três fases, caracterização dos materiais a utilizar nas misturas, determinação do módulo de rigidez para determinação a percentagem ótima de ligante e a caracterização mecânica das misturas produzidas, dando especial atenção aos procedimentos seguidos na realização dos diversos ensaios. Neste capítulo são também apresentados os resultados obtidos.

No capítulo 5 (Considerações finais) são explanadas as conclusões obtidas ao longo do presente estudo e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS TEMPERADAS

2 - MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS TEMPERADAS

2.1 - Introdução

O benefício imediato da produção e colocação de misturas betuminosas a baixas temperaturas é a redução do consumo de energia. Com o decréscimo da temperatura de produção acrescem outros benefícios, tais como, a redução dos gases de efeito de estufa, fumos e odores gerados na central e no local da pavimentação. Mais, os benefícios técnicos podem também ser substancialmente incluídos na redução a curto prazo do endurecimento do ligante, redução da fragilidade da mistura durante a compactação, possível aumento da percentagem de material fresado e possível extensão da época de pavimentação/construção (Croteau e Tessier, 2008).

2.2 - Temperatura de produção de misturas betuminosas

A redução das temperaturas de produção e de aplicação e o aumento do conteúdo de materiais reciclados nas misturas betuminosas proporcionam benefícios óbvios para a sustentabilidade a curto, médio e longo prazo (NYNAS, 2009).

As misturas betuminosas podem ser classificadas de acordo com o intervalo de temperaturas a que são produzidas, como ilustra a Figura 2.1.

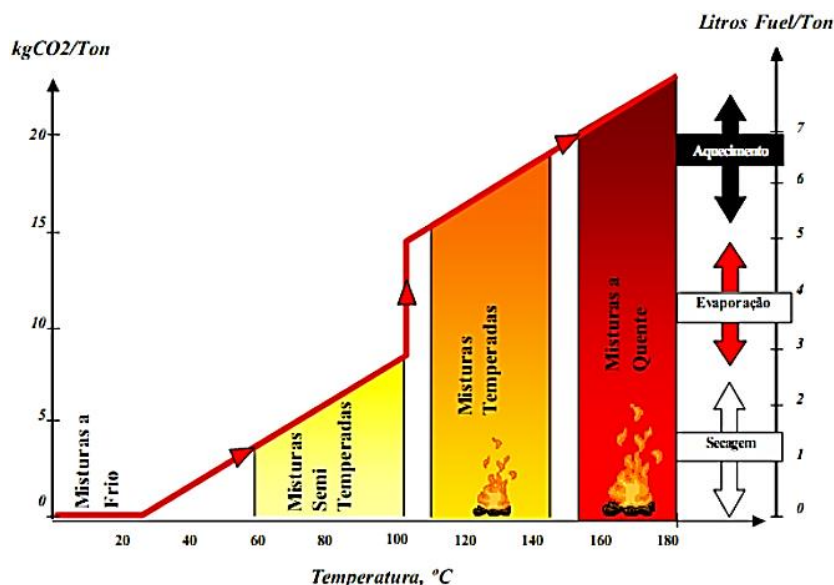


Figura 2.1 - Temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões de gases (Dinis-Almeida, 2010)

As misturas a frio são produzidas sem recurso ao aquecimento dos agregados, ou seja, à temperatura ambiente. Este tipo de misturas é realizado com emulsão betuminosa (EAPA, 2010).

As misturas semi-temperadas são produzidas com agregados aquecidos à temperatura de mistura, entre 70 a 100 °C, aproximadamente. A sua principal característica é o facto do fabrico e colocação serem feitos a temperaturas inferiores a 100 °C. É de notar que a água retida nos agregados grossos facilita o processo de mistura uma vez que aumenta de volume aquando do aquecimento da mistura, facilitando desta forma o processo de envolvimento dos agregados pelo betume (Alconada, 2011; EAPA, 2010).

As misturas temperadas possuem uma temperatura de produção entre 100 e 140 °C (EAPA, 2010). A sua tecnologia de base implica o uso de aditivos químicos, aditivos orgânicos ou técnicas de formação de espuma, com o objetivo de reduzir a viscosidade do ligante através de modificação reológica (Dinis-Almeida, 2010).

As misturas a quente são produzidas entre 150 e 180 °C, sendo que a temperatura de produção depende do betume usado (EAPA, 2010). O ligante utilizado é o betume tradicional ou os betumes modificados com polímeros ou com borracha (Dinis-Almeida, 2010).

2.3 - Evolução das misturas betuminosas temperadas

A escassez de informação acerca das misturas betuminosas temperadas não significa que esta seja uma técnica recente. De acordo com a bibliografia, em 1956, o Professor Ladis Csanyi da Iowa State University, avaliou o potencial da espuma de betume no uso como ligante para solos (Chowdhury e Button, 2008). O processo desenvolvido consistia na injeção de vapor de água no betume aquecido de forma a reduzir a temperatura de produção da mistura (Al-Rawashdeh, 2008). Em 1968, a Mobil Oil na Austrália patenteou a descoberta de Csanyi e modificou o método original, substituindo a injeção de vapor de água por água fria, agilizando assim o processo de produção do betume-espuma (Kristjansdottir *et al.*, 2007).

No início dos anos 70, a Chevron desenvolveu critérios de dimensionamento e formulação para pavimentos em misturas betuminosas estabilizadas com emulsões. Sendo que em 1977 publicou o “*Bitumuls Mix Manual*”, um manual com informações pertinentes sobre a metodologia de dimensionamento, formulação e produção deste tipo de misturas (Chowdhury e Button, 2008). Em 1979 e 1981, a FHWA (*Federal Highway Administration*) e a AEMA (*Asphalt Emulsion Manufacturers Association*), respetivamente, publicaram manuais análogos seguindo-se um crescente e unânime consenso na utilização deste tipo de misturas, principalmente para a utilização em meios onde existem restrições nas emissões, bem como em zonas com baixos níveis de tráfego (FHWA, 1979; AEMA, 1981). Kuennen (2004), citado por Chowdhury e Button (2008), reportou que as misturas com emulsão betuminosa eram populares em zonas rurais onde a distância às centrais de misturas a quente e o reduzido volume de tráfego podem impedir o uso das tradicionais misturas a quente. As centrais de misturas betuminosas a frio têm um custo inicial mais reduzido quando comparadas com as centrais das misturas betuminosas a quente, contudo podem ser facilmente situadas em qualquer lugar devido à inexistência de emissões de gases prejudiciais. Além disso, as

misturas betuminosas temperadas possibilitam o uso de elevadas quantidades de material recuperado. Em 1994, Maccarone *et al.* (1994), citado por Ferreira (2009), estudaram duas misturas betuminosas a frio com ligantes diferentes, um era a espuma de betume e o outro a emulsão betuminosa (elevado conteúdo) e concluíram que ambas representavam um ganho na construção rodoviária devido à eficiência energética e às reduzidas emissões.

As primeiras estradas construídas com misturas betuminosas temperadas são europeias e datam de 1995. Foram construídas na Alemanha com recurso à adição de um zeólito sintético (*Aspha-Min*), seguindo-se a aplicação desta tecnologia na Noruega e na Dinamarca (Prowell e Hurley, 2008).

Em 1999, Jenkins *et al.*, propuseram um processo de produção de misturas betuminosas semi-temperadas com betume espuma. Eles investigaram o conceito e os benefícios do pré-aquecimento dos agregados antes da introdução da espuma de betume, a uma temperatura ligeiramente acima da temperatura ambiente, mas inferior a 100 °C. Os resultados mostraram que o pré-aquecimento dos agregados potencia o envolvimento das partículas, a coesão da mistura, a resistência à tração e a compactação. Sendo isto particularmente benéfico para misturas com elevadas taxas de material recuperado ou em misturas britadas densamente graduadas (Ferreira, 2009). Segundo a bibliografia consultada, diversos autores afirmam que provavelmente devido ao elevado custo e escassez dos combustíveis fósseis, a Europa (Koenders *et al.*, 2000), a África do Sul (Jenkins *et al.*, 1999) e a Austrália (AAPA, 2001) cedo começaram a avaliar os benefícios e o desempenho das misturas betuminosas temperadas.

Em 2002, a NAPA (*National Asphalt Pavement Association*) lidera uma visita pela Europa visando a análise e estudo das misturas betuminosas temperadas. Desde essa altura, também nos EUA o interesse e desenvolvimento desta tecnologia cresceram de forma exponencial, de tal forma que a FHWA designou as misturas betuminosas temperadas como área em foco e organizou com a NAPA, em 2003, uma conferência cujo objetivo principal era explorar a seu potencial de utilização nos EUA. Em 2004, no “*World of Asphalt*” são apresentados projetos e desenvolvimentos nesta área por diversas empresas e entidades rodoviárias. Desde então, quer nos EUA, quer na Europa, não mais se parou de estudar as vantagens da tecnologia de produção de misturas betuminosas temperadas (Ferreira, 2009).

2.4 - Técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas

A redução da temperatura de produção das misturas betuminosas é um dos domínios, no âmbito da construção rodoviária, onde se conseguem as maiores poupanças de energia. Hoje em dia existem no mercado diversas soluções técnicas muito completas que permitem este feito e que se encontram disponíveis no mercado (NYNAS, 2009).

As tecnologias das misturas betuminosas temperadas operam acima dos 100 °C o que faz com que a água remanescente na mistura seja muito reduzida. Várias técnicas são usadas para

reduzir a viscosidade efetiva do ligante de modo a permitir o completo revestimento dos agregados e a subsequente compactação a temperaturas mais baixas (EAPA, 2010). As técnicas mais comuns são com recurso a aditivos orgânicos, a aditivos químicos e à formação de espuma de betume, descritos em seguida.

2.4.1 - Aditivos orgânicos

De acordo com alguns autores, a seleção do tipo de aditivos deve ser feita de forma cuidadosa para que o ponto de fusão seja mais elevado que o esperado para temperaturas em serviço (caso contrário poderá ocorrer excessiva deformação permanente) e para minimizar a fragilização da mistura betuminosa a baixas temperaturas (EAPA, 2010). Podem ser usados diferentes aditivos orgânicos para reduzir a viscosidade do ligante a temperaturas acima dos 90 °C, sendo o mais usado a parafina, produzida através da conversão do gás natural. Este tipo de aditivos proporciona uma redução de temperatura entre 20 a 30 °C enquanto aumenta a resistência à deformação de modo modificado (EAPA, 2010).

2.4.2 - Aditivos químicos

Os aditivos químicos não alteram a viscosidade do ligante mas atuam como tensoativos, diminuindo as forças de atrito a temperaturas entre 140 a 185 °C (EAPA, 2010). Tornando assim possível misturar o betume com os agregados e compactar as misturas a temperaturas reduzidas, dado que reduzem as temperaturas de mistura e compactação cerca de 20 a 30 °C. O uso deste tipo de aditivos tem a facilidade de não necessitar de alterações nas centrais betuminosas (Chowdhury e Button, 2008). Durante o processo de produção a emulsão betuminosa é simplesmente usada em vez do betume, misturada com os agregados, havendo a libertação de água da emulsão sob a forma de vapor (Ferreira, 2009). Segundo Batista (2004) as emulsões betuminosas são sistemas formados por duas fases, cujos principais constituintes são o betume (fase dispersa) e a água (fase contínua). Ainda segundo a mesma fonte, a percentagem de betume, numa emulsão betuminosa varia entre 50 a 65 %.

2.4.3 - Formação de espuma de betume

As técnicas de formação de espuma de betume consistem em adicionar pequenas quantidades de água (geralmente entre 2 a 3 % da massa do betume) ao betume quente (acima de 170 °C) (Batista, 2004). A adição da água ao betume quente faz com que a água evapore rapidamente, levando o betume a transformar-se numa “espuma”, com volume cerca de 20 a 30 vezes superior ao seu volume (Batista, 2004). A quantidade de expansão do betume depende de vários fatores, incluindo a quantidade de água adicionada e a temperatura da mistura betuminosa (Jenkins, 2000).

Esta técnica pode permitir uma redução da temperatura da mistura betuminosa cerca de 20 a 30 °C (EAPA, 2010).

2.5 - Vantagens das misturas betuminosas temperadas

Segundo NYNAS (2009) a redução das temperaturas de produção e colocação das misturas betuminosas proporcionam benefícios evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em benefícios sociais, económicos e ambientais.

As misturas betuminosas temperadas (MBT) são benéficas por duas razões, a diminuição da viscosidade auxilia a compactação e a diminuição da temperatura de produção reduz o envelhecimento do betume (FHWA, 2008). Em seguida, são apresentados alguns dos benefícios das misturas betuminosas temperadas.

A redução da temperatura de produção, em relação às misturas betuminosas a quente (MBQ), é o fator que conduz a mais vantagens para este tipo de misturas. Destacando-se a redução do consumo e dos custos associados à energia e ao combustível, de acordo com a APAO (*Asphalt Pavement Association of Oregon*) (2009) de, respetivamente 60 a 80 % e 20 a 35 %, sendo que uma redução da temperatura de 28 °C proporciona uma poupança de 11 % de combustível segundo cálculos teóricos (Ferreira, 2009).

Devido às temperaturas de colocação mais baixas é possível ainda a redução das emissões/odores em central e durante a colocação, sendo que quanto menor a temperatura de produção maior será a redução das emissões/odores. Verificando-se (EAPA, 2010) uma redução de 20 a 25 % para as poeiras, 30 a 40 % para o dióxido de carbono e dióxido de enxofre, 50 % para compostos químicos voláteis, 10 a 30 % para monóxido de carbono, 60 a 70 % para óxidos nitrosos, 30 a 50 % para os fumos das pavimentadoras. A redução das emissões leva a uma diminuição da consternação pública e à fácil permissão para localização de centrais em áreas urbanas (FHWA, 2007), bem como, para a pavimentação em áreas com qualidade do ar reduzida (APAO, 2009). O “*Bitumen Forum*” relacionou emissões com temperatura e concluiu que para temperaturas abaixo dos 80 °C as emissões não são significativas, a 150 °C as emissões são cerca de 1 mg/h, sendo que a 180 °C as emissões já são significativas (FHWA, 2008).

Dado que as MBT possibilitam a incorporação de elevadas taxas de material fresado devido ao aumento de trabalhabilidade que proporcionam (Ferreira, 2009), é possível diminuir os custos associados à aquisição de recursos naturais e à eliminação/redução de depósito dos resíduos, favorecendo desta forma a conservação dos recursos naturais e o impacto ambiental (NYNAS, 2009). A utilização de material fresado (em técnicas de reciclagem) proporciona uma diminuição da alteração ao nível da rasante do pavimento (em comparação com a solução de reforço do pavimento) (Dinis-Almeida, 2010).

A reduzida diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de colocação da mistura possibilita (Zaumanis, 2010) a pavimentação em climas frios, o aumento do período de pavimentação (uma vez que se tem mais tempo para pavimentar e compactar), aumento da

distância de transporte garantindo uma trabalhabilidade adequada, associada a uma compactação com menor esforço. É conseguida também a construção mais rápida de camadas mais espessas e uma rápida abertura ao tráfego, devido ao tempo de cura praticamente inexistente, isto torna-se especialmente importante em interseções que precisam ser reabertas ao tráfego rapidamente e em aeroportos (FHWA, 2007).

A redução da temperatura da mistura proporciona uma melhoria das condições de trabalho, reduzindo-se o risco de queimaduras (em comparação com a MBQ), observando-se um aumento da produtividade na colocação das misturas e uma redução do envelhecimento do ligante durante a mistura, aumentando assim o tempo de vida em serviço do pavimento (Ferreira, 2009).

Dado que o processo de fabrico deste tipo de misturas betuminosas é semelhante ao das misturas betuminosas a quente é possível a utilização de centrais betuminosas a quente, permitindo a amortização do investimento feito numa época em que estas proliferavam sem fins lógicos (Dinis-Almeida, 2010).

2.6 - Desvantagens das misturas betuminosas temperadas

Apesar das baixas temperaturas nas misturas betuminosas temperadas serem inicialmente um aspeto muito promissor desta tecnologia são também objeto de preocupação (Vaitkus *et al.*, 2009a,b) devido à implementação e ao desempenho destas misturas.

De acordo com Hurley e Prowell, a elevada sensibilidade à água das misturas betuminosas temperadas observada nos seus estudos (Hurley e Prowell, 2005a,b; Hurley e Prowell, 2006) pode ser justificada pela baixa temperatura de produção e compactação, que resultam numa secagem incompleta dos agregados que juntamente com o menor envelhecimento do ligante, causado pela reduzida temperatura de produção das misturas, origina a formação prematura de rodeiras. Ainda segundo as mesmas fontes, a diminuição da resistência à tração reportada nos estudos realizados, é um indicador de que há mais retenção de água nas misturas betuminosas temperadas do que nas misturas betuminosas a quente. Segundo Hill (2011), a adição de material fresado à mistura pode melhorar o desempenho na sensibilidade à água e na deformação permanente (formação de rodeiras).

Outros dos aspetos negativos das misturas betuminosas temperadas é a falta de dados acerca do comportamento a longo prazo e a falta de análise quantitativa do ciclo de vida, necessários para a promoção das técnicas de produção e para avaliar o desempenho do pavimento (Miller e Bahía, 2010).

Até à data, nos Estados Unidos da América não há registo de desempenho negativo a longo prazo (Chuwdhury e Button, 2008) e na Europa, os trechos experimentais de misturas

betuminosas temperadas, têm tido um desempenho igual ou melhor que as misturas betuminosas a quente (FHWA, 2008).

2.7 - Custos comparativos

Apesar da redução do consumo de combustível evidenciar uma conseqüente redução dos custos (Rubio *et al.*, 2012), ao falar em custos comparativos é inevitável referir que o investimento e a modificação das centrais (quando assim for necessário), que o custo dos aditivos (se for necessário) e que os custos das licenças das tecnologias de produção das misturas betuminosas temperadas podem aumentar o custo de produção destas misturas (EAPA, 2010).

Segundo Chowdhury e Button (2008), dependendo da redução da temperatura de produção e da fonte de energia utilizada, consegue-se uma economia de energia entre 25 a 70 %, em relação às misturas betuminosas a quente. Sendo que, quanto maior for a redução da temperatura de produção, menor será o consumo de energia/combustível e, conseqüentemente, quanto mais cara for a fonte de energia/combustível maior será a poupança associada.

Segundo o estudo económico efetuado por Dinis-Almeida (2010) com a utilização de MBRT com emulsão betuminosa é possível uma redução de 46,6 % por tonelada de mistura produzida, em relação a MBQ com betume.

2.8 - Reciclagem de pavimentos

Segundo Fonseca (2002), o objetivo fundamental da reciclagem de pavimentos é transformar um pavimento degradado numa estrutura homogénea e adaptada ao tráfego que irá suportar. A reciclagem de pavimentos consiste em reaproveitar/reutilizar materiais para a construção de novas camadas, reduzindo assim o consumo de novos materiais.

Segundo Kandhal e Mallick (1997), o reaproveitamento dos materiais existentes no pavimento para a produção de misturas betuminosas resulta numa considerável redução de materiais, custos e energia. As principais vantagens da reciclagem de pavimentos são, entre outras, (David, 2006) a redução dos custos de construção, a redução do uso de novos agregados e ligantes betuminosos, dando suporte ao conceito de “utilização em ciclo fechado dos materiais rodoviários”, a conservação da cota do pavimento existente, a redução do impacto ambiental (pois não haverá tanto material a ser depositado em vazadouros, reduzindo assim o problema da produção de resíduos), a economia de energia durante a produção, transporte e extração da matéria-prima e a eliminação de fendas, impedindo a sua propagação.

A reciclagem de pavimentos teve início em 1915 nos Estados Unidos da América. Nos anos 70, com a falta de materiais betuminosos e com a crise económica internacional, alguns técnicos rodoviários internacionais juntamente com alguns organismos de renome destacaram o

reaproveitamento dos materiais existentes nos pavimentos deteriorados através da técnica da reciclagem (Bonfim, 2000). Desde então, várias técnicas de reciclagem têm sido desenvolvidas, podendo ser classificadas de várias formas, pelo local onde é executada a mistura, pela temperatura do processo, pelas características do material a reciclar ou pelo tipo de ligante (Moreira e Pereira, 2007), adquirindo assim as seguintes classificações: segundo a temperatura de produção da mistura - a frio, temperadas ou a quente; segundo a localização da produção da mistura - *in situ* ou em central; segundo o tipo de ligante - betuminoso, hidráulico ou misto (Antunes e Batista, 2009).

Em seguida serão descritas de forma mais detalhada a reciclagem a quente em central, por ser a técnica mais usual em Portugal e a reciclagem em central temperada com emulsão por ser a técnica usada na produção das misturas em estudo no presente trabalho. As restantes técnicas de reciclagem não serão abordadas neste trabalho pois já se encontram explanadas por diversos autores (Batista, 2004; Baptista, 2006; Dinis-Almeida, 2010).

Reciclagem a quente em central

De acordo com EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) (2008), a produção de misturas betuminosas recicladas a quente em central tem uma complexidade semelhante à produção das misturas betuminosas a quente convencionais.

A forma como se procede ao aquecimento da mistura betuminosa recuperada é um fator importante pois determina as percentagens permitidas para a incorporação nas MBQ (Batista, 2004). O aquecimento das misturas betuminosas recuperadas nas centrais de fabrico contínuas pode ser feito por três métodos distintos, são eles: o aquecimento por chama indireta, o aquecimento por chama direta e o aquecimento por contacto com os agregados sobreaquecidos (Dinis-Almeida, 2010). Sendo que atualmente os métodos mais usuais são o aquecimento por chama direta e por contacto com os agregados sobreaquecidos (EAPA, 1998). É de salientar que o betume “novo” a acrescentar a estas misturas betuminosas deve ser mais mole que o habitual, modificado ou conter rejuvenescedores, de forma a regenerar o comportamento do betume envelhecido para que o desempenho da mistura reciclada seja idêntico a uma mistura convencional com materiais novos.

O recurso a centrais contínuas proporciona o uso de dois métodos distintos, o método da alimentação separada e o método do duplo tambor.

Na reciclagem em central contínua pelo método da alimentação separada a mistura betuminosa recuperada é introduzida na zona central do tambor-secador-misturador e o aquecimento e desidratação dos materiais é feito quer pelos gases de combustão quentes quer pelo contacto com os agregados sobreaquecidos a incorporar (Dinis-Almeida, 2010). Quando usado o método do duplo tambor nas centrais contínuas, recorre-se a um tambor rotativo tradicional de fluxos contracorrente, envolvido por um tambor exterior fixo. Sendo a mistura recuperada introduzida na parte superior do tambor exterior, percorrendo o espaço

entre tambores sem entrar em contacto com os gases de combustão. Os novos agregados são secos e sobreaquecidos no tambor interior sendo introduzidos no tambor exterior através das aberturas existentes no tambor interior.

O recurso a centrais descontínuas proporciona o uso de três técnicas de reciclagem distintas, são elas: o método RAP a frio, o método RAP a quente e o *Recyclean* (reciclagem limpa).

O método RAP a frio (Dinis-Almeida, 2010) consiste em introduzir a mistura betuminosa recuperada no elevador dos agregados quentes, sendo o seu aquecimento e desidratação feito através do contacto com os novos agregados sobreaquecidos antes de entrar para o misturador, onde se adiciona o betume novo (segundo a quantidade e as características aferidas no estudo de composição previamente efetuado). Este método de reciclagem permite a incorporação de 10 a 30 % de mistura betuminosa recuperada. O método RAP a quente (Dinis-Almeida, 2010) implica que a mistura betuminosa recuperada seja pré-aquecida. Para isso as centrais descontínuas são complementadas com a instalação de um tambor-secador que irá aquecer o material fresado. Este método de reciclagem permite a incorporação de cerca de 70 % de mistura betuminosa recuperada (Batista, 2004). O método *Recyclean* (Dinis-Almeida, 2010) consiste em introduzir no mesmo tambor, mas em áreas distintas, os agregados a incorporar e a mistura betuminosa recuperada. Sendo que os primeiros são introduzidos na extremidade do tambor secador e os segundos num anel central, no meio do tambor secador. Assim, o aquecimento da mistura betuminosa recuperada é feito através da chama, assegurando que este material não sofre sobreaquecimento. É permitida a incorporação de 35 % de material fresado.

As centrais torre são um tipo de centrais betuminosas descontínuas onde o processo de secagem é efetuado de forma independente do processo de mistura. Neste caso, os agregados (já aquecidos) são transportados para silos, localizados por cima da unidade de mistura, de acordo com a sua fração granulométrica, e posteriormente enviados para as básculas, em função da composição da mistura selecionada e por fim colocados no misturador (Dinis-Almeida, 2010).

Segundo estudos realizados por diversos autores (Gomes, 2005; Ibarra, 2003) foi possível comprovar que as misturas recicladas a quente em central podem alcançar um comportamento praticamente equivalente ao das misturas convencionais, sempre que se tenha o suficiente cuidado na sua formulação e processo de fabrico, apresentando-se desta forma como uma alternativa viável na reabilitação de pavimentos.

Reciclagem temperada com emulsão betuminosa em central

Na reciclagem temperada com emulsão betuminosa em central a mistura betuminosa recuperada é aquecida no tambor de uma central a quente, contínua ou descontínua e a emulsão betuminosa é injetada à temperatura ambiente (através de um sistema automático).

Sendo a mistura dos materiais feita no misturador central (nas centrais descontínuas) ou no tambor-secador-misturador (nas centrais contínuas).

Esta técnica de reciclagem é realizada com temperaturas de produção entre os 60 a 100 °C com 50 % de economia energética em relação às misturas tradicionais e entre os 100 e os 140 °C com uma economia energética entre os 10 a 30 %, para a reciclagem temperada, respetivamente (Dinis-Almeida, 2010).

A emulsão deve ser catiónica de rotura lenta, com o objetivo de proporcionar à mistura uma elevada coesão inicial, uma elevada adesividade ativa e passiva, bem como uma trabalhabilidade adequada para aplicação com espalhadoras convencionais (Dinis-Almeida, 2010). A mistura betuminosa reciclada temperada pode ser armazenada durante 24h sempre que o espalhamento e compactação sejam efetuados à temperatura mínima de 60 °C (Soto *et al.*, 2005).

A reciclagem temperada com emulsão betuminosa conjuga os benefícios da reciclagem a quente e a frio, agrupando assim nas seguintes vantagens (Dinis-Almeida, 2010), capacidade de reciclar 100 % dos resíduos provenientes da fresagem dos pavimentos degradados, tempo de “cura” mais reduzido que nas misturas a frio (devido à eliminação de grande parte da água durante o processo de fabricação), não condicionamento da obra a uma única época do ano (Verão), temperaturas de produção e colocação mais baixas que na reciclagem a quente devido à utilização de emulsões betuminosas e consequente economia de energia e de custos, melhor o controlo da mistura final, visto ser fabricada em central.

No que diz respeito à formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas, não existem ainda metodologias e critérios definidos e aceites pelas autoridades competentes nos diversos países, levantando-se assim a questão de que método utilizar para nesta tecnologia (Dinis-Almeida, 2010).

Dinis-Almeida apresentou uma metodologia de formulação para misturas betuminosas temperadas que será descrita no capítulo 3.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE FORMULAÇÃO

3 - MÉTODOS DE FORMULAÇÃO

3.1 - Introdução

Os métodos de formulação são usados para definir a combinação ideal de uma mistura betuminosa estabelecendo as quantidades de agregados e ligante. Para que o método de formulação seja viável deve ser capaz de reproduzir em laboratório de forma fiável as condições *in situ* a que a mistura estará sujeita e de fornecer uma composição que garanta à mistura um bom desempenho em serviço durante a vida útil do pavimento.

Nos últimos anos tem-se verificado um grande esforço de investigação para o estabelecimento de novos métodos que permitam formular misturas betuminosas a partir de critérios baseados nas propriedades mecânicas dos materiais. Estes métodos são designados por métodos fundamentais ou racionais por se apoiarem na avaliação das propriedades “fundamentais” dos materiais, ou seja, no módulo de deformabilidade, na resistência à fadiga e na resistência à deformação permanente (Capitão *et al.*, 2001).

Existem métodos de formulação para misturas betuminosas a quente (MBQ) e para misturas betuminosas a frio (MBF), por envolverem tipos de ligantes distintos. No entanto, ao longo deste capítulo apenas serão abordados os métodos de formulação para misturas betuminosas recicladas a quente (MBRQ), pois de acordo com o trabalho desenvolvido por Dinis-Almeida (2010), as misturas betuminosas recicladas temperadas, que são objeto de estudo no presente trabalho, assemelham-se mais às MBQ do que às MBF. De entre os métodos existentes para as misturas betuminosas recicladas a quente apenas serão descritos os métodos americanos, pois são os mais usuais.

3.2 - Métodos de formulação para misturas betuminosas recicladas a quente

Como já foi referido, o objetivo da formulação de misturas betuminosas é a otimização das proporções dos seus constituintes de forma a atingir propriedades físicas que satisfaçam os limites especificados (Dinis-Almeida, 2010). Todavia, a conformidade destes limites não garante, por si só, o bom desempenho da mistura em serviço. Por isso, alguns métodos de formulação também avaliam as características mecânicas das misturas betuminosas (a deformação permanente e resistência à fadiga).

3.2.1 - Métodos de formulação existentes

Os procedimentos que têm sido propostos mundialmente ainda não obtiveram nenhum consenso, apresenta-se abaixo a classificação proposta por Francken (1998) que tem como base os processos e conceitos envolvidos nas metodologias e que apresenta a seguinte classificação: métodos “por receita”, empíricos, analíticos e volumétricos.

Os métodos “por receita” estabelecem a composição das misturas betuminosas apenas quando estas são tradicionais e quando há muita experiência na sua utilização (Capitão *et al.*, 2001). Estes métodos resultam da experiência e da observação do desempenho das misturas betuminosas sujeitas a diferentes condições climáticas e de tráfego (Dinis-Almeida, 2010). Uma receita estabelece a curva granulométrica do agregado, a classe de penetração do betume a usar e a composição final da mistura betuminosa, fixando a espessura da camada e as características que a mistura deve apresentar durante as operações de mistura, espalhamento e compactação (Capitão *et al.*, 2001). Nenhuma das tarefas indicadas implica a produção de quaisquer provetes para ensaiar em laboratório (Capitão *et al.*, 2001). A vantagem dos métodos “por receita” é o facto de favorecerem a uniformização dos processos, a desvantagem é o facto de dificultarem a introdução/adaptação de novas técnicas ou materiais.

Os métodos empíricos derivam dos métodos por receita e consistem na realização de ensaios simples e relativamente económicos, sendo que as grandezas avaliadas não são medidas diretas do comportamento mecânico do material formulado (Capitão *et al.*, 2001). Estes métodos têm sido usados de forma generalizada em todo o mundo, alguns exemplos são o método de *Marshall*, o método de *Duriez* e o método de *Hveem* (Dinis-Almeida, 2010). Contudo, a aplicação dos métodos empíricos não permite medir diretamente as propriedades mecânicas fundamentais e incorporam procedimentos desajustados a inovações tecnológicas e a novos materiais de pavimentação rodoviária (Baptista, 2006).

Os métodos analíticos consistem no cálculo da composição volumétrica de misturas betuminosas, nomeadamente da proporção de cada uma das frações de agregados usados e dos volumes de betume e de vazios, de uma forma puramente analítica (Capitão *et al.*, 2001). Estes métodos incluem modelos de previsão do desempenho mecânico das misturas e a realização de ensaios de caracterização mecânica por forma a avaliar a qualidade das misturas e a validar a fórmula de execução (Baptista, 2006).

Os métodos volumétricos determinam a percentagem de betume e a granulometria a usar através da análise dos volumes parcelares que compõem as misturas (vazios, betume e agregados), sendo os volumes medidos em provetes produzidos em laboratório (Capitão *et al.*, 2001). Usualmente recorre-se à prensa de corte giratória (PCG) para determinar a compactidade e o volume de vazios que será obtido *in situ*, para determinada espessura da camada (Baptista, 2006). Por esta razão, em situações de tráfego mais pesado, devem realizar-se ensaios de desempenho para verificação das características mecânicas das composições estudadas (Dinis-Almeida, 2010).

Dado o grande número de variáveis envolvidas, é ilusório pensar que é possível obter, com elevada confiança, misturas com bom comportamento mecânico recorrendo apenas aos métodos volumétricos (Capitão *et al.*, 2001). Desta forma, surgem os métodos racionais ou

fundamentais. É de salientar, que apesar de atenuarem as deficiências dos métodos volumétricos (relativas à verificação do comportamento mecânico das misturas), a realização dos ensaios de desempenho implica tempo e custos justificáveis somente para pavimentos sujeitos a um elevado tráfego pesado (Dinis-Almeida, 2010).

3.2.2 - Metodologia geral de formulação

Os procedimentos usados para obter a fórmula de execução são semelhantes aos usados nas misturas tradicionais, podendo ir desde a habitual transposição para trechos experimentais até à tomada de decisão em função das características mecânicas das misturas obtidas em ensaios de desempenho, na Figura 3.1 apresentam-se as principais etapas da metodologia geral de formulação para as misturas betuminosas recicladas a quente (Baptista, 2006).

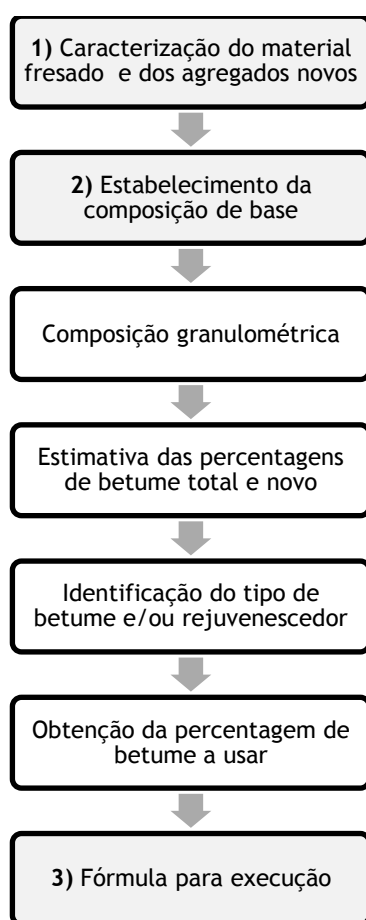


Figura 3.1 - Organograma da metodologia geral de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Baptista, 2006)

Na maioria dos métodos de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente a seleção do tipo de betume novo e/ou rejuvenescedor depende da taxa de reciclagem, das características do betume envelhecido presente no material fresado e das propriedades desejadas para o ligante final (Baptista, 2006). Depois da extração e recuperação do betume envelhecido presente no material fresado, procede-se à sua caracterização através

determinação da penetração a 25 °C e da temperatura de amolecimento, que constituem medidas indiretas da viscosidade.

Segundo Baptista (2006), a estimativa da viscosidade do ligante final numa mistura betuminosa reciclada poder ser feita através de expressões simples. Tomando como referência a *Association Mondiale de la Route* a penetração do ligante final a 25 °C, pode ser estimada pela equação (3.1) e a temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola pela equação (3.2).

$$\log(\text{pen}_R) = TRb \cdot \log(\text{pen}_F) + (1 - TRb) \cdot \log(\text{pen}_N) \quad (3.1)$$

$$Tab_R = TRb \cdot Tab_F + (1 - TRb) \cdot Tab_N \quad (3.2)$$

Onde:

pen_R - Penetração do ligante final da mistura reciclada [10^{-1} mm];

TRb - Taxa de reciclagem de betume;

pen_F - Penetração do ligante envelhecido do material fresado [10^{-1} mm];

pen_N - Penetração do ligante novo [10^{-1} mm];

Tab_R - Temperatura de amolecimento do ligante final da mistura reciclada [°C];

Tab_F - Temperatura de amolecimento do ligante envelhecido do material fresado [°C];

Tab_N - Temperatura de amolecimento do ligante novo [°C].

Assim, com base no exposto anteriormente, conclui-se que conhecendo a taxa de reciclagem e a penetração do ligante presente na mistura betuminosa recuperada, ao escolher um tipo de betume novo e a sua penetração é possível estimar a penetração do ligante final da mistura e a temperatura de amolecimento.

De acordo com o exposto por Baptista (2006), relativamente à deformabilidade, o aumento da quantidade de ligante novo deverá conduzir a uma diminuição do módulo de rigidez e a um pior comportamento à deformação permanente, agravado pelo aumento da percentagem de ligante e pela diminuição da rigidez da mistura. Ainda de acordo com a mesma fonte, em termos de fadiga, passar-se-á o inverso, pois a diminuição da rigidez e o aumento da percentagem de ligante provocam, geralmente, um efeito duplo em termos de melhoria do comportamento à fadiga. Baptista (2006) refere ainda que, relativamente ao ligante novo, para a mesma composição da mistura reciclada, ao optar-se por um betume mais mole, a rigidez da mistura final diminui e o comportamento à fadiga melhora, piorando o desempenho à deformação permanente.

Nas seguintes secções são abordados de forma sucinta os principais métodos de formulação das misturas betuminosas recicladas a quente.

3.2.3 - Método do *Asphalt Institute*

O método do *Asphalt Institute* consiste na caracterização do material fresado e dos agregados novos, na determinação da granulometria do material fresado após extração do betume, da percentagem de betume (Pb_F) e da viscosidade a 60 °C do betume recuperado (Baptista, 2006). Este método permite a incorporação de 20 a 70 % de material fresado. Caso a taxa de reciclagem seja reduzida (15 a 20 %) a avaliação da viscosidade do betume recuperado não é necessária (Kandhal e Mallick, 1997).

Segundo Baptista (2006) a estimativa da percentagem de betume total da mistura (Pb_R) é feita com base no método da superfície específica, usando a seguinte expressão empírica (3.3) e a determinação da percentagem de betume novo pela expressão (3.4), apresentadas a seguir.

$$Pb_R = 0,035 \cdot a + 0,045 \cdot b + K \cdot p_{200} + F \quad (3.3)$$

$$Pb_N = Pb_R - \left(\frac{Pb_F \cdot TR}{100} \right) \quad (3.4)$$

Sendo:

Pb_R - Estimativa da percentagem de betume total da mistura reciclada em relação à massa total da mistura;

a - Proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 2,36 mm;

b - Proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 2,36 mm;

K - Constante em função da quantidade de material que passa no peneiro nº 200, pode ter os seguintes valores;

K = 0,15 para 11 a 15 % de passados no peneiro nº 200

K = 0,18 para 6 a 10 % de passados no peneiro nº 200

K = 0,20 para 0 a 5 % de passados no peneiro nº 200

p_{200} - Proporção ponderal de elementos de dimensão inferior a 0,075 mm;

F - Fator de absorção dos agregados com valores entre 0 e 2 %, na ausência de informação usar o valor de 0,7 %;

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

Pb_F - Percentagem de betume das misturas betuminosas recuperadas;

TR - Taxa de reciclagem.

Os ensaios sobre a mistura são realizados de acordo com o método de formulação escolhido (método de *Marshall* ou de *Hveem*) em provetes com diferentes teores de betume (valor estimado $\pm 0,5$ %) para determinar a percentagem ótima de betume (Dinis-Almeida, 2010).

3.2.4 - Método do *Superpave*

O método *Superpave* (*Superior Performance Pavement*) tem sido aplicado a misturas betuminosas recicladas a quente nos EUA (McDaniel e Anderson, 2001; Kanhal e Mallick, 1997).

Em comparação com o método do *Asphalt Institute*, além do uso da prensa de corte giratório (PCG) no estudo da composição de base, existem diferenças no que respeita à caracterização do betume recuperado do material fresado e à forma de selecionar o betume novo (Baptista, 2006).

Em função da taxa de reciclagem (TR), da graduação (PG -*performance grade*) do betume recuperado do material fresado, McDaniel e Anderson (2001) recomendam as opções de seleção do betume novo apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Recomendações para a seleção do betume novo (adaptado de McDaniel e Anderson, 2001)

Caso	Recomendação	Classe do betume recuperado do material fresado		
		≤ PG Tx-22	PG Tx-16	PG Tx-10
A	Betume normal	TR<20 %	TR<15 %	TR<10 %
B	Betume de graduação PG abaixo	20 %≤TR≤30 %	15 %≤TR≤25 %	10 %≤TR≤15 %
C	Betume de acordo com gráficos de composição (<i>Blending Charts</i>)	TR>30 %	TR>25%	TR>15%

3.3 - Método de formulação para misturas betuminosas recicladas temperadas com base no módulo de rigidez

Atualmente, não existe nenhum método de formulação para misturas betuminosas recicladas temperadas (MBRT) aceite ou homologado pelas entidades competentes. Dinis-Almeida (2010) desenvolveu uma metodologia de formulação para este tipo de misturas que será avaliada neste trabalho. Na Figura 3.4 apresenta-se o organograma da referida metodologia, explanando-se em seguida cada uma das etapas constituintes.

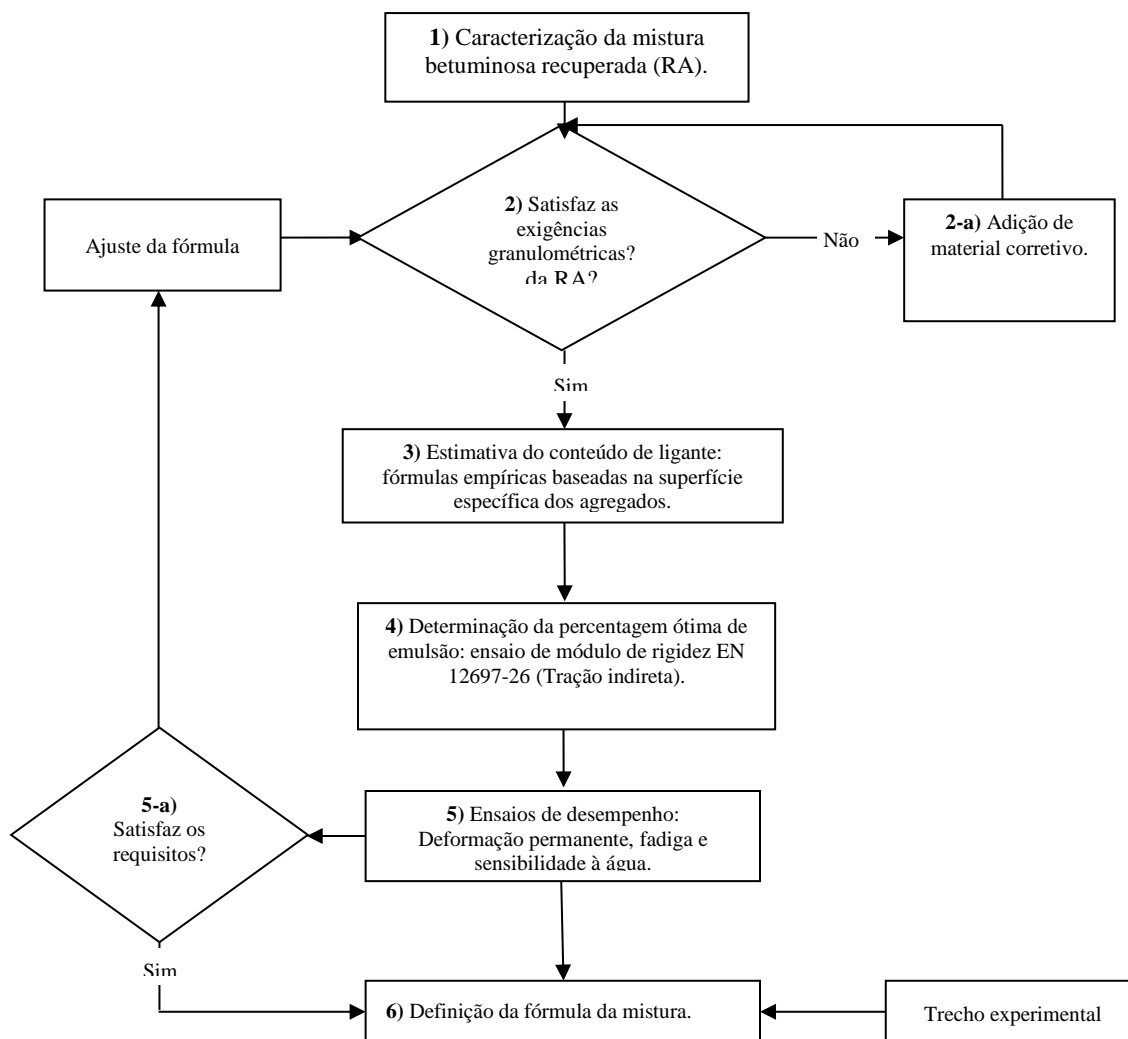


Figura 3.2 - Organograma da metodologia de formulação proposta por Dinis-Almeida (2010)

1) Caracterização da mistura betuminosa recuperada

A mistura betuminosa recuperada (RA) usada deve ser classificada e descrita consoante os requisitos especificados na norma europeia EN 13108-1: 2005 (*Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt*).

No Quadro 3.2 Apresentam-se o conjunto de ensaios que devem ser realizados aquando da caracterização das misturas betuminosas recuperadas.

Quadro 3.2 - Propriedades do material fresado e seus constituintes (Baptista, 2006)

Material	Propriedades	Norma de ensaio
Mistura betuminosa recuperada	Presença de matéria estranha	EN 12697-42
	Granulometria	EN 933-1
	Teor em água	EN 12697-14
	Percentagem de ligante	EN 12697-1
Ligante recuperado	Penetração a 25 °C	EN 1426
	Temperatura de amolecimento	EN 1427
Agregado recuperado	Granulometria	EN 933-1

2) Satisfaz as exigências granulométricas do agregado recuperado

O fuso granulométrico a cumprir é o definido no caderno de encargos (EP, 2009) para misturas betuminosas a quente para agregados naturais, em função da camada pretendida. Apesar de no caderno de encargos estar definido um fuso granulométrico para misturas betuminosas recuperadas sem extração do betume envelhecido, Dinis-Almeida (2010) recomenda que a análise granulométrica seja feita após a extração pois “o que à partida possa parecer partículas grossas, na realidade são partículas finas que se encontram aglomeradas pelo ligante envelhecido”.

2-a) Adição de material corretivo

A adição de material corretivo dever ser feita sempre que não se cumpra o fuso granulométrico, sob a forma de agregado natural (brita 15/25). A escolha da brita 15/25 deve-se ao facto de constituir um processo de correção granulométrica bastante expedito, sendo apenas necessário combinar a percentagem de cada um dos agregados (agregado recuperado e agregado natural) em relação à massa total de agregados, visando a conformidade com os limites especificados.

3) Estimativa do conteúdo de ligante

A estimativa do conteúdo de ligante necessário à produção da mistura betuminosa reciclada temperada (Pb_R) é feita através de fórmulas empíricas baseadas na superfície específica do agregado após extração do betume (no caso dos agregados recuperados), referida anteriormente como expressão (3.3), aquando da descrição do método do *Asphalt Institute*, no âmbito dos métodos gerais de formulação.

A percentagem de ligante novo (Pb_N) a adicionar à mistura é expressa em relação à massa total da mistura e calculada através da expressão (3.4), em função da percentagem de ligante envelhecido (Pb_F) presente na mistura betuminosa recuperada. Contudo, é de notar que a penetração do ligante final da mistura (pen_R) é um aspeto relevante a ter em conta, desta forma é necessário aferir se a penetração do ligante novo (pen_N) resultante da aplicação da expressão (3.1) é suficiente para garantir uma viscosidade e penetração adequadas para a mistura final. Partindo de uma solução para o ligante novo e estimando o valor do ligante final ou partindo das características pretendidas para o ligante final e estimando a penetração do ligante novo. Baptista (2006) estipulou o valor de $30 \cdot 10^{-1}$ mm para a penetração do ligante final da mistura reciclada, sendo este um betume 35/50. Na formulação das MBRT usadas neste trabalho também se usou este valor como referência para a realização do estudo de penetração. Dado que o ligante a adicionar é uma emulsão betuminosa é necessário converter a percentagem de ligante em teor de emulsão.

4) Determinação da percentagem ótima de emulsão

A determinação da percentagem ótima de emulsão é feita através da determinação do módulo de rigidez à tração indireta, segundo o Anexo C da norma europeia EN 12697-26: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*).

O ensaio de tração indireta por compressão diametral (IT-CY, *Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens*) é constituído por um sistema de aplicação de cargas com funcionamento servo pneumático, uma célula de carga (que mede o valor da força aplicada numa das geratrizes do provete cilíndrico) e transdutores do tipo LVDT (*Linear variable differential transformers*), colocados de forma diametralmente oposta no plano horizontal, perpendicularmente ao plano de carga. No presente trabalho, o ensaio foi realizado no equipamento *Nottingham Asphalt Test* (NAT) cujos principais componentes se encontram descritos na Figura 3.3 e são os seguintes: sistema de apoio do provete e dos transdutores, sistema pneumático de carregamento dos provetes, câmara climatizada com controlo de temperatura, sistema regulador de pressão e reservatório de ar comprimido e uma interface digital de entrada de dados e saída de resultados ligada a um computador.

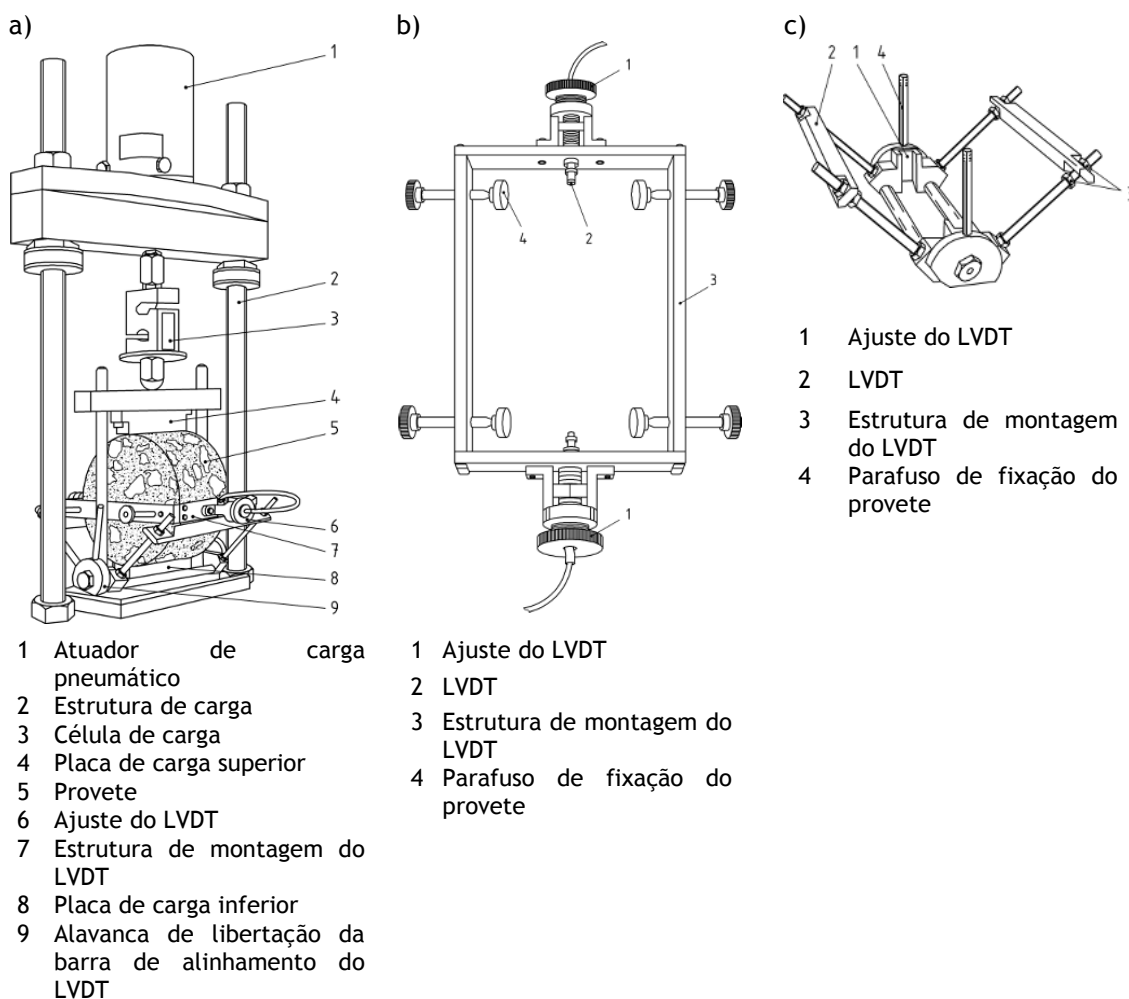


Figura 3.3 - Esquema do equipamento usado na realização do ensaio do módulo de rigidez (adaptado da EN 12697-26)

O sistema de apoio dos transdutores de deslocamento, representado na Figura 3.3-b é colocado no provete de forma a garantir a centralidade em relação à direção perpendicular do carregamento. Este sistema é fixado ao provete por meio de parafusos adequados, que por sua vez é apoiado no centro das barras de aplicação da carga.

Durante o ensaio, os provetes são submetidos a um carregamento repetido de compressão diametral, que desenvolve um estado de tensão horizontal de tração uniforme ao longo do plano diametral de aplicação da carga. Este estado de tensão induz a deformação (d) do provete conforme se representa na Figura 3.4-a). A curva de deformação média no provete, segundo a direção diametral perpendicular ao plano de atuação da carga, é registada durante o ensaio assim como a curva correspondente ao impulso da força. Estas curvas têm a forma que representada na Figura 3.4-b). O impulso da força é caracterizado pela amplitude (F) e pelo tempo de crescimento da carga (RT - *raise time*). O RT da carga é o período de tempo decorrido desde o instante inicial de aplicação da força até ao instante em que se regista o respetivo valor máximo e está relacionado com a frequência de aplicação da carga. A bibliografia refere que o tempo de crescimento da carga deve ser um valor compreendido entre 120 e 125 milissegundos, correspondente a um carregamento sinusoidal com a frequência de 2,5 Hz (Neves e Correia, 2006), contudo a norma EN 12697-26 (2004) recomenda um valor de 124 ± 4 milissegundos para o tempo de crescimento da carga. O impulso de carga é aplicado de forma a alcançar um pico transitório da deformação horizontal de 5 ± 2 mm, para provetes com diâmetro nominal de 100 milímetros.

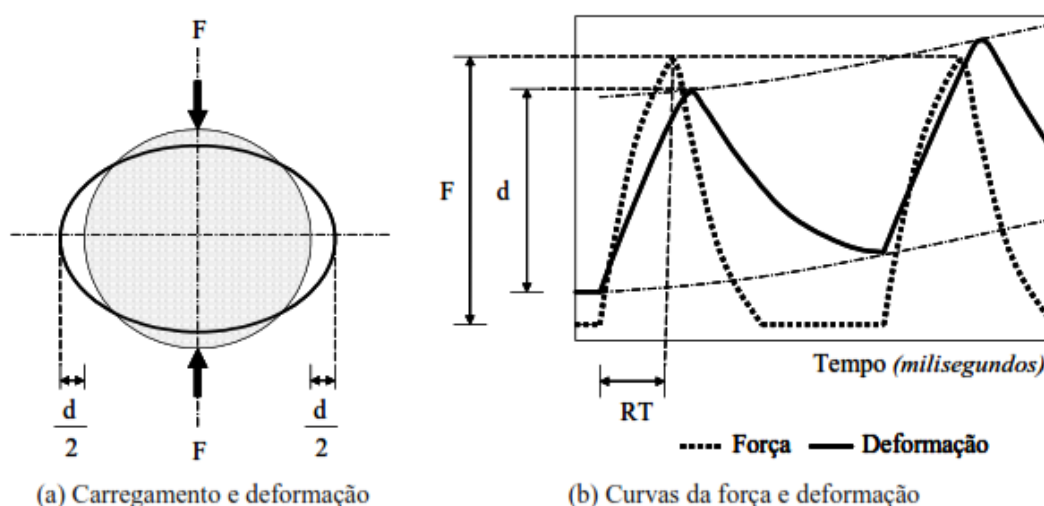


Figura 3.4 - Princípio de carregamento e deformação do provete durante o ensaio de tração indireta (Neves e Correia, 2006)

Nestas condições de carregamento dos provetes o módulo de rigidez (S_m) para cada carga é calculado com base na expressão (3.5).

$$S_m = \frac{F \times (v + 0,27)}{(d \times h)} \quad (3.5)$$

Onde,

S_m - Módulo de rigidez do provete para cada carga [MPa];

F - Amplitude da carga [N];

ν - Coeficiente de Poisson do provete à temperatura de ensaio;

d - Deformação total segundo a direção diametralmente perpendicular ao plano de atuação da carga [mm];

h - Espessura do provete [mm].

Segundo Teixeira (2000), esta metodologia apresenta diversas vantagens, tais como, a facilidade de obtenção de provetes cilíndricos, quer por compactação em laboratório, quer por carotagem *in situ*; a simplicidade da técnica de ensaio e a interpretação de resultados; o estado da tensão verificado do tipo biaxial e a rotura do provete que ocorre numa secção de tensões de tração uniformes e máximas. Quanto ao módulo de rigidez das misturas, obtido pelo ensaio de compressão diametral, verifica-se que existe uma tendência para obter valores mais elevados do que nos restantes ensaios (flexão e compressão axial).

Em cada ensaio, o provete é submetido à aplicação de 5 cargas repetidas, antecedidas de uma fase de pré-carregamento de forma a ajustar o sistema de aplicação de carga ao provete (a norma EN 12697-26 (2004) recomenda 10 repetições). O ensaio é realizado segundo duas direções diametraais, ortogonais entre si, definindo-se o módulo de rigidez do provete como o valor médio das duas direções, em condições de tensão controlada, sendo o controlo de impulsos efetuado pelo *software* do equipamento. O programa admite as seguintes simplificações para o cálculo do estado de tensão dentro do provete e para a avaliação da carga que lhe é aplicada (Batista, 2004):

- O provete está submetido a um estado de tensão plana;
- O comportamento é elástico linear;
- O material é homogéneo e isotrópico;
- O coeficiente de *Poisson* é constante e conhecido (assume-se que para uma temperatura de ensaio de 20 °C tem o valor de 0,35);
- O carregamento aplicado corresponde a uma carga de “cutelo”.

A determinação do módulo de rigidez por tração indireta é feita através da variação do valor estimado para a percentagem de emulsão (1 % acima e 1 % abaixo) em 3 provetes cilíndricos para cada uma das percentagens.

5) Ensaio de desempenho

Os ensaios de desempenho deverão ser realizados para avaliar o cumprimento dos requisitos, bem como a confirmação da escolha da percentagem ótima de emulsão. Neste sentido são realizados ensaios de resistência à deformação (*wheel tracking*), de resistência à fadiga (flexão em 4 pontos em provetes prismáticos) e de sensibilidade à água.

Resistência à deformação permanente

Para avaliar a resistência à deformação permanente recorre-se ao ensaio de simulação em pista de laboratório (“wheel tracking test”), segundo o preconizado na norma europeia EN12697-22: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking*), num equipamento de pequenas dimensões (*small size device*) com acondicionamento ao ar, através do procedimento B. Segundo a norma, para estas condições devem ser utilizados dois provetes (prismáticos). O ensaio termina quando se atingem os 10 000 ciclos de carga aplicados ou quando o sulco atinge uma profundidade de 20 mm.

A temperatura de ensaio a utilizar durante o ensaio varia consoante o local onde será instalada a mistura betuminosa. O estudo elaborado por Freire (2002) acerca da temperatura a usar neste tipo de ensaios para misturas aplicadas em camadas de desgaste tinha como referência as zonas climáticas propostas por Baptista (1999) (Figura 3.5) e os métodos de previsão das temperaturas de serviço dos pavimentos desenvolvidos por Picado-Santos (1994).

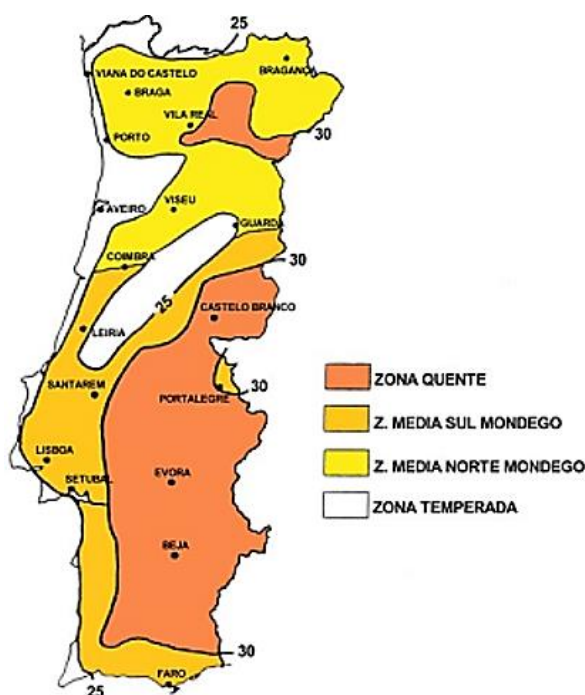


Figura 3.5 - Zonas climáticas em Portugal Continental (Baptista, 1999)

As temperaturas a utilizar, consoante a zona climática onde se irá aplicar a mistura betuminosa, propostas por Freire (2002) apresentam-se no Quadro 3.3, contudo o autor refere que as MBT não atingem 60 °C como temperatura superficial nas camadas de base.

Quadro 3.3 - Temperaturas a adotar no estudo da deformação permanente de pavimentos em Portugal Continental (Freire, 2002)

Zona climática	Temperatura [°C]
Zona quente	60
Zona média a sul e a norte do Mondego	45
Zona temperada	40

Os parâmetros mais importantes a calcular para o procedimento B, de acordo com a EN 12697-22, são a profundidade média da rodeira no final do ensaio (R_D) e o declive máximo da rodeira (WTS_{air}), sendo que este se calcula através da expressão (3.6).

$$WTS_{air} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \text{ [mm/10}^3 \text{ ciclos de carga]} \quad (3.6)$$

Onde,

WTS_{air} - Declive máximo da rodeira;

$d_{10\,000}$ e $d_{5\,000}$ - Deformação após 10 000 e após 5 000 ciclos de carga [mm].

Dado que em Portugal não existem limites preconizados para este tipo de ensaios, utiliza-se como valores de referência os apresentados nas especificações espanholas (OC, 2008).

Resistência à Fadiga

A resistência à fadiga foi determinada de acordo com o preconizado pela norma europeia EN 12697-24: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue*) através do equipamento de ensaio de flexão em quatro pontos (4PBT-PR - *Four-point bending test*) (Anexo D) com provetes prismáticos.

Este ensaio consiste em submeter o provete à flexão, com rotação e translação livres em todos os pontos de carga e de apoio, através dos dois pontos internos na direção vertical, perpendicular ao eixo longitudinal do provete sendo aplicada uma carga sinusoidal. Esta carga cria um momento constante e por conseguinte uma tensão constante entre os dois pontos interiores. Na Figura 3.6 apresentam-se os princípios básicos do equipamento de ensaio com flexão em quatro pontos.

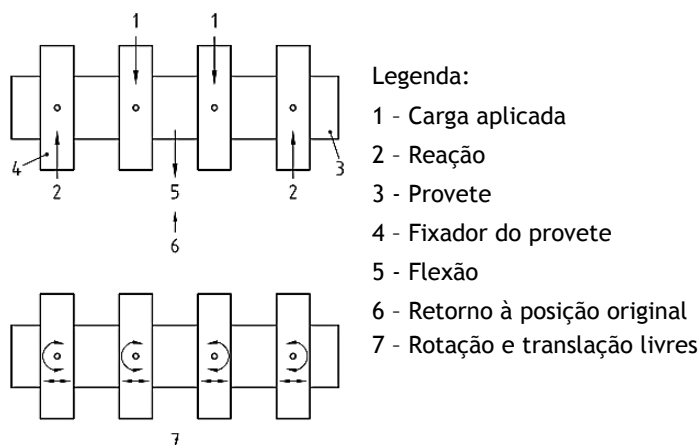


Figura 3.6 - Princípios básicos do equipamento de ensaio de 4PBT-PR (EN 12697-24, Anexo D)

As leis de comportamento do comportamento à fadiga obtidas em laboratório relacionam o número de repetições de carga correspondente à rotura por fadiga desse material (N) com a extensão de tração máxima aplicada em cada ciclo (ϵ). Desta forma, os resultados obtidos foram interpretados com base na lei de fadiga, de acordo com a expressão (3.7).

$$\varepsilon = A \cdot N^B \quad (3.7)$$

Onde,

ε - Extensão de tração [$\mu\text{m}/\text{m}$];

A, B - Coeficientes determinados experimentalmente;

N - Número de aplicações de carga até à rotura.

Juntamente com a lei da fadiga habitualmente recorre-se também a duas variáveis para avaliar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, são elas a resistência à fadiga para a extensão de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ (N_{100}) e a extensão para uma resistência à fadiga de 1 milhão de ciclos (ε_6). A norma define que o ensaio termina quando se atinge 50 % do módulo de rigidez inicial do provete. Em Portugal não existem valores limites definidos para a resistência à fadiga.

Sensibilidade à água

A sensibilidade à água é avaliada de acordo com a norma europeia EN 12697-12: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*). Este ensaio consiste no diferente acondicionamento de dois grupos de 3 provetes e na comparação da resistência à tração em compressão diametral.

Após o acondicionamento dos provetes conforme descrito na norma EN 12697-12 (2003) procede-se ao ensaio à compressão diametral, de acordo com a norma europeia EN 12697-23: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of specimens*), com carga aplicada à velocidade de 50 ± 2 mm/min.

A resistência conservada em tração indireta (ITSR - *Indirect tensile strength ratio*) e a resistência à tração em compressão diametral (ITS) são calculadas pelas expressões (3.8) e (3.9), respetivamente.

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d} [\%] \quad (3.8)$$

Onde,

ITSR - Resistência conservada em tração indireta;

ITS_w - Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes imersos;

ITS_d - Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes “a seco”.

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dh} [GPa] \quad (3.9)$$

Onde,

ITS - Resistência à tração em compressão diametral;

P - Resistência máxima média [kN];

D - Diâmetro do provete [mm];

h - Altura do provete [mm].

Dado que em Portugal, não existem limites definidos para a camada de base, podem tomar-se como referência os estipulados pelas especificações espanholas (OC, 2008), adotando-se então o valor de 80 % para a resistência conservada em tração indireta para misturas betuminosas aplicadas em camadas de base.

De acordo com a norma europeia EN 12697-23 (2003) a rotura do provete pode ser classificada, após inspeção visual, nas categorias apresentadas na Figura 3.7.

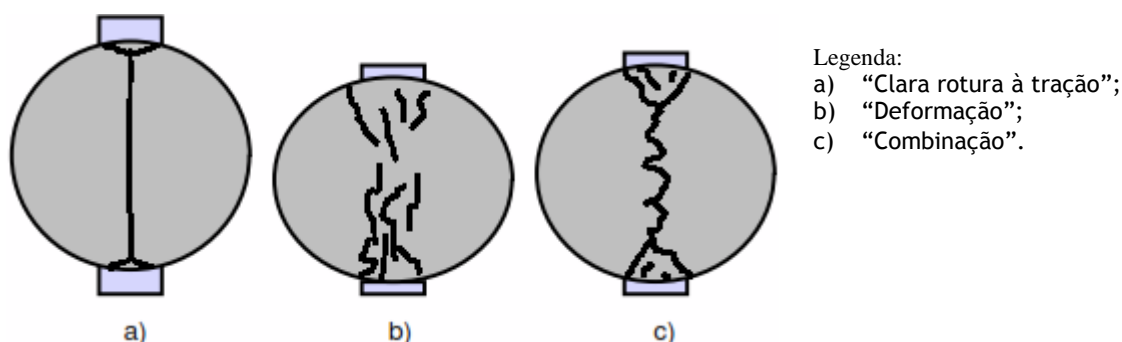


Figura 3.7 - Tipo de rotura do provete para o ensaio de tração indireta (EN 123697-23).

5-a) Satisfaz os requisitos para os ensaios de desempenho

Caso não se verifique o cumprimento dos requisitos dos ensaios de desempenho, deve proceder-se a ajustes na fórmula de base. Repetindo novamente o método de formulação desde o ponto 2).

Definindo-se posteriormente a fórmula para execução da mistura após a realização de um troço experimental. Sempre que se verifiquem alterações nas características da mistura betuminosa recuperada ou em algum outro componente da mistura, deverá ser estudada uma nova fórmula de trabalho.

6) Definição da fórmula da mistura

Caso se cumpram os limites definidos para os ensaios de desempenho, deve realizar-se um troço experimental, que represente o mais possível as condições que se irão verificar em obra e efetuar ensaios de módulo de rigidez por tração indireta, bem como ensaios de desempenho.

Se os resultados obtidos para o troço experimental não estiverem em concordância com os obtidos em laboratório deve proceder-se novamente a ajustes da fórmula de mistura, repetindo a metodologia de formulação desde o ponto 2).

No capítulo seguinte é descrito todo o trabalho experimental realizado. Dado que o objetivo do presente estudo é validar a metodologia de formulação de MBRT proposta por Dinis-Almeida (2010), todas as etapas acima explanadas foram seguidas de forma rigorosa.

CAPÍTULO 4

TRABALHO EXPERIMENTAL

4 - TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 - Introdução

O trabalho experimental desenvolvido teve como objetivo validar a metodologia de formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas (MBRT) com base na determinação do módulo de rigidez por tração indireta, proposta por Dinis-Almeida (2010), anteriormente apresentada na secção 3.4.

O trabalho experimental pode ser dividido em três fases: caracterização dos materiais usados e definição da composição granulométrica, formulação da mistura através do módulo de rigidez e ensaios de desempenho.

Foram produzidas 5 misturas betuminosas, 4 MBRT (duas para cada material fresado, uma com 100 % de incorporação e outra com introdução de agregado natural, para corrigir a granulometria da mistura) e uma mistura betuminosa a quente (MBQ) só com agregados naturais, usada como mistura de referência.

Os ensaios laboratoriais foram realizados nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI).

4.2 - Caracterização dos materiais usados

A caracterização dos agregados naturais e do material fresado (MF) foi realizada através de vários ensaios: análise granulométrica, massa volúmica, absorção de água, resistência à fragmentação pelo método de *Los Angeles* e determinação da percentagem de betume envelhecido (no caso do material fresado).

4.2.1 - Ligantes betuminosos

Para a mistura betuminosa a quente foi escolhido como ligante o betume asfáltico 35/50 da *CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.* (CPP), visto ser um betume correntemente usado na construção de estradas em Portugal e a sua gama de penetração ser próxima da pretendida para o ligante final das MBRT (30 10^{-1} mm). Este é um betume indicado para misturas com temperaturas de fabrico entre 162 °C a 166 °C e temperaturas de compactação entre 152 °C a 156 °C. As características relativas ao betume usado na MBQ estão descritas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Características relativas ao betume usado (Betume asfáltico 35/50, CPP)

Propriedades	Norma	Resultados	Limites
Penetração 25°C, 0,1 mm	EN 1426	40	35 a 50
Ponto de amolecimento, °C	EN 1427	51,2	50 a 58

O ligante adotado para a produção das MBRT foi a emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta RECIEMUL 90 (C60B7) da CPP, visto ser uma emulsão especialmente usada em misturas betuminosas recicladas temperadas. As suas características de aplicação são ideais para temperaturas de fabrico de 90 °C. O seu teor em betume permite obter uma viscosidade que possibilita o perfeito envolvimento de todo o material a reciclar, por outro lado, o betume usado na produção da emulsão tem uma composição e consistência adequada a regenerar o ligante envelhecido presente no material fresado. No Quadro 4.2 apresentam-se as características relativas à emulsão usada, fornecidos pela CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.

Quadro 4.2 - Características da emulsão betuminosa usada (RECIEMUL 90, CPP)

Propriedades	Norma	Resultados
Viscosidade STV, s	EN 12846	37
Peneiração, % m/m	EN 1429	0,01
Carga das particulas	EN 1430	Positiva
Conteúdo de ligante (por cont. água), %	EN 1428	60,8
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s) 0,1 mm	EN 1426	110

4.2.2 - Material fresado

O material fresado usado nos ensaios laboratoriais era proveniente da obra de beneficiação da A23 junto a Castelo Branco (MF-A23) e da obra de beneficiação ao quilómetro 9 da EN346 entre Alcaria e Capinha (MF-EN346).

A determinação da percentagem de betume envelhecido presente no material fresado foi efetuada nos Laboratórios do DECA da UBI através da incineração em mufla, segundo o preconizado pela norma europeia EN 12697-39: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition*). Na Figura 4.1 apresentam-se algumas imagens relativas ao ensaio de determinação da percentagem de betume envelhecido por incineração.



Figura 4.1 - Determinação da percentagem de betume envelhecido

No Quadro 4.3 apresentam-se os resultados obtidos.

Quadro 4.3 - Percentagem de ligante envelhecido

Amostra	Pb _F [%]
MF-A23	5,1
MF-EN346	4,8

O betume envelhecido contido no MF-A23 foi analisado após extração e recuperação pela *Aurélio Martins Sobreiro & Filhos, S.A.* (AS, 2010) através do método de centrifugação, de acordo com a norma europeia EN 12697-1: 2000 (*Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content*). Obtendo-se o resultado de 5,1 % igual ao obtido por incineração em mufla (5,1 %). Segundo o referido estudo, o material fresado não possui qualquer tipo de matéria estrada, enquadrando-se assim na categoria F1, de acordo com o preconizado no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2009).

No Quadro 4.4 apresentam-se os resultados da caracterização do betume envelhecido presente no material fresado da A23, determinados por *Aurélio Martins Sobreiro & Filhos, S.A.* (AS, 2010)

Quadro 4.4 - Caracterização do betume envelhecido do MF-A23 (AS, 2010)

Ensaio	AS, 2010	Valor normativo (EP, 2009)	Norma
Penetração	15,3 mm	≥ 15	EN 1426: 2007
Anel e Bola	62,3 °C	≤ 70	EN 1427: 2007

O ligante envelhecido contido no material fresado da EN346 foi analisado após extração pela *PROAS Betunes CEPSA*, obtendo-se o valor de 4,5 %. Este valor é ligeiramente inferior ao obtido através da incineração do MF em mufla, onde se obteve o valor de 4,8 %. No Quadro 4.5 apresentam-se os resultados da caracterização do ligante envelhecido, obtidos pela *PROAS Betunes CEPSA*.

Quadro 4.5 - Caracterização do betume envelhecido do MF-EN346 (*PROAS Betunes CEPSA*)

Ensaio	PROAS Betunes CEPSA	Valor normativo (EP, 2009)	Norma
Penetração	4,0 mm	≥ 15	EN 1426: 2007
Anel e Bola	85,7 °C	≤ 70	EN 1427: 2007

Supondo que o betume de origem do pavimento da EN346 teria uma gama de penetração de 35/50 ou 50/70, visto serem as mais usuais em Portugal, a penetração que apresenta atualmente, bem como a temperatura de amolecimento, sugerem um betume bastante envelhecido.

4.2.3 - Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados são de origem granítica (brita 6/15, brita 15/25 e pó de pedra) provenientes de uma das maiores pedreiras da Beira Interior explorada pela empresa *J. Bartolomeu, Lda.* situada junto à Ribeira da Meimoa, na Quinta da Caçoa, concelho do Fundão.

4.2.4 - Massa volúmica

A massa volúmica dos agregados foi determinada em conformidade com a norma europeia EN 1097-6: 2000 (*Tests of mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*).

Para a análise do pó de pedra e do material fresado foi usado o método do densímetro e uma amostra com cerca de 500 g e o cálculo da massa volúmica foi feito através da expressão (4.1), sendo o resultado arredondado às dezenas. Para a análise da brita 6/15 e da brita 15/25 foi adotado o método do cesto metálico com uma amostra de 2000 g, o cálculo da massa volúmica foi efetuado através da expressão (4.2).

$$\delta_{densimetro} = \frac{M_1}{M_1 + M_{3a} - M_{2a}} \cdot \rho_w \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.1)$$

$$\delta_{cesto\ metálico} = \frac{M_1}{M_1 + M_{2b} - M_{3b}} \cdot \rho_w \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.2)$$

Onde,

δ - Massa volúmica do agregado [kg/m³];

M_1 - Massa do agregado saturado com superfície seca [kg];

M_{2a} - Massa densímetro com o agregado e com água até ao traço de referência [kg];

M_{3a} - Massa do densímetro com água até ao traço de referência [kg];

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m³];

M_{2b} - Massa do cesto metálico, imerso [kg];

M_{3b} - Massa do cesto metálico com a amostra, imerso [kg].

No Quadro 4.6 apresentam-se os resultados obtidos para a massa volúmica dos agregados.

Quadro 4.6 - Massa volúmica dos agregados

Massa volúmica dos agregados [kg/m ³]	
Pó de pedra	2640
Brita 6/15	2690
Brita 15/25	2690
RA-A23	2660
RA-EN346	2630

4.2.5 - Absorção de água

A absorção de água foi determinada apenas para os agregados naturais, de acordo com a norma europeia EN 1097-6: 2000 (*Tests of mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*).

A absorção de água foi calculada através da expressão (4.3), sendo os resultados obtidos apresentados no Quadro 4.7.

$$A = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot \rho_w [\%] \quad (4.3)$$

Onde,

A - absorção de água do agregado [%];

M_1 - Massa da amostra saturada com superfície seca [kg];

M_2 - Massa da amostra seca até massa constante [kg];

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m³].

Quadro 4.7 - Absorção de água dos agregados naturais

Absorção de água [%]	
Pó de pedra	0,55
Brita 6/15	0,20
Brita 15/25	0,20

4.2.6 - Resistência à fragmentação

A resistência à fragmentação foi determinada apenas para a brita 6/15 e para a brita 15/25 através do método de *Los Angeles*, segundo a norma europeia EN 1097-2: 2000 (*Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*).

O cálculo do coeficiente de *Los Angeles* (LA) foi efetuado através da expressão (4.4). Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.8.

$$LA = \frac{M - m}{50} [\%] \quad (4.4)$$

Onde,

LA - Coeficiente de *Los Angeles* [%];

M - massa da amostra inicial [kg];

m - massa do material retido no peneiro 1,6 mm [kg].

Quadro 4.8 - Resistência à fragmentação - Coeficiente de *Los Angeles*

<i>Los Angeles</i> [%]	
Brita 6/15	24
Brita 15/25	20

4.2.7 - Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados foi realizada pelo método da peneiração, de acordo com a norma europeia EN 933-1: 2000 (*Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution, sieving method*).

Os resultados do ensaio são apresentados no Quadro 4.9 e as respetivas curvas granulométricas no gráfico da Figura 4.2. A análise granulométrica do material fresado foi realizada após extração do betume envelhecido.

Quadro 4.9 - Análise granulométrica dos agregados

Abertura dos peneiros [mm]	Percentagem de material acumulado passado [%]				
	Pó de pedra	Brita 6/15	Brita 15/25	MF-A23	MF-EN346
25	100	100	97	100	99
19	100	100	70	98	99
12,5	100	39	12	90	86
10	100	17	5	70	77
4	78	0	0	47	52
2	55	0	0	35	37
1	41	0	0	27	26
0,5	27	0	0	20	17
0,125	6	0	0	7	6
0,063	2	0	0	2	1
Resíduo	0	0	0	0	0

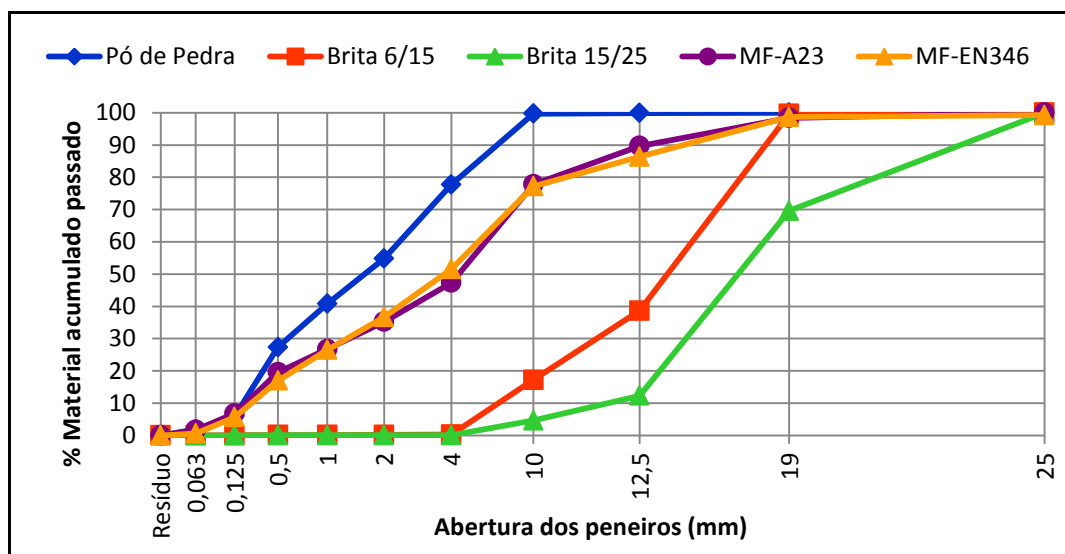


Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados

4.3 - Composição granulométrica das misturas betuminosas

Após a queima do material fresado e a determinação da sua granulometria verificou-se a conformidade das amostras de material fresado com os limites estabelecidos no Caderno de Encargos (EP, 2009) para material betuminoso recuperado.

O estudo da composição granulométrica das misturas betuminosas foi efetuado para camada de base, devido ao facto do desempenho das MBRT ainda não estar claramente caracterizado, ou seja, ainda não existirem dados suficientes acerca do desempenho a longo prazo destas misturas. Assim, o fuso escolhido foi o Fuso II, dado ser o indicado para camadas de

pavimento com espessura entre 6 a 10 cm, como é o caso da camada de base, para a qual se fez a formulação da mistura. No Quadro 4.10 apresentam-se os limites do Fuso II e os valores obtidos na granulometria para o material fresado da A23 e da EN346.

Quadro 4.10 - Fuso granulométrico para material betuminoso recuperado (EP, 2009)

Abertura dos peneiros [mm]	Fuso II (EP, 2009)		MF-A23	MF-EN346
	Limite inferior	Limite superior		
40	100	100	100	100
32	80	100	100	100
20	62	89	98	99
12,5	49	77	90	86
8	31	58	-	-
4	19	42	47	52
2	2	20	35	37
0,25	0	10	-	-
0,063	0	3	2	1

Da análise do Quadro 4.10 conclui-se que ambas as amostras de material fresado possuem uma quantidade de finos superior ao previsto nos limites.

Devido à inexistência de limites definidos para as misturas betuminosas recicladas temperadas, utilizaram-se os limites estabelecidos para as misturas betuminosas a quente, seguindo-se a recomendação/conclusão do trabalho realizado por Dinis-Almeida (2010). Desta forma, adotaram-se os limites estabelecidos no Caderno de Encargos referentes a camadas de misturas betuminosas a quente para AC20 Base (MB). No Quadro 4.11 apresentam-se os limites do fuso granulométrico para AC20 Base (MB).

Quadro 4.11 - Limites do fuso granulométrico para AC20 Base (MB) (EP, 2009)

Abertura dos peneiros [mm]	AC20 Base (MB)		MF-A23	MF-EN346
	Limite inferior	Limite superior		
31,5	100	100	100	100
20	90	100	98	99
12,5	57	86	90	86
4	34	49	47	52
2	26	41	35	37
0,5	12	26	20	17
0,125	4	14	7	6
0,063	2	7	2	1

Analisando o Quadro 4.11, verifica-se que o material fresado não cumpre pontualmente os limites, ou seja as misturas betuminosas com incorporação de 100 % de material fresado terão de ser corrigidas para que cumpram os limites estipulados no Caderno de Encargos.

A nomenclatura usada para as misturas betuminosas produzidas encontra-se no Quadro 4.12, bem como a descrição das misturas.

Quadro 4.12 - Nomenclatura adotada e descrição das misturas betuminosas produzidas

Tipo de mistura	Designação	Descrição
Mistura betuminosa reciclada temperada	A23	Mistura produzida com incorporação de 100 % de material fresado da A23
	EN346	Mistura produzida com incorporação de 100% de material fresado da EN346
	A23-C	Mistura betuminosa produzida com material fresado da A23 e brita 15/25
	EN346-C	Mistura betuminosa produzida com material fresado da EN346 e brita 15/25
Mistura betuminosa a quente	MBQ	Mistura produzida com agregado natural

Desta forma, optou-se por acrescentar brita 15/25 como corretor granulométrico, uma vez que é um procedimento expedito e que pode ser facilmente adotado pelas centrais betuminosas. Para que as misturas cumprissem os limites do fuso foram estudadas várias combinações de material fresado e brita 15/25. No Quadro 4.13 apresenta-se a percentagem de cada agregado usado para a produção das misturas betuminosas, de forma a estar em conformidade com o fuso granulométrico. As curvas granulométricas das misturas betuminosas estão representadas no gráfico da Figura 4.3.

Quadro 4.13 - Composição das misturas betuminosas (%)

Agregado	A23	EN346	A23-C	EN346-C	MBQ
Pó de pedra	-	-	-	-	40
Brita 6/15	-	-	-	-	30
Brita 15/25	-	-	10	-	30
MF-A23	100	-	90	20	-
MF-EN346	-	100	-	80	-

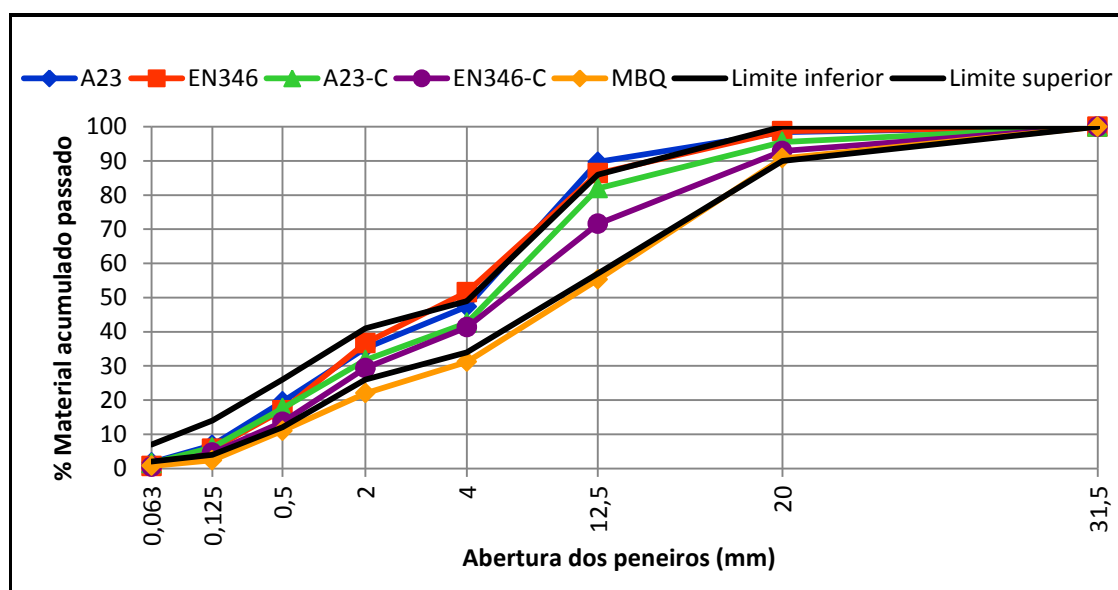


Figura 4.3 - Curvas granulométricas das misturas betuminosas

Através da análise da Figura 4.3 é possível aferir que a mistura A23 tem pouco material de dimensões entre 20 e 12,5 mm e a mistura EN346 pouco material com dimensões entre 12,5 e 4 mm. As misturas betuminosas recicladas temperadas com material fresado e agregado natural, apresentam-se em conformidade com os limites do fuso granulométrico presente no Caderno de Encargos (EP, 2009).

A mistura de referência, produzida a quente com agregados naturais não está em conformidade com os limites do fuso pois deveria ter mais finos. Apesar do trabalho laboratorial se ter iniciado com outras misturas betuminosas de referência, que teoricamente cumpriam o fuso granulométrico, após os ensaios de caracterização das misturas compactadas essas soluções foram abandonadas. Embora a mistura MBQ não cumpra o fuso granulométrico (encontra-se ligeiramente abaixo do limite inferior) era a que possuía características volumétricas que mais se assemelhavam às misturas betuminosas recicladas temperadas. Sendo o objetivo da mistura de referência exatamente este, possuir características semelhantes às misturas recicladas temperadas possibilitando a sua comparação, tomou-se esta como mistura de referência.

4.4 - Estimativa do conteúdo de ligante da mistura final

A percentagem de ligante da mistura final (Pb_R) em relação ao peso da mistura de agregados foi determinada com base na expressão empírica (3.3), baseando-se na superfície específica dos agregados (após extração do betume, no caso do material fresado).

$$Pb_R = 0,035 \cdot a + 0,045 \cdot b + K \cdot p_{200} + F \quad (3.3)$$

Sendo:

Pb_R - Estimativa da percentagem de betume total da mistura reciclada em relação à massa total da mistura;

a - Proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 2,36 mm;

b - Proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 2,36 mm;

K - Constante em função da quantidade de material que passa no peneiro nº 200, pode ter os seguintes valores;

K = 0,15 para 11 a 15 % de passados no peneiro nº 200

K = 0,18 para 6 a 10 % de passados no peneiro nº 200

K = 0,20 para 0 a 5 % de passados no peneiro nº 200

p_{200} - Proporção ponderal de elementos de dimensão inferior a 0,075 mm;

F - Fator de absorção dos agregados com valores entre 0 e 2 %, na ausência de informação usar o valor de 0,7 %.

A estimativa da quantidade de ligante final foi feita com base na superfície específica, no entanto, também foi considerada a penetração do ligante envelhecido presente no material fresado e a penetração do ligante novo da mistura reciclada. Calculando-se então a

percentagem de betume novo a adicionar à mistura, através da expressão (3.4), esta percentagem é em relação à massa total da mistura.

$$Pb_N = Pb_R - \left(\frac{Pb_{MBR} \cdot TR}{100} \right) \quad (3.4)$$

Onde:

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

Pb_R - Percentagem de betume estimada em (3.3);

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

TR - Taxa de reciclagem.

A aplicação das expressões (3.4) e (3.5) resultou nos valores apresentados no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 - Percentagem de ligante da mistura final (Pb_R) e de ligante novo (Pb_N)

Mistura betuminosa	Pb_R [%]	Pb_N [%]
A23	4,86	-0,28
EN346	4,73	-0,11
A23-C	4,83	0,20
EN346-C	4,65	0,78
MBQ	4,58	Não aplicável

Dado que o ligante novo é uma emulsão betuminosa (RECIEMUL 90) é necessário converter a percentagem de ligante novo (Pb_N) em percentagem de emulsão (E). A conversão é feita através da expressão (4.5).

$$E = \frac{Pb_N}{X} \times 100 \text{ [%]} \quad (4.5)$$

Onde,

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

X - Teor em betume da emulsão betuminosa [%];

E - Percentagem de emulsão betuminosa a adicionar à mistura.

No Quadro 4.15 apresentam-se os resultados obtidos para a percentagem de emulsão a adicionar às misturas betuminosas recicladas temperadas, conseguidos através da aplicação da expressão (4.5).

Quadro 4.15 - Percentagem de emulsão a adicionar à mistura

Mistura betuminosa	E [%]
A23	-0,46
EN346	-0,18
A23-C	0,32
EN346-C	1,3

As misturas betuminosas com 100 % de incorporação de material fresado apresentam, segundo o resultado das expressões (3.4) e (4.5), ligante a mais. Por isso a percentagem de ligante novo (Pb_N) a adicionar é negativa. É de assinalar que a aplicação da expressão (3.4) por si só é insuficiente. Desta forma, efetuou-se um estudo sobre a penetração do ligante final (betume envelhecido + emulsão betuminosa), de forma a estimar a quantidade de emulsão betuminosa a adicionar, através da expressão (3.1) apresentada na secção 3.2.2 do Capítulo 3.

$$\log(\text{pen}_R) = TRb \cdot \log(\text{pen}_F) + (1 - TRb) \cdot \log(\text{pen}_N) \quad (3.1)$$

Onde,

pen_R - Penetração do ligante final da mistura reciclada [10^{-1} mm];

TRb - Taxa de reciclagem de betume determinada por:

$$TRb = \frac{TR \cdot Pb_F}{Pb_R}$$

pen_F - Penetração do ligante envelhecido do material fresado [10^{-1} mm];

pen_N - Penetração do ligante novo [10^{-1} mm].

À semelhança de outros autores (Baptista, 2006) estipulou-se que a penetração do ligante final da mistura betuminosa reciclada (pen_R) deveria ser no mínimo de $30 \cdot 10^{-1}$ mm, valor normalmente considerado em Portugal para as misturas recicladas. No Quadro 4.16 apresentam-se os resultados obtidos no estudo de penetração do ligante final das misturas betuminosas recicladas temperadas.

Quadro 4.16 - Resultados do estudo de penetração do ligante final das MBRT

Mistura betuminosa	TR [%]	Pb_F [%]	pen_F [10^{-1} mm]	pen_N [10^{-1} mm]	Pb_R [%]	Pb_N [%]
A23	100	5,14	15,3	110	7,8	2,66
EN346	100	4,84	4	110	12,3	7,46
A23-C	90	5,14	15,3	110	7,0	2,38
EN346-C	80	4,84	4	110	9,9	6,0

Analisando o Quadro 4.16 constata-se que os resultados obtidos para a percentagem de ligante novo a adicionar às misturas produzidas com material fresado da EN346 são bastante elevados comparativamente com os obtidos para as misturas com material fresado da A23. Isto deve-se ao facto da penetração do ligante envelhecido presente no material fresado ser bastante reduzida ($4 \cdot 10^{-1}$ mm). Ou seja, teoricamente necessita de uma maior percentagem de ligante novo para rejuvenescer (aumentar a penetração do ligante final). Para confirmar estas quantidades obtidas teoricamente (apresentadas no Quadro 4.16) procedeu-se à produção de diferentes misturas com diferentes quantidades de emulsão com o objetivo de, através de observação visual, avaliar a ocorrência de escorrimento da emulsão. Optou-se por iniciar a produção das misturas com uma percentagem de 2 % de emulsão visto ser o valor correntemente adotado. Como esta percentagem a mistura apresentava um aspeto muito seco, com um revestimento deficiente dos agregados. Variou-se a percentagem de emulsão

em 1 %, com 3 % o aspeto da mistura era aceitável, apresentando um bom revestimento dos agregados. Variou-se novamente a percentagem de emulsão produzindo misturas com 4 % de emulsão, sendo que com esta percentagem a mistura apresentava já um ligeiro excesso de emulsão. Produzindo-se assim, 3 provetes cilíndricos para as percentagens de 2 %, 3 % e 4 %. A mistura de referência foi produzida com 5 % de betume 35/50.

4.5 - Determinação da percentagem ótima de emulsão

A determinação da percentagem ótima de emulsão foi efetuada através da determinação do módulo de rigidez por tração indireta. Para isso, os provetes foram preparados e moldados segundo a norma europeia EN 12697-35: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing*). Moldaram-se 3 provetes para cada percentagem de ligante de cada mistura, perfazendo um total de 39 provetes.

Cada provete necessitou de 1100 g de agregados, aproximadamente. Para cada percentagem de emulsão pesou-se a quantidade de cada um dos agregados, necessária para a produção dos 3 provetes, de acordo com a composição apresentada no Quadro 4.13. Os agregados foram pré-aquecidos a 120 °C para as MBRT e a 160 °C para a mistura betuminosa de referência, sendo que nesta, também se colocou o betume a aquecer à mesma temperatura. Os provetes foram fabricados individual e manualmente durante 60 segundos, para que os agregados se apresentassem totalmente revestidos.

Num recipiente colocou-se a quantidade necessária de agregados para fabricar um provete e adicionou-se a emulsão à temperatura ambiente, para as MBRT e o betume à temperatura de 160 °C, para a mistura de referência. Na produção das misturas A23-C e EN346-C, a brita 15/25 foi previamente envolvida em parte da emulsão betuminosa utilizada no fabrico do provete, dado que caso não se efetuasse esta operação o agregado natural não ficaria totalmente revestido.

Utilizaram-se os moldes Marshall, com $63,5 \pm 2,5$ mm de altura e 101,6 mm de diâmetro, para moldar os provetes. Colocou-se o conjunto constituído pelo colar, molde e placa de base, previamente untado com óleo na base do compactador, segurando-se firmemente com o suporte de fixação, sendo colocado um filtro de papel no fundo do molde. Em seguida, verteu-se cerca de metade da mistura no molde e distribuiu-se a mistura com 15 pancadas na periferia e 10 no interior, repetiu-se o processo para a outra metade da mistura, no final colocou-se outro filtro de papel no topo do provete. A compactação realizou-se com o compactador de impacto (Figura 4.4), segundo a norma europeia EN 12697-30: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor*) com 50 pancadas. A temperatura de compactação deveria ter sido de 90 °C, contudo, por lapso, os provetes foram compactados a 70 °C, o que terá efeito diminutivo na rigidez e na baridade dos provetes.

Ao fim de 4 horas, os provetes foram desmoldados, utilizando um dispositivo mecânico, que permite deslizar de forma uniforme o provete através do molde, sem afetar as suas dimensões. Os provetes foram colocados sobre uma superfície plana à temperatura de 20 °C. Na Figura 4.5 apresentam-se os provetes produzidos para as diferentes misturas.



Baridade saturada com superfície seca

A baridade saturada com superfície seca das misturas betuminosas compactadas foi determinada de acordo com o preconizado na norma europeia EN 12697-6: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*).

No Quadro 4.17 apresentam-se os valores da densidade da água em função da temperatura utilizados no cálculo da baridade.

Quadro 4.17 - Densidade da água em função da temperatura (EN 12697-6: 2003)

Temperatura [°C]	Densidade da água [kg/m ³]
10	999,8
11	999,7
12	999,6
13	999,4
14	999,3
15	999,2
16	999,0
17	998,8
18	998,7
19	998,5
20	998,3

O cálculo da baridade saturada com superfície seca (ρ_{SSD}) foi realizado através da expressão (4.6).

$$\rho_{SSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (4.6)$$

Onde,

ρ_{SSD} - Baridade da mistura compactada saturada com superfície seca [kg/m³];

m_1 - Massa do provete seco [kg];

m_2 - Massa do provete saturado, imerso [kg];

m_3 - Massa do provete saturado com superfície seca [kg];

ρ_w - Densidade da água à temperatura de ensaio [Kg/m³].

No Quadro 4.18 apresentam-se os resultados obtidos para cada uma das misturas betuminosas.

Quadro 4.18 - Baridade saturada com superfície seca

Misturas recicladas temperadas % emulsão	Misturas recicladas temperadas			Mistura a quente	
	2	3	4	% betume	5
A23	2038	2076	2125		
EN346	2153	2208	2235	MBQ	2420
A23-C	2105	2070	2141		
EN346-C	2196	2214	2203		

Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta

O módulo de rigidez por tração indireta foi determinado segundo o Anexo C da norma europeia EN 12697-26: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*). O ensaio foi realizado no equipamento *Nottingham Asphalt Test* (NAT) nos Laboratórios do DECA da UBI, conforme apresentado na Figura 4.6.

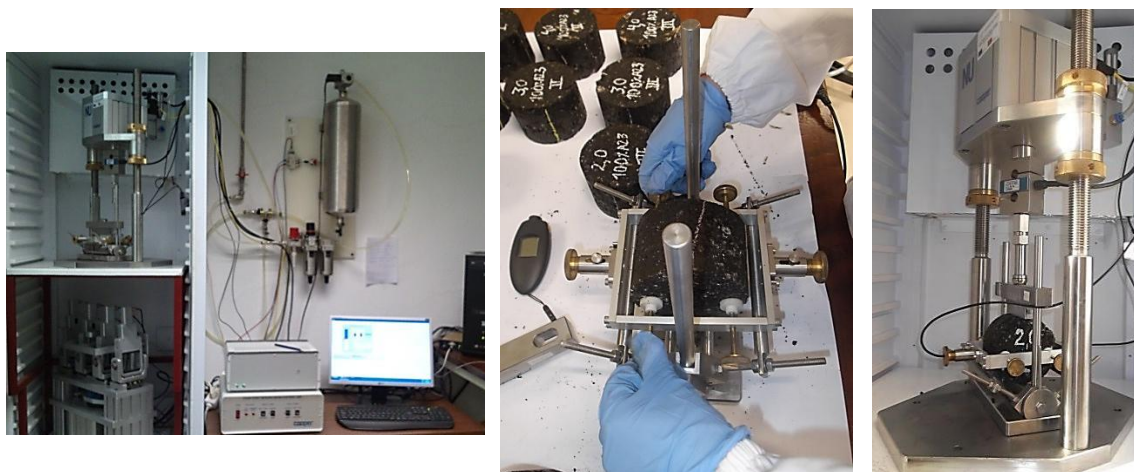


Figura 4.6 - Ensaio de módulo de rigidez

Os parâmetros usados na realização do ensaio foram adotados de acordo com as dimensões dos provetes e consoante a norma europeia EN 12697-26 (2004). No Quadro 4.19 apresentam-se os valores adotados.

Quadro 4.19 - Parâmetros usados na realização do ensaio de módulo de rigidez

Temperatura de ensaio	Diâmetro do provete	Coefficiente de Poisson	RT	Deformação horizontal máxima
20 °C	101,6 mm	0,35	124 ms	5 mm

O equipamento permite a aplicação de uma carga de modo que a máxima tensão de tração horizontal no centro do provete esteja compreendida entre 50 e 700 kPa, adotou-se o valor de 100 kPa para a determinação do módulo de rigidez. O ensaio do módulo de rigidez por tração indireta foi realizado nos 39 provetes com diferentes idades: 1 dia, 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias. No intervalo de tempo entre os ensaios, os provetes foram mantidos a 20 °C.

No Quadro 4.20 apresentam-se os resultados obtidos para cada mistura produzida. Os resultados obtidos no ensaio do módulo de rigidez estão apresentados na Figura 4.7 para as MBRT com 100 % de incorporação e na Figura 4.8 para as MBRT com correção granulométrica.

Quadro 4.20 - Módulo de rigidez médio (média de 3 provetes) [MPa]

Mistura		1 Dia	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
A23	2 %	1222	898	1090	1238	1239
	3 %	1727	1333	1415	1496	1589
	4 %	1826	1265	1347	1327	1390
EN346	2 %	2645	1549	1546	1698	1731
	3 %	2677	2146	2381	1923	1731
	4 %	2179	2086	1962	1652	1805
A23-C	2 %	1962	1961	1267	1855	1815
	3 %	1639	1194	1137	1355	1419
	4 %	1667	1347	1341	1430	1477
EN346-C	2 %	2087	1510	1462	1437	1550
	3 %	1640	1518	1388	1362	1402
	4 %	1664	1294	1248	1314	1274
MBQ	5 %	5362	5003	6161	5466	5365

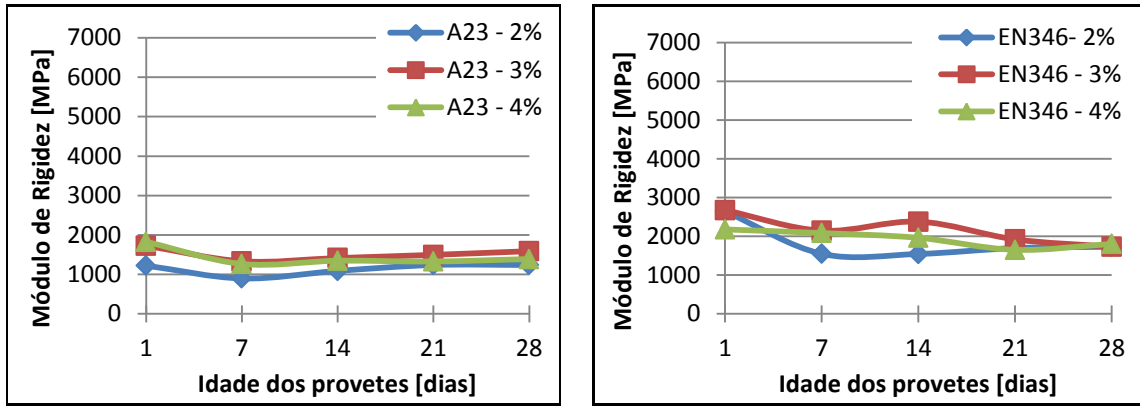


Figura 4.7 - Resultados do módulo de rigidez para as MBRT com 100% de incorporação de material fresado

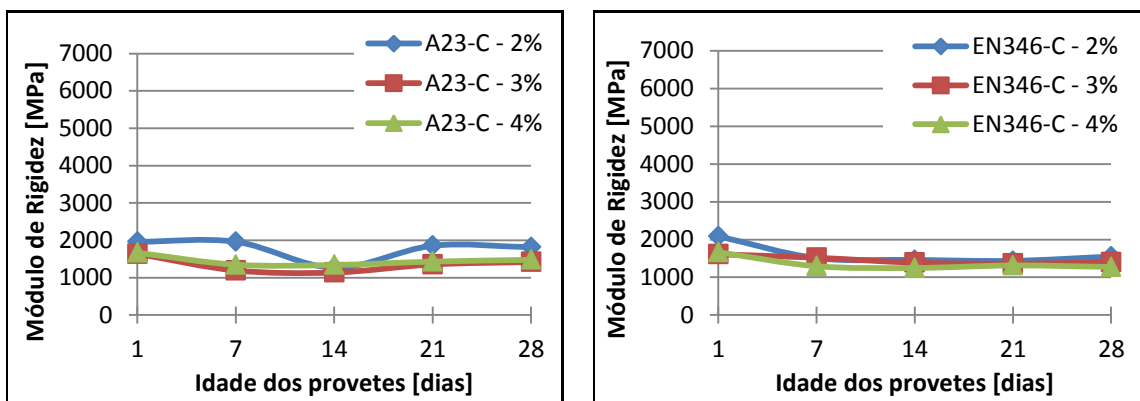


Figura 4.8 - Resultados do módulo de rigidez para as MBRT com material fresado e agregado natural

Na Figura 4.9 apresentam-se os resultados obtidos para a mistura betuminosa a quente (de referência).

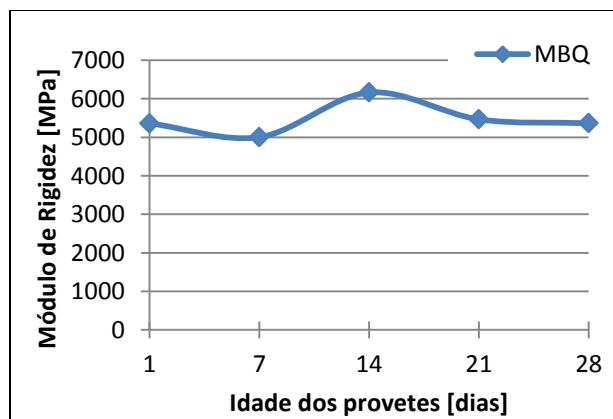


Figura 4.9 - Resultados do módulo de rigidez para a mistura betuminosa a quente

Analisando o gráfico apresentado na Figura 4.7 verifica-se que a mistura EN346 apresenta maiores valores de rigidez comparativamente às restantes MBRT, isto deve-se ao facto de possuir um ligante envelhecido com uma penetração muito reduzida ($4 \cdot 10^{-1}$ mm). Com base na mesma figura é possível aferir que a percentagem de emulsão para a qual se obtêm maiores

valores do módulo de rigidez é 3 %, relativamente às misturas betuminosas com 100 % de incorporação de material fresado (A23 e EN346).

Já no caso das misturas betuminosas com agregado natural e material fresado (A23-C e EN346-C), constata-se que a percentagem de emulsão que possibilita maiores valores de módulo de rigidez é 2 % (Figura 4.8).

A diferença da percentagem ótima de emulsão entre as MBRT deve-se ao facto das misturas A23 e EN346 possuírem uma quantidade de finos superior às misturas A23-C e EN346-C, ou seja, uma superfície específica mais elevada, necessitando assim de uma maior quantidade de emulsão betuminosa.

Apesar de nos gráficos da Figura 4.8 se observar que a percentagem ideal de emulsão para as misturas A23-C e EN346-C é 2 %, optou-se pela utilização de 3 %, uma vez que como foi explicado na secção 4.4 as misturas com 2 % de emulsão não permitiam o total envolvimento dos agregados com o ligante.

Assim, estimou-se que o valor de 3 % de emulsão era o teor ótimo de emulsão para todas as MBRT e procedeu-se à produção de provetes para os ensaios de desempenho de modo a averiguar a estimativa efetuada.

4.6 - Ensaios de desempenho

Os ensaios de desempenho realizados ao longo do trabalho experimental tiveram o objetivo de aferir a composição definida para as misturas. Desta forma, foram realizados os ensaios de deformação permanente, de resistência à fadiga e de sensibilidade à água.

4.6.1 - Ensaio de deformação permanente (*Wheel Tracking*)

O processo utilizado para a avaliar a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas foi o ensaio de simulação em pista de laboratório (*“wheel tracking test”*), realizado de acordo com o preconizado na norma europeia EN12697-22: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking*), num equipamento de pequenas dimensões (*small size device*) e acondicionamento ao ar, através do procedimento B (Figura 4.10) nos Laboratórios do DECA da UBI. O procedimento de ensaio termina quando se atingem os 10 000 ciclos de carga aplicados ou quando o sulco atinge uma profundidade de 20 mm. Segundo a norma, são necessários no mínimo 2 provetes para este procedimento.



Figura 4.10 - Equipamento *wheel tracking* de pequenas dimensões (*small size device*)

Foram produzidos 3 provetes para cada MBRT e 2 provetes para a mistura de referência, com 30x30x6 cm de dimensões. As misturas betuminosas foram produzidas de acordo com a norma europeia EN 12697-35 (2004), de forma semelhante às produzidas para os provetes do ensaio de módulo de rigidez, diferindo apenas no facto de terem sido produzidas mecanicamente. A compactação realizou-se com placa vibratória, de acordo com a norma europeia EN 12697-32: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 32: Laboratory compaction of bituminous mixtures by vibratory compactor*) em duas partes (a meio do molde e no final) durante 60 segundos. Enquanto se procedia à compactação a restante mistura estava na estufa, por forma a garantir que a compactação fosse efetuada a 90 °C. As lajetas foram desmoldadas 24 h depois, sendo colocadas em seguida sobre uma superfície plana a 20 °C. Na Figura 4.11 ilustram-se algumas das etapas mais importantes no fabrico dos provetes.



Figura 4.11 - Principais etapas da produção dos provetes para o ensaio *wheel tracking*.

Quando os provetes atingiram os 14 dias determinou-se a baridade saturada com superfície seca, de acordo com a norma europeia EN 12697-6 (2003), de forma análoga à descrita anteriormente na secção 4.5. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 - Baridade média das lajetas (média de 3 lajetas MBRT e 2 lajetas MBQ)

Mistura	Baridade [kg/m^3]
A23	2025
EN346	2223
A23-C	2162
EN346-C	2235
MBQ	2320

O ensaio foi realizado passado um tempo de cura de 28 dias em que as lajetas estiveram à temperatura de 20 °C, a temperatura de realização do ensaio foi de 45 °C, as lajetas foram acondicionadas à temperatura de ensaio por um período mínimo de 4 h, conforme indicado na norma.

No gráfico da Figura 4.12 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente em pista, segundo o procedimento B.

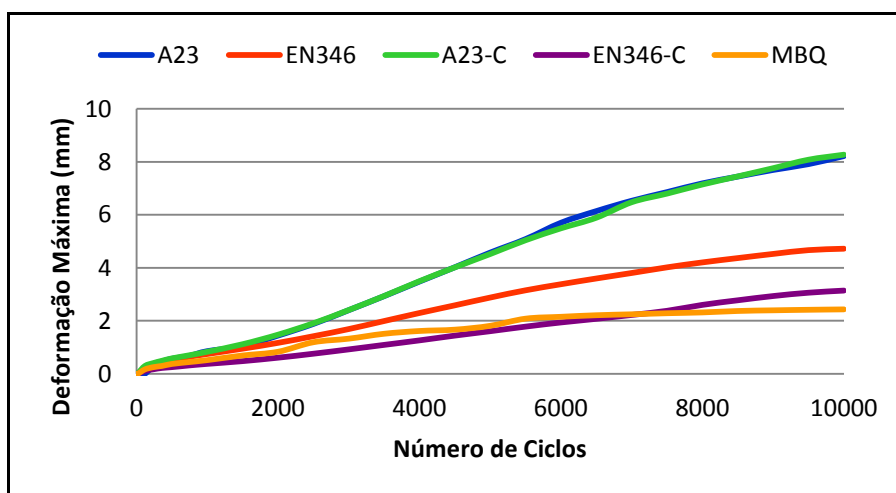


Figura 4.12 - Resultados do ensaio de deformação permanente em pista

Na Figura 4.12 pode observar-se que a mistura A23 e a mistura A23-C têm um comportamento muito semelhante. No caso das misturas com material fresado da EN346, o seu andamento é um pouco distinto sendo que a EN346-C apresenta menos deformação. Pode então concluir-se que as misturas com menor resistência à deformação permanente são as que possuem material fresado proveniente da A23. Sendo a que apresenta maior resistência à deformação permanente a mistura de referência. Comparando os valores obtidos com os valores da penetração do ligante final, pode concluir-se que, quanto maior a penetração do ligante final das MBRT, menor será a deformação permanente sofrida pela mistura e por conseguinte, maior será a sua resistência à deformação causada por cargas repetidas.

Os parâmetros mais importantes a calcular para o procedimento B, de acordo com a EN 12697-22, são a profundidade média da rodeira no final do ensaio (R_D) e o declive máximo da rodeira (WTS_{air}), sendo que esta se calcula através da expressão 4.5.

$$WTS_{air} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \text{ [mm/10}^3 \text{ ciclos de carga]} \quad (4.5)$$

Onde,

WTS_{air} - Declive máximo da rodeira;

$d_{10\,000}$ e $d_{5\,000}$ - Deformação após 10 000 e 5 000 ciclos de carga [mm].

No Quadro 4.22 apresentam-se os resultados obtidos para a média da profundidade da rodeira no final do ensaio e para o declive máximo.

Quadro 4.22 - Resultados do ensaio de deformação permanente

Mistura	WTS_{AIR} [mm/10 ³ ciclos de carga]	R_D [mm]
A23	0,65	8,31
EN346	0,37	4,72
A23-C	0,75	8,27
EN346-C	0,31	3,14
MBQ	0,12	2,43

Em conformidade com o exposto anteriormente na secção 4.5 e em comparação com as restantes MBRT, as misturas com material fresado da EN346 apresentam-se como sendo as que possuem melhor resistência à deformação permanente. Do Quadro 4.22 resulta que a adição de agregado natural às MBRT por aumentar a quantidade de agregados grosso permite a formação de um esqueleto mineral mais consistente e um aumento da resistência à deformação permanente.

Em Portugal, não existem valores preconizados para os resultados do ensaio de simulação de pista em laboratório. Contudo, no Quadro 4.29 apresentam-se os valores limites definidos em Espanha, de acordo com a norma EN 12697-22 (procedimento B), para camadas de desgaste de pavimentos.

Quadro 4.23 - Declive máximo da rodeira a 60 °C para o ensaio de deformação permanente (OC, 2008)

Zona térmica estival	WTS [mm/10 ³ ciclos de carga]		
	Categoria de tráfego pesado		
	T00 e T0	T1	T2 e T3
Quente	0,07	0,07	0,1
Média	0,07	0,1	-
Temperada	0,1	-	-

Analisando o Quadros 4.22 e o Quadro 4.23 constata-se que nenhuma mistura cumpre os limites. É de notar que estes limites estão definidos para camadas de desgaste e que as misturas estudadas no presente trabalho foram formuladas para camadas de base, onde a temperatura de 60 °C nunca será a temperatura superficial da camada, pelo que os limites para a deformação permanente não seriam tão exigentes.

Dinis-Almeida (2010) obteve valores médios de profundidade da rodeira de 14,60 mm para MBRT com 100 % de material fresado e 7,77 mm para MBRT com material fresado e agregado natural, comparando estes valores do Quadro 4.28 constata-se que as misturas betuminosas produzidas apresentam melhor resistência à deformação permanente que as referidas anteriormente, à exceção da A23-C.

4.6.2 - Ensaio de fadiga (Flexão em 4 pontos)

O ensaio de fadiga foi realizado de acordo com o preconizado pela norma europeia EN 12697-24: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue*), através do equipamento de ensaio de flexão em quatro pontos (4PBT-PR - *Four-point bending test*) (Anexo D) com provetes prismáticos (40x5x5 cm).

As misturas betuminosas foram produzidas de acordo com a norma europeia EN 12697-35 (2004), de forma análoga à produção das misturas para as lajetas do ensaio de deformação permanente, descrito anteriormente. O cálculo das quantidades de material a utilizar no fabrico das misturas foi efetuado através da baridade obtida para os provetes do ensaio de módulo de rigidez (Quadro 4.18). Tendo sido divididas em quatro partes iguais, sendo a mistura elaborada mecânica e individualmente para cada uma das partes. Fabricou-se uma lajeta (no molde apresentado na Figura 4.13-a) que posteriormente se cortou para se obterem os 6 provetes com as dimensões desejadas (40x5x5 cm) (Figura 4.13-b). A compactação foi efetuada a 90 °C com cilindro de rolos (Figura 4.13-c).



Figura 4.13 - Compactação das lajetas com cilindro de rolos

As lajetas foram desmoldadas passado 4 horas. Quando atingiram a idade de 14 dias foram cortadas em 6 vigotas (40x5x5 cm) e passado 7 dias procedeu-se à determinação da baridade saturada com superfície seca para cada um dos provetes.

A baridade foi determinada de acordo com a norma europeia EN 12697-6 (2003), no Quadro 4.24 apresentam-se os resultados obtidos.

Quadro 4.24 - Baridade média das vigotas (média de 6 vigotas)

Mistura	Baridade [kg/m ³]
A23	2339
EN346	2429
A23-C	2384
EN346-C	2419
MBQ	2392

As leis de comportamento do comportamento à fadiga obtidas em laboratório, geralmente, relacionam o número de repetições de carga correspondente à rotura por fadiga desse material (N) com a extensão de tração máxima aplicada em cada ciclo (ϵ). Desta forma, os resultados obtidos foram interpretados com base na lei de fadiga, de acordo com a expressão (4.6).

$$\epsilon = A \cdot N^B \quad (4.6)$$

Onde,

ϵ - Extensão de tração [$\mu\text{m}/\text{m}$];

A, B - Coeficientes determinados experimentalmente;

N - Número de aplicações de carga até à rotura.

Juntamente com a lei da fadiga, usualmente são usadas mais duas variáveis para avaliar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, a resistência à fadiga para a extensão de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ (N_{100}) e a extensão para uma resistência à fadiga de 1 milhão de ciclos.

O ensaio realizou-se a 20 °C, com carregamento sinusoidal sem período de repouso, com frequência de aplicação de cargas de 10 Hz e em extensão controlada para três níveis (200, 400 e 600 $\mu\text{m}/\text{m}$). A norma europeia EN 12697-24 (2004) admite que a rotura do provete ocorre quando este atinge 50 % do módulo de rigidez inicial, que é determinado ao fim da aplicação de 100 ciclos.

No Quadro 4.25 apresentam-se os valores obtidos para o número de aplicações de carga até à rotura das vigotas.

Quadro 4.25 - Número de ciclos até à rotura

Extensão [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Vida à fadiga [ciclos]				
	A23	EN346	A23-C	EN346-C	MBQ
200	180 744	5 854 499	227 499	234 557	83 378
200	121 730	635 999	64 102	362 860	1 075 499
400	11 999	111 999	38 499	18 500	25 499
400	38 999	63 499	32 999	17 499	89 999
600	1 200	1 845	8 499	1 507	1 209
600	1 173	2 359	1 500	6 699	599

Na Figura 4.14 apresentam-se as leis de fadiga obtidas para as vigotas ensaiadas.

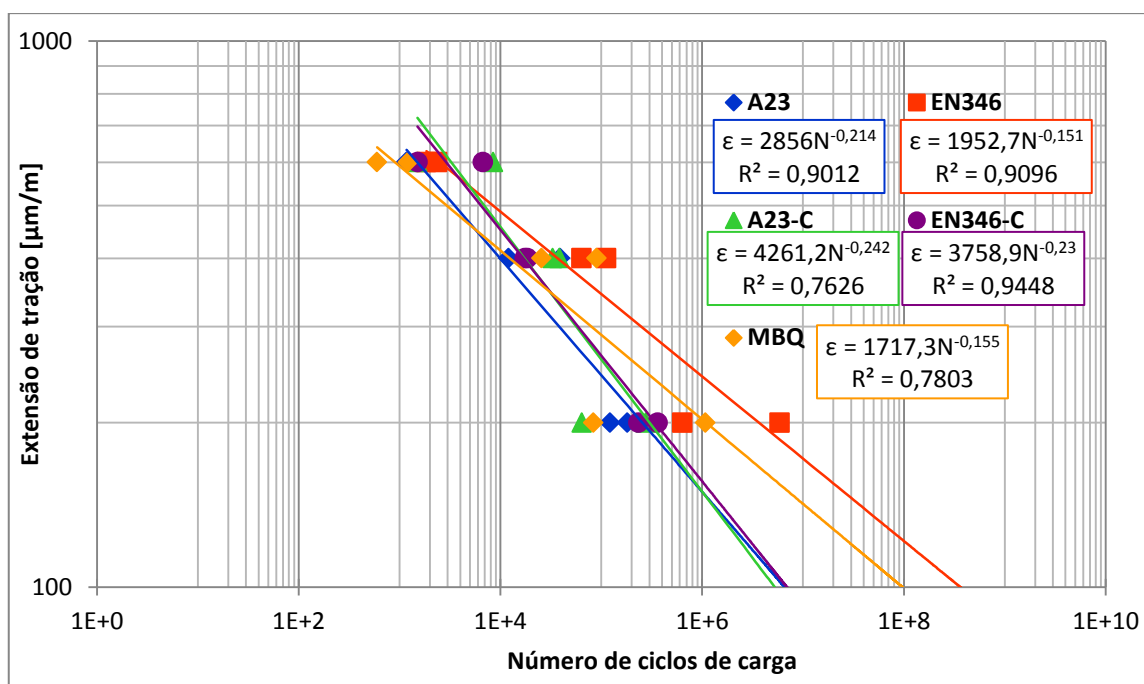


Figura 4.14 - Leis de fadiga

No Quadro 4.26 apresentam-se os valores obtidos para as variáveis que definem as leis de fadiga.

Quadro 4.26 - Coeficientes obtidos para as leis de fadiga

Coeficiente	A23	EN346	A23-C	EN346-C	MBQ
A	2856	1952,7	4261,2	3758,9	1717,3
B	-0,214	-0,151	-0,242	-0,230	-0,155
R ²	0,9012	0,9096	0,7626	0,9448	0,7803
ε ₆	149	242	151	157	202
N ₁₀₀	6,35E+06	3,53E+08	5,42E+06	7,05E+06	9,26E+07

Da análise do Quadro 4.26 conclui-se que a mistura que apresenta maior resistência à fadiga é a mistura com incorporação de 100 % de material fresado da EN346 e por outro lado, a que apresenta menor resistência é a mistura A23-C. Sendo que a lei de fadiga da mistura EN346-C é a que apresenta melhor coeficiente de correlação (R²).

Comparando os resultados obtidos para a extensão a um milhão de ciclos com os de outros autores (Baptista, 2006; Dinis-Almeida, 2010) é possível aferir que, regra geral, as misturas ensaiadas apresentam uma maior resistência à fadiga.

4.8.3 - Ensaio de sensibilidade à água

A sensibilidade à água foi determinada de acordo com a norma europeia EN 12697-12: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*). O ensaio realizado consistiu no diferente acondicionamento de dois grupos constituídos por 3 provetes cada um e na comparação da resistência à tração em compressão diametral.

Os provetes foram preparados de forma análoga aos do módulo de rigidez. A separação dos provetes em dois grupos fez-se de acordo com a altura média e a baridade saturada com superfície seca (Quadro 4.27).

Quadro 4.27 - Baridade média e altura média dos grupos de provetes (média de 3 provetes)

Mistura	Altura média [mm]		Baridade [kg/m ³]	
	“a seco”	“imerso”	“a seco”	“imerso”
A23	60,2	57,4	2254	2355
EN346	55,9	55,2	2435	2431
A23-C	58,2	58,9	2335	2345
EN346-C	65	65,8	2196	2208
MBQ	61,6	60,7	2407	2397

Imediatamente a seguir aos provetes serem retirados da água foram ensaiados à compressão diametral, de acordo com a norma europeia EN 12697-23: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*). Tendo a carga sido aplicada à velocidade de 50 ± 2 mm/min.

No Quadro 4.28 apresentam-se os resultados obtidos para a resistência conservada em tração indireta (ITSR - *Indirect tensile strength ratio*) e para a resistência à tração em compressão diametral (ITS). Sendo que a ITRS e a ITS são calculadas pelas expressões (4.7) e (4.8), respetivamente.

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d} [\%] \quad (4.7)$$

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} [GPa] \quad (4.8)$$

Onde,

ITSR - Resistência conservada em tração indireta;

ITS_w - Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes imersos [kPa];

ITS_d - Valor médio da resistência à tração indireta dos provetes “a seco” [kPa];

ITS - Resistência à tração em compressão diametral [kPa];

P - Resistência máxima média [kN];

D - Diâmetro do provete [mm];

H - Altura do provete [mm].

Quadro 4.28 - Resultados do ensaio de tração indireta

Mistura	$P_{méd}$ [kN]		ITS [kPa]		ITSR [kPa]
	“a seco”	“imerso”	“a seco”	“imerso”	
A23	9,85	15,06	1040	1640	100
EN346	12,6	11,58	1410	1310	93
A23-C	15,88	12,00	1710	1280	75
EN346-C	4,01	2,27	390	220	56
MBQ	11,09	9,35	1130	970	86

Dado que em Portugal, não existem limites definidos para a camada de base, optou-se por usar os estipulados pelas especificações espanholas (OC, 2008). Estas estipulam o limite de 80 % para a resistência conservada em tração indireta para misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste. Desta forma, verifica-se que apenas as misturas betuminosas recicladas temperadas com correção granulométrica (A23-C e EN346-C) não cumprem o limite estabelecido. As misturas betuminosas temperadas produzidas com incorporação de 100 % de material fresado são as que apresentam maior resistência à sensibilidade à água. É então possível concluir que quanto maior for a taxa de reciclagem (maior quantidade de material fresado) nas misturas betuminosas temperadas, melhor será, em princípio, a sensibilidade à água da mistura, tal como concluiu Hill (2011) nos seus estudos. Por outro lado, os resultados obtidos contrariam a conclusão dos estudos de Hurley e Prowell (Hurley e Prowell, 2005a,b; Hurley e Prowell, 2006) que referiam que as misturas betuminosas temperadas possuem uma menor resistência à tração indireta, indicando a existência de mais retenção de água nas MBT do que nas MBQ.

De acordo com a norma europeia EN 12697-23 (2003) a rotura do provete pode ser classificada, após inspeção visual na categoria de “clara rotura à tração” (Figura 4.15).

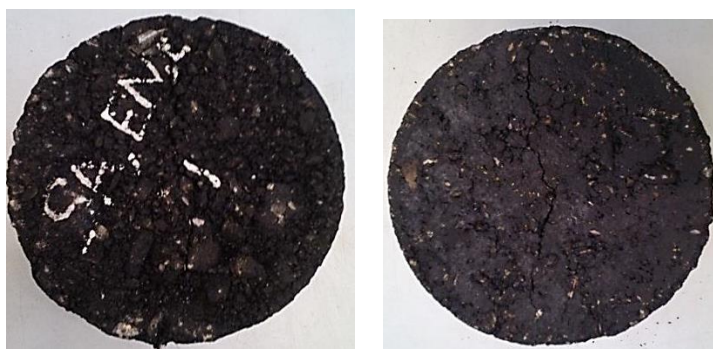


Figura 4.15 - Tipo de rotura do provete para o ensaio de tração indireta (EN 12697-23).

Uma vez que é possível observar claramente a linha diametral, em alguns casos com formação de pequenas áreas triangulares fissuradas, na região de apoio do prxovete (topo e base).

Em suma, as misturas betuminosas temperadas produzida com incorporação de material fresado da EN346 são as que apresentam melhores resultados nos ensaios de caracterização, exceto no ensaio de avaliação da sensibilidade à água, onde é superada pela mistura A23.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 - Principais conclusões

A realização do presente estudo teve como principal objetivo a validação de uma nova metodologia de formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas (MBRT) com emulsão betuminosa, visando a incorporação de material reciclado até 100%, através de avaliação prática com base no módulo de rigidez por tração indireta. A importância deste trabalho prende-se com o facto não existir uma metodologia de formulação para MBRT homologada pelas entidades competentes. Habitualmente recorre-se a metodologias de formulação de misturas betuminosas a quente (MBQ) que provam ter um bom comportamento para as misturas betuminosas temperadas. O trabalho ganha mais relevância pelo aspeto ambiental devido ao facto dos agregados naturais, usualmente utilizados na produção das misturas betuminosas, serem recursos limitados e como tal devem ser substituídos por outro tipo de material que promova a sustentabilidade, como por exemplo, o material fresado proveniente dos trabalhos de reabilitação de pavimentos rodoviários degradados. O facto das misturas betuminosas serem normalmente produzidas a elevadas temperaturas (entre 150 a 180 °C) contribui para o aumento da emissão de dióxido de carbono, poluindo o ambiente e inviabilizando o cumprimento das especificações ambientais, cada vez mais rigorosas, sendo por isso urgente reduzir a temperatura de produção das misturas betuminosas.

Ao longo do trabalho foram abordadas as principais vantagens da utilização de MBT e da reciclagem de pavimentos e foram descritos os principais métodos de formulação das MBQ, por serem os que melhor se adaptam às MBRT.

No que concerne à metodologia de formulação a validar, primeiramente, procedeu-se à análise granulométrica do material fresado após extração e caracterização do ligante envelhecido (percentagem, penetração a 25 °C e temperatura de amolecimento). Em seguida, avaliou-se o cumprimento das exigências granulométricas e procedeu-se à adição de agregado natural. Feita a caracterização dos materiais a utilizar na produção da mistura, estimou-se a percentagem de ligante final, através de uma expressão empírica (baseada na superfície específica dos agregados) e no estudo da penetração do ligante final. Posteriormente fez-se variar a percentagem de emulsão em 1 % e procedeu-se ao fabrico de provetes cilíndricos para análise do módulo de rigidez. O módulo de rigidez por tração indireta foi utilizado para otimizar o conteúdo de emulsão da mistura betuminosa. Por último, procedeu-se à caracterização mecânica das misturas através de ensaios de deformação permanente (*wheel tracking*), de fadiga (flexão em 4 pontos) e de sensibilidade à água.

Aquando da otimização da percentagem de emulsão, verificou-se que as misturas betuminosas produzidas com incorporação de 100 % de material fresado necessitavam de mais emulsão que as misturas betuminosas produzidas com material fresado e agregado natural. Isto pode ser

justificado à luz da superfície específica dos agregados, isto é, dado que as misturas com 100 % de fresado tem um teor de finos superior ao das misturas que contêm agregado natural, conseqüentemente, também têm uma maior superfície específica, necessitando de uma percentagem de emulsão superior. Relativamente aos resultados obtidos no ensaio de módulo de rigidez por tração indireta as misturas que apresentaram valores mais elevados foi a mistura betuminosa a quente, sendo que relativamente às MBRT a mistura EN346 obteve maiores valores médios de módulo de rigidez. O que se pode dever ao facto do ligante envelhecido presente no material fresado da EN346 estar bastante envelhecido e possuir uma penetração bastante reduzida ($4 \cdot 10^{-1}$ mm) o que diminui significativamente a penetração do ligante final, tornando a mistura mais rígida.

A resistência à deformação permanente foi maior para a mistura MBQ e para a mistura EN346-C. As misturas com material fresado da A23 apresentam menor resistência à deformação permanente devido ao facto de terem maior penetração do ligante final. Nenhuma das misturas cumpre os limites estabelecidos nas especificações, contudo é de realçar que estes limites são para ensaios realizados a 60 °C e que como as MBRT se aplicam em camadas de base, nunca atingem este valor como temperatura superficial da camada. Não obstante, os valores obtidos para a deformação permanente podem ser benéficos na camada de base, na medida em que se o pavimento possuir uma maior deformabilidade terá uma maior capacidade de prevenir o aparecimento e a propagação de fissuras. Os valores obtidos apesar de não estarem concordantes com os limites da especificação são melhores que os obtidos por outros autores (Dinis-Almeida, 2010).

A mistura que apresenta maior resistência à fadiga é a EN346. Comparando os resultados obtidos para a extensão para uma resistência à fadiga de 1 milhão de ciclos com os de outros autores (Baptista, 2006; Dinis-Almeida, 2010) é possível aferir que, regra geral, as misturas ensaiadas apresentam uma maior resistência à fadiga.

Relativamente à sensibilidade à água, as únicas misturas que não cumprem o limite de 80 % para a resistência conservada em tração indireta são as misturas betuminosas com adição de agregado natural. Sendo as misturas betuminosas com 100 % de material fresado mais resistentes à ação da água que a mistura betuminosa a quente. Contrariando a conclusão dos estudos de Hurley e Prowell (Hurley e Prowell, 2005a,b; Hurley e Prowell, 2006) que dizia que as misturas betuminosas temperadas possuem uma menor resistência à tração indireta, indicando a existência de mais retenção de água nas MBT do que nas MBQ. Por outro lado, suporta a conclusão de Hill (2011) que refere que a adição de material fresado nas misturas betuminosas temperadas poderá melhorar a sensibilidade à água deste tipo de misturas.

Com base na experiência adquirida ao longo da realização do presente trabalho foi possível concluir que um dos parâmetros de qualidade com mais importância neste tipo de misturas betuminosas é a temperatura de compactação. Devido a ser um fator com bastante influência

na baridade das misturas e conseqüentemente na porosidade. Sendo que quanto menor for a temperatura de compactação menor será a baridade e maior será a porosidade, tendo isto um efeito redutor da rigidez e um aumento da sensibilidade à água.

Por fim, considera-se que a metodologia de formulação é válida e que fornece resultados seguros e concisos bem como que as misturas com incorporação de material reciclado até uma taxa de 100% possuem um bom desempenho. As misturas betuminosas recicladas temperadas apresentam-se assim, como uma alternativa viável às tradicionais misturas betuminosas a quente.

Espera-se que com a realização deste trabalho se tenha contribuído para o estudo da formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas, assim como para a divulgação e incentivo à utilização deste tipo de misturas.

São necessários mais estudos relativos ao desempenho das misturas betuminosas recicladas temperadas, bem como a realização e acompanhamento de obras com este tipo de misturas. As entidades governamentais devem ter um papel mais ativo na promoção destas misturas, visto que se apresentam como uma solução viável e mais económica comparativamente com as soluções tradicionais. Desta forma, deveriam ser fornecidos incentivos para que os Donos de Obra optassem pela aplicação de misturas betuminosas recicladas temperadas.

5.2 - Trabalhos futuros

O trabalho experimental realizado careceu da realização de um troço experimental para confirmação da fórmula da mistura. Apesar dos resultados obtidos serem satisfatórios seria importante a realização de um troço experimental de forma a poder avaliar, mais uma vez, o desempenho destas misturas *in situ* e assim aumentar a confiança na aplicação desta nova tecnologia por parte dos Donos de Obra.

A realização e monitorização de obras com este tipo de misturas betuminosas é imprescindível pois permitiriam a obtenção de dados do desempenho a longo prazo, inexistentes até à data.

De modo a que as misturas betuminosas recicladas temperadas se possam tornar numa prática corrente é imprescindível o desenvolvimento de legislação e de diretivas relacionadas com controlo de qualidade e com a metodologia de formulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAPA (2001). *Warm Mix Asphalt - A State of the Art Review*. Advisory Note 17, Australian Asphalt Pavement Association, Kew, Victoria, Australia, June. Disponível em: http://www.warmmixasphalt.com/submissions/33_20071127_AdvisoryNote17.pdf [Consult. 30 Abril 2012].
- AEMA (1981). *Recommended Performance Guidelines*. Asphalt Emulsion Manufacturers Association, Washington, D.C.
- Alconada I. (2006). *Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Mornas*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Setembro.
- Al-Rawashdeh A. (2008). *Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements*. MSc Thesis, Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, November. Disponível em: http://etd.ohiolink.edu/view.cgi?acc_num=ohiou1224252979 [Consult. 27 Abril 2012].
- Antunes M., Batista F. (2009). Reciclagem de pavimentos utilizando ligantes betuminosos. 2^{as} Jornadas CEPSA Betumes/CRP “Poupança: Energia e recursos naturais”. LNEC, Lisboa, Portugal, 7 e 8 Julho. Disponível em: <http://www.crp.pt> [25 Novembro 2012].
- APAO (2006). Asphalt Contributes to Sustainable Solutions. *Centerline*, Asphalt Pavement Association of Oregon, Volume X, Issue 1, Spring, 1-2 pp. Disponível em: <http://www.apao.org/centerline.html> [Consult. 22 Novembro 2012].
- APAO (2009). Warm mix asphalt is wave of the future. *Centerline*, Asphalt Pavement Association of Oregon, Volume XIII, Issue 1, Winter, 1-2 pp. Disponível em: <http://www.apao.org/documents/APAO2009winter.pdf> [Consult. 22 Novembro 2012].
- AS (2010). *Estudo prévio - Empreitada de beneficiação de pavimentos da A23*. Aurélio Martins Sobreiro & Filhos, S.A.
- Baptista A. (1999). *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis. Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Portugal, Fevereiro.

- Baptista A. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central. Contribuição para o seu estudo e aplicação*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, Dezembro.
- Batista F. (2004). *Novas técnicas de reabilitação de pavimentos. Misturas betuminosas densas a frio*. Tese de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Bonfim V. (2000). “Fresagem de pavimentos asfálticos”. Ed. Fazendo Arte, São Paulo.
- Capitão S., Picado-Santos L., Pais J. (2001). *Estabelecimento de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analítica à composição final*. Jornadas de estradas e pontes dos países de língua portuguesa, Lisboa.
- Chowdhury A., Button J. (2008). *A review of warm mix asphalt*. Texas Transportation Institute, Report No. 473700-00080-1, Texas, December. Disponível em: <http://ntl.bts.gov/lib/31000/31200/31288/473700-00080-1.pdf> [Consult. 4 Novembro 2012].
- Croteau J.M., Tessier B. (2008). Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder’s Perspective. In: *2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Toronto. Disponível em: <http://www.tac-atc.ca/english/resourcecentre/proceedings.cfm> [Consult. 28 Outubro 2012].
- David D. (2006). *Misturas asfálticas recicladas a frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, Setembro. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8173/000569382.pdf?sequence=1> [Consult. 11 Maio 2013].
- Dinis-Almeida M. (2010). *Caracterização e formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas em central*. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Dezembro.
- EAPA (1998). *Diretivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas*. European Asphalt Pavement Association, Holanda. (Batista, 2004).
- EAPA (2008). *Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling*. Position Paper, European Asphalt Pavement Association, 21 May. Disponível em: http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/ [Consult. 22 Novembro 2012].

- EAPA (2010). *The use of warm mix asphalt*. Position Paper, European Asphalt Pavement Association, January. Disponível em: <http://www.eapa.org/publications.php?c=90> [Consult. 17 Abril 2013].
- EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra - Características dos materiais*. Estradas de Portugal, S.A., Vol. 3, Capítulo 14.03, Janeiro.
- Ferreira C. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Dezembro.
- FHWA (1979). *A Basic Asphalt Emulsion Manual*. Manual Series No. 19, Second Edition, FHWA-IP-79-1, The Asphalt Institute, Maryland.
- FHWA (2007). *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, Report 0-5597-1, FHWA, July. Disponível em: <http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf> [Consult. 2 Novembro 2012].
- FHWA (2008b). *Warm Mix Asphalt: European Practice*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-PL-08-007, FHWA, February. Disponível em: <http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf> [Consult. 2 Novembro 2012].
- Fonseca P. (2002). *Reciclagem de pavimentos rodoviários*. 6ª Semana das engenharias, Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Portugal, Abril. Disponível em: http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem_pavimentos.pdf [Consult. 28 Outubro 2012].
- Francken L. (1998). *Bituminous Binders and Mixes*. Rilem Report 17, Cleveland.
- Freire A. (2002). *Deformação permanente de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*. Tese de doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Portugal, Janeiro.
- Fröbel T (2002). Reabilitação de pavimentos usando a reciclagem a frio - Porquê, Quando, Como?. *Colóquio Técnico "Foamed Bitumen: Reciclagem a frio para o Séc. XXI"*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, 12 de Março. (Batista, 2004).
- Gomes L. (2005). *Reciclagem de misturas betuminosas a quente em central*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, Fevereiro.

- Hill B. (2011). *Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Incorporating Reclaimed Asphalt Pavement*. MSc Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA.
- Hurley G., Prowell B. (2005a). *Evaluation of Aspha-Min® Zeolite for Use In Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology. Report 05-04. Auburn University, Auburn, USA. Disponível em: <http://www.eng.auburn.edu/files/centers/ncat/reports/2005/rep05-04.pdf> [Consult. 22 Novembro 2012].
- Hurley G., Prowell B. (2005b). *Evaluation of Sasobit for Use In Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology. Report 05-06. Auburn University, Auburn, USA. Disponível em: <http://www.ncat.us/files/reports/2005/rep05-06.pdf> [Consult. 22 Novembro 2012].
- Hurley G., Prowell B. (2006). *Evaluation of Evotherm for Use In Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology. Report 06-02. Auburn University, Auburn, USA. Disponível em: <http://www.structural-engineering-courses.bece.auburn.edu/research/centers/ncat/files/reports/2006/rep06-02.pdf> [Consult. 22 Novembro 2012].
- Ibarra J. (2003). *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, España, Enero.
- Jenkins K (2000). *Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen*. PhD Thesis, Stellenbosch University.
- Jenkins K., Groot J., van de Ven M., Molenaar A. (1999). Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, a New Process. *7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA)*.
- Kandhal P., Mallick R. (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments - Participant's Reference Book*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Publication N° FHWA-SA-98-042, December. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/> [Consult. 30 Outubro 2012].
- Koenders B., Stoker D., Bowen C., Groot P., Larsen O., Hardy D., Wilms K. (2000). Innovative Processes in Asphalt Production and Application to Obtain Lower Operating Temperatures. *2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona, Spain.
- Kristjansdottir O., Michael L., Muench S., Burke G. (2007). *Assessing the Potential for Warm Mix Asphalt Technology Adoption*. Disponível em: http://www.mannvit.is/media/files/kristjansdottirmuenchmichaelburke_trb.pdf [Consult. 27 Abril 2012].

- Kuennen T. (2004). *Warm Mixes are a Hot Topic*. Better Roads, James Informational Media, Inc., Des Plaines, Illinois, June. (Chowdhury e Button, 2008).
- Maccarrone S., Holleran G., Ky, A. (1994). Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hot Mix. *9th Australian Asphalt Pavement Association (AAPA) International Asphalt Conference*. (Ferreira, 2009).
- McDaniel R., Anderson R. (2001). *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's manual*. NCHRP Report n.º 452, Washington, D.C.
- Miller T., Bahía H. (2010). Establishing a framework for analyzing asphalt pavement sustainability. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 3, Issue 3, 149-155 pp. Disponível em: <http://www.ijprt.org.tw/index.php?page=issue&volume=3&issue=3> [Consult. 11 Maio 2013].
- Moreira J., Pereira P. (2007). Reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento - Novas perspetivas. *VI Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos - Inovação e Novos Desafios*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, 15 e 16 de Novembro. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/8829/1/18-ReutMatFresado.pdf> [Consult. 22 Novembro 2012].
- Neves J., Correia, A. (2006). *Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaios de Tração Indireta por Compressão diametral de Provetes Cilíndricos*. Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho, Número 26, 61-74 pp.
- NYNAS (2009). Asfalto templado, semi-templado y frio: el caso a favor de la sostenibilidad, *Revista Performance - NYNAS Bitumen Magazine*, Edición 01, Otoño, 8-9 pp.
- OC (2008). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Carreteras Y Puentes (PG-3)*. Artículo: 542 - *Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso*. Ministerio de Fomento, Secretaria General de Infraestructuras, Dirección General de Carreteras.
- Picado-Santos L. (1994). *Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, Novembro.
- Prowell B., Hurley G. (2008). *Warm-Mix Asphalt: Best Practices*. National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series 125. Disponível em: <http://www.co-asphalt.com/documents/Warm%20Mix/WMAAll.pdf> [Consult. 2 Maio 2013].

- Rubio M., Martínez G., Baena L., Moreno F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 24, 76-84 pp. Disponível em: www.elsevier.com/locate/jclepro [Consult. 28 Outubro 2012].
- Soto H., Morcilo A., Victória M. (2005). Mezclas semicalientes. Mezclas asfálticas fabricadas en centrales en caliente con emulsión. *Jornada Técnica: Panorama Actual de las Mezclas Bituminosas*, ASEFMA, Palacio de Congresos de Madrid, España, 21 Junio.
- Teixeira A. (2000). *Caracterização da resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas em Equipamento Servopneumático*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Vaitkus A., Cygas A., Laurinavicius A., Perveneckas Z. (2009a). Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Vol. 4, Issue 2, 80-86 pp. Disponível em: http://eelv94plateau.files.wordpress.com/2011/12/hma_wma_lithuania.pdf [Consult. 12 Novembro 2012].
- Vaitkus A., Vorobjovas V., Ziliut L. (2009b). *The Research on the Use of Warm Mix Asphalt for Asphalt Pavement Structures*. Disponível em: http://www.balticroads.org/downloads/27BRC/27BRC_A2_Vaitkus_1.pdf [Consult. 12 Novembro 2012].
- Zaumanis M. (2010). *Warm mix asphalt investigation*. PhD Thesis, Riga Technical University, Lyngby, Denmark.

ACERVO NORMATIVO

EN 933-1: 2000	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution, sieving method.
EN 1097-2: 2000	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.
EN 1097-6: 2000	Tests of mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption.
EN 12697-1: 2000	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content.
EN 12697-5: 2002	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density.
EN 12697-6: 2006	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.
EN 12697-12: 2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.
EN 12697-22: 2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking.
EN 12697-23: 2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.
EN 12697-24: 2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue.
EN 12697-26: 2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness.
EN 12697-29: 2002	Bituminous mixtures - Test method for hot mix asphalt - Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen.
EN 12697-30: 2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor.

- EN 12697-32: 2003 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 32: Laboratory compaction of bituminous mixtures by vibratory compactor.
- EN 12697-35: 2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing.
- EN 12697-39: 2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition.
- EN 13108-8: 2005 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt.