



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Resistência às Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas com Betumes Temperados

Marta Isabel Esteves Duarte

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

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

Covilhã, junho de 2014

Ao meu irmão Miguel e ao Sérgio

AGRADECIMENTOS

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

A realização deste trabalho contou direta ou indiretamente com a colaboração fundamental de diversas pessoas, a quem a autora deseja expressar os seus sinceros agradecimentos:

À Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida, orientadora científica, pela disponibilidade, estímulo e permanente incentivo e, principalmente, pela amizade demonstrada na orientação deste trabalho.

À *Cepsa Portuguesa Petróleos, S.A.*, na pessoa do Eng. Luís Vieira, pelo fornecimento dos ligantes betuminosos.

À *PROAS Betunes Cepsa*, na pessoa do Eng. Antonio García Siller, pela realização dos ensaios de caracterização do material fresado, nos laboratórios de Madrid.

À *Pedreira Agrepor Agregados-Extracção de Inertes SA*, na pessoa do Eng. Luís Carmona, pelo fornecimento dos agregados para a realização do trabalho experimental.

Ao laboratório *Infralab - Laboratório de materiais, unipessoal, Lda.*, em especial ao Sr. Sérgio Patrício pela disponibilidade e troca de conhecimentos.

Ao Sr. Albino e Sr. Félix, técnicos dos laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, pela boa disposição transmitida e pelo valioso apoio prestado na execução do trabalho experimental.

À família, pelo importante e constante apoio e encorajamento dado, durante a realização deste trabalho e constante acompanhamento e motivação ao longo do percurso académico.

Aos verdadeiros amigos, que de alguma forma, sempre souberam transmitir a força necessária, e pelo incansável apoio moral.

Por último, um agradecimento especial ao Sérgio, pela compreensão, apoio e essencialmente pela paciência e carinho dado neste percurso e por estar sempre presente em todos os momentos com o seu sorriso contagiante.

RESUMO

No desenvolvimento das novas tecnologias de pavimentação a grande preocupação passa pela redução das temperaturas nas fases de fabrico e aplicação, implicando uma redução no consumo de combustíveis e de emissões de carbono. Surgem, neste sentido, as misturas betuminosas temperadas, diminuindo os impactos ambientais e, garantindo a trabalhabilidade e desempenho mecânico.

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de um estudo comparativo, no que diz respeito à resistência à deformação permanente, de uma mistura betuminosa tradicional a quente com uma mistura betuminosa temperada. Estudou-se ainda uma mistura betuminosa temperada com incorporação de 30 % de material fresado, dado o seu interesse económico e ambiental.

O estudo inicia-se com a revisão bibliográfica, realizando-se uma breve descrição das misturas betuminosas, análise das tecnologias e comportamento mecânico. Na fase seguinte, define-se a teor de betume com melhor contributo para as características fundamentais da mistura, através do ensaio Marshall, determinando-se a sua composição. Para a caracterização das misturas betuminosas em estudo foram realizados os ensaios de rigidez e sensibilidade à água. O estudo da resistência à deformação permanente realizou-se através do ensaio de pista (*Wheel Tracking*). Por último, fez-se o tratamento dos resultados, análise comparativa das várias misturas estudadas sendo apresentadas as principais conclusões deste estudo com sugestões de trabalhos futuros.

Os resultados obtidos nos diferentes ensaios laboratoriais de caracterização e avaliação do comportamento das diferentes misturas betuminosas revelam que as misturas temperadas apresentam resultados semelhantes às misturas tradicionais a quente, e as misturas temperadas com incorporação de material fresado, apresentam melhores resultados.

Deste modo, este estudo permitiu concluir que as misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado apresentam-se como uma solução viável na reabilitação e construção de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave

Desempenho mecânico; Material fresado; Misturas betuminosas temperadas; Misturas Recicladadas; Resistência à deformação permanente.

ABSTRACT

A major concern in the development of new asphalt paving technologies is reducing temperature at the mixing and placing stages, thus causing lower fuel consumption and carbon emissions. This has led to the warm-mix asphalt technology, which reduces environmental impacts while ensuring workability and mechanical performance.

This dissertation aims to conduct a comparative study between traditional hot-mix asphalt and warm-mix asphalt with regard to resistance to permanent deformation. A warm-mix asphalt with 30% of reclaimed asphalt pavement was also studied, given its economic and environmental interest.

First, a state of art with a brief description of asphalt mixtures, analysis of technologies and mechanical performance was conducted. Next, the bitumen content which better contributes to the fundamental characteristics of the mixture is defined through the Marshall test, and its composition is determined. The indirect tensile stiffness modulus and water sensitivity tests were performed in order to characterise the asphalt mixtures. The study of resistance to permanent deformation was conducted through the wheel tracking test. The results were processed and the comparative analysis of the different mixtures analysed was carried out. Finally, the main conclusions of this study are presented along with suggestions for further research.

The results obtained in different laboratory tests for the characterisation and evaluation of the performance of the different bituminous mixtures show similarities between warm-mix and traditional hot-mix asphalt mixtures. The warm-mix asphalt incorporating reclaimed asphalt pavement shows the best results.

From this study, it can therefore be concluded that warm-mix asphalt incorporating reclaimed asphalt pavement appears a viable solution to the rehabilitation and construction of road pavements.

KEYWORDS

Mechanical Performance; Reclaimed asphalt pavement; Warm mix asphalt; Recycled mixtures; Resistance to permanent deformation.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organização do trabalho.....	2
CAPÍTULO 2 - Misturas betuminosas temperadas	3
2.1 Enquadramento.....	3
2.2 Benefícios da utilização de misturas betuminosas temperadas.....	4
2.2.1 Benefícios Sociais	5
2.2.2 Benefícios Económicos	5
2.2.3 Benefícios Ambientais.....	6
2.3 Desvantagens da utilização de misturas betuminosas temperadas.....	6
2.4 Breve história das misturas betuminosas temperadas.....	7
2.5 Tecnologias para a produção de misturas betuminosas temperadas	9
2.5.1 Aditivos orgânicos	10
2.5.2 Aditivos químicos	11
2.5.3 Espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais	12
2.5.4 Espuma de betume por injeção de água.....	12
2.6 Misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado.....	12
2.6.1 Enquadramento	12
2.6.2 Necessidade de reutilização e reciclagem para desenvolvimento sustentável ..	13
2.6.3 Características da Mistura Betuminosa Reciclada Temperadas.....	14
2.6.4 Regulamentação	15
CAPÍTULO 3 - Ensaio de resistência à deformação permanente	17
3.1 Enquadramento.....	17
3.2 Fatores que causam a deformação permanente.....	18
3.2.1 Temperatura.....	20

3.2.2 Compactação	21
3.2.3 Tráfego	22
3.2.4 Velocidade	25
3.2.5 Betume	25
3.2.6 Tipo de agregado e sua granulometria.....	26
3.3 Conseqüências da deformação permanente.....	28
3.4 Ensaios laboratoriais para caracterizar a resistência à deformação permanente.....	29
3.4.1 Ensaios Empíricos	31
3.4.1.1 Ensaios Marshall	31
3.4.1.2 Ensaios de Hveem	33
3.4.2 Ensaios Fundamentais.....	33
3.4.2.1 Ensaios de Compressão Uniaxial.....	33
3.4.2.2 Ensaios de Compressão Triaxial	34
3.4.2.3 Ensaios de Compressão Diametrial ou de tração indireta.....	35
3.4.2.4 Ensaios de Corte.....	36
3.4.2.5 Ensaios de Cilindro Oco	37
3.4.3 Ensaios de Simulação	38
3.4.3.1 Ensaios de simulação em pista de laboratório - <i>Wheel Tracking</i>	38
3.4.3.2 Ensaios de simulação em pista à escala real	41
CAPÍTULO 4 - Trabalho experimental	43
4.1 Enquadramento	43
4.2 Caracterização dos materiais utilizados	44
4.2.1 Material Fresado	44
4.2.2 Granulometria.....	46
4.2.3 Massa volúmica.....	48
4.2.4 Absorção de água	49
4.2.5 Ligante betuminoso	50
4.3 Estudo da composição das misturas	50
4.3.1 Fuso granulométrico	50
4.3.2 Quantidade inicial de betume (P_b)	52

4.3.3 Escolha da percentagem de betume ideal	54
4.3.3.1 Baridade máxima teórica	56
4.3.3.2 Baridade.....	56
4.3.3.3 Ensaio Marshall.....	57
4.4 Ensaio de caracterização das misturas.....	61
4.4.1 Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta - ITSM	61
4.4.2 Sensibilidade à água.....	62
4.4.3 Resistência à deformação permanente	66
CAPÍTULO 5 - Conclusões e trabalhos futuros	71
5.1 Conclusões.....	71
5.2 Apreciação global e desenvolvimentos futuros	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ACERVO NORMATIVO	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desenvolvimento sustentável (Adaptado de FHWA, 2008)	4
Figura 2.2 - Temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões de gases (Dinis - Almeida, 2010)	9
Figura 2.3 - Técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas (Adaptado Ferreira, 2009)	10
Figura 3.1 - Representação esquemática dos vários tipos de cavados de rodeira observados em pavimentos flexíveis (Freire, 2002)	18
Figura 3.2 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas granulares do pavimento (Santucci, 2001)	20
Figura 3.3 - Afundamento por compactação do tráfego (Bernucci, 2009)	21
Figura 3.4 - Efeito do processo de compactação no comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente - ensaio de compressão uniaxial estático (Khan et al., 1998 citado por Gardete, 2006)	22
Figura 3.5 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na UE, previsão até 2030 (DG TREN, 2003 citado por Gardete, 2006)	23
Figura 3.6 - Repartição modal do transporte de mercadorias em diversos países da UE em 2002 (exceto transporte marítimo) (DG TREN, 2004 citado por Gardete, 2006)	23
Figura 3.7 - Efeito do excesso de peso por eixo nos pavimentos, contribuição das diversas camadas para a profundidade de rodeira (adaptado Chen et. al., 2004 citado por Gardete, 2006)	24
Figura 3.8 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma mesma granulometria (Erkens, 2002 citado por Gardete, 2006)	25
Figura 3.9 - Efeito da percentagem de agregado grosso no comportamento à deformação permanente (adaptado de Cooper, K., 1997 citado por Freire, 2002)	26
Figura 3.10 - Correlação entre a textura do agregado determinada por análise de imagem e a deformação obtida no GLWT (Masad et al., 2004 citado por Gardete, 2006)	27
Figura 3.11 - Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, A. 1999 - Adaptado por Dinis-Almeida, 2010)	29
Figura 3.12- Equipamento para o ensaio Marshall (Laboratório da Infralab, 2014)	32
Figura 3.13 - Representação esquemática do estabilómetro do ensaio Hveem (Asphalt Institute (MS2), 1993)	33
Figura 3.14 - Ensaio de compressão uniaxial cíclico (Gardete, 2006)	34
Figura 3.15 - Equipamento para a realização de ensaios de compressão triaxial (Gardete, 2006)	35
Figura 3.16 - Ensaio de compressão diametral (UBI, 2014)	36
Figura 3.17 - Esquema da instrumentação de um provete para o ensaio de corte a altura constante (Santucci, 2001)	37

Figura 3.18 - Exemplo de um provete para o ensaio do cilindro oco e dimensões utilizadas (TRB, 2004)	38
Figura 3.19 - Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação permanente (<i>Wheel Tracking</i>) - (UBI, 2014)	39
Figura 3.20 - Fases da evolução da deformação permanente (Adaptado de Freire, 2002)	41
Figura 4.1 - Componentes da mistura betuminosa.....	44
Figura 4.2 - Material fresado proveniente da A23 do Nó de Vila Velha de Rodão	45
Figura 4.3 - Incineração em mufla: (teor de betume envelhecido): a) Fresado antes da extração de betume, b) Fresado depois da extração de betume	45
Figura 4.4 - Granulometria dos agregados: a) secagem b) peneiração	46
Figura 4.5 - Curva granulométrica do material fresado antes da extração de betume	47
Figura 4.6 - Curvas granulométricas dos agregados e material fresado	47
Figura 4.7 - Método do cesto de rede metálica (Brita 5/15).....	48
Figura 4.8 - Método do picnómetro.....	48
Figura 4.9 - Curva granulométrica das misturas.....	51
Figura 4.10 - Mistura betuminosa com incorporação de 30 % material fresado: a) 3,9 % betume b) 4,4 % betume c)4,9 % betume.....	54
Figura 4.11 - Fabrico dos provetes	54
Figura 4.12 - Compactação e desmoldagem dos provetes.....	55
Figura 4.13 - Provetes cilíndricos fabricados e ensaiados.....	55
Figura 4.14 - Ensaio Marshall - Provetes em banho-maria a uma temperatura de 60 °C	57
Figura 4.15 - Ensaio Marshall - Rotura dos provetes	58
Figura 4.16 - Estabilidade e deformação Marshall (valores médios).....	58
Figura 4.17 - Resultados da porosidade Vm, VMA e VFB (valores médios).....	60
Figura 4.18 - Ensaio do módulo de rigidez por tração indireta (Equipamento Nottingham Asphalt Test)	61
Figura 4.19 - Provetes para ensaio de sensibilidade à água	62
Figura 4.20 - Determinação das dimensões dos provetes.....	62
Figura 4.21 - Vácuo e saturação dos provetes	63
Figura 4.22 - Ensaio de sensibilidade à água a)Provete com “Fratura de tração clara”	64
Figura 4.23 - Tipos de rotura dos provetes (Fonte: Infralab, 2014)	65
Figura 4.24 - Rotura nos provetes: a)Rotura do tipo “A” b) Rotura do tipo “B”	65
Figura 4.25 - Fabrico das lajetas 30x30x6 cm: a)Preparação da mistura b)Colocação da mistura no molde c) Compactação da mistura	66
Figura 4.26 - Lajetas 30x30x6 cm	66
Figura 4.27 - Ensaio “ <i>Wheel Tracking</i> ”: a) antes do ensaio b) depois do ensaio	68
Figura 4.28 - Lajetas ensaiadas à deformação permanente - Mistura a quente (referência) ..	68
Figura 4.29 - Deformação máxima obtida pelo ensaio de simulação de pista (<i>Wheel Tracking</i>)	69

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Principais factores que afectam a deformação permanente em misturas Betuminosas (Adaptado de Gardete, 2006)	28
Quadro 3.2 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, 2002).....	30
Quadro 3.3 - Número de provetes (adaptado da EN 12697-22)	40
Quadro 3.4 - Declive máximo da rodeira no intervalo 5.000 a 10.000 ciclos para camada desgaste (EN 12697-22 (mm por 10 ³ ciclos de carga), (Manual de pavimentação Cepsa, 2011)	41
Quadro 4.1 - Teor do betume envelhecido do material fresado em laboratório por incineração em mufla (média de 5 amostras)	45
Quadro 4.2 - Análise granulométrica dos agregados e material fresado depois da extração de betume	46
Quadro 4.3 - Análise granulométrica dos agregados e material fresado depois da extração de betume	47
Quadro 4.4 - Massa volúmica	49
Quadro 4.5 - Absorção de água	49
Quadro 4.6 - Características dos ligantes betuminosos	50
Quadro 4.7 - Fuso granulométrico	50
Quadro 4.8 - Granulometrias das misturas estudadas	51
Quadro 4.9 - Composição das misturas betuminosas (%).....	51
Quadro 4.10 - Teor de betume (%).....	52
Quadro 4.11 - Síntese de resultados obtidos no estudo de penetração do ligante final das misturas betuminosas com incorporação de material fresado.....	53
Quadro 4.12 - Baridade Máxima Teórica.....	56
Quadro 4.13 - Baridade saturada com superfície seca	57
Quadro 4.14 - Valores limite para Marshall	60
Quadro 4.15 - Síntese dos valores característicos das misturas	61
Quadro 4.16 - Módulo de rigidez nas misturas.....	61
Quadro 4.17 - Dimensões e Baridade "geométrica" dos provetes.....	63
Quadro 4.18 - Resultados de <i>ITSR</i> e <i>ITS</i>	64
Quadro 4.19 - Tipo de rotura nos provetes.....	66
Quadro 4.20 - Resultados da baridade (ρ), porosidade (V_m), vazios na mistura de agregados (VMA) e vazios no agregado preenchidos com betume (VFB)	67
Quadro 4.21 - Síntese resultados da <i>PROAS Betunes Cepsa</i>	67
Quadro 4.22 - Resultados do ensaio à deformação permanente	69
Quadro 4.23 - Velocidade de deformação ($V_{105/120}$ [10^{-3} mm / min])	70

LISTA DE ACRÓNIMOS

ALF	Accelerated Load Facility
ALT	Accelerated Load Testing
APAO	Asphalt Pavement Association of Oregon
APT	Accelerated Pavement Testing
BMT	Baridade Máxima Teórica
CALTRANS	California Department of Transportation
CEN	Comité Europeu de Normalização
CE EP	Caderno de Encargos das Estradas de Portugal
CO ₂	Dióxido de carbono
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
DSR	Dynamic Shear Rheometer
d ₁₀₀₀₀	Profundidade da rodeira após 10000 ciclos
d ₅₀₀₀	Profundidade da rodeira após 5000 ciclos
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EPI's	Equipamentos de proteção individual
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
FT	Fischer-Tropsch
ITS	Resistência à tração em compressão diametral
ITSM	Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta
ITSR	Indirect tensile strength ratio
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LDVT	Linear Variable Displacement Transducer
MATTA	Universal Asphalt Tester
MBR	Mistura Betuminosa Reciclada
MT	Mistura Betuminosa Temperada
MF	Material fresado
MQ	Mistura Betuminosa a Quente

MT30	Mistura betuminosa temperada com incorporação de 30% de material fresado
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NAT	Nottingham Asphalt Tester
NLT	Normas del Laboratorio del Transporte
NP	Norma Portuguesa
P	Resistência máxima média
P_b	Percentagem de betume em relação ao peso total da mistura
Pb_{MBR}	Teor de betume das misturas betuminosas recuperadas
PbN	Teor de betume novo expressa como percentagem da massa total da mistura
PG3	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes
PRD_{air}	Média proporcional da profundidade da rodeira
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RD	Profundidade média da rodeira
RSST - CH	Repetitive Simple Shear at Constant Height
RT	Raise time
SHRP	Strategic Highway Research Program
SSD	Saturated surface dry
SST	Simple Shear Test
TR	Taxa de reciclagem
UBI	Universidade da Beira Interior
UCPRC	University of California Pavement Research Center
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
V_m	Porosidade
VMA	Vazios na mistura de agregados
VFB	Vazios no agregado preenchido com betume
WTS_{air}	Taxa de deformação média, para o procedimento B
V_{105/120}	Velocidade de deformação média

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 Enquadramento do tema

A constante procura de alternativas às misturas betuminosas produzidas a quente tem sido avaliada e estudada, para tentar reduzir os impactos ambientais e económicos resultantes da produção das mesmas, surgindo as misturas betuminosas temperadas. Desde a década de 90 têm-se efetuado estudos e experiências envolvendo as misturas betuminosas temperadas (Prowell e Hurley, 2008).

As misturas betuminosas temperadas são produzidas e aplicadas a temperaturas mais baixas, proporcionando benefícios de sustentabilidade evidentes, como a redução de emissão de gases poluentes e de consumos energéticos. A aplicação destas misturas é favorável aos trabalhadores que ficam menos expostos à poluição devido à emissão de menores quantidades de substâncias nocivas (Button et al, 2007). As menores temperaturas das misturas fazem com que a taxa de arrefecimento da mistura seja menor, facilitando a sua compactação e maior facilidade de aplicação e trabalhabilidade (Newcomb, 2007).

Em Portugal têm sido realizados vários estudos, no sentido da utilização de elevadas taxas de reciclagem, mostrando que estas são uma alternativa às misturas betuminosas convencionais (Dinis-Almeida *et. al.*, 2012; Silva *et. al.*, 2012; Abreu, *et. al.*, 2013). Na produção de misturas betuminosas temperadas, a incorporação de maiores quantidades de material fresado apresenta-se mais vantajosa uma vez que não está sujeita ao contacto com temperaturas elevadas, o que levaria a uma maior oxidação do betume envelhecido.

Por outro lado, as misturas betuminosas temperadas ainda não estão estudadas de forma a serem produzidas e aplicadas com garantia dos seus resultados, conduzindo a reservas na sua utilização (Button et al, 2007; Zaumanis, 2010) o que leva a que este trabalho seja também um contributo para o aumento de conhecimento acerca deste tema.

1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade do uso das misturas betuminosas temperadas, reduzindo a temperatura de fabrico sem comprometer o seu desempenho mecânico no que diz respeito à resistência à deformação permanente. Simultaneamente, pretende-se avaliar o uso das misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado, comparativamente com uma mistura betuminosa tradicional.

É necessário comprovar que o desempenho das misturas betuminosas temperadas é, no mínimo, equivalente às misturas betuminosas a quente, para que estas sejam aceites pelas entidades responsáveis, e incluídas na elaboração dos cadernos de encargos das obras. Têm sido desenvolvidos estudos experimentais por várias empresas, como o estudo levado a cabo pela *CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.* (Portugal) e *PROAS betune CEPSA* (Espanha) apresentado por Carvalho e Barreno (2013) que vai servir como base comparativa neste estudo.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, a sua organização e conteúdo são sintetizados nesta secção.

No capítulo 1 (Introdução) é feito um enquadramento do tema em estudo e faz-se uma abordagem genérica à importância global das misturas betuminosas temperadas, assim como a apresentação dos objetivos para a realização deste trabalho.

No capítulo 2 (Misturas betuminosas temperadas) é feita uma breve descrição das misturas betuminosas temperadas, seus benefícios (sociais, ambientais e económicos) e desvantagens da sua utilização, salientando as tecnologias de produção mais usuais das misturas betuminosas e ainda um breve resumo histórico das mesmas.

No capítulo 3 (Ensaio de resistência à deformação permanente) descrevem-se os principais fatores e consequências da deformação permanente, e um breve resumo dos principais ensaios laboratoriais para caracterizar a resistência à deformação permanente.

No capítulo 4 (Trabalho experimental) apresenta-se todo o trabalho experimental realizado para a caracterização do comportamento mecânico (resistência á deformação permanente) das misturas betuminosas. O estudo pode ser dividido em diversas fases, a caracterização dos materiais utilizados nas misturas, a determinação da percentagem ótima de betume através do ensaio Marshall, a caracterização das misturas produzidas (baridade, porosidade, modulo de rigidez e sensibilidade à água) e a caracterização da resistência à deformação permanente.

No capítulo 5 (Considerações finais) são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - Misturas betuminosas temperadas

2.1 Enquadramento

O aumento da consciência ambiental e o aumento dos custos de energia ajudaram a incentivar o desenvolvimento de tecnologias para reduzir as emissões de poluentes e reduzir o consumo de energia. Misturas betuminosas temperadas (MT) é o termo geralmente utilizado para se referir a tecnologias que visam reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono, baixando a temperatura de produção e de aplicação das misturas betuminosas (Kristjánsdóttir *et. al.*, 2006).

A destruição dos recursos naturais e as mudanças climáticas são as principais causas de danos e perturbação dos ecossistemas. Indústria, agricultura e transporte são os principais contribuintes. Essa consciência foi formalizada em 1997 pelo Protocolo de Quioto, adotado e assinado por consenso na terceira sessão da Convenção Básica das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Na sua generalidade, este protocolo visa a redução da produção de dióxido de carbono (CO₂) em pelo menos 5,2 % os níveis de emissões.

Para que o pavimento atinja com eficácia a sua função estrutural e funcional é necessário haver um permanente controlo tecnológico dos materiais no momento da construção do pavimento. A temperatura não pode estar acima (a chamada “queima da mistura”), nem abaixo da temperatura de projeto, visto que muitas das suas propriedades, como a viscosidade, por exemplo, estão diretamente relacionadas com a temperatura da mistura betuminosa. A opinião de diversos pesquisadores é semelhante, Birman (1979) afirma que a temperatura da mistura betuminosa é o fator mais importante e que mais influencia no valor da baridade final da mistura. Para este, quase todos os problemas de execução estariam resolvidos caso se conseguisse que o espalhamento e compactação fossem executados dentro da faixa de temperatura especificada no projeto. Entre outros, Sombre *et. al.* (1998) e Azari *et. al.* (2003) afirmam que o controle das temperaturas de compactação torna-se ainda mais importante quando os pavimentos são construídos durante períodos de baixas temperaturas. A mistura arrefece muito mais rapidamente nestas condições, deixando um intervalo de tempo muito pequeno para que a compactação se execute de acordo com o previsto.

O efeito da temperatura de compactação foi amplamente estudado por Parker (1960), o conhecimento do intervalo de temperatura no qual o esforço de compactação é maximizado ajuda a assegurar a conformidade com as especificações de compactação.

2.2 Benefícios da utilização de misturas betuminosas temperadas

As misturas betuminosas temperadas ao permitirem temperaturas mais baixas, apresentam impactos positivos sobre o desempenho do pavimento (Zettler, 2006; Button *et. al.*, 2007).

Estas tecnologias melhoram a trabalhabilidade da mistura e reduzem os requisitos de energia de compactação e, assim, aumentam a baridade no local (Hurley e Prowell, 2006). A compactação melhorada é, evidentemente, um parâmetro chave em relação ao desempenho.

Além disso, a maioria do envelhecimento da mistura ocorre na central, quando expostas a temperaturas elevadas. Um aspeto que se acredita estar associado à diminuição das temperaturas em misturas betuminosas temperadas é a redução do envelhecimento do betume por oxidação (Rühl, 2008). A menor temperatura da mistura vai reduzir a oxidação do betume, o que implica a redução da suscetibilidade à fendilhação, melhorando a flexibilidade do pavimento e longevidade.

As misturas betuminosas temperadas são produzidas com temperaturas entre 105 °C a 140 °C aproximadamente (Lapav, 2007; Carvalho e Barreno, 2013), tendo como objetivo alcançar resistência e durabilidade equivalentes ou superiores às das misturas betuminosas tradicionais (Newcomb, 2007). As temperaturas de produção e de espalhamento das misturas betuminosas temperadas podem ser reduzidas entre 30 °C a 40 °C relativamente às misturas tradicionais, sem que percam as suas características mecânicas (Prowell e Hurley, 2007; Carvalho e Barreno, 2013).

A redução das temperaturas de produção e aplicação das misturas betuminosas proporciona benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em vantagens sociais, económicas e ambientais (Nynas, 2009).

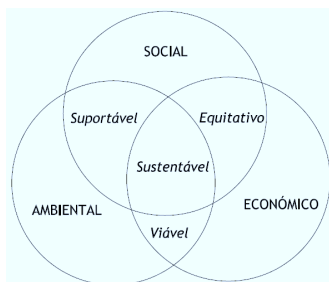


Figura 2.1 - Desenvolvimento sustentável (Adaptado de FHWA, 2008)

2.2.1 Benefícios Sociais

Um benefício social das misturas betuminosas temperadas (MT) será a melhoria do ambiente de trabalho na aplicação. Com o uso de misturas betuminosas temperadas os operários durante a aplicação ficam menos expostos às emissões, sendo este um fator positivo para a sua saúde e para as condições ambientais a nível global da sociedade. Além disso, os trabalhadores passam a ter um ambiente de trabalho com temperatura mais baixa e com redução de emissões (Newcomb, 2006; Prowell e Hurley, 2007). Dados relativos aos países europeus mostram que as MT reduzem significativamente a exposição dos trabalhadores aos fumos em cerca de 30 a 50 % em relação às misturas betuminosas a quente. O facto de se proporcionar maior conforto e melhores condições de trabalho aos trabalhadores promove um aumento de produtividade na aplicação destas misturas (FHWA, 2008).

O emprego de misturas betuminosas temperadas pode ser favorável nas situações em que há grande preocupação com a queda significativa de temperatura da mistura, na dificuldade de compactação e em perda de material, uma vez que a taxa de arrefecimento é dada pela diferença de temperatura entre a mistura betuminosa e o meio ambiente. Neste caso, a mistura produzida em temperatura mais baixa arrefece sob uma taxa menor, possuindo menor gradiente térmico que uma mistura mais quente (Newcomb, 2006; Prowell e Hurley, 2007). Existirá um período de tempo maior para transporte por longas distâncias e compactação sendo garantido o mesmo grau de trabalhabilidade em locais mais distantes. É apresentado também como benefício a menor dificuldade de aplicação em épocas ou locais de clima muito frio, e a possibilidade de uma abertura ao tráfego mais rápida (FHWA, 2008).

2.2.2 Benefícios Económicos

Os benefícios económicos devem ser avaliados juntamente com os benefícios ambientais. Como a temperatura de produção das misturas betuminosas temperadas é mais baixa que as misturas a quente, existe diminuição do consumo energético, ou seja, uma redução da quantidade de combustível necessário no processo produção (APAO, 2003; Newcomb, 2006; Prowell e Hurley, 2007). Os níveis de poupança de combustível dependem de vários fatores, tais como as reduções de temperatura efetivamente praticadas para produzir as MT, das condições de funcionamento da central, e principalmente, do grau de humidade dos agregados (combustível necessário para aquecer e secar o agregado). Medições efetuadas permitem concluir que aumentos de 1 % no teor em água dos agregados aumentam o consumo de combustível em 10 % (Prowell e Hurley, 2008). O valor da redução não é consensual entre vários autores, podendo oscilar entre 20 a 35 % (Carvalho e Barreno, 2013; FHWA, 2008) e 20 a 50 % (Button *et. al.*, 2007; Ferreira, 2009).

As misturas betuminosas temperadas (MT) são benéficas ao uso de maiores quantidades de material fresado (RAP). Nas misturas betuminosas tradicionais a quente o betume envelhecido presente no RAP está sujeito a uma grande oxidação, agravando o envelhecimento da mistura. O uso de MT favorece assim a adição de maiores percentagens de material fresado (Prowell e Hurley, 2007; Olard, 2008). Adicionalmente, pode ser também considerado que ao incorporar maiores taxas material fresado se diminui a quantidade de agregados naturais utilizados, bem como a diminuição de deposição do material em vazadouros, o que se traduz também em economias significativas (Nynas, 2009).

2.2.3 Benefícios Ambientais

A menor emissão de poluentes atmosféricos é apresentada como benefício ambiental. As temperaturas mais baixas conduzem a uma redução da produção de gases de efeito estufa, não só porque são emitidos menos vapores e fumos durante a produção e aplicação da mistura, mas também porque parte do combustível que seria utilizado no fabrico deixa de ser queimado (Prowell e Hurley, 2007). As menores emissões poderão também permitir que as centrais de produção de misturas betuminosas se situem em áreas comuns sem quaisquer restrições a nível ambiental. Desta forma, o trabalho *in situ* ou em central, nas proximidades das obras, reduz o uso do transporte e dos combustíveis, assim como as emissões de gases que lhe estão associadas.

Segundo Barbosa (2012) e da análise de dados de Prowell (2007) são expectáveis reduções de emissões de CO₂ entre os 30 e 40 %. Quanto à produção de poeiras, conseguem-se reduções de cerca de 20 a 25 % (FHWA, 2008; EAPA, 2010).

A taxa de reutilização pode atingir os 100 % nas tecnologias temperadas, verificando-se menor quantidade de produção de desperdícios ao reciclar os pavimentos degradados e, conseqüentemente, favorece-se a conservação dos recursos naturais. (Dinis-Almeida, 2010).

2.3 Desvantagens da utilização de misturas betuminosas temperadas

A redução das emissões e menor consumo de energia são benefícios, mas por si só, não justificam a adoção da tecnologia de misturas betuminosas temperadas. Estes potenciais benefícios e a sua otimização precisam ser estudados e devem incluir o desempenho a longo prazo (a durabilidade dos pavimentos, diminuindo os danos causados), análises de custo de ciclo de vida (para apurar e quantificar o nível de redução das emissões e o consumo de combustível e verificar se irá reduzir os custos globais de produção) e um compromisso de garantia de qualidade (Kristjansdottir *et. al.*, 2007).

Um grande número de questões relativas à implementação desta tecnologia, especialmente sobre as especificações e controle de qualidade, precisam ser respondidas. Embora exista uma grande expectativa na redução da temperatura nas misturas betuminosas temperadas, há outras preocupações para além das referidas anteriormente. É necessária mais investigação sobre estes aspetos, nomeadamente a trabalhabilidade, uma vez que as misturas betuminosas temperadas aparentam ser viáveis e de fácil compactação, devendo verificar-se ainda um tempo de abertura ao tráfego o mais rápido possível.

Mesmo com os benefícios e os resultados de desempenho demonstrados, o novo produto ainda tem obstáculos significativos a serem superados antes da sua aceitação (Zettler, 2006). De um modo geral, a indústria de pavimentação, como um todo, é lenta a aceitar novas tecnologias.

2.4 Breve história das misturas betuminosas temperadas

Desde o início do desenvolvimento de tecnologias modernas, uma série de experiências foram realizadas para estabelecer potenciais benefícios da utilização de mistura betuminosa temperada e avaliar o desempenho em comparação às tradicionais misturas.

Em 1956, Dr. Ladis H. Csanyi, professor da Iowa State University, estudou sobre o potencial da espuma de betume para ser usada como um ligante para solos. A partir de então, a tecnologia de espuma de betume, que permite a diminuição das temperaturas de misturas, é usada com sucesso em muitos países.

Em 1968, a Mobil Oil Australia, ao qual adquiriu as patentes da invenção de Csanyi, modificou o processo original por adicionar água fria em vez de adicionar água em forma de vapor (MUTHEN, 1998). Em 1994, Maccarone examinou os desenvolvimentos em misturas betuminosas baseadas no uso de espuma de betume e em emulsões com elevado teor de ligante. Esse sistema possui boa eficiência energética e é menos agressivo ao meio ambiente, isso porque as misturas frias não liberam hidrocarbonetos e não utilizam combustível na sua produção (Maccarone, 1994).

Em 1996, o ministro do Trabalho e das Relações Sociais da Alemanha, levantou questões sobre os limites de exposição dos trabalhadores aos fumos. Perante a pressão do governo, foi criado o *German Bitumen Forum* (uma parceria entre governo, indústria e trabalhadores da Alemanha), cujo foco foi procurar respostas a estas questões. Naquela ocasião, foram realizados estudos e debates sobre constituintes do betume, emissões de fumos, uso de equipamentos de proteção individual (EPI's) na indústria do betume, epidemiologia e incidência de cancro nos operários do setor. Foram estudadas tecnologias que permitissem baixar a temperatura do processo de produção, espalhamento e compactação e, por fim, o

desenvolvimento de processos visando atender a redução das emissões (Nascimento *et. al.* 2008). Jenkins *et. al.* (1999) realizaram um estudo com espuma de betume com os agregados aquecidos acima da temperatura ambiente e abaixo dos 100 °C. Esta técnica mostrou um ganho nas propriedades mecânicas em relação a misturas produzidas com agregados na temperatura ambiente.

No segundo *Eurasphalt & Eurobitume Congress* realizado em Barcelona em 2000, Koenders *et. al.* publicaram resultados de laboratório e de trechos experimentais em grande escala de uma tecnologia de espuma de betume com testes na Noruega, Reino Unido e Holanda entre os anos de 1996 e 1999. Foram avaliadas mais de 1000 toneladas de mistura betuminosas temperadas produzidas com espuma de betume em diferentes períodos do ano em estradas de tráfego com média intensidade. Os autores concluíram que este processo contribuiu para uma redução significativa nas emissões de poeiras, fumos e CO₂, além de uma economia de energia de 20 a 30 %. Além disso, os resultados mecânicos apresentaram valores satisfatórios.

Em 2002, a National Asphalt Pavement Association (NAPA) liderou a visita de técnicos norte americanos pela Dinamarca, Alemanha e Noruega, visando à análise e estudo das misturas betuminosas temperadas usadas nestes países. Desde essa data, também nos Estados Unidos, o interesse e desenvolvimento desta tecnologia cresceram de tal forma que a Federal Highway Administration (FHWA) designou estas misturas como área em foco e organizou com a NAPA, em 2003, uma conferência cujo objetivo principal foi explorar o seu potencial de utilização nos Estados Unidos (Ferreira, 2009).

Em 2004, no “World of Asphalt” foram apresentados projetos e desenvolvimentos nesta área por diversas empresas e entidades rodoviárias. Desde então, nos Estados Unidos e na Europa, continuou-se o estudo das vantagens da tecnologia de produção de misturas betuminosas temperadas (Ferreira, 2009).

Em 2007 surgiu uma parceria entre o Departamento de Transportes da Califórnia (California Department of Transportation - CALTRANS) e o Centro de Pesquisa de Pavimentos da Universidade da Califórnia (University of California Pavement Research Center - UCPRC) para avaliar se as misturas betuminosas temperadas teriam um desempenho igual ou melhor do que as misturas betuminosas tradicionais. Também foram avaliados possíveis problemas relacionados à baixa temperatura de compactação e de sensibilidade do pavimento à humidade. O trabalho deste grupo consistiu em realizar diversos ensaios de laboratório de forma a avaliar problemas de curto, médio e longo prazo. Os resultados deste estudo mostraram maior conforto dos trabalhadores devido a menor temperatura de trabalho e a menor emissão de fumos. O estudo mostrou que este tipo de mistura não apresentou perdas nas propriedades analisadas sendo a sua utilização promissora (Jones, 2009).

2.5 Tecnologias para a produção de misturas betuminosas temperadas

A sociedade precisa desenvolver formas de reduzir o consumo de combustível e de energia fóssil, e as emissões de gases de efeito estufa. Neste sentido surgem as MT que se apresentam ambientalmente benéficas e rentáveis. As tecnologias de produção destas misturas podem ser classificadas de vários modos. Um método de classificação destas tecnologias será o grau de redução da temperatura de produção. Há uma ampla gama de temperaturas de produção das misturas betuminosas (Figura 2.2).

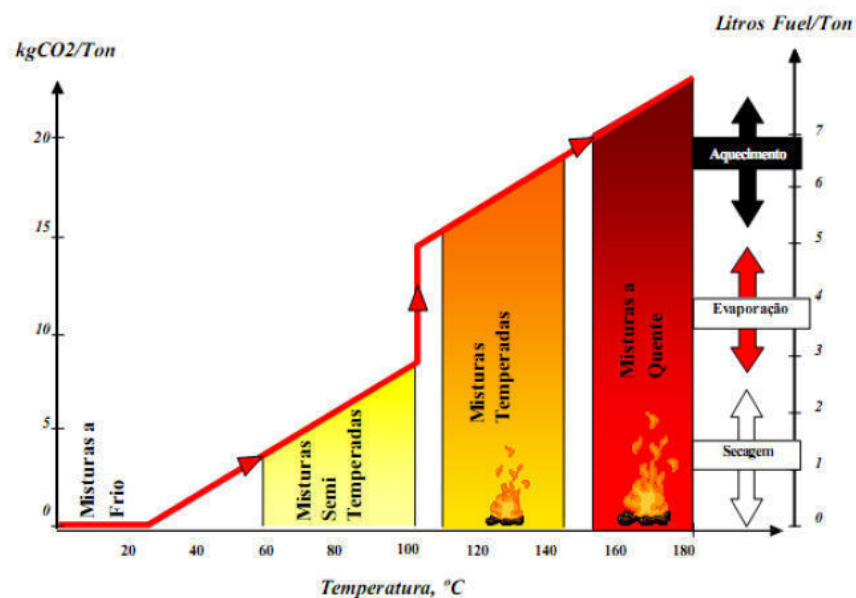


Figura 2.2 - Temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões de gases (Dinis - Almeida, 2010)

- Mistura a frio (0-30 °C);
- Mistura semi-temperada (65-100 °C);
- Misturas temperadas (100-140 °C);
- Misturas a quente (acima de 140 °C).

Para que seja possível fabricar misturas betuminosas em temperaturas mais baixas que as tradicionais a quente, normalmente empregam-se aditivos químicos, que são inseridos no ligante ou na mistura, e faz-se uma alteração do processo de fabrico para a produção de espuma de betume (Prowell e Hurley, 2007).

Os aditivos são uma parte essencial na maioria das técnicas de produção de mistura betuminosa temperada, alterando a viscosidade do ligante permitindo uma redução na temperatura de produção.

Existem dois métodos principais para a adição de aditivos na mistura, o processo via húmido e o processo via seco. A diferença entre os dois métodos é a adição no sistema de produção. No método húmido, o aditivo é misturado homogeneamente juntamente com o ligante e, em seguida, misturados com os agregados no tambor de mistura. No método seco o aditivo é injetado na linha de betume, antes ou diretamente no tambor de mistura, em conjunto com os outros materiais.

Nas técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas, segundo vários autores, como, Vaitkus *et. al.*, 2009 e EAPA, 2007, distinguem-se quatro grandes grupos de tecnologias, descritas a seguir e observadas na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas (Adaptado Ferreira, 2009)

2.5.1 Aditivos orgânicos

Diferentes aditivos orgânicos são utilizados para conseguir a redução da temperatura através da redução da viscosidade do ligante (betume), a temperaturas acima de cerca de 90 °C. O tipo de aditivo deve ser escolhido cuidadosamente de modo a que o seu ponto de fusão seja mais elevado do que as temperaturas esperadas em serviço (para que não ocorra a deformação permanente) e para minimizar a fragilização do betume a baixa temperatura (D'Angelo *et. al.* 2008).

Os aditivos orgânicos normalmente dão uma redução de temperatura entre 20 °C a 30 °C ao mesmo tempo que também melhoram a resistência à deformação de betume assim modificado (EAPA, 2010). Os processos que utilizam aditivos orgânicos como o Fischer-Tropsch (FT), a cera de Montana, ou amidas gordas mostram uma diminuição na viscosidade acima do ponto de fusão da cera.

Os aditivos orgânicos mais utilizados são o Sasobit[®] e o Asphaltan B[®]. O Sasobit[®], uma cera Fischer -Tropsch (ceras de parafina) em forma de pó ou granulado branco, é considerado um melhorador da viscosidade do betume, tanto durante a produção da mistura como durante a aplicação, devido à sua característica de reduzir a viscosidade do ligante (Hurley e Prowell, 2006).

2.5.2 Aditivos químicos

No caso de produção de MT com recurso a aditivos químicos, a incorporação do aditivo permite um melhor recobrimento do agregado pelo ligante, mesmo a baixas temperaturas (Hurley & Prowell, 2006). A produção de misturas betuminosas temperadas recorrendo a aditivos químicos não assenta na alteração da viscosidade do betume, regulam e reduzem as forças de atrito. Desta forma, é possível misturar os betumes e agregados e compactar a mistura a uma temperatura mais baixa. Os aditivos químicos podem reduzir as temperaturas de mistura e compactação em cerca de 20 °C a 30 °C (EAPA, 2010).

Os aditivos químicos são o terceiro tipo de tecnologia de misturas betuminosas temperadas mais usado. Uma variedade de aditivos químicos é possível ser utilizado para diferentes produtos. Existe geralmente uma combinação de agentes de emulsificação, agentes tensoactivos, polímeros e aditivos para melhorar o revestimento, mistura, trabalhabilidade e compactação (Hurley and Prowell, 2006).

Exemplo de aditivos químicos, entre outros, é o Evotherm[®], o Rediset[®] WMX, a Reciemul 90[®] e o Revix[®]. O Evotherm[®] é fornecido sob a forma de emulsão de betume. É um melhorador de recobrimento e trabalhabilidade, promove a adesividade e funciona como agente emulsificante. O Evotherm representa 30 % da massa do ligante e diminui a viscosidade da mistura aglutinante a temperaturas mais baixas, o que leva a agregados totalmente revestidos à mesma temperatura. Este processo de produção reduz a temperatura até 30 %.

No que diz respeito ao Rediset[®] WMX, quimicamente modifica o betume e incentiva a adesão de agregados por ligante. A Reciemul 90[®] é uma emulsão de betume com aditivos poliaminas modificadas que melhoram a estabilidade da emulsão e permitem uma elevada coesão entre as partículas.

Por último, o Revix[®] é um aditivo químico, que permite uma redução da temperatura cerca de 15 °C a 27 °C. Este aditivo atua devido à presença de vários componentes, como agentes tensoativos, ceras, polímeros e outros materiais, não dependendo da produção de espuma, ou da redução da viscosidade, para reduzir a temperatura de produção e compactação das misturas (Prowell and Hurley, 2008).

2.5.3 Espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais

A tecnologia de produção de MT com recurso a minerais sintéticos ou naturais tem como base a utilização de zeólitos. O zeólito é um silicato de alumínio hidratado cristalino que contém cerca de 20 % de água cristalina, a qual é libertada acima de 100 °C. Esta libertação de água cria um efeito de formação de espuma controlada, o que pode proporcionar uma trabalhabilidade melhorada durante um período de 7 horas, ou até que a temperatura caia abaixo de 100 °C (uma diminuição na temperatura da mistura até cerca de 30 °C), com um desempenho equivalente de compactação (Prowell and Hurley, 2008; EAPA, 2010).

2.5.4 Espuma de betume por injeção de água

Uma variedade de técnicas de formação de espuma é utilizada para reduzir a viscosidade do betume. Vários meios são empregues para introduzir pequenas quantidades de água no betume quente. A água (cerca de 2 % sobre a massa do betume) transforma-se em vapor, aumenta o volume do betume e reduz a sua viscosidade por um curto período até que o material tenha arrefecido. A espuma entra em colapso e, em seguida, o betume comporta-se como um agente de ligação normal. A quantidade de expansão depende de diversos fatores, incluindo a quantidade de água adicionada e a temperatura da mistura. No estado espumoso, a viscosidade do betume é reduzida, permitindo o recobrimento dos agregados a temperaturas de mistura mais reduzidas (Croteau and Tessier, 2008).

2.6 Misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado

2.6.1 Enquadramento

A construção de estradas pressupõe um elevado consumo de agregados e de betume. A reciclagem de pavimentos teve início nos finais dos anos 70 nos Estados Unidos da América, altura em que se vivia uma das crises petrolíferas. Nessa altura as empresas começaram a analisar de uma forma bastante séria os preços do betume e dos combustíveis utilizados para a produção das misturas betuminosas e transporte dos agregados. A reciclagem de pavimentos surgiu para resolver problemas económicos e não ambientais, pois quando o preço do petróleo voltou a descer a reciclagem de pavimentos decaiu substancialmente. O que se tem verificado nos últimos anos é que esta técnica renasceu, mas agora, devido a problemas ambientais (Blanco *et. al.*, 2006). A crescente preocupação com a proteção ambiental que se verifica em todas as áreas leva a que, a nível da Indústria Rodoviária, sejam já utilizadas técnicas de reciclagem de subprodutos resultantes de trabalhos de beneficiação e reforço de pavimentos flexíveis (Moreira *et. al.*, 2006). No entanto não deixa de ser verdade que o grande “motor” da reciclagem de pavimentos nos dias de hoje é o fator económico.

A reciclagem de um pavimento é em geral mais económica do que o reforço com uma mistura betuminosa a quente, embora existam algumas limitações com as técnicas de reciclagem existentes até ao momento. Para ultrapassar estas limitações recorre-se a técnicas de reciclagem como a temperada, utilizando novas emulsões mas mantendo e até incrementando bastante a economia de custos (Blanco, A., *et. al.*, 2006)

2.6.2 Necessidade de reutilização e reciclagem para desenvolvimento sustentável

As vantagens da utilização da técnica da reciclagem na conservação de vias vão desde a economia de materiais, até a preservação do meio ambiente. Com a diminuição do consumo de betume, de alto valor comercial, e dos materiais agregados, há uma diminuição dos custos das obras. A reciclagem contribui para a preservação ambiental, uma vez que evita a exploração agressiva das áreas de exploração e reduz as áreas de vazadouro (Peterson *et. al.*, 1994). Num documento da European Asphalt Pavement Association (EAPA) há uma declaração geral sobre a reciclagem de misturas betuminosas, levando em consideração as tendências atuais no sentido do desenvolvimento sustentável, na minimização do impacto ambiental, na otimização do uso dos recursos naturais e nos potenciais incentivos económicos para aumentar a reutilização e/ou reciclagem de material (EAPA, 2004). A indústria de betume europeu é ambientalmente consciente e é responsável pelo seu produto durante toda a vida. Desta forma, a EAPA apoia todos os esforços para otimizar a reutilização e reciclagem de betume, económica e tecnicamente viável.

O conceito de desenvolvimento sustentável traduz-se num desenvolvimento global que incorpora os aspetos ambientais num modelo de desenvolvimento socioeconómico. A aplicação desta temática abarca, por exemplo, a redução das emissões e a possibilidade de incorporação de misturas betuminosas a recuperar (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) (Ferreira, 2009). Reciclagem e reutilização são importantes para preservar recursos naturais que garantam recursos adequados para as gerações futuras, definindo-se assim o "desenvolvimento sustentável" (EAPA, 2008).

A reutilização e a reciclagem de pavimentos betuminosos recuperados (RAP - Reclaimed Asphalt Pavement) começaram há mais de 30 anos. Em muitos países europeus o uso do RAP é uma prática comum, no entanto ainda existem vários países europeus, onde não há praticamente nenhuma reutilização. As razões para reciclar materiais a partir da infraestrutura de estradas podem diferir de país para país. Em países onde quase todos os agregados têm de ser importados, como a Holanda, existe uma base económica para otimizar o uso de RAP, tanto quanto tecnicamente possível.

Em Portugal, já foram realizados estudos sobre as alternativas de pavimentação utilizando 100 % de RAP, aquecida a temperaturas entre 100 °C e 140 °C e adição de uma pequena percentagem de emulsão de betume a temperatura ambiente. (Dinis-Almeida *et. al.*, 2012). No entanto, em Portugal, a produção de misturas de reciclagem com alta percentagem de RAP ainda não é uma realidade, em parte devido à falta de incentivo. Em contraste, o estudo de misturas recicladas com alto teor de RAP já é uma realidade em alguns países (especialmente Holanda, Alemanha, Japão e EUA), em alguns países começaram a produzir misturas com 100 % RAP em Central (Harrington, 2005; . Hossain *et. al.* , 1993). No entanto, o sucesso desta tecnologia recente ainda não é vista entre a comunidade científica como uma realização completa, porque é ainda bastante sensível à qualidade da RAP (origem, variabilidade) e as condições de produção (rigoroso controlo de temperaturas) (Rebbechi e Green, 2005).

Por outro lado, o problema da escassez crescente de agregados adequados para pavimentação, leva à consciencialização para um maior aproveitamento de todo o tipo de materiais. Ao contrário de outros materiais utilizados na construção de estradas, os pavimentos betuminosos, uma vez envelhecidos e esgotado o seu ciclo de vida, são suscetíveis de ser facilmente reciclados a um custo razoável.

Existem vários procedimentos de reciclagem, sendo que o mais adequado inclui a adição de componentes rejuvenescedores que atuam no betume envelhecido. O envelhecimento do betume é um processo de natureza físico-química que altera a sua composição química e que se manifesta, na prática, por um endurecimento e uma perda das suas características mecânicas e ligantes. A necessidade de um melhor aproveitamento dos materiais constituintes das estradas e da redução da produção de resíduos da construção, conduz a que exista um interesse crescente na reciclagem destes materiais. Desta forma, a presença do betume, mesmo envelhecido, conduz a um fator de valorização pelo que não será negligenciável a sua presença.

2.6.3 Características da Mistura Betuminosa Reciclada Temperada

As misturas betuminosas recicladas (MBR), independentemente da técnica de reciclagem usada, podem ser aplicadas na obra de onde provêm, em camadas de reforço ou substituindo as camadas degradadas, ou ainda aplicadas em outras obras novas ou de reabilitação de pavimentos rodoviários (Baptista, 2006). Como já referido anteriormente, este tipo de técnica, para além de utilizar meios de aplicação como os das obras convencionais e da qual se obtêm resultados similares aos de uma mistura a quente, apresenta como vantagem a economia de energia e materiais e proporciona a conservação do meio ambiente reduzindo o impacto ambiental (Moreira, 2007).

Nesta técnica existe a possibilidade de reabilitação estrutural de faixas de rodagem individuais. Permite ainda a reciclagem de pavimentos com alta taxa de RAP e o rejuvenescimento dos betumes envelhecidos travando a velocidade da sua oxidação. A incorporação de misturas betuminosas envelhecidas provenientes de pavimentos degradados permite diminuir o consumo de agregados naturais e reduzir o volume deste material normalmente depositado em vazadouros (Dinis-Almeida *et. al.*, 2011).

Em Portugal, apesar de já estarem previstas soluções de reciclagem em alguns projetos, verifica-se que a quantidade de material fresado sobranete ainda atinge valores apreciáveis (Moreira, *et. al.*, 2006). Em muitos países europeus, o uso de RAP já é uma prática comum tendo iniciado há mais de 30 anos, no entanto, ainda existem outros, onde não há praticamente nenhuma reutilização de RAP. A cada ano cerca de 50 milhões de toneladas de RAP é produzido e uma grande quantidade destes 50 milhões de toneladas é reutilizado e reciclado. A meta é ter 100 % da RAP reutilizado ou reciclado (EAPA, 2008).

A necessidade de um melhor aproveitamento dos materiais constituintes das estradas, associado à disposição de reduzir ao máximo a produção de resíduos da construção, conduz a que exista um interesse crescente na reciclagem de estradas degradadas. Na prática procede-se para que os materiais resultantes da fresagem de estradas envelhecidas sejam aproveitados, entrando como parte integrante das novas misturas. Utilizando rejuvenescedores sobre os betumes envelhecidos conseguem-se misturas com propriedades mecânicas adequadas para utilização como camadas de base em pavimentos com elevada intensidade de tráfego.

2.6.4. Regulamentação

Em Portugal as primeiras aplicações de RAP na produção de misturas betuminosas foi em 1999, e com o crescente interesse na reciclagem o Laboratório Nacional de engenharia Civil (LNEC) publica a especificação E 472 (Guia para a produção RAP) e revista em 2009 (Antunes *et. al.*, 2010).

Numa política de sustentabilidade bem sucedida com o objetivo de minimizar o uso de matérias primas primárias deve haver incentivo para estimular a reutilização e a reciclagem de RAP.

O RAP não deve ser visto como um desperdício, mas como um material valioso que pode preservar material natural para as próximas gerações. A reutilização de RAP por vezes é vista como uma nova técnica com riscos adicionais e incertezas, sendo necessário que exista uma política clara, apoiada num quadro jurídico, permitindo e estimulando a sua utilização regular.

A fim de estimular a indústria a investir em novas tecnologias e novos equipamentos, o dono de obra deve apresentar uma política de investimento para um período mais longo, estimulando a aplicação de materiais secundários previstos nos cadernos de encargos das obras. Neste sentido, os materiais que podem ser reutilizados para produção de novas misturas betuminosas devem atender a requisitos estabelecidos na norma europeia EN 13108-8 (EAPA, 2008).

CAPÍTULO 3 - Ensaio de resistência à deformação permanente

3.1 Enquadramento

A vida útil de um pavimento, em termos de serventia e desempenho, está relacionada ao seu correto dimensionamento, que procura evitar a ocorrência de defeitos estruturais, nomeadamente o fendilhamento, a formação de cavados de rodeira e ocorrência de fendas transversais. Dadas as condições climáticas verificadas no nosso país, o mecanismo de fratura devido a baixas temperaturas (ocorrência de fendas transversais), não é relevante. O fendilhamento e os cavados de rodeira são os principais defeitos nos pavimentos de misturas betuminosas, tradicionalmente chamado de pavimentos flexíveis. O fendilhamento pode ter origem em fenómenos como a fadiga, nos quais cargas intermitentes originam as fissuras, que é um dano progressivo. Os cavados de rodeira são decorrentes do mecanismo denominado deformação permanente (Freire, 2002).

As deformações permanentes são degradações no pavimento que podem ocorrer quer nas camadas betuminosas quer nas camadas granulares ou no solo de fundação. Estas manifestam-se através do aparecimento à superfície do pavimento, de depressões longitudinais nas zonas de passagem dos rodados dos veículos pesados e acompanhados geralmente por elevações nas zonas laterais adjacentes (Freire, 2002).

A deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação de misturas betuminosas, mas para a qual ainda não existe uma metodologia que possa prever a sua evolução e prevenir o aparecimento deste género de anomalias em pavimentos flexíveis (Bernucci *et. al.*, 2008). É assim fundamental conseguir avaliar a suscetibilidade das misturas betuminosas à deformação permanente. Para avaliar a deformação permanente existem vários ensaios laboratoriais, como sejam, o ensaio de *Wheel tracking*, o ensaio triaxial cíclico e o ensaio de fluência dinâmica (Gardete *et.al.*, 2004). Nos EUA foi desenvolvido e tem sido utilizado o ensaio de corte a altura constante (RSST- CH), este tem sido pouco utilizado fora dos EUA, embora exista capacidade de o realizar em instituições portuguesas. No entanto, para a implementação na prática dos ensaios referidos nas normas europeias é necessário ultrapassar alguns obstáculos, como a definição com precisão dos procedimentos e condições de ensaio e definir valores limites de aceitação para os resultados. Deste modo, torna-se importante comparar os ensaios e os seus resultados tendo em conta a sua facilidade de realização, aquisição de equipamento e adequação à prática corrente no país (Picado-Santos, 2008).

3.2 Fatores que causam a deformação permanente

Os pavimentos rodoviários representam um importante e valioso património, a sua gestão e manutenção exige a implementação de estratégias mais exigentes e criteriosas. Uma patologia que contribui para a degradação dos pavimentos rodoviários é a formação de rodeiras devido à deformação permanente das camadas betuminosas. As causas de formação de rodeiras devido à deformação permanente em misturas betuminosas têm vindo a agravar-se, esperando-se que os insucessos relacionados com esta patologia venham a aumentar (Gardete, 2006).

Atualmente, ainda não são usados métodos de previsão da evolução das degradações em pavimentos que considerem a contribuição das camadas betuminosas para a formação de cavados de rodeira. Este facto deve-se à não existência de modelos adequados que simulem o comportamento das várias camadas constituintes do pavimento e ao desconhecimento de parâmetros que caracterizem o comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente em função das condições em que se dá a circulação do tráfego (temperatura, velocidade de circulação e modo de aplicação das cargas transportadas). As misturas betuminosas, ou mais propriamente os ligantes betuminosos, apresentam um comportamento viscoelástico, função das condições de solitação em serviço, o qual afeta significativamente a contribuição das camadas betuminosas na formação dos cavados de rodeira (Freire, 2002).

As deformações permanentes em pavimentos flexíveis têm tendência para aumentar com a repetida aplicação das ações devidas ao tráfego, resultando em cavados de rodeira, que ocorrem nas diferentes camadas que constituem o pavimento, solo de fundação, camadas granulares e camadas betuminosas, podendo em países frios incluir-se o desgaste da superfície do pavimento ao longo da zona de passagem devido a veículos equipados com pneus de inverno com pregos ou correntes de neve que são bastante agressivos para o pavimento (NCHRP, 2002). As deformações podem ter origem em diversos mecanismos ou combinações de mecanismos, tais como, a perda de material da camada de desgaste (Figura 3.1 a), as deformações permanentes das camadas inferiores do pavimento e da fundação (Figura 3.1 b) e as deformações permanentes das camadas betuminosas superiores (Figura 3.1 c), (Freire, 2002).

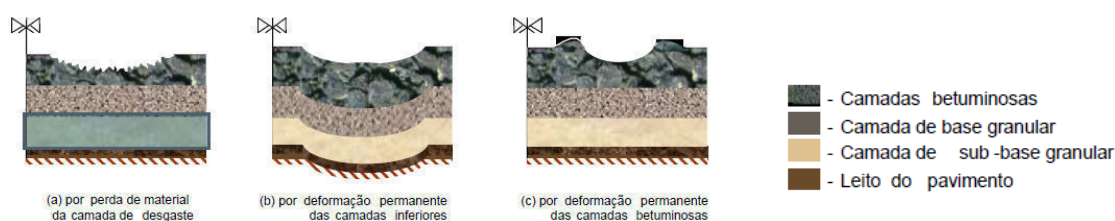


Figura 3.1 - Representação esquemática dos vários tipos de cavados de rodeira observados em pavimentos flexíveis (Freire, 2002)

Na Figura 3.1 (a), ocorrem rodeiras devido à degradação da camada superficial do pavimento, contribuindo apenas esta camada para a formação das rodeiras. O uso de correntes de neve ou pneus de gelo com pregos origina este tipo de desgaste, no entanto a sua ocorrência verifica-se apenas em países com clima mais frio. A gênese deste tipo de rodeiras também difere consideravelmente dos restantes pois não resulta de deformações das camadas mas do desgaste e desagregação da camada de desgaste na zona de passagem dos rodados.

Na Figura 3.1 (b), a causa dos cavados de rodeiras é devido à deformação do solo de fundação, podendo existir a contribuição de outras camadas granulares. A origem da deformação do pavimento é essencialmente no solo de fundação, mantendo as restantes camadas a sua espessura, mas estas vão-se deformar para acompanhar o movimento da fundação. Estas rodeiras são caracterizadas por terem grande raio.

Na Figura 3.1 (c), as depressões são geralmente acompanhadas por elevações nas zonas laterais contíguas e as rodeiras são causadas por deformação nas camadas betuminosas. Para esta deformação contribui essencialmente a camada superficial, podendo ainda existir deformação nas camadas betuminosas que se encontram sob esta. No entanto, a deformação nas camadas betuminosas acontece geralmente na parte superior do pavimento, que é a zona mais sujeita às cargas circulantes e ações climatéricas desfavoráveis, nomeadamente, temperaturas elevadas. A formação deste tipo de rodeiras é mais preocupante em países quentes como Portugal. Estas rodeiras são caracterizadas por terem pequeno raio e pela formação de umas pequenas elevações laterais que a acompanham.

As diferentes origens da deformação permanente resultam em perfis de rodeira diferentes. Têm-se estudado métodos para com base no perfil superficial transversal do pavimento se poder determinar qual a origem da deformação permanente, isto é, quais as camadas do pavimento que mais terão contribuído para a deformação verificada (NCHRP, 2002).

Nas camadas ligadas, a deformação resulta de misturas betuminosas instáveis devido a uma deficiente composição, materiais inadequados, má execução ou camadas sujeitas a cargas de tráfego e temperaturas demasiado elevadas. Outros fatores contribuem ainda para a deformação destas camadas, como por exemplo, a velocidade do tráfego. Assim, em intersecções, subidas de grande inclinação e outros locais com velocidades de circulação inferiores, é maior a probabilidade de ocorrência deste tipo de deformações.

Problemas com a drenagem do pavimento e a infiltração de água nas camadas não ligadas reduzem a sua resistência, tornando-as mais vulneráveis às ações aplicadas. Este género de deformação encontra-se esquematizado na Figura 3.2.

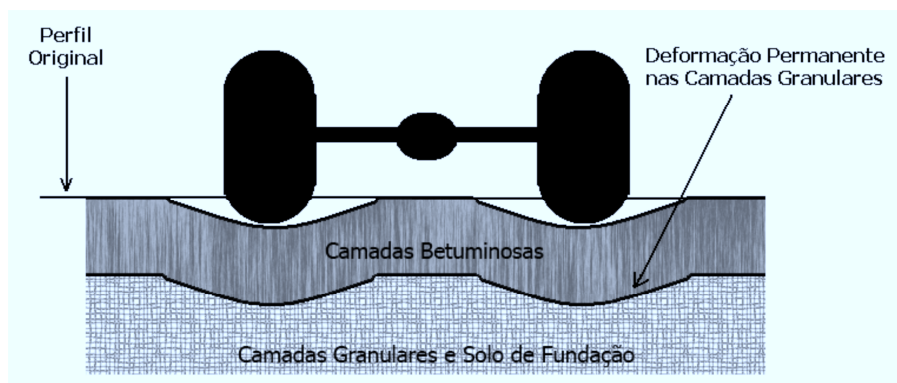


Figura 3.2 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas granulares do pavimento (Santucci, 2001)

Diversos fatores estão envolvidos no fenômeno da deformação permanente, como as características das misturas e ações exteriores. As características das misturas dependem das propriedades dos seus elementos constituintes bem como da proporção destes na mistura. Nas ações exteriores, incluem-se ações climáticas, em especial a temperatura, e as características do tráfego, como sejam, o número de veículos pesados, as cargas por eixo, o tipo e a pressão dos pneus e a velocidade de circulação. As deformações permanentes resultam, em primeiro lugar, da diminuição do índice de vazios (densificação), mas também de esforços de corte importantes que se instalam, principalmente, nas camadas superiores (Azevedo *et. al.*, 1999). Resultam ainda de um fenômeno de deformação plástica de corte sem existir densificação, que ocorre junto à superfície do pavimento, sendo causada pelas tensões de corte que se verificam por debaixo dos pneus dos veículos pesados, ocorrendo principalmente nos dias mais quentes perante a passagem dos veículos mais pesados (Sousa & Weissman, 1994).

3.2.1 Temperatura

O comportamento das misturas betuminosas é altamente influenciado pela temperatura, devido à sua parcela viscosa. Quando a temperatura aumenta, o betume torna-se mais fluido e a resistência à deformação das misturas betuminosas diminui. Assim, para um determinado carregamento a deformação ocorrida é superior. As deformações de origem viscosa, nomeadamente as irreversíveis serão superiores, o que piora o comportamento da mistura à deformação permanente. Perante um aumento de temperatura, o módulo de rigidez da mistura betuminosa diminui, proporcionando o aparecimento de deformações na zona de passagem dos rodados através da aplicação repetida de cargas devido à passagem dos veículos pesados, contribuindo para a formação dos cavados de rodeira (Batista, 2004).

As deformações permanentes ocorrem geralmente a temperaturas elevadas. Quanto mais alta for a temperatura, menor é a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes.

Em Portugal as elevadas temperaturas que se fazem sentir no verão, que reduzem a viscosidade do betume, propiciam o aparecimento de deformações permanentes nas misturas betuminosas, pelo qual, além dos motivos já expostos, este fenómeno deve ser estudado com alguma preocupação. A temperatura é um dos fatores que deve merecer mais atenção, pois a sua influência nas propriedades da mistura betuminosa é enorme, aumentando muito a sua suscetibilidade à deformação permanente com o aumento de temperatura.

3.2.2 Compactação

A deformação permanente nas rodéiras pode resultar ainda da deficiente compactação de camadas provocando uma resistência insuficiente das camadas betuminosas ou da rotura por cisalhamento.



Figura 3.3 - Afundamento por compactação do tráfego (Bernucci, 2009)

A utilização de misturas betuminosas densas é desejável para diminuir a formação dos cavados de rodéira. Quando convenientemente compactadas, as misturas betuminosas, com porosidades inferiores a 10 % (Pinelo, 1991), e com granulometrias contínuas, apresentam porosidades baixas e conseqüentemente um maior número de pontos de contacto entre as partículas do agregado, do que as misturas betuminosas abertas (porosidades superiores a 15 %) e com granulometrias descontínuas.

Efetuando-se uma boa compactação diminui-se o volume de vazios na mistura, assim esta deforma-se menos quando sujeita à passagem do tráfego, pois caso o volume de vazios seja muito elevado, quando solicitada pelo tráfego a mistura irá densificar-se, originando deformações. Isto ocorre devido à falta de contacto entre partículas do agregado em misturas com compactação deficiente, deste modo quando carregada a camada, as partículas mudam de posição dentro da mistura (rodando), provocando deformações à superfície. No entanto, o volume de vazios da mistura após compactação também não deve ser muito baixo pois a mistura pode tornar-se instável piorando muito o seu comportamento. O volume de vazios para o qual este fenómeno se verifica é designado por “volume de vazio crítico” e é de aproximadamente 3 %, dependendo das misturas (Capitão, 2003).

Em obra a compactação é sempre realizada recorrendo a cilindros, no entanto quando se pretende estudar as misturas em laboratório existem vários processos de compactação disponíveis para fabricar provetes. O processo de compactação utilizado condiciona assim os valores obtidos. Este facto torna-se relevante sempre que estão em causa valores obtidos com métodos de compactação diferentes (Khan *et. al.*, 1998).

Na Figura 3.4 é mostrado um exemplo, resultante da dissertação de Dinis Gardete (2006), de como provetes de uma mesma mistura betuminosa apresentam diferentes comportamentos á deformação permanente dependentes da forma como foram compactados.

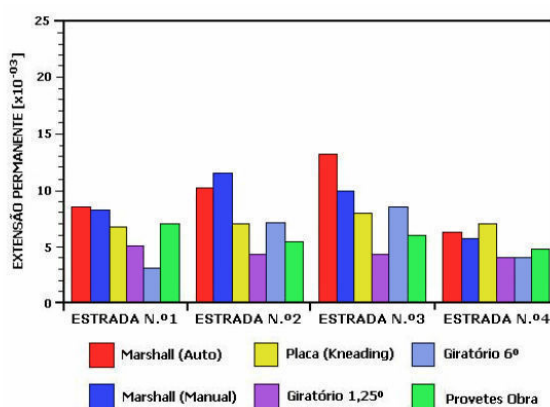


Figura 3.4 - Efeito do processo de compactação no comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente - ensaio de compressão uniaxial estático (Khan *et al.*, 1998 citado por Gardete, 2006)

Linden e Van der Heide (1987) realçam a importância das operações de compactação e concluem que o grau de compactação é um dos principais parâmetros de qualidade a exigir à mistura betuminosa, especialmente em misturas que apresentam baixos teores em betume, com o objetivo de aumentar a resistência à deformação permanente. As misturas bem formuladas e cujos processos construtivos tenham sido bem controlados comportar-se-ão melhor, ou seja, terão uma maior durabilidade e apresentarão as melhores características mecânicas, desde que bem compactadas.

3.2.3 Tráfego

O aumento do tráfego (especialmente o tráfego pesado), o aumento das cargas transportadas por eixo, a crescente substituição dos rodados duplos por rodados simples de base larga e o aumento da pressão de enchimento dos pneus estão na base duma mais acelerada formação de patologias em pavimentos rodoviários, nomeadamente, os cavados de rodeira devido à deformação permanente em misturas betuminosas (COST 334, 1999).

As previsões indicam que nos países da UE existirá entre 2000 e 2030 um crescimento anual no sector de transporte de cargas de 2,1 %.

Na Figura 3.5 apresenta-se a distribuição prevista do transporte de cargas por diferentes modos de transporte, excetuando transporte marítimo, para os estados membros da UE desde 1990 até 2030. Observa-se que o transporte de mercadorias por estrada terá uma importância crescente, prevendo-se que em 2030 represente 77,4 % do transporte de mercadorias (DG TREN, 2003).

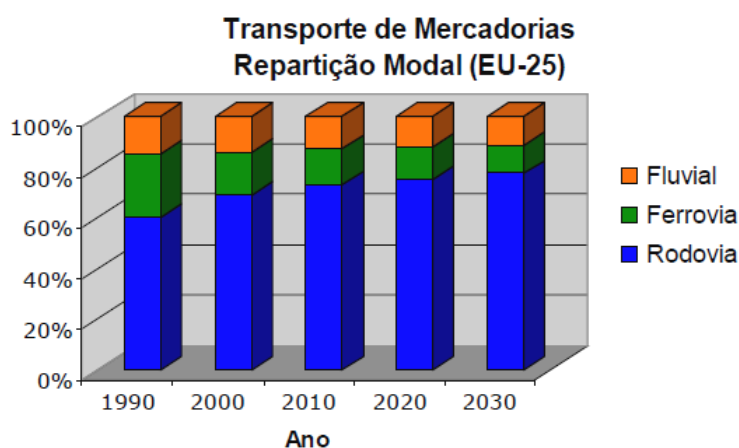


Figura 3.5 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na UE, previsão até 2030 (DG TREN, 2003 citado por Gardete, 2006)

Na Figura 3.6 apresenta-se a repartição modal do transporte de bens para diversos países da Europa em 2002 (excetuando o transporte marítimo). Observa-se que em Portugal o transporte rodoviário de mercadorias é claramente superior ao dos outros meios de transporte à semelhança do que ocorre na grande maioria dos países europeus.

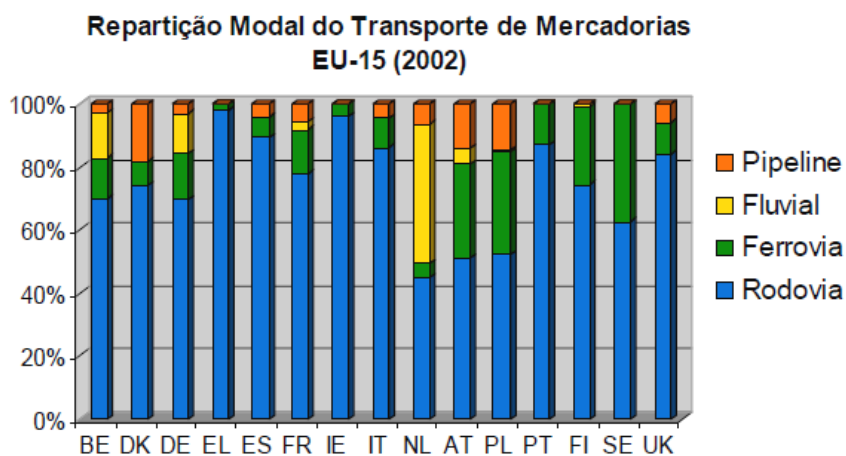


Figura 3.6 - Repartição modal do transporte de mercadorias em diversos países da UE em 2002 (exceto transporte marítimo) (DG TREN, 2004 citado por Gardete, 2006)

Este aumento de tráfego leva a que se realizem pavimentos com espessuras superiores de misturas betuminosas. Cada vez mais devem ser precavidadas questões relacionadas com a composição e execução das misturas betuminosas, bem como fenómenos relacionados com estas, como seja, a deformação permanente. Devido à grande importância que o transporte rodoviário tem na economia e como o estado das estradas pode afetar os custos operacionais é de suprema importância avaliar quais as consequências que estas alterações no transporte rodoviário têm no estado do pavimento. É fundamental procurar soluções, em termos de projeto, construção e conservação, que permitam amenizar estes problemas.

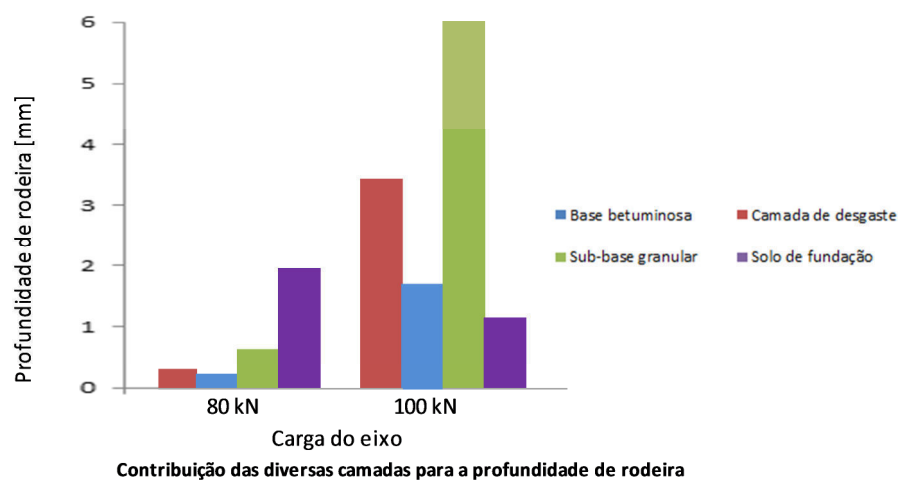


Figura 3.7 - Efeito do excesso de peso por eixo nos pavimentos, contribuição das diversas camadas para a profundidade de roedeira (adaptado de Chen *et al.*, 2004 citado por Gardete, 2006)

Na Figura 3.7 observa-se o efeito do aumento das cargas nos eixos dos veículos pesados no pavimento, nomeadamente na contribuição das diversas camadas constituintes do pavimento para a deformação permanente. Quando se compara o dano provocado pelas passagens de um eixo com 100 kN com o mesmo número de passagens de um eixo de 80 kN observa-se uma maior profundidade de roedeira, com um acréscimo da contribuição das camadas betuminosas. As camadas superiores são aquelas onde se regista um maior acréscimo da contribuição para a deformação permanente (Chen *et al.*, 2004).

A tendência que se verifica em substituir os rodados duplos por rodados simples de base larga é outro fator que agrava a formação de cavados de roedeiras, pois a área de pavimento afetada é menor e a pressão de enchimento do pneu é maior, logo as tensões no pavimento serão superiores. Este agravamento verifica-se principalmente para as camadas superiores, betuminosas, pois para as camadas inferiores a forma como a carga é aplicada deixa de ser relevante, passando a interessar apenas a carga total aplicada (COST 334, 2000).

3.2.4 Velocidade

A velocidade de tráfego também influencia a deformação permanente. Para velocidades de tráfego baixas a resposta do pavimento é menos rígida. Isto corresponde a ter a carga sobre uma determinada zona do pavimento durante mais tempo, ou seja, um tempo superior de carregamento. Desta forma, as deformações obtidas são superiores, existindo uma parcela de deformação irreversível também superior. Alguns investigadores referem que a extensão vertical máxima nas camadas betuminosas provocada por um veículo pesado a 20 km/h é cerca do dobro da provocada pelo mesmo veículo a 80 km/h (Chen *et al.*, 2004).

A distribuição lateral dos veículos também se apresenta como fator importante. Em locais onde o tráfego é mais canalizado, com uma menor distribuição lateral, os rodados solicitam sempre a mesma zona do pavimento observando-se assim um crescimento mais rápido das rodeiras com o número de eixos. Quando a distribuição lateral dos veículos é maior a formação de rodeiras por deformação das misturas betuminosas é menor com o número de rodados.

3.2.5 Betume

Existem outros diversos fatores que influenciam a deformação permanente em camadas betuminosas, nomeadamente o ligante, se não tiver ligante suficiente a mistura pode desagregar-se quando solicitada. No entanto, se a quantidade de ligante for excessiva a mistura pode deformar-se em excesso quando solicitada, esta torna-se uma mistura com baixa resistência à deformação permanente, como se pode verificar na figura 3.8.

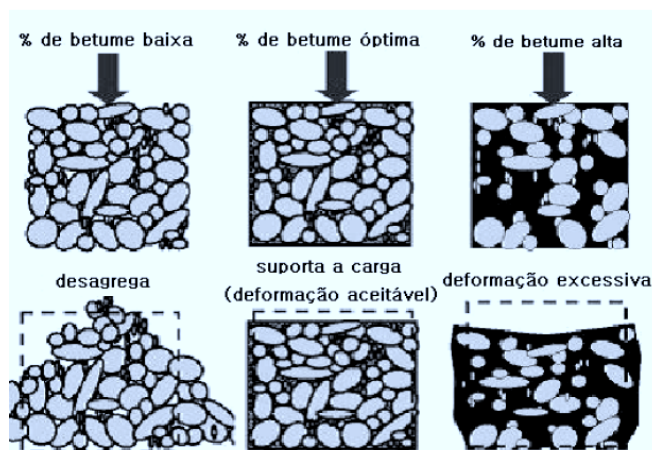


Figura 3.8 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma mesma granulometria (Erkens, 2002 citado por Gardete, 2006)

A viscosidade do betume, o uso de betumes mais duros ou modificados aumenta a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas. De uma forma geral, para uma dada mistura quanto mais duro for o betume, isto é, quanto maior for a sua viscosidade a uma

determinada temperatura, melhor será o seu comportamento à deformação permanente (Prowell, 1999 e Barreno *et al.*, 2004). Se o betume se apresentar menos fluido, quando solicitado, sofrerá deformações mais baixas, tendo também uma menor componente de deformação viscosa responsável pelas deformações permanentes.

O betume vai envelhecendo com a passagem do tempo, por volatilização e oxidação dos seus componentes. O betume apresenta assim uma maior viscosidade para a mesma temperatura. Apesar de este envelhecimento prejudicar algumas características das misturas betuminosas torna-as menos suscetíveis à deformação permanente. As misturas betuminosas são mais suscetíveis à deformação permanente no início da vida útil do pavimento, com o envelhecimento do betume estas tornam-se mais resistentes a este fenómeno.

3.2.6 Tipo de agregado e sua granulometria

Diversas propriedades das misturas betuminosas são afetadas pela distribuição granulométrica dos agregados. Destas propriedades, destaca-se a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à fadiga, a resistência à deformação permanente e a resistência aos danos causados pela humidade. Portanto, a distribuição granulométrica adequada ao tipo de mistura que se quer produzir é o primeiro passo para a elaboração de uma mistura betuminosa com bom desempenho (Cunha, 2004).

As misturas com agregados de maior dimensão e granulometria contínua apresentam melhor resistência à deformação permanente devido a se conseguir um melhor contacto entre as partículas do agregado, oferecendo assim uma maior resistência. O uso de agregado de maiores dimensões resulta num esqueleto sólido mais resistente formado por estas partículas o que beneficia a resistência à deformação permanente das misturas (Figura 3.9).

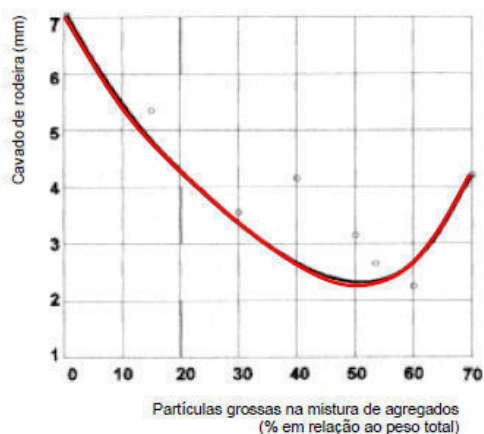


Figura 3.9 - Efeito da percentagem de agregado grosso no comportamento à deformação permanente (Cooper, 1997 citado por Freire, 2002)

A forma dos agregados é uma das propriedades que mais afeta o desempenho das misturas betuminosas (Sargand e Kim, 2001 e Masad *et al.*, 2004). Uma boa granulometria dos agregados, expressa na curva granulométrica da mistura, é fundamental para se obter, após compactação, uma mistura coesa com um elevado grau de imbricamento entre as partículas do agregado. Na Figura 3.9 pode observar-se a influência que a percentagem de partículas grossas existentes na granulometria da uma mistura tem na formação do cavado de rodeira, em ensaio de simulação realizado laboratorialmente (Cooper, K., 1997).

A utilização de agregados britados é outro fator que influencia a deformação permanente, as misturas produzidas com estes são mais resistentes à deformação permanente do que as que utilizam agregados rolados, pois os primeiros fornecem melhor resistência por atrito (Pereira e Picado Santos, 2002). É assim comum os cadernos de encargos exigirem o uso de agregados britados numa percentagem elevada para o fabrico de misturas betuminosas (CE EP, 2012). Em Portugal, a utilização de agregado rolado, de origem aluvionar, requer que, para além da britagem das partículas, se efetue a introdução de um aditivo que permita melhorar a adesividade entre o agregado e o ligante betuminoso utilizado (CE EP, 2012).

Outra questão relativa à forma dos agregados relaciona-se com a existência de partículas lamelares e alongadas, a existência nas misturas betuminosas de uma elevada percentagem destas partículas pode ter efeitos indesejados na resistência das misturas betuminosas. Estas partículas quando sujeitas a esforços mostram-se mais frágeis. Assim também a quantidade de partículas lamelares e alongadas nas misturas betuminosas deve ser controlada, o que é geralmente proposto em todas as especificações técnicas (por exemplo CE EP, 2012).

A textura dos agregados também influi na resistência das misturas betuminosas à deformação permanente (Figura 3.10). Agregados com textura superficial mais rugosa (ex. agregados graníticos) apresentam melhores resultados que agregados com a textura superficial lisa (ex. agregados calcários).

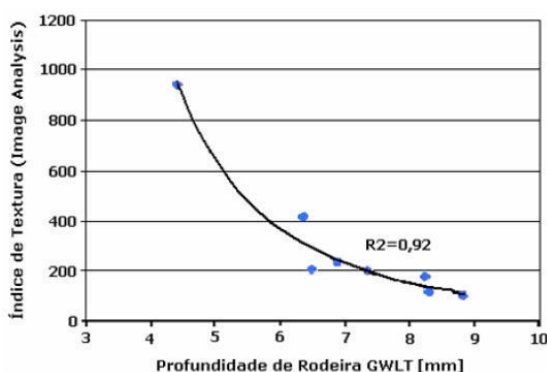


Figura 3.10 - Correlação entre a textura do agregado determinada por análise de imagem e a deformação obtida no GLWT (Masad *et al.*, 2004 citado por Gardete, 2006)

Com o uso de agregados mais rugosos consegue-se uma maior resistência nos contactos das partículas, aumentando a fricção interna e portanto a resistência à deformação permanente.

O estabelecimento de uma granulometria adequada, que minimize a ocorrência de deformações permanentes, pressupõe a seleção de várias frações de agregados, que quando misturadas entre si e com o betume, e devidamente compactadas confirmam à mistura betuminosa um esqueleto mineral estável. A estabilidade da mistura de agregados baseia-se nos diversos contactos entre partículas. Desta forma, quanto maior for o número de contactos gerados no decorrer da compactação, melhor será o seu comportamento (Cooper K., 1997).

No quadro 3.1 apresenta-se a síntese dos principais factores que afetam a deformação permanente e consequente formação de cavados de rodeira.

Quadro 3.1 - Principais factores que afectam a deformação permanente em misturas Betuminosas (Adaptado de Gardete, 2006)

Factor	Varição da susceptibilidade à deformação permanente
Temperatura	Aumenta com o aumento da temperatura.
Compactação	Diminui com a redução do volume de vazios até atingir o volume de vazios crítico, reduzindo-se a resistência da mistura abaixo deste.
Tráfego	Aumenta com o aumento do número de passagens de rodados, com o aumento da pressão dos pneus, com o aumento das cargas por eixo, com a redução da velocidade de circulação e com a utilização de rodados simples.
Velocidade	Aumenta com a diminuição da velocidade.
Betume	Diminui com o aumento de viscosidade do betume, podendo utilizar-se aditivos no betume que melhorem a resistência das misturas betuminosas à deformação permanente. Aumenta com o aumento da percentagem de betume.
Agregado	Diminui com agregados de granulometria contínua que permitam boa compactação e interligação entre partículas, com o aumento da máxima dimensão do agregado, com a utilização de agregados britados, com partículas de forma cúbica e com agregados de textura rugosa.

3.3 Consequências da deformação permanente

A deformação permanente de misturas betuminosas é uma das patologias mais preocupantes. Em Portugal, as altas temperaturas registadas no verão e o aumento das cargas dos veículos pesados constituem factores ao aparecimento desta anomalia (Gardete *et.al.*, 2004). O comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas constitui assim um fator muito importante a ter em consideração, quer na fase de projeto (dimensionamento e elaboração das especificações dos materiais a utilizar), quer na fase de construção (Freire, 2002). A formação de cavados de rodeiras por deformação permanente tem várias consequências, como afundamentos nos pavimentos, que se manifestam na superfície dos revestimentos, diminuição da segurança e comodidade dos usuários (perda de aderência em períodos de chuva) pois dificulta a drenagem transversal, aumentando consideravelmente os

custos operacionais (Picado - Santos *et.al.*, 2006). Reflete problemas estruturais e/ou de projeto das misturas betuminosas e dificulta a manutenção/reabilitação dos pavimentos (Bernucci, 2009).

Para além das consequências óbvias que advêm do aparecimento de rodeiras por deformação permanente nas camadas betuminosas e que pode levar à saída de serviço do pavimento, acresce o facto de este fenómeno acontecer no princípio da vida útil deste.

Assim, a perceção negativa dos usuários e as consequências para a gestão poderão ser mais propícias que as ocorridas devido a outro tipo de degradações que se manifestam passados mais anos de serviço.

3.4 Ensaio laboratoriais para caracterizar a resistência à deformação permanente

Para a avaliação do comportamento das misturas betuminosas às deformações permanentes é usual recorrer a ensaios de cargas repetidas realizados a altas temperaturas, de forma a simular as condições agressivas a que as camadas estão sujeitas quando se encontram em serviço. Em Portugal, Freire (2002) desenvolveu um estudo sobre as temperaturas adequadas para a realização de ensaios de caracterização do comportamento às deformações permanentes de misturas betuminosas para camadas de desgaste, obtendo valores na ordem dos 50 a 60°C. A temperatura a usar no estudo do comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas é definida em função das condições climáticas do local da obra e do tipo de betume usado na mistura.

Este estudo teve como referência a aplicação dos métodos de previsão de temperaturas de serviço dos pavimentos a partir das temperaturas do ar, desenvolvidos por Picado-Santos (1994) e as zonas climáticas consideradas foram as propostas por Baptista, A. (1999) ilustradas na Figura 3.11.

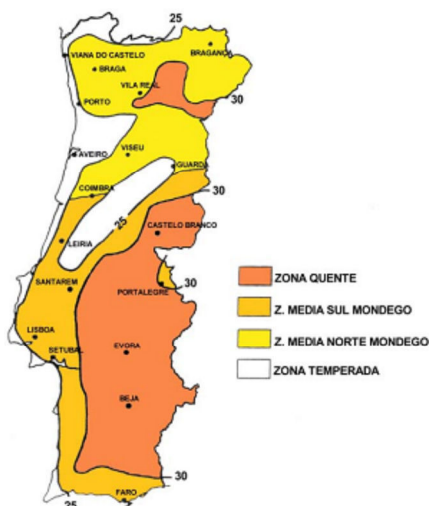


Figura 3.11 - Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, 1999 - citado por Dinis-Almeida, 2010)

As temperaturas recomendadas a adotar nos ensaios para a caracterização do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas, consoante a zona climática onde se aplicará o pavimento são as indicadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, 2002)

Zona climática	Temperatura
Zona quente	50 °C
Zona média sul do Mondego e zona média norte do Mondego	45 °C
Zona temperada	40 °C

O processo de compactação seja em laboratório ou em obra, ao influenciar a estrutura do esqueleto mineral da mistura betuminosa, também afeta o comportamento à deformação permanente. De um modo geral, a redução da porosidade de uma mistura betuminosa aumenta a resistência à deformação permanente, desde que não atinja os valores de porosidade inferiores a 3 %, referidos anteriormente (Freire, 2002).

Os ensaios, em geral, não permitem a quantificação da deformação permanente (cavado de rodeira) que irá ocorrer no pavimento. No entanto, permitem ordenar as misturas em estudo relativamente à deformação permanente ou verificar se uma determinada mistura cumpre os requisitos relativamente a um parâmetro que representa esse fenómeno. A aceitação de uma mistura não implica conhecer o valor da rodeira causada pela deformação permanente das misturas betuminosas no pavimento. Apenas se assume que se a mistura cumprir determinados valores limite definidos para o ensaio, a deformação permanente que esta sofrer estará dentro de limites aceitáveis não colocando em causa a vida útil do pavimento (Gardete, 2006).

Os ensaios existentes com alguma capacidade ou potencialidade para avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas agrupam-se nas seguintes categorias (Freire, 2002 e Brown *et. al.*, 2001):

Ensaio empíricos

- Ensaio de Marshall
- Ensaio de Hveem

Ensaio fundamentais

- Ensaio de compressão uniaxial estático (ensaio de fluência dinâmica) ou cíclico;
- Ensaio de compressão triaxial, geralmente com cargas cíclicas (ensaio triaxial cíclico);
- Ensaio de compressão diametral. Apesar de também serem ensaios com cargas de compressão a carga é aplicada segundo o diâmetro do provete;

- Ensaio de corte, com aplicação de cargas estáticas ou cíclicas de ensaio de corte a altura constante);
- Ensaio em cilindro oco, este ensaio permite aplicar simultaneamente tensões axiais e de corte no provete.

Ensaio de simulação

- Ensaio de simulação de tráfego em laboratório (*Wheel tracking*);
- Ensaio de simulação de tráfego em pista à escala real.

A implementação destes ensaios revela-se de elevado interesse mas existem ainda alguns obstáculos, nomeadamente a definição de procedimentos e condições de ensaio e a definição de valores limite para os resultados (Gardete *et. al.*, 2004). Apesar das diferenças entre os ensaios, como o *Wheel tracking* e o de fluência dinâmica, os dois serão previsivelmente, os que têm maiores possibilidades de implementação no meio técnico para este fim, devido ao preço do equipamento e simplicidade do ensaio, quando comparados com, por exemplo, ensaios como o Triaxial e como o de corte a altura constante (Gardete *et. al.*, 2004). Existem também ensaios que são realizados apenas no betume, como o Dynamic Shear Rheometer (DSR). No entanto, devido a estes ensaios caracterizarem apenas um dos componentes da mistura betuminosa os seus resultados dificilmente poderão ser utilizados para a caracterização do comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente (Carswell, 2004).

De seguida, apresenta-se, a descrição resumida dos ensaios para caracterização à deformação permanente e que se enquadram nos diferentes tipos atrás referidos. Não será feita uma descrição pormenorizada de cada ensaio e apenas serão referidos e sucintamente descritos os ensaios mais divulgados e o ensaio realizado neste trabalho, pois na realidade existe um grande número de ensaios.

3.4.1 Ensaio Empíricos

3.4.1.1 Ensaio Marshall

Este é o ensaio que é utilizado na formulação de misturas a quente em Portugal. O método de Marshall, no qual se insere este ensaio, é o mais utilizado em todo o mundo para a formulação de misturas betuminosas (Gardete, 2006).

Os conceitos básicos do ensaio Marshall, nomeadamente no que respeita ao processo de fabrico e de compactação laboratorial e ao método de avaliação de resultados, foram inicialmente desenvolvidos por Bruce Marshall. Em 1948, após diversos estudos, o U.S. Corps

of Engineers melhorou a concepção básica do ensaio inicialmente desenvolvido, estabelecendo os critérios a adotar na formulação de misturas betuminosas (Asphalt Institute (MS2), 1993).

O principal objetivo deste ensaio é o de quantificar a resistência mecânica e a deformação sofrida por uma mistura betuminosa compactada laboratorialmente, sob determinadas condições.

Este ensaio é utilizado como parte da metodologia de formulação de misturas betuminosas mais utilizada em todo o mundo, para obtenção do valor ótimo do teor em betume, e de baridades de referência com vista ao controle da qualidade das misturas aplicadas (Freire, 2002). Na figura 3.12 apresenta-se o equipamento para o ensaio Marshall.



Figura 3.12- Equipamento para o ensaio Marshall (Laboratório da Infralab, 2014)

O ensaio Marshall foi originalmente desenvolvido apenas para misturas betuminosas com agregados com dimensão máxima de 25 mm. Dado que este ensaio não permite determinar qualquer propriedade fundamental que descreva o comportamento das misturas, a análise dos resultados obtidos, por ser efetuada com base na experiência passada, perde-se quando são introduzidas modificações aos procedimentos normalizados e inicialmente desenvolvidos. Posteriormente foi desenvolvido o Método Marshall Modificado para o ensaio de misturas betuminosas com agregados cuja dimensão máxima do agregado pode ir até 38 mm (Asphalt Institute (MS2), 1993). No entanto, existe há décadas em todo o mundo uma experiência de utilização deste ensaio que permitiu verificar uma boa relação entre os resultados dos ensaios e o comportamento das misturas quando em serviço.

A utilização do ensaio de Marshall para caracterizar misturas betuminosas quanto à deformação permanente apresenta limitações, não traduzindo as propriedades fundamentais daqueles materiais (Brown, S. *et al.*, 1985). Encontram-se alguns autores que o consideram inadequado para caracterizar a resistência das misturas betuminosas à deformação permanente (Chen e Liao, 2002). Como vantagens, este ensaio, tem a sua simplicidade, o facto de o equipamento se encontrar disponível na maioria dos laboratórios e existir grande experiência na sua utilização.

3.4.1.2 Ensaio de Hveem

Este ensaio foi introduzido na década de 20 e é um ensaio empírico cuja finalidade é a formulação de misturas betuminosas. Tal como no método Marshall, a interpretação dos resultados do método Hveem assenta essencialmente na experiência, não sendo possível determinar propriedades fundamentais da mistura betuminosa. O ensaio Hveem não é um ensaio utilizado em Portugal.

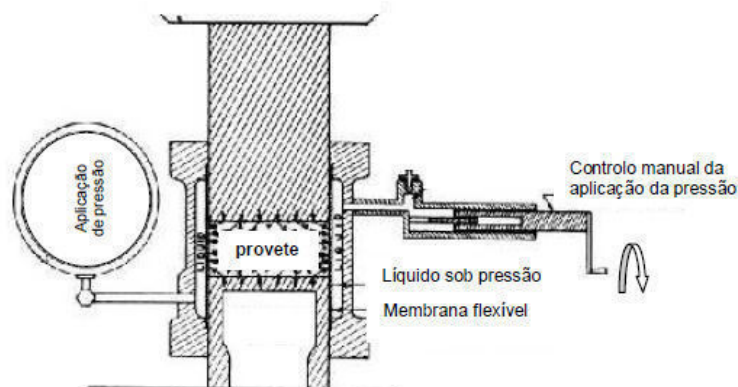


Figura 3.13 - Representação esquemática do estabilômetro do ensaio Hveem (Asphalt Institute (MS2), 1993)

3.4.2 Ensaio Fundamentais

3.4.2.1 Ensaio de Compressão Uniaxial

Por forma a melhor simular laboratorialmente o efeito da passagem dos veículos sobre o pavimento, desenvolveram-se ensaios de compressão uniaxial com aplicação de cargas repetidas. Este tipo de ensaios consiste na aplicação repetida, sobre o provete, de ciclos de carga e de descarga, medindo-se as extensões verticais resultantes no provete. Tendo em vista a definição das condições de ensaio, para além do valor da carga máxima a aplicar ao provete e da temperatura de ensaio, há ainda que fixar a forma de variação do carregamento, o tempo de carga e o tempo de repouso entre as sucessivas aplicações de carga, para simular a passagem dos veículos, bem como o modo como a tensão aplicada varia ao longo do tempo (Freire, 2002).

O ensaio de compressão uniaxial estático é utilizado para caracterização do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas desde a década de 70, pelo Shell Laboratory em Amsterdão (Hills, J., 1973). Sendo um ensaio de fácil execução, com o uso de equipamento de ensaio pouco complexo e de baixo custo, tem vindo a ser adotado e implementado em todo o mundo, por numerosos centros de investigação. Consiste em submeter provetes cilíndricos ou prismáticos a uma carga constante ao longo do tempo, atuando na direção do eixo do provete. Este ensaio tem sido utilizado para determinar os parâmetros dos modelos físicos utilizados na modelação de misturas betuminosas, como por exemplo o modelo de Burgers.

O resultado é uma curva que representa a deformação axial sofrida pelo provete em função do tempo. Uma das propriedades da mistura determinada com este tipo de ensaios é o “módulo de rigidez da mistura”, que é o quociente entre a tensão aplicada ao provete e a deformação sofrida por este após um determinado tempo de ensaio. O ensaio de compressão uniaxial estático apesar de útil, não simula a passagem do tráfego que é uma ação fundamentalmente dinâmica.

São vários os tipos de equipamentos existentes para a aplicação de cargas com o objetivo de medir a resposta do material sob o efeito de cargas repetidas, podendo estas ser aplicadas ao provete por sistemas pneumáticos ou servo - hidráulicos.

Apresenta-se na Figura 3.14 um equipamento para a realização de ensaios de compressão uniaxial cíclicos.



Figura 3.14 - Ensaio de compressão uniaxial cíclico (Gardete, 2006)

3.4.2.2 Ensaio de Compressão Triaxial

Os ensaios triaxiais consistem na aplicação de cargas axiais em provetes cilíndricos sujeitos a tensões de confinamento lateral. As cargas axiais e as tensões de confinamento podem ser constantes (ensaio estático) ou variar ciclicamente no tempo (ensaio com cargas repetidas). É também comum a utilização de tensões de confinamento constantes e cargas axiais cíclicas. As grandezas medidas durante a realização do ensaio são a extensão vertical e extensão volumétrica, função do número de ciclos aplicados (Freire, 2012).

O ensaio de compressão triaxial permite aproximar as condições de tensão de ensaio às que a mistura betuminosa está sujeita na realidade. Estes ensaios são semelhantes aos ensaios de compressão uniaxial, mas os provetes são submetidos a uma tensão de confinamento estática durante o ensaio. A gama de temperaturas e de tensões que se podem utilizar neste ensaio é superior à do ensaio de compressão uniaxial. Assim, a existência da tensão de confinamento

permite realizar o ensaio com temperaturas e tensões superiores, simulando melhor o que acontece num pavimento, sem que ocorra a rotura prematura do provete.

Os ensaios triaxiais com a aplicação de carregamento repetido permitem a quantificação das propriedades dinâmicas dos materiais, em função da temperatura e da frequência de aplicação das cargas. No caso particular de a tensão de confinamento ser mantida constante estamos perante um ensaio de compressão uniaxial com aplicação de cargas repetidas, confinado.

Na Figura 3.15 apresenta-se um equipamento para ensaios de compressão triaxial cíclicos que aplica a tensão de confinamento com água.



Figura 3.15 - Equipamento para a realização de ensaios de compressão triaxial (Gardete, 2006)

Para os ensaios triaxiais cíclicos o resultado é uma curva que relaciona a deformação vertical permanente com o número de carregamentos, semelhante à obtida nos ensaios uniaxiais cíclicos, e com as mesmas características. Na maioria dos equipamentos utilizados para a execução dos ensaios triaxiais, as tensões principais não variam de direção durante o ensaio. A rotação dos eixos principais, durante a realização do ensaio, apenas pode ter lugar em equipamentos onde se possam aplicar tensões tangenciais aos provetes, quaisquer que sejam as tensões normais aplicadas. Estes ensaios, são ensaios dispendiosos e demorados, necessitando de equipamento mais sofisticado.

3.4.2.3 Ensaio de Compressão Diametral ou de tração indireta

Este ensaio difere dos anteriores na determinação das propriedades das misturas betuminosas pois o provete é sujeito durante o ensaio a uma força de compressão diametral, o que provoca estados de tensão não uniformes no provete e que não são conhecidos. No entanto no plano vertical de aplicação da carga o campo de tensões é quase uniforme. O ensaio de compressão diametral é utilizado para medir as propriedades das misturas betuminosas a baixas e médias temperaturas, como seja, a fragilidade térmica e a resistência à tração. É possível no entanto determinar o módulo de deformabilidade das misturas (CEN, 1999).

O módulo de deformabilidade relaciona a extensão sofrida na mistura com a tensão aplicada permitindo inferir o comportamento das misturas à deformação permanente. Neste ensaio o provete fica sujeito a tensões de tração, o que faz com que as propriedades do betume assumam uma importância superior. Este é um ensaio em que o betume assume maior peso na caracterização da mistura podendo assim não apresentar resultados fiáveis na caracterização das misturas à deformação permanente pois a resistência fornecida pelo esqueleto do agregado pode não ser corretamente contabilizada. É assim, mais utilizado para a determinação das características das misturas betuminosas à tração (resistência à fadiga) e módulos de deformabilidade a baixas e médias temperaturas.

Nestes ensaios os provetes são cilíndricos e a carga é aplicada diametralmente e não perpendicularmente às faces do provete. Dentro deste género de equipamentos os mais divulgados são o Nottingham Asphalt Tester (NAT) e o Universal Asphalt Tester (MATTA), estando ainda disponíveis equipamentos de outros fabricantes, como o da figura 3.16 que se segue.

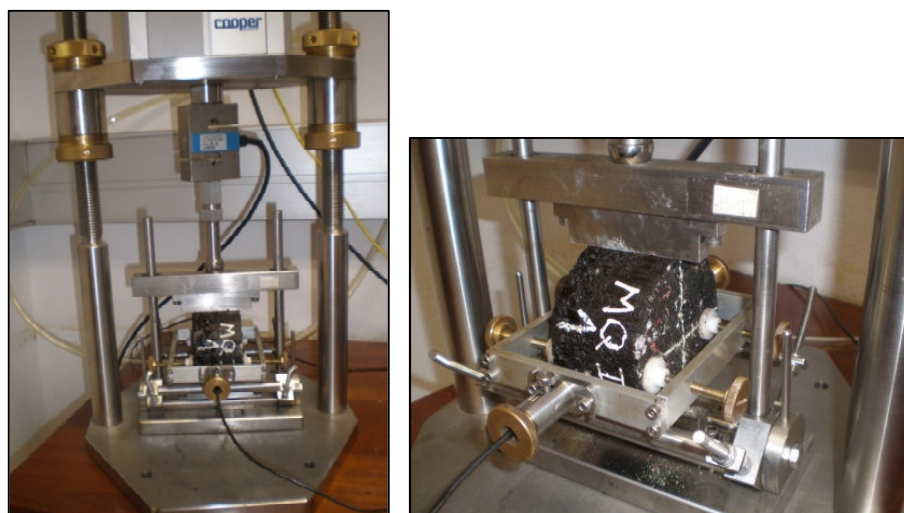


Figura 3.16 - Ensaio de compressão diametral (UBI, 2014)

3.4.2.4 Ensaio de Corte

O ensaio de corte proposto no Programa Strategic Highway Research Program (SHRP) com a designação *Repetitive Simple Shear Test at Constant Height (RSST-CH)*, preconiza a aplicação de cargas repetidas, permitindo efetuar a avaliação do comportamento de materiais betuminosos para pavimentação, do ponto de vista da deformação permanente (Sousa, J. *et al.*, 1991).

Os ensaios de corte a altura constante são realizados de forma a não ocorrer deformação volumétrica do provete. Assim, neste ensaio o provete é sujeito a tensões de corte.

Este tipo de ensaios está mais divulgado nos EUA estando incluídos no programa SHRP (metodologia SUPERPAVE) para avaliar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas quando sujeitas a temperaturas elevadas. Na Europa não é comum a sua utilização, não estando prevista nenhuma norma para a sua realização.

O equipamento de ensaios de Corte, Simple Shear Tester (SST), permite realizar diversos tipos de ensaios de corte. Durante o ensaio a altura do provete é mantida constante. Para analisar o comportamento das misturas à deformação permanente o procedimento de ensaio mais utilizado é o ensaio de corte cíclico a altura constante. Uma das bases deste ensaio é processar-se a volume constante. Assim, a deformação do provete ocorre por corte a volume constante. Estas deformações são as principais responsáveis pela formação de rodeiras em pavimentos. Este processo tem a desvantagem de fazer depender os resultados do volume de vazios inicial. Este ensaio também permite a rotação dos eixos principais, simulando o que ocorre quando um rodado solicita o pavimento.

Na Figura 3.17 mostra-se a instrumentação dos provetes para o ensaio de corte a altura constante (Santucci, 2001).

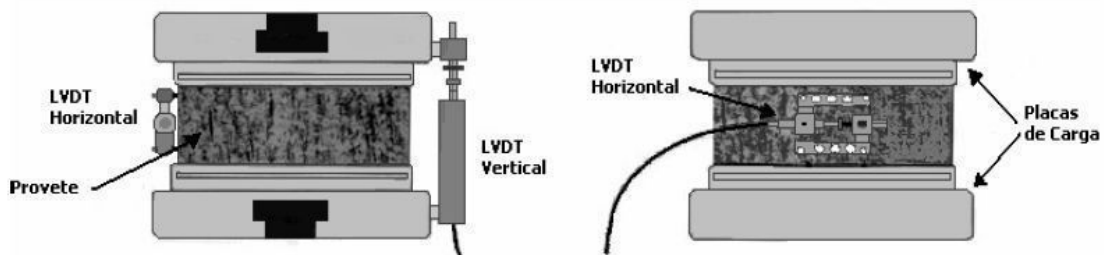


Figura 3.17 - Esquema da instrumentação de um provete para o ensaio de corte a altura constante (Santucci, 2001)

3.4.2.5 Ensaio de Cilindro Oco

É um ensaio complexo utilizado essencialmente para investigação, podendo ser utilizado em materiais granulares, como solos e agregados e em misturas betuminosas. Este ensaio permite aplicar ao provete forças axiais e de corte simultaneamente. É assim possível simular com mais rigor as solicitações a que o material está sujeito quando solicitado pelo rodado de um veículo, nomeadamente a rotação das tensões principais. Permitindo realizar esta rotação utilizando para isso uma combinação entre a aplicação de cargas axiais e de corte (aplicando tensão às paredes interiores do cilindro ou aplicando esforços de torção). As cargas aplicadas podem ser estáticas ou cíclicas. O provete é um cilindro oco, podendo ser obtido caroteando o interior de um provete cilíndrico e utilizando a parte exterior no ensaio.

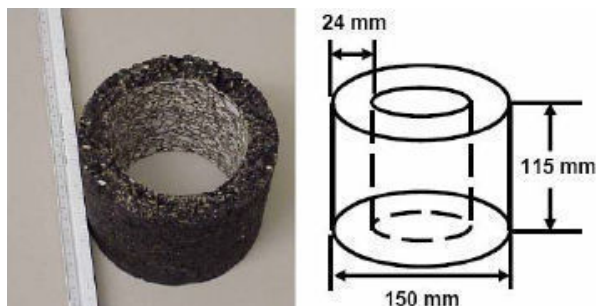


Figura 3.18 - Exemplo de um provete para o ensaio do cilindro oco e dimensões utilizadas (TRB, 2004)

O resultado do ensaio permite determinar a resistência à fadiga e o módulo de deformabilidade da mistura. Como permite obter a evolução da deformação com relação à tensão aplicada é possível inferir o comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente. Apesar das potencialidades deste ensaio, este é utilizado principalmente para caracterizar o comportamento das misturas betuminosas à fadiga e o módulo de deformabilidade, não se utilizando usualmente para a caracterização à deformação permanente.

O ensaio de cilindro oco é um ensaio muito complexo nas suas diferentes fases. A obtenção dos provetes exige algum esforço e a forma destes impossibilita a utilização de provetes recolhidos em obra. Este é um ensaio que, devido a estas condicionantes, apenas tem sido utilizado em investigação não parecendo reunir as condições para uma utilização na prática.

3.4.3 Ensaio de Simulação

Nos ensaios de simulação o objetivo é simular mais aproximadamente as ações do tráfego, utilizando para esse efeito um rodado. Estes ensaios podem ser realizados a escala reduzida em laboratório com condições controladas, ou serem realizados numa escala real em pista. O ensaio de simulação em laboratório (*Wheel tracking*) é o que se encontra no âmbito deste trabalho, pelo que se vai descrever com maior pormenor.

3.4.3.1 Ensaio de simulação em pista de laboratório - “*Wheel tracking*”

Os ensaios de simulação em pista de laboratório, designados por “*Wheel tracking tests*”, são cada vez mais utilizados em todo mundo, como uma ferramenta para avaliação do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas. Se bem que não possibilitem a obtenção de propriedades fundamentais dos materiais ensaiados, permitem efetuar uma avaliação comparativa do seu comportamento quando sujeitos à ação de passagens sucessivas de um rodado, sob condições de ensaio controladas (Freire, 2002). O ensaio de resistência à deformação permanente, ensaio de pista, permite avaliar a suscetibilidade à deformação da mistura betuminosa. Consiste na medição da profundidade de rodeira formada após passagens repetidas de uma roda normalizada sobre um provete, em condições de temperatura mais elevadas.



Figura 3.19 - Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação permanente (*Wheel tracking*) - (UBI, 2014)

Este tipo de ensaio tem a vantagem de as solicitações aplicadas ao provete serem do mesmo tipo das que ocorrem em serviço, em pavimentos sujeitos à ação do tráfego, embora as pressões aplicadas e as dimensões dos rodados sejam distintas.

O ensaio de pista (*Wheel tracking*) cujo objetivo é avaliar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas, é realizado de acordo com o especificado na norma EN 12697-22 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking*).

A avaliação da suscetibilidade à deformação dos materiais betuminosos é feita medindo a profundidade de rodeira formada após sucessivas passagens de uma roda sobre o provete a temperaturas constantes. De acordo com a norma existem três tipos de equipamentos passíveis de serem utilizados neste ensaio. O ensaio pode ser realizado recorrendo a um equipamento extra grande, grande ou pequeno, com acondicionamentos ao ar ou em água.

Dentro do equipamento de pequenas dimensões distinguem-se ainda dois procedimentos distintos (procedimento A e B) que diferem essencialmente, pelo ambiente em que decorre o ensaio, ao ar ou em banho de água (apenas para o procedimento B) e pela duração do ensaio.

O ensaio, pelo procedimento A, termina quando se atingem os 1000 ciclos de carga ou o sulco atingir uma profundidade de 15 mm, enquanto pelo procedimento B, o ensaio termina quando se atingem 10 000 ciclos de carga aplicados ou até que o sulco atinja uma profundidade de 20 mm. Considera-se que cada ciclo corresponde a duas passagens da roda, ida e volta. O equipamento de pequenas dimensões pelo procedimento A deriva, diretamente, das normas já utilizadas na Europa, nomeadamente em Inglaterra e Espanha (Dinis-Almeida, 2010).

O número de provetes necessários à realização do ensaio também varia consoante o equipamento, como se resume no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Número de provetes (adaptado da EN 12697-22)

Equipamento	Número mínimo de provetes
Grandes ou Extra-grandes dimensões	2
Pequenas dimensões, Proc A, ao ar	6
Pequenas dimensões, Proc B, ao ar	2
Pequenas dimensões, Proc B, em água	2

No caso de provetes acondicionados ao ar, os principais resultados que são possíveis retirar do ensaio de pista são a média da variação da deformação permanente ao ar - *Wheel tracking Slope in air* (WTS_{air}), a média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados - *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{air}) e a profundidade média da rodeira - *Mean Rut Depth in air* (RD).

A variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}) é obtida pela equação:

$$WTS_{air} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.1)$$

Onde,

WTS_{air} - Declive máximo da rodeira [mm por 10^3 ciclos carga];

d_{10000} - Profundidade da rodeira após 10000 ciclos [mm];

d_{5000} - Profundidade da rodeira após 5000 ciclos [mm].

O conceito subjacente ao ensaio de simulação de tráfego em laboratório é bastante intuitivo, pois o objetivo é observar o comportamento de uma amostra de mistura betuminosa quando solicitada por um pequeno rodado, tentando simular a uma escala inferior o que se passa num pavimento.

Os ensaios de *Wheel tracking* são, *à priori*, aqueles que mais facilmente poderão ser implementados em termos de mercado para utilização geral em termos de análise e controlo de qualidade (Brown *et al.*, 2001). São ensaios simples e cujo equipamento apresenta preços acessíveis. No entanto, é ainda necessário estabelecer características de ensaio e valores limite, de forma a tornar mais coerente a sua utilização e a interpretação dos resultados, nomeadamente, em termos de aceitação ou rejeição de uma mistura para ser utilizada num pavimento sujeito a determinadas ações de temperatura e de tráfego.

Em Portugal, não existem valores preconizados para os resultados do ensaio *Wheel tracking*, existindo apenas a condição no CE EP (2012) da realização do ensaio a 60 °C quando usado o equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar. Em Espanha, estão definidos valores nas especificações técnicas (PG3 - OC 29/2011) de acordo com a norma EN 12697-22, para camadas de desgaste de pavimentos, que se apresentam no quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Declive máximo da rodeira no intervalo 5.000 a 10.000 ciclos para camada desgaste (EN 12697-22 (mm por 10³ ciclos de carga), (Manual de pavimentação CEPISA, 2011)

Zona Térmica	Categoria de tráfego pesado				
	T00 e T0	T1	T2	T3	T4
Estival Quente		0,07		0,10	-
Média	0,07		0,10		-
Temperada		0,10			-

Os resultados do *Wheel tracking* são representados na forma gráfica, obtendo-se curvas, sendo possível distinguir três fases na curva resultante, como se pode verificar na figura 3.20.

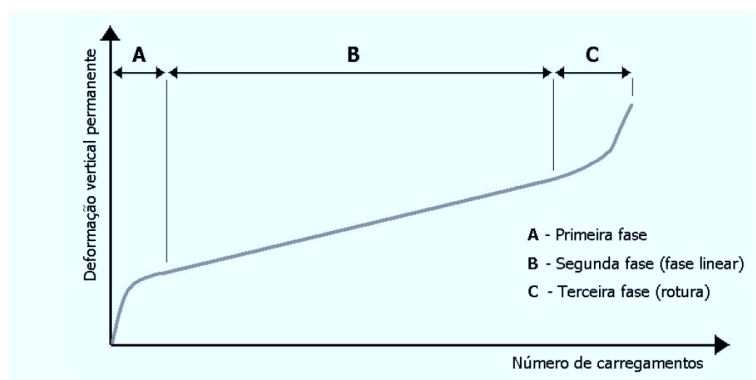


Figura 3.20 - Fases da evolução da deformação permanente (Adaptado de Freire, 2002)

A primeira fase (A), que resulta numa variação rápida e acentuada da inclinação da curva. Este comportamento explica-se pela deformação verificada não ser só devido a deformação por tensões de corte mas por existir também densificação na camada betuminosa. Esta densificação da mistura betuminosa aumenta a resistência à deformação permanente pois melhora os contactos entre os agregados e processa-se até a mistura ter resistência suficiente para suportar as cargas sem sofrer mais redução de volume, passando as deformações a ocorrer a volume constante.

Na segunda fase (B) a velocidade de deformação é inferior à da fase 1 e toma um valor constante. Nesta fase a curva de deformação é quase linear, pelo que a velocidade de deformação obtida nesta fase é usualmente o indicador utilizado para a caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente. Por último, na terceira fase a velocidade de deformação cresce rapidamente sofrendo o provete deformações apreciáveis. Esta fase é associada à rotura do provete. (Freire, 2002; De Hilster e Van de Loo, 1977).

3.4.3.2 Ensaio de simulação em pista à escala real

Os ensaios de simulação em pista à escala real foram desenvolvidos para avaliar o desempenho das estruturas de pavimentos, em particular no que se refere à capacidade de suportar as ações devidas à passagem do tráfego. O comportamento à deformação permanente pode pois ser avaliado através deste tipo de ensaio (Freire, 2002).

Estes ensaios permitem uma melhor simulação das condições de serviço observadas nos pavimentos, quer no que se refere à estrutura do pavimento, quer no que se refere às ações do tráfego, (configuração, distribuição lateral das passagens, velocidade de aplicação), bem como, para alguns tipos de equipamentos, às temperaturas observadas.

A vantagem deste tipo de ensaio é a obtenção de resultados num intervalo de tempo substancialmente reduzido, quando comparado com a situação real observada nos pavimentos em serviço. Como desvantagem pode referir-se o elevado custo de aquisição, bem como a implementação e a manutenção daquele tipo de equipamento. Por outro lado, é necessário dispor de meios adequados para o fabrico e a aplicação dos materiais de pavimentação, sempre que se pretenda estudar um tipo de material ou de estrutura diferente. (Freire, 2002).

Os ensaios de simulação à escala real são equipamentos complexos e extremamente dispendiosos. A sua utilização é sobretudo para conduzir trabalhos de investigação e de desenvolvimento tecnológico de materiais. Realiza-se no entanto uma abordagem a estes equipamentos pois os conhecimentos que estes permitem obter são de enorme valia. Neste caso o provete é, por assim dizer, um troço de pavimento, e a aplicação de cargas é realizada com rodados de camião, existindo alguns casos em que se realizaram troços experimentais com o carregamento realizado com camiões.

Este tipo de equipamentos recebe correntemente a designação de Accelerated Load Facility (ALF) e os ensaios de Accelerated Load Testing (ALT) ou Accelerated Pavement Testing (APT).

Estes ensaios têm a vantagem de simular a realidade de forma mais satisfatória, quer no que se refere à estrutura do pavimento (número e constituição das camadas, fabrico e colocação), quer no que se refere à aplicação das cargas (valor da carga, dimensão, configuração, velocidade e distribuição lateral). Nem todos os equipamentos dispõem de todas estas possibilidades existindo diferenças entre eles, aliás, cada equipamento é por assim dizer único uma vez que são construídos de raiz seguindo as especificações desejadas.

Existe alguma variedade nestes equipamentos, alguns assemelhando-se a equipamentos de *Wheel tracking* mas em escala real. Alguns situam-se em recintos fechados, estes têm a vantagem de fatores como a temperatura e a humidade serem controlados, isto permite que se realizem estudos em que estes fatores são conhecidos. Existem alguns que funcionam sob as condições atmosféricas existentes, tornando o ensaio mais real, mas tendo a desvantagem de os fatores climáticos não serem controlados, apenas podendo ser monitorizados. Existem equipamentos que permitem as duas possibilidades e ainda alguns que são móveis podendo realizar os ensaios em troços reais.

CAPÍTULO 4 - TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 Enquadramento

Nos métodos correntes para dimensionamento de pavimentos, a deformação permanente no pavimento é controlada pela tensão de compressão gerada por um rodado de um veículo pesado no topo do solo de fundação. Os ensaios, em geral, não permitem a quantificação da deformação permanente (cavado de rodeira) que irá ocorrer no pavimento. No entanto, permitem verificar se uma determinada mistura cumpre os requisitos relativamente a um parâmetro que representa esse fenómeno. A aceitação de uma mistura não implica conhecer o valor da rodeira causada pela deformação permanente das misturas betuminosas no pavimento. Apenas se assume que se a mistura cumprir determinados valores limite definidos para o ensaio, a deformação permanente que esta sofrer será aceitável, não colocando em causa a vida útil do pavimento (Gardete, 2006).

Neste capítulo descrevem-se as características fundamentais dos materiais constituintes das misturas e as características das misturas betuminosas ensaiadas, os métodos utilizados para fabrico dos provetes e lajetas de laboratório e apresentam-se os procedimentos e condições de ensaio utilizados na sua realização. O estudo experimental desenvolveu-se em três etapas, começando pela caracterização dos materiais e escolha da composição granulométrica, pela formulação da mistura ideal e pelo ensaio de desempenho à deformação permanente.

Foram fabricadas em laboratório três tipos de misturas betuminosas. A mistura betuminosa a quente (mistura de referência - MQ), mistura betuminosa temperada (MT) e mistura betuminosa temperada com incorporação de 30% de material fresado (MT30), que foram ensaiadas para avaliação da deformação permanente, usando o ensaio de pista *Wheel Tracking*. O estudo teve por base uma formulação granulométrica para as várias composições de acordo com o fuso estabelecido, AC16 Surf, preconizado e usado em Espanha, para camadas de desgaste. Esta escolha prende-se com o facto de vários estudos experimentais estarem a ser desenvolvidos pela *CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.* (Portugal) e *PROAS Betunes CEPSA* (Espanha) no âmbito das misturas com betumes temperados, tendo sido realizados vários trechos experimentais em Espanha (Carvalho e Barreno, 2013) que servirão como base comparativa ao presente estudo.

Os ensaios laboratoriais foram realizados nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI) e no laboratório disponibilizado pela Infralab - Laboratório de materiais, unipessoal, Lda, nomeadamente o ensaio de Marshall e o ensaio de sensibilidade à água.

4.2 Caracterização dos materiais utilizados

No fabrico das misturas betuminosas a quente foram usados agregados naturais e ligante, e no caso da mistura betuminosa temperada reciclada para além destes componentes, o material fresado (MF).

Os agregados usados são de origem granítica, brita 5/15, brita 3/6 e pó de pedra, provenientes da pedreira situada na Capinha, *Agrepor Agregados-Extracção de Inertes SA*. O ligante usado é o betume 35/50 para a mistura a quente e o betume temperado 35/50 para a mistura betuminosa temperada, da *CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.*. Na Figura 4.1 apresentam-se os componentes das misturas.

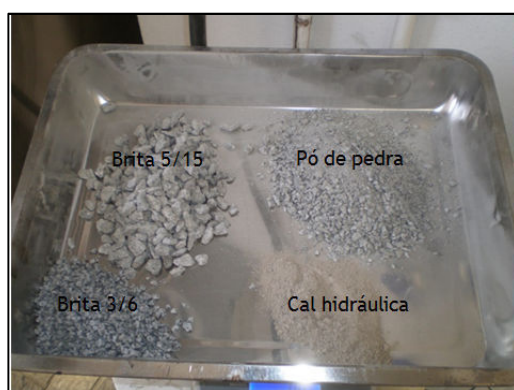


Figura 4.1 - Componentes da mistura betuminosa

As características físicas, geométricas e mecânicas, favoráveis a um bom comportamento das misturas durante a fase de construção do pavimento e um bom desempenho em serviço devem ser tidas em conta. Para a caracterização dos agregados e do material fresado foram realizados vários ensaios, nomeadamente a análise granulométrica, massa volúmica e absorção de água, e determinação do teor de betume envelhecido, por queima, do material fresado. De seguida, é feita de forma sucinta a descrição dos ensaios realizados aos materiais e respetivos resultados.

4.2.1 Material Fresado

O material fresado (RAP) usado nos ensaios laboratoriais era proveniente da A23 no nó de Vila Velha de Rodão. Na Figura 4.2 apresenta-se o material fresado.

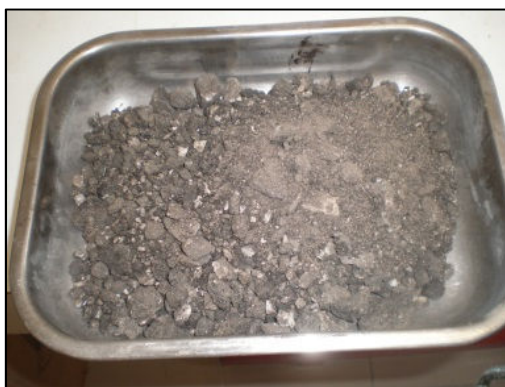


Figura 4.2 - Material fresado proveniente da A23 do Nó de Vila Velha de Rodão

Determinou-se a percentagem de teor de betume da referida amostra recorrendo à incineração em mufla, Figura 4.3, de acordo com a norma europeia EN 12697-39: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition*).



Figura 4.3 - Incineração em mufla (teor de betume envelhecido): a) Fresado antes da extração de betume, b) Fresado depois da extração de betume

No Quadro 4.1 apresenta-se os resultados obtidos referentes ao teor de betume envelhecido da mistura.

Quadro 4.1 - Teor do betume envelhecido do material fresado em laboratório por incineração em mufla (média de 5 amostras)

Amostra	Pb _{MBR} (%)
Material fresado (RAP)	5,0

O betume envelhecido do material fresado foi ainda analisado pela *PROAS Betunes CEP*SA, em Madrid, 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*).

No Quadro 4.2 apresentam-se os resultados da caracterização do ligante envelhecido, obtidos pela *PROAS Betunes CEP*SA.

Quadro 4.2 - Caracterização do betume envelhecido (*PROAS Betunes CEP*SA)

Amostra	Pb _{MBR} (%)	Penetração (10 ⁻¹ mm) [pen _{MBR}]	Ponto de amolecimento (°C)
Material fresado (RAP)	5,2	11,0	82,6

Dos valores fornecidos conclui-se que o ligante apresenta-se bastante envelhecido, dado que apresentam valores de penetração muito baixos e uma temperatura de amolecimento muito elevada.

4.2.2 Granulometria

O ensaio da análise granulométrica dos agregados foi realizado pelo método da peneiração, de acordo com a norma europeia EN 933-1: 2000 (*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração*).

No respeitante à análise granulométrica do material fresado, foi realizada antes e após extração do betume envelhecido. Na análise antes da extração usou-se o fuso granulométrico preconizado pelo CE EP, e o fuso adotado depois da extração foi o estabelecido nas especificações técnicas Espanholas (OC 29/2011 (PG3)).

O ensaio consiste na lavagem do material, secagem na estufa durante 24h, a uma temperatura de 110±5 °C e posteriormente na separação do material, por meio de peneiros, durante 5 minutos num agitador com vibração, como representado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Granulometria dos agregados: a) secagem b) peneiração

Na figura 4.5 apresenta-se a granulometria do material fresado antes da extração de betume, de acordo com o estabelecido no CE EP (Quadro 14.03.10.1.2a - Fuso II).

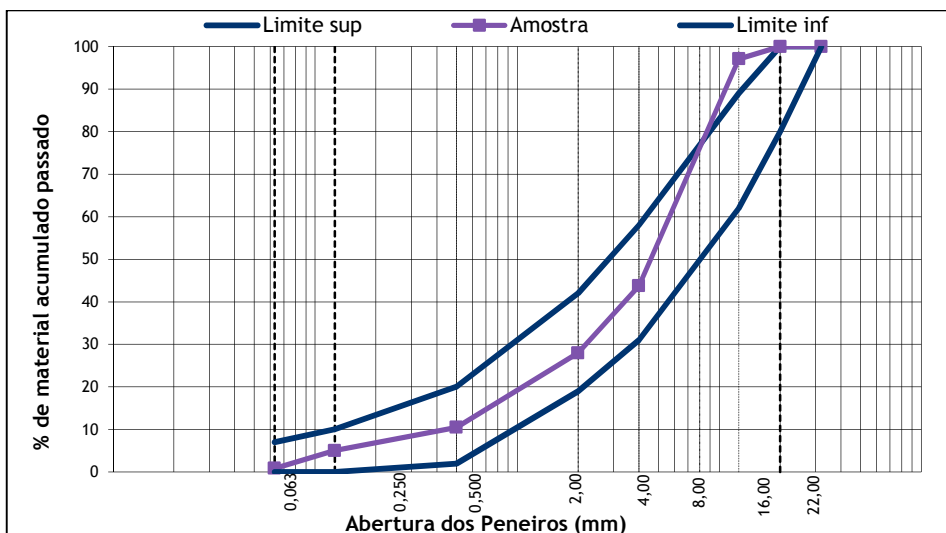


Figura 4.5 - Curva granulométrica do material fresado antes da extração de betume

Os resultados do ensaio da análise granulométrica são apresentados no Quadro 4.3 e as respectivas curvas granulométricas na Figura 4.6.

Quadro 4.3 - Análise granulométrica dos agregados e material fresado depois da extração de betume

Abertura dos peneiros [mm]	Porcentagem de material acumulado passado			
	Pó de pedra [%]	Brita 3/6 [%]	Brita 5/15 [%]	Material fresado [%]
22	100	100	100	100
16	100	100	100	98
8	100	100	37	78
4	83	46	0	55
2	59	2	0	42
0,5	32	0	0	27
0,25	22	0	0	18
0,063	8	0	0	6

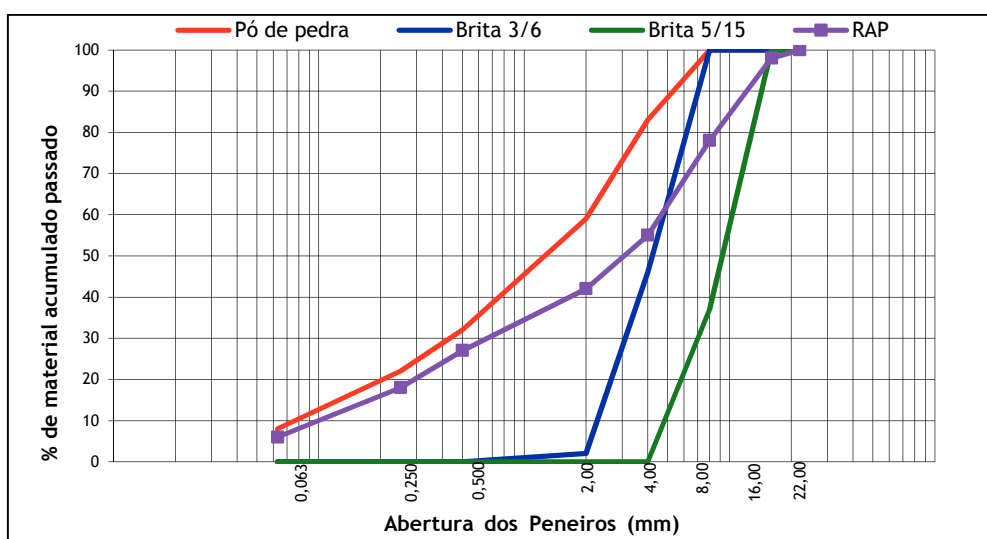


Figura 4.6 - Curvas granulométricas dos agregados e material fresado

4.2.3 Massa volúmica

A massa volúmica foi determinada de acordo com a norma europeia EN 1097-6: 2003 (Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água).

Este ensaio foi realizado por dois métodos distintos, o método do cesto de rede metálica (Figura 4.7) para a brita 5/15, e o método do picnómetro (Figura 4.8) para os restantes materiais (brita 3/6, pó de pedra e material fresado). Em ambos os métodos o material ficou imerso durante 24h, onde foi usada uma amostra de cerca de 1000 g de brita 5/15 e 500 g para os restantes materiais.



Figura 4.7 - Método do cesto de rede metálica (Brita 5/15)

Neste método o cálculo da massa volúmica (δ) é dado pela expressão (4.1).

$$\delta = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3} \times \rho_w \quad (4.1)$$

Onde,

δ - Massa volúmica do agregado [kg/m^3];

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

M_2 - Massa do cesto metálico vazio, imerso [g];

M_3 - Massa do cesto metálico com agregado, imerso [g];

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m^3];



Figura 4.8 - Método do picnómetro

No método do picnómetro o cálculo da massa volúmica (δ) é obtido pela expressão (4.2).

$$\delta = \frac{M1}{M1+M5-M4} \times \rho_w \quad (4.2)$$

Onde,

δ - Massa volúmica do agregado [kg/m^3];

M1 - Massa do agregado saturado com superfície seca [kg];

M4 - Massa do balão com o agregado e com água até ao traço de referência [g];

M5 - Massa do balão com água até ao traço de referência [g];

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m^3];

No Quadro 4.4 apresentam-se os resultados obtidos para a massa volúmica.

Quadro 4.4 - Massa volúmica

Massa volúmica [Kg / m^3]	
Pó pedra	2640
Brita 3/6	2650
Brita 5/15	2610
Material fresado	2410
Cal Hidráulica	2810

4.2.4 Absorção de água

O ensaio da absorção de água foi realizado apenas para os agregados naturais, e de acordo com a norma europeia EN 1097-6: 2003 (Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água). Com as amostras utilizadas para a massa volúmica, efetuou-se o ensaio da absorção de água colocando-se na estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C para secagem até massa constante.

O cálculo da absorção de água (A) é dado pela expressão (4.3).

$$A = \frac{M1-M2}{M2} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde,

A - Absorção de água do agregado [%];

M1 - Massa da amostra saturada com superfície seca [g];

M2 - Massa da amostra seca até massa constante [g];

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m^3].

No Quadro 4.5 apresentam-se os valores obtidos para a absorção de água.

Quadro 4.5 - Absorção de água

Absorção de água [%]	
Pó pedra	0,55
Brita 3/6 e Brita 5/15	1,00

4.2.5 Ligante betuminoso

Os ligantes usados nas misturas foram o betume 35/50 e o betume temperado 35/50, fornecido pela *CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.*. Este tipo de betume é o vulgarmente usado em Portugal, sendo o betume ideal quando se pretende misturas com temperaturas de fabrico de aproximadamente 162 °C a 166 °C e temperatura de compactação entre 152 °C e 156 °C, para além de apresentar valores de ensaio à penetração favoráveis do ligante das misturas betuminosas recicladas temperadas.

Os betumes apresentam como propriedades as resumidas no Quadro 4.6., de acordo com o “Certificado de Análise” fornecido pela *CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.*.

Quadro 4.6 - Características dos ligantes betuminosos

Ensaio	Norma	Betume 35/50	Betume temperado 35/50
Penetração 25 °C, 100 gr, 5 seg [mm]	EN 1426	45,0	47,0
Ponto de amolecimento [°C]	EN 1427	54,5	54,7

As características indicadas obedecem à Especificação EN12591 de Abril de 2009, emitida pelo CEN - Comité Europeu de Normalização.

4.3 Estudo da composição das misturas

4.3.1 Fuso granulométrico

Na escolha do fuso teve-se em consideração as misturas a analisar, (mistura betuminosa a quente (MQ), mistura betuminosa temperada (MT) e mistura betuminosa temperada com incorporação de 30% de fresado (MT30) e a camada em estudo (desgaste). O fuso adotado foi o usado em Espanha para a mistura AC16 Surf em camadas de desgaste. Em simultâneo, verificou-se a conformidade das amostras com os limites estabelecidos no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CE EP). No Quadro 4.7 apresenta-se o fuso granulométrico definido nas especificações técnicas Espanholas (OC 29/2011 PG3).

Quadro 4.7 - Fuso granulométrico

Abertura da malha (mm)	Fuso
22	100
16	90-100
8	64-79
4	44-59
2	31-46
0,5	16-27
0,25	11-20
0,063	4-8

No Quadro 4.8 apresentam-se as granulometrias obtidas para as misturas estudadas, e na figura 4.9 as curvas granulométricas.

Quadro 4.8 - Granulometrias das misturas estudadas

Abertura da malha (mm)	MQ	MT	MT30
	% de material acumulado passado		
22	100	100	100
16	100	100	99
8	78	78	78
4	48	48	48
2	30	30	31
0,5	17	17	19
0,25	13	13	14
0,063	7	7	7

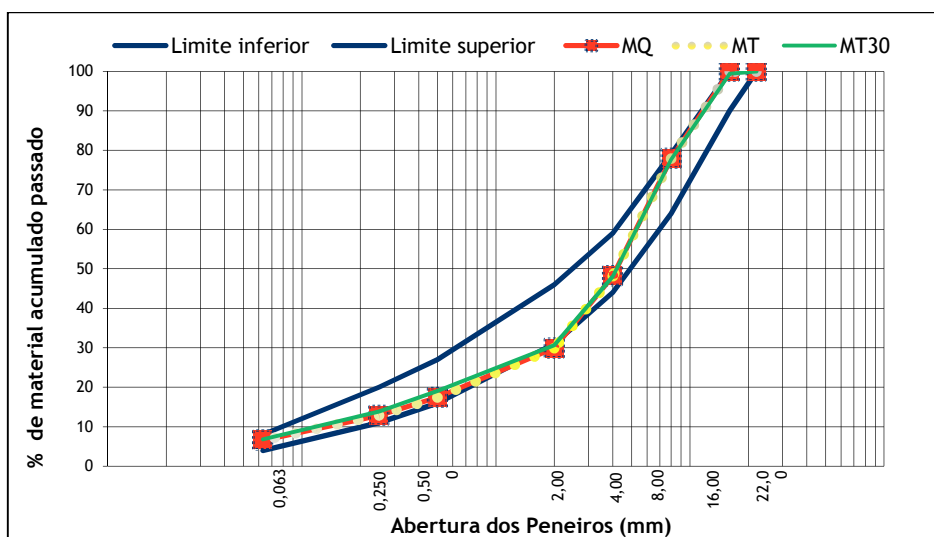


Figura 4.9 - Curva granulométrica das misturas

Como se pode verificar da Figura 4.9 a mistura a quente e a mistura temperada apresentam a mesma granulometria, justificado pelo facto de a sua composição diferir unicamente no ligante, betume 35/50 e betume temperado 35/50, respetivamente.

Da análise das características dos agregados obtém-se a composição das misturas betuminosas a estudar, apresentada no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Composição das misturas betuminosas (%)

Material	Mistura betuminosa		
	MQ	MT	MT30
Pó de pedra	45	45	25
Brita 3/6	17	17	17
Brita 5/15	35	35	25
Cal hidráulica	3	3	3
Fresado	–	–	30

4.3.2 Quantidade inicial de betume (P_b)

Baseado na superfície específica dos agregados a percentagem de betume da mistura (P_b), em relação ao peso da mistura de agregados, foi determinada segundo a expressão empírica (4.4).

$$P_b = 0,035 \times A + 0,045 \times B + K \times C + F \quad (4.4)$$

Onde,

P_b - Percentagem de betume em relação ao peso total da mistura;

A - Percentagem de agregados retidos no peneiro 2,36 mm;

B - Percentagem de agregados que passa no peneiro 2,36 mm e fica retido no peneiro 0,075 mm;

C - Percentagem de agregados que passa no peneiro 0,075 mm;

K - Constante, função da quantidade de material que passa no peneiro 0,075 mm;

K= 0,15 para 11-15 % passados no peneiro 0,075 mm

K= 0,18 para 6-10 % passados no peneiro 0,075 mm

K= 0,20 para ≤ 5 % passados no peneiro 0,075 mm

F - Fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2%) Na falta de informação F=0,7%

De acordo com os valores anteriores foi considerado o k de 0,18 e um fator de absorção dos agregados (F) de 0,7 %.

Para o cálculo da quantidade de betume novo (P_{bN}) a adicionar na mistura betuminosa temperada com fresado, considerou-se o betume envelhecido presente no material fresado, calculado pela expressão (4.5).

$$P_{bN} = P_b - \frac{P_{bMBR} - TR}{100} \quad (4.5)$$

Onde,

P_{bN} - Percentagem de betume novo expressa como percentagem da massa total da mistura;

P_b - Percentagem de betume estimada em [4.4];

P_{bMBR} - Teor de betume das misturas betuminosas recuperadas [Quadro 4.1];

TR - Taxa de reciclagem.

Apresenta-se no Quadro 4.10 o teor de betume das misturas betuminosas.

Quadro 4.10 - Teor de betume (%)

Mistura	P_b	P_{bN}
MQ	5,4	-
MT	5,4	-
MT30	5,42	3,9

Para a mistura betuminosa com incorporação de material fresado efetuou-se ainda o estudo da penetração do ligante final (betume envelhecido + betume novo), através da fórmula (4.6).

$$\log(\text{pen}_R) = TRb \cdot \log(\text{pen}_{MBR}) + (1 - TRb) \cdot \log(\text{pen}_N) \quad (4.6)$$

Onde,

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

TRb - Taxa de reciclagem de betume determinada por:

$$TRb = \frac{TR \cdot Pb_{MBR}}{Pb} \quad (4.7)$$

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

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

No estudo foi considerado que a penetração do ligante final (pen_R) da mistura betuminosa com incorporação de material fresado seria no mínimo de 30×10^{-1} mm, dado que é o valor considerado em Portugal, e referido por outros autores como Baptista (2006). O valor da penetração do ligante envelhecido do material fresado (pen_{MBR}) e da penetração do ligante novo (pen_N), são 11×10^{-1} mm e 47×10^{-1} mm, como descrito nos Quadros 4.2 e 4.5 respetivamente. Desta forma, pela expressão (4.6) obtém-se uma taxa de reciclagem de betume (TRb) de 31%. Do teor de betume das misturas betuminosas recuperadas obtido em 4.2.1 e pela expressão (4.7) obtém-se um P_b de 4,9%, e consequentemente, pela expressão 4.5 uma percentagem de betume novo (Pb_N) de 3,4%.

Apresenta-se no Quadro 4.11 a síntese dos resultados obtidos no estudo para a penetração de ligante final, no que diz respeito à taxa de reciclagem, à percentagem de betume em relação ao peso total da mistura e à percentagem de betume novo expressa como percentagem da massa total da mistura.

Quadro 4.11 - Síntese de resultados obtidos no estudo de penetração do ligante final das misturas betuminosas com incorporação de material fresado.

Mistura	TRb [%]	Pb [%]	Pb _N [%]
MT30	31	4,9	3,4

Dos dois estudos realizados (incineração em mufla e por centrifugação) obteve-se resultados similares, no entanto para confirmação dos valores obtidos teoricamente, procedeu-se à produção de misturas com diferentes quantidades de betume, para visualmente se avaliar o excesso ou falta de betume. Escolheu-se iniciar o fabrico das misturas com uma percentagem de 3,4 % de betume. Da observação visual verificou-se um imperfeito revestimento dos agregados em que a mistura apresentava um aspeto seco. De seguida, realizou-se uma mistura com mais 0,5 % de betume. Nesta verificou-se uma melhoria no seu aspeto, no entanto alguns agregados não estavam totalmente revestidos.

Optou-se por variar a percentagem de betume mais 0,5 %, que corresponde á percentagem obtida por incineração em mufla (4,4 %), sendo neste caso o aspeto da mistura aceitável, com um bom revestimento dos agregados. Para confirmação variou-se mais 0,5 % a percentagem de betume (4,9 %), no entanto com esta percentagem a mistura já apresentava excesso de betume. Da análise, escolheu-se as percentagens de 3,9 %, 4,4 % e 4,9 % para prosseguimento do trabalho experimental (Figura 4.10).



Figura 4.10 - Mistura betuminosa com incorporação de 30 % material fresado: a) 3,9 % betume b) 4,4 % betume c) 4,9 % betume

4.3.3 Escolha da percentagem de betume ideal

Estimada a percentagem de betume preparam-se provetes variando 0,5% para cada lado do valor estimado. De seguida, realizam-se ensaios como o módulo de rigidez por tração indireta (ITSM), o Marshall e a sensibilidade à água, para a escolha do teor de betume ideal.

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*). Na totalidade foram moldados 27 provetes (3 provetes para cada percentagem de betume de cada mistura), com aproximadamente 1100 g e com as percentagens de cada material apresentado no quadro 4.8.



Figura 4.11 - Fabrico dos provetes

No fabrico dos provetes teve-se o cuidado de aquecer os agregados e o betume previamente, assim como os moldes. Verificou-se regularmente a temperatura das misturas, 165 °C no fabrico da mistura betuminosa a quente e a temperatura de compactação de aproximadamente 155 °C. Na mistura betuminosa temperada a temperatura da mistura foi superior a 125 °C e a temperatura de compactação foi superior a 115 °C. Para moldar os provetes usaram-se os moldes Marshall, com aproximadamente 63,5 mm de altura e 101,6 mm de diâmetro. Colocou-se o conjunto constituído pelo colar, molde e placa de base, previamente untado com óleo no compactador. Todo este processo de fabrico encontra-se representado na figura 4.11.

A compactação foi realizada 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 em cada face do provete. Passadas 4 horas desmoldaram-se os provetes, como mostrado na Figura 4.12.



Figura 4.12 - Compactação e desmoldagem dos provetes

Na figura 4.13 apresentam-se os 27 provetes produzidos para as três misturas, com as diferentes percentagens de betume.



Figura 4.13 - Provetes cilíndricos fabricados e ensaiados

4.3.3.1 Baridade máxima teórica

Segundo a norma EN 12697 - “*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt*”, parte 5 - “*Determination of the maximum density*” e o procedimento C, calculou-se matematicamente a baridade máxima teórica (BMT) de cada mistura (Quadro 4.12). No procedimento matemático a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa é calculada pela sua composição (percentagem de betume e de agregado) e das baridades dos constituintes da mistura. Para o cálculo da BMT, aplicou-se a expressão (4.8).

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\frac{P_a}{\rho_a} + \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (4.8)$$

Onde,

ρ_{mc} - Máxima densidade do material no cálculo [kg / m³];

P_a - Percentagem de agregado na mistura [%];

P_b - Percentagem de ligante na mistura [%];

ρ_a - Densidade aparente do agregado [Kg / m³];

ρ_b - Densidade do ligante, a 25 ° C, [kg / m³];

Obteve-se os resultados apresentados no quadro 4.10.

Quadro 4.12 - Baridade Máxima Teórica

Mistura	Teor de Betume [%]	BMT [Kg / m ³]
MQ	4,9	2450
	5,4	2430
	5,9	2420
MT	4,9	2450
	5,4	2430
	5,9	2420
MT30	3,9	2410
	4,4	2410
	4,9	2390

4.3.3.2 Baridade

A baridade 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*) tendo sido adotado o Procedimento B, baridade saturada com superfície seca (Bulk density - SSD).

O cálculo da baridade saturada com superfície seca (ρ_{bssd}) foi efetuado através da expressão (4.9).

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (4.9)$$

Onde,

ρ_{bssd} - Baridade da mistura compactada saturada com superfície seca [kg/m^3];

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/m^3].

No Quadro 4.13 apresentam-se os resultados obtidos da baridade.

Quadro 4.13 - Baridade saturada com superfície seca

Mistura	Teor de Betume [%]	Baridade (SSD) [kg/m^3]
MQ	4,9	2340
	5,4	2330
	5,9	2390
MT	4,9	2350
	5,4	2350
	5,9	2350
MT30	3,9	2310
	4,4	2280
	4,9	2270

4.3.3.3 Ensaio Marshall

No ensaio Marshall usaram-se os provetes cilíndricos com um diâmetro de 101,6 mm e 63,5 mm de altura. O ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 12697-34: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test*), que consiste em aplicar uma carga diametralmente aos provetes, que estavam em banho-maria a uma temperatura de $60 \pm 1^\circ\text{C}$, entre 40 a 60 minutos (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Ensaio Marshall - Provetes em banho-maria a uma temperatura de 60°C

Os provetes são colocados no estabilômetro (Figura 4.15) e comprimidos segundo o seu diâmetro a uma velocidade constante de $50 \pm 2 \text{ mm}/\text{min}$ levando-os até à rotura.



Figura 4.15 - Ensaio Marshall - Rotura dos provetes

Do ensaio resulta a força máxima medida no momento da rotura, estabilidade Marshall, e a respetiva deformação Marshall. Na Figura 4.16 apresentam-se os resultados obtidos do ensaio e respetivas curvas das 3 misturas.

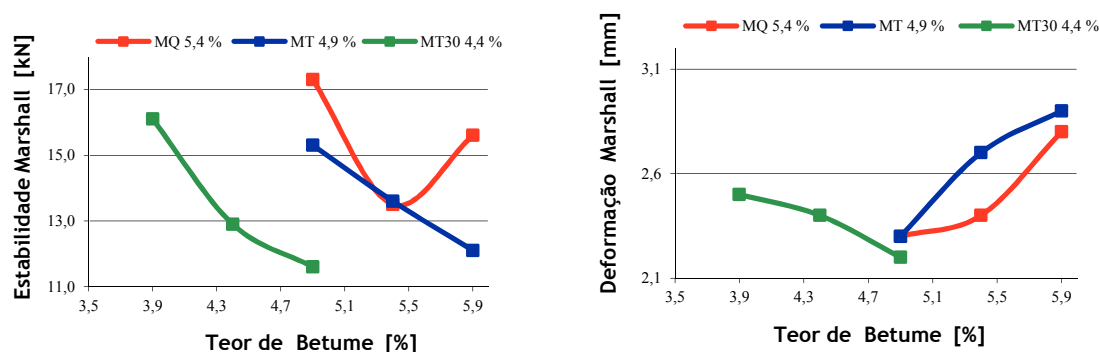


Figura 4.16 - Estabilidade e deformação Marshall (valores médios)

Determinaram-se ainda a porosidade V_m , os vazios na mistura de agregados *VMA*, e os vazios no agregado preenchido com betume *VFB*, exigido no caderno de encargos. Sendo que, estas exigências não variam com a classe de tráfego ou com a temperatura prevista para o pavimento.

De acordo com a norma na norma europeia EN 12697-8: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*), para a porosidade aplica-se a expressão (4.10) e para o volume de vazios na mistura de agregados a expressão (4.11).

A porosidade (V_m) é calculada pela expressão.

$$V_m = \left(\frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \right) \times 100 \quad (4.10)$$

Onde,

V_m - Porosidade da mistura [%];

ρ_m - Baridade máxima teórica da mistura [Kg / m³];

ρ_b - Baridade da amostra [Kg / m³].

Os vazios na mistura de agregados (VMA) é calculado pela expressão.

$$VMA = V_m + B \left(\frac{\rho_b}{\rho_B} \right) \quad (4.11)$$

Onde,

VMA - Vazios na mistura de agregados [%];

V_m - Porosidade da mistura [%];

B - Teor de ligante da amostra (em mistura de 100%) [m / m];

ρ_b - Baridade da amostra [Kg / m³];

ρ_B - Massa volúmica do ligante [Kg / m³].

Calculou-se o volume de vazios no agregado preenchido com betume pela expressão (4.12).

$$VFB = \left(\left(B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \right) / VMA \right) \times 100 \quad (4.12)$$

Onde,

VFB - Vazios no agregado preenchido com betume [%];

B - Teor de ligante da amostra (em mistura de 100%) [m / m];

ρ_b - Baridade da amostra [Kg / m³];

ρ_B - Massa volúmica do ligante [Kg / m³];

VMA - Vazios na mistura de agregados [%].

Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 4.17.

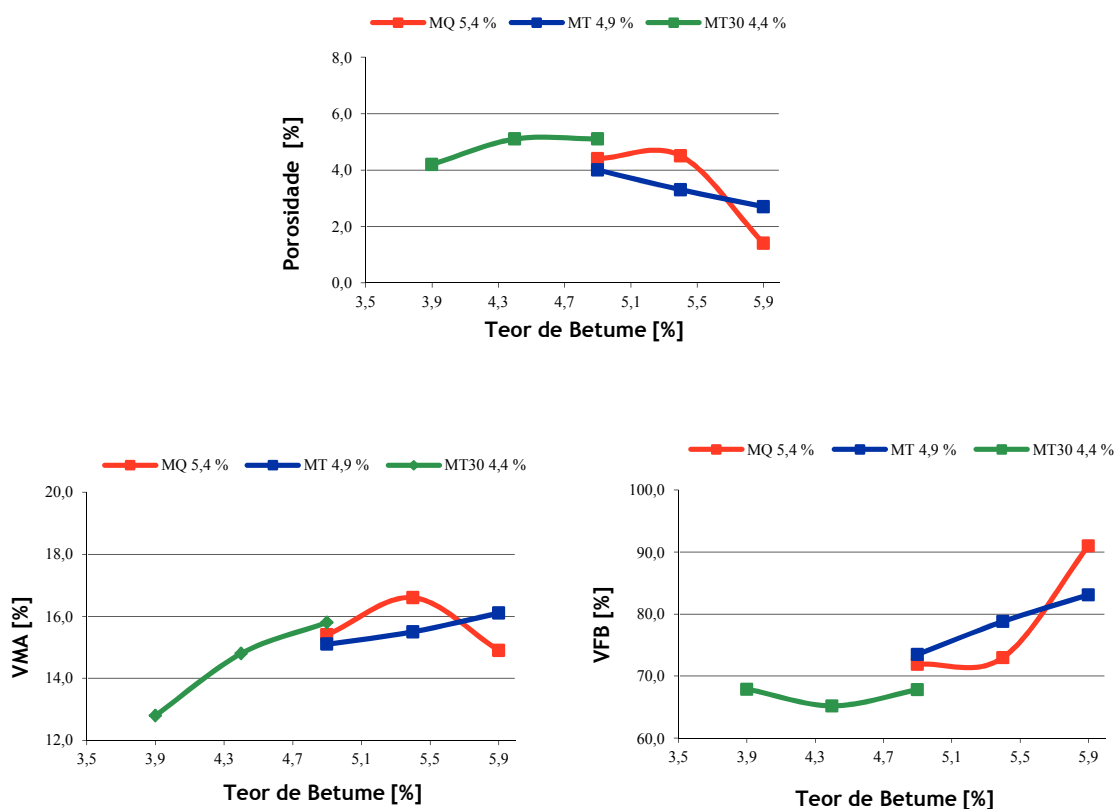


Figura 4.17 - Resultados da porosidade V_m , VMA e VFB (valores médios)

A escolha do betume ideal de cada mistura foi baseada num conjunto de parâmetros. Realizados todos os ensaios e cálculos descritos anteriormente, analisaram-se e compararam-se os limites preconizados nas especificações técnicas Espanholas (OC 29/2011 PG3) e no CE EP, resumidos no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 - Valores limite para Marshall

	CE EP	PG3
Estabilidade [Kn]	7,5 - 15	> 12,5
Deformação [mm]	2 - 4	2 - 3,5
Porosidade V_m [%]	3-5	4-6
VMA [%]	> 14	–

Os resultados para as diferentes misturas e teores de betume apresentam-se no Quadro 4.15, cumprindo os limites estabelecidos no Quadro 4.14, para estabilidade, deformação, porosidade e VMA. No que diz respeito aos valores obtidos para o ITSM não existe qualquer valor de referência no CE EP ou no PG3, não tendo sido possível ter em conta estes resultados na escolha do teor de betume ideal.

Quadro 4.15 - Síntese dos valores característicos das misturas

Mistura		MQ	MT	MT30
Teor de betume [%]		5,4	4,9	4,4
Baridade [kg / m ³]		2330	2350	2280
Marshall	Estabilidade [Kn]	13,5	15,3	12,9
	Deformação [mm]	2,4	2,3	2,4
V _m [%]		4,5	4,0	5,1
VMA [%]		16,6	15,1	14,8

4.4 Ensaios de caracterização das misturas

4.4.1 Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta - ITSM

O ensaio foi realizado no equipamento *Nottingham Asphalt Test* (NAT) segundo o Anexo C da norma europeia EN 12697-26: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*). Na realização do ensaio adotaram-se alguns parâmetros, tendo em consideração a dimensão dos provetes e preconizados na norma europeia EN 12697-26 (2004), como a temperatura 20 °C, o diâmetro de 101.6 mm, coeficiente de *Poisson* de 0.35, o tempo de crescimento de carga (RT) (tradução do termo inglês “*rise time*”) 124 ms, a deformação horizontal máxima 5 mm e 10 aplicações de carga. No que diz respeito á altura do provete é a média de 3 medições. Na Figura 4.18 apresenta-se o equipamento usado no ensaio.



Figura 4.18 - Ensaio do módulo de rigidez por tração indireta (Equipamento *Nottingham Asphalt Test*)

No Quadro 4.16 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio do módulo de rigidez por tração indireta, para as misturas.

Quadro 4.16 - Módulo de rigidez nas misturas

Mistura	Teor de betume [%]	ITSM [Mpa]
MQ	5,4	5021
MT	4,9	3611
MT30	4,4	4750

4.4.2 Sensibilidade à água

O ensaio de avaliação da sensibilidade à água foi realizado de acordo com a norma EN 12697-12: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*). Foram fabricados 18 provetes cilíndricos (6 provetes para cada mistura) nos moldes Marshall (Figura 4.19). O seu fabrico foi semelhante aos provetes fabricados para o ensaio de ITSM e Marshall. Caracterizaram-se volumetricamente, o peso, a altura e o diâmetro para obtenção da baridade (Figura 4.20).



Figura 4.19 - Provetes para ensaio de sensibilidade à água

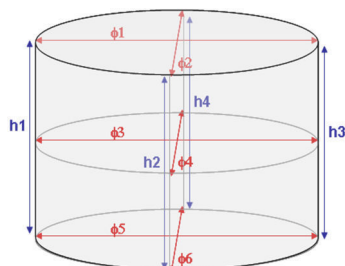


Figura 4.20 - Determinação das dimensões dos provetes

A baridade de cada provete foi obtida pela expressão (4.13) de acordo com o procedimento D da norma EN 12697-6: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*).

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times h} \times 10^6 \quad (4.13)$$

Onde,

$\rho_{b,dim}$ - Baridade da mistura [Kg / m³];

m_1 - Massa do provete [g];

h - Altura do provete [mm];

d - Diâmetro provete [mm].

Em cada mistura, fez-se a separação dos provetes em dois grupos submetidos a condições diferentes: o grupo seco e o grupo imerso. A separação dos provetes fez-se de acordo com o preconizado na norma, ou seja, tendo em conta a semelhança de baridade entre eles. No Quadro 4.17 apresenta-se a média das dimensões dos provetes e respetiva baridade média (3 provetes).

Quadro 4.17 - Dimensões e Baridade "geométrica" dos provetes

	MQ		MT		MT30	
	Provetes "a seco"	Provetes "imersos"	Provetes "a seco"	Provetes "imersos"	Provetes "a seco"	Provetes "imersos"
h (mm)	62,3	60,4	62,5	62,1	61,3	61,0
d (mm)	101,4	101,6	101,5	101,0	101,5	101,5
m_1 (g)	1162,0	1153,3	1152,9	1152,2	1140,5	1155,5
$\rho_{b,dim}$ (kg / m ³)	2380	2370	2410	2330	2380	2350

O grupo seco foi mantido ao ar a uma temperatura constante de 20 ± 5 °C. O grupo imerso submeteu-se a vácuo, Figura 4.21, durante 30 ± 5 min em água a 20 ± 5 °C, sendo posteriormente colocados a saturar em água à temperatura de 40 ± 1 °C, durante um período de 68 a 72 horas.

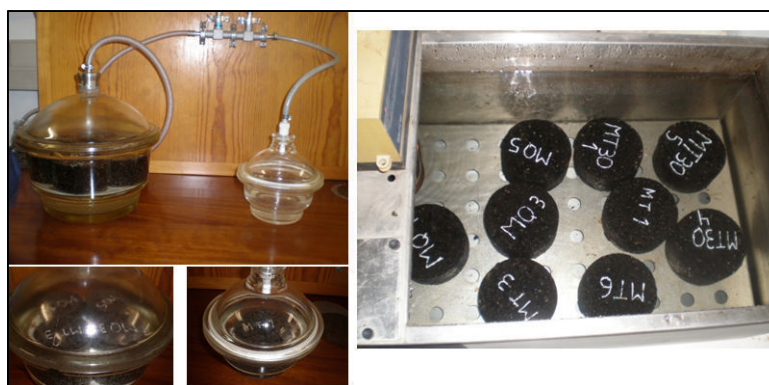


Figura 4.21 - Vácuo e saturação dos provetes

Decorrido o período indicado os provetes foram retirados da água a 40 °C e colocados imersos em água a 15 °C durante mais 2 horas.

De seguida, ensaiaram-se os provetes 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*). A carga foi aplicada a uma velocidade de 50 ± 2 mm/min. O ensaio foi realizado no laboratório da Infralab - Laboratório de materiais, unipessoal, Lda.

Na Figura 4.22 apresenta-se o equipamento usado para o ensaio e indicação de uma das roturas verificadas nos provetes.



Figura 4.22 - Ensaio de sensibilidade à água a) Provete com “Fratura de tração clara”

Dos resultados obtidos no ensaio obtém-se a resistência conservada em tração indireta (*ITSR - Indirect tensile strength ratio*) e a resistência à tração em compressão diametral (*ITS*) pelas expressões (4.14) e (4.15), respetivamente.

$$ITSR = 100 \times \frac{ITSw}{ITSd} \quad (4.14)$$

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (4.15)$$

Onde,

ITSR - Resistência conservada em tração indireta [%];

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

ITSd - 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].

No Quadro 4.18 apresentam - se os resultados (média dos 3 provetes) para *ITSR* e *ITS*.

Quadro 4.18 - Resultados de *ITSR* e *ITS*

Mistura	Provete	P [Kn]	ITS [Kpa]	ITSR [%]
MQ	Provete "seco"	23,490	2370	97
	Provete "imerso"	22,210	2300	
MT	Provete "seco"	20,087	2020	97
	Provete "imerso"	19,160	1950	
MT30	Provete "seco"	27,937	2860	100
	Provete "imerso"	28,390	2920	

Em Portugal não estão estabelecidos valores limite para a sensibilidade à água, mas de acordo com as especificações espanholas (PG3, 2011) estabelecem um limite mínimo de 80 % para a resistência conservada em tração indireta para misturas betuminosas, verifica-se assim que as misturas betuminosas cumprem o limite estabelecido. Sendo as MT30 que apresentam uma maior resistência de sensibilidade à água.

De acordo com a norma europeia EN 12697-23 (2003) podemos classificar a rotura do provete de 3 formas, como verificado na Figura 4.23.

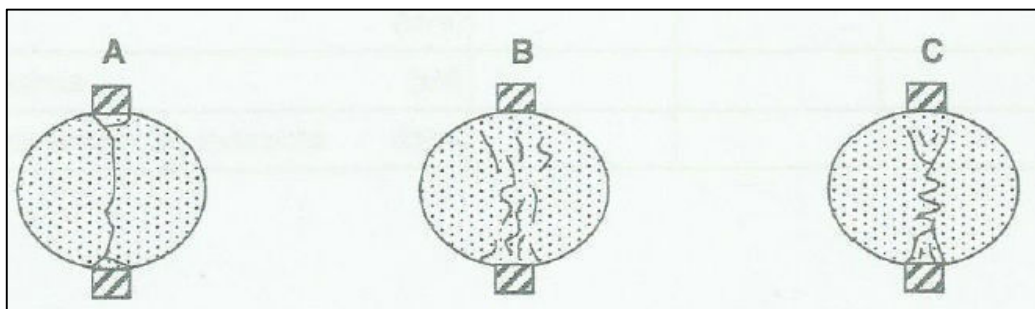


Figura 4.23 - Tipos de rotura dos provetes (Fonte: Infralab, 2014)

A - “Fratura de tração clara” - O Provete quebra suavemente durante o curso do ensaio numa direção diametral, possivelmente com exceção de pequenas secções triangulares na proximidade da zona de contacto das tiras de pressão.

B- “Deformação” - O provete sem clara (reconhecível) linha de fratura.

C - “Combinação” - Provete com uma linha de fratura limitada e uma área de maior deformação na proximidade da zona de contacto das tiras de pressão.

Na Figura 4.24 apresentam-se as fraturas “A” e “B” verificadas em dois dos provetes ensaiados e no Quadro 4.19 o tipo de rotura de cada provete.



Figura 4.24 - Rotura nos provetes: a) Rotura do tipo “A” b) Rotura do tipo “B”

Quadro 4.19 - Tipo de rotura nos provetes

Provetes MQ	Tipo de rotura	Provetes MT	Tipo de rotura	Provetes MT30	Tipo de rotura
MQ1	B	MT1	A	MT30 1	A
MQ2	A	MT2	A	MT30 2	A
MQ3	B	MT3	A	MT30 3	A
MQ4	A	MT4	A	MT30 4	A
MQ5	B	MT5	A	MT30 5	A
MQ6	A	MT6	A	MT30 6	A

4.4.3 Resistência à deformação permanente

O ensaio utilizado para avaliar a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas foi o ensaio de simulação em pista de laboratório (“*Wheel tracking test*”).

Produziram-se 3 lajetas para cada mistura com 30x30x6 cm de acordo com a norma europeia EN 12697-35:2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing*). Na compactação foi usada a placa vibratória, e, como nos ensaios anteriores, teve-se o cuidado de verificar regularmente a temperatura de compactação, para desta forma se simular uma mistura semelhante às misturas em obra. Posteriormente as lajetas foram desmoldadas, sendo colocadas sobre uma superfície plana a 20 °C.

Na Figura 4.25 apresentam-se as etapas de fabrico (Preparação e compactação da mistura betuminosa) e na Figura 4.26 as respetivas lajetas para realização do ensaio à deformação permanente.



Figura 4.25 - Fabrico das lajetas 30x30x6 cm: a)Preparação da mistura b)Colocação da mistura no molde
c) Compactação da mistura

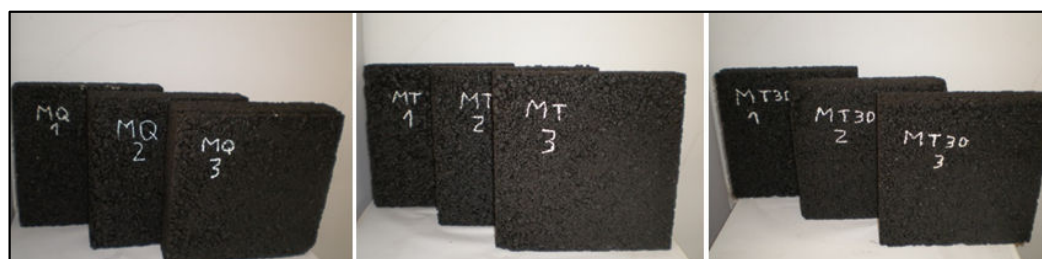


Figura 4.26 - Lajetas 30x30x6 cm

Determinou-se a baridade saturada com superfície seca das lajetas quando estas tinham 14 dias. O procedimento e a norma (EN 12697-6:2003) foi o descrito no ponto 4.3.3.2 deste trabalho.

De forma análoga com o descrito no ponto 4.3.3.3 determinou-se a porosidade (V_m), os vazios na mistura de agregados (VMA) e os vazios no agregado preenchido com betume (VFB) para as lajetas, os resultados obtidos são os que se apresentam no Quadro 4.20.

Quadro 4.20 - Resultados da baridade (ρ), porosidade (V_m), vazios na mistura de agregados (VMA) e vazios no agregado preenchidos com betume (VFB)

Mistura	MQ	MT	MT30
Baridade [Kg / m ³]	2181	2162	2262
V_m [%]	10,4	12,0	6,0
VMA [%]	21,7	21,9	15,6
VFB [%]	52,1	46,5	61,2

Dos resultados apresentados pode concluir-se que a porosidade das lajetas apresenta valores superiores aos obtidos no ensaio de formulação pelo método Marshall (Figura 4.15), obtendo-se apenas valores aceitáveis para a mistura MT30. Os elevados valores de porosidade nas lajetas foram influenciados pelo processo de compactação que se conclui não ser o mais adequado. Comparando ainda os resultados obtidos com os do estudo realizado pela PROAS Betunes CEPSA, em Espanha, para uma mistura betuminosa AC 16 Surf (betume 50/70 e uma percentagem de 5,2 %) aplicada na Estrada GI 4141 (Asteasu, Guipúzcoa), confirma-se que os valores da porosidade são elevados.

Apresenta-se no Quadro 4.21 a síntese dos resultados analisados e comparados com o estudo desenvolvido por Carvalho e Barreno na Espanha.

Quadro 4.21 - Síntese resultados da PROAS Betunes CEPSA

Mistura		MQ	MT	MT30
Betume	UBI 2014	35/50	35/50	35/50
	CEPSA	50/70	50/70	50/70
Teor de betume [%]	UBI 2014	5,4	4,9	4,4
	CEPSA	5,2	5,2	—
Baridade [Kg / m ³]	UBI 2014	2181	2162	2262
	CEPSA	2332	2315	—
V_m [%]	UBI 2014	10,4	12,0	6,0
	CEPSA	1,4	3,4	—

O ensaio à deformação permanente foi realizado de acordo com a norma 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, pelo procedimento B.

O ensaio foi executado 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 60 °C, sendo que as lajetas foram acondicionadas à mesma temperatura, antes da realização do ensaio, por um período mínimo de 4 h. O 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, tendo sido usados neste trabalho 3 provetes.

Apresenta-se na Figura 4.27 o equipamento usado, com a lajeta antes e depois de ser ensaiada, e as respectivas lajetas da mistura a quente ensaiadas, a título de exemplo, na Figura 4.28.

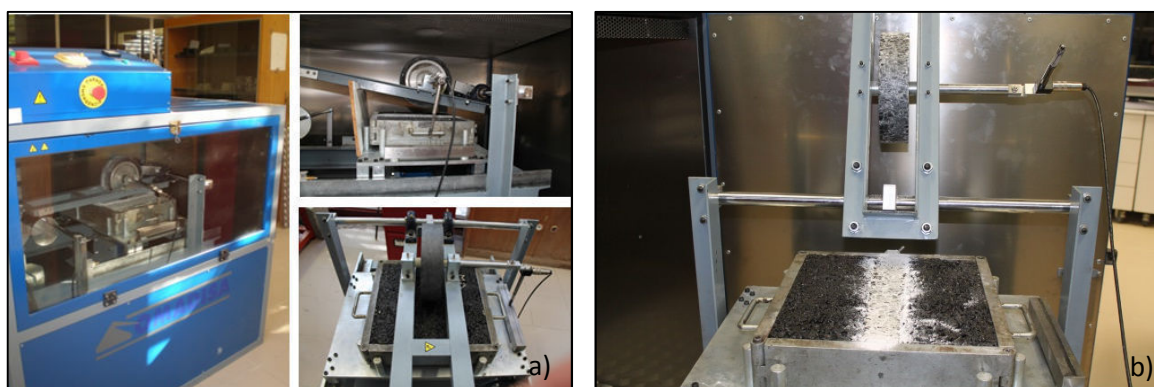


Figura 4.27 - Ensaio “Wheel Tracking”: a) antes do ensaio b) depois do ensaio

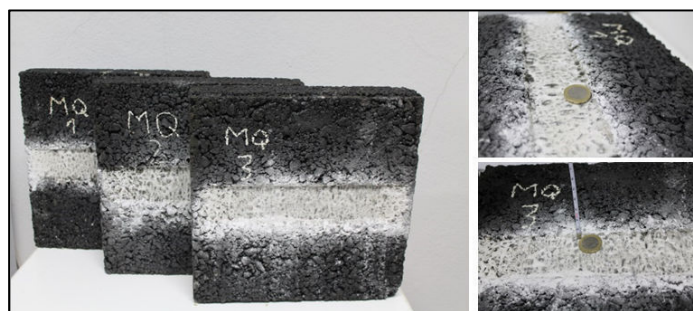


Figura 4.28 - Lajetas ensaiadas à deformação permanente - Mistura a quente (mistura de referência)

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à deformação permanente são o declive máximo de rodeira - *Wheel Tracking Slope* (WTS) e a média de profundidade da rodeira nos três provetes ensaiados - *Mean Rut Depth* (RD). Na Figura 4.28 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente em pista, segundo o procedimento B, para as três misturas em análise.

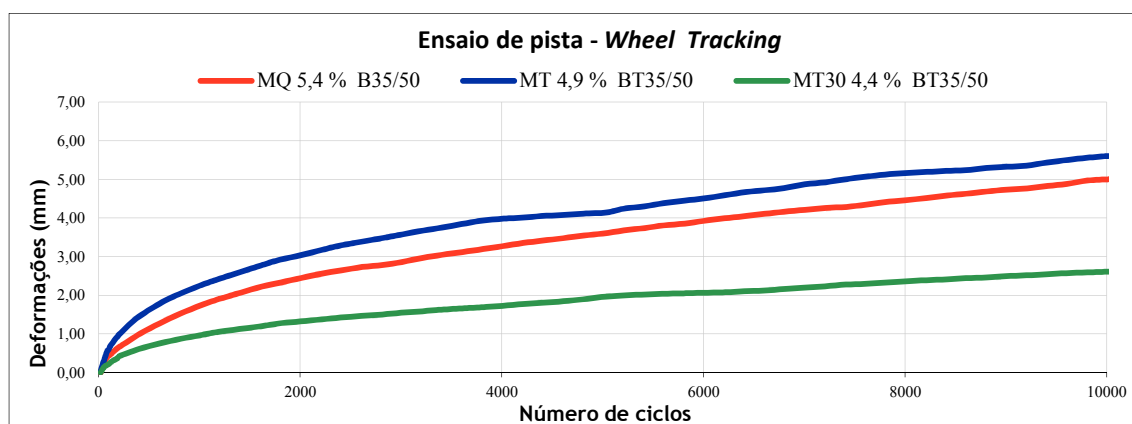


Figura 4.29 - Deformação máxima obtida pelo ensaio de simulação de pista (*Wheel tracking*)

Da análise às curvas obtidas, Figura 4.29, verifica-se que a mistura a quente (referência) e a mistura temperada apresentam um comportamento muito idêntico, apesar da mistura temperada apresentar maior valor de deformação permanente. Na mistura com material fresado o seu comportamento é mais favorável apresentando uma menor profundidade de rodeira.

O valor da variação da deformação permanente é obtido através da equação (4.16).

$$WTS_{\text{air}} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (4.16)$$

Onde,

WTS_{air} - Declive máximo da rodeira [mm/10³ ciclos];

d_{10000} - profundidade da rodeira após 10000 ciclos [mm];

d_{5000} - profundidade da rodeira após 5000 ciclos [mm].

O Quadro 4.22 apresenta os resultados obtidos para o declive máximo da rodeira (WTS_{air}) e a profundidade média de rodeira (RD).

Quadro 4.22 - Resultados do ensaio à deformação permanente

Mistura	RD [mm]	WTS_{air} [mm/10 ³ ciclos]
MQ	5,0	0,28
MT	5,61	0,31
MT30	2,61	0,19

Em Portugal não estão preconizados valores limite para o ensaio de pista em laboratório, no entanto foi considerado como meio de comparação os valores limite considerados em Espanha para o declive máximo da rodeira apresentados no Quadro 3.4 deste trabalho.

Da análise realizada, verifica-se que nenhuma das misturas cumpre o valor limite estabelecido. Isto deve-se ao facto da porosidade obtida nas lajetas utilizadas neste ensaio ser demasiado elevada, levando a valores igualmente elevados de deformação permanente.

Conclui-se desta forma, que o método de compactação utilizado não é o mais adequado prejudicando os resultados finais no que diz respeito à análise da resistência à deformação permanente. No entanto, analisando as 3 misturas conclui-se ainda que a mistura MT30 apresenta valores mais aceitáveis do que as restantes misturas, sendo isto um indicativo de que as misturas com adição de material fresado são uma solução viável.

Embora não seja referido no CE EP, é habitual avaliar-se a velocidade de deformação utilizando-se o preconizado na norma Espanhola NLT-173/00. Determinaram-se os valores da velocidade de deformação média, $V_{105/120}$, de forma a compararem-se com o estudo realizado pela *PROAS Betunes CEPSA* em Espanha (Carvalho e Barreno). Nesse estudo é usado o betume 50/70 e uma percentagem de betume de 5,2 %.

O cálculo da velocidade de deformação média é calculado pela fórmula (4.17).

$$V_{105/120} = \frac{d_{105} - d_{120}}{105 - 120} \quad (4.17)$$

Onde,

$V_{105/120}$ - Velocidade de deformação [10^{-3} mm/min];

d_{105} - Deformação ao minuto 105 [mm];

d_{120} - Deformação ao minuto 120 [mm].

No Quadro 4.23 apresenta-se as velocidades médias (3 lajetas) de deformação obtidas e os valores do estudo da *PROAS Betunes CEPSA*.

Quadro 4.23 - Velocidade de deformação ($V_{105/120}$ [10^{-3} mm/min])

Mistura	UBI 2014	CEPSA (Carvalho e Barreno 2013)
MQ	9,89	1,3
MT	12,00	2,4
MT30	4,67	—

Comparativamente ao estudo da *PROAS Betunes CEPSA* os resultados obtidos são elevados. No entanto, segundo as especificações D.G. carreteras OC 299/1989 em vigor com a norma NLT 173/89 e o PG3 Art. 542 (para misturas betuminosas a quente, nas condições mais desfavoráveis, zona térmica estival quente, $TMDp \geq 2000$), que estabelecem como limite máximo de $V_{105/120}$ o valor de 15 $\mu\text{m}/\text{min}$, todas as misturas apresentam um comportamento satisfatório à deformação permanente.

CAPÍTULO 5 - Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

A avaliação das diversas características das misturas através de ensaios de desempenho assume-se fundamental. A caracterização das misturas à deformação permanente merece uma análise aprofundada pois o aumento do tráfego de pesados, o aumento das cargas por eixo e a utilização de rodados simples com pneus de pressão de enchimento elevada são fatores que contribuem para a deformação permanente em misturas betuminosas. O progresso tecnológico disponibiliza também um número cada vez maior de soluções para a realização de misturas betuminosas com uso crescente em Portugal. Assim, a caracterização do comportamento destas misturas torna-se essencial, nomeadamente, a caracterização à deformação permanente.

Este trabalho teve como objetivo principal a comparação da resistência à deformação permanente de uma mistura betuminosa tradicional a quente com misturas betuminosas temperadas produzidas com agregados naturais e com incorporação de 30 % de material fresado.

Na formulação das misturas betuminosas foi estudado o material fresado, nomeadamente a caracterização do ligante envelhecido e análise granulométrica. Caracterizaram-se ainda os agregados (brita 5/15, brita 3/6, pó de pedra e cal hidráulica) e os ligantes (betume 35/50 e betume temperado 35/50) constituintes das misturas betuminosas. Procedeu-se á escolha da percentagem de betume ideal pelos resultados da baridade e pelo método Marshall (estabilidade e deformação), incluindo o cálculo da porosidade (V_m), dos vazios na mistura de agregados (VMA) e do volume de vazios preenchidos com betume (VFB). Adotou-se para a mistura betuminosa a quente (mistura de referência) 5.4 % de betume, para a mistura betuminosa temperada 4.9 % de betume e ainda para a mistura betuminosa com incorporação de 30 % de material fresado 4.4 % de betume. Do estudo Marshall, verificou-se que as percentagens ótimas de betume adotadas nas 3 misturas cumprem os limites definidos no caderno de encargos, CE EP, e nas especificações técnicas Espanholas, PG3.

Definida a composição e escolhida a percentagem ótima de betume das misturas betuminosas a serem estudadas procedeu-se aos ensaios de caracterização, o módulo de rigidez por tração

indireta (ITSM), a sensibilidade à água e a caracterização mecânica através do ensaio de pista, resistência à deformação permanente (*Wheel tracking*). Todos os ensaios foram executados de acordo com o preconizado nas diversas partes aplicáveis da norma EN 12697.

Para o ensaio de módulo de rigidez por tração indireta a mistura betuminosa a quente apresenta o valor mais elevado, sendo muito semelhante a mistura betuminosa com incorporação de 30 % material fresado, e a mistura betuminosa temperada apresenta o valor mais baixo.

No que diz respeito à análise da sensibilidade à água, foi calculada a resistência à tração em compressão diametral (ITS) e, conseqüentemente, a resistência conservada em tração indireta (ITSR). Para a resistência conservada em tração indireta, em Portugal, não estão estabelecidos valores limite, no entanto de acordo com as especificações espanholas (PG3) é estabelecido um limite mínimo de 80 %, sendo este limite cumprido por todas as misturas estudadas. A mistura betuminosa a quente (mistura de referência) e a mistura betuminosa temperada apresentam o mesmo valor e a mistura betuminosa com incorporação de 30 % de material fresado apresenta o valor mais elevado, concluindo-se que tem menor sensibilidade à água, não a danificando. Foi ainda analisada o tipo de rotura de cada provete, obtendo-se rotura de 2 tipos, a mais frequente a “fratura de tração clara” em que o provete quebra suavemente durante o curso do ensaio numa direção diametral e a rotura por “deformação”, em que a linha de fratura no provete não é clara.

Na caracterização das lajetas, de forma análoga aos provetes Marshall, foi analisada a baridade, a porosidade, o volume de vazios na mistura de agregados e os vazios nos agregados preenchidos com betume. Dos resultados obtidos concluiu-se que a porosidade das lajetas apresenta valores superiores aos obtidos no ensaio de formulação pelo método Marshall, obtendo-se apenas valores aceitáveis para a mistura MT30. Da mesma forma se conclui que os resultados obtidos são elevados, comparando com os resultados do estudo realizado pela PROAS Betunes CEPSA, em Espanha, para uma mistura betuminosa AC 16 Surf (betume 50/70 e uma percentagem de 5,2 %). Conclui-se que os elevados valores obtidos de porosidade das lajetas foram influenciados pelo processo de compactação que se verifica não ser o mais adequado prejudicando os resultados finais, no que diz respeito à análise da resistência à deformação permanente. A compactação é um fator com bastante influência na baridade das misturas e, conseqüentemente, na porosidade. Teoricamente, quanto menor a baridade, maior será a porosidade, tendo isto um efeito redutor da rigidez e um aumento da sensibilidade à água. Similarmente, quanto menor a baridade, maior a suscetibilidade à deformação permanente.

É importante referir que a temperatura de compactação também influencia a baridade das lajetas, ou seja, a uma temperatura de compactação baixa corresponde um maior número de

espaços vazios. Este facto, leva-nos a concluir que a temperatura de compactação no decorrer da produção das lajetas condicionou os resultados finais, influenciando o comportamento da mistura.

A caracterização da resistência à deformação permanente, no presente estudo, realizou-se através de ensaios de simulação em pista de laboratório a 60 °C. A mistura betuminosa temperada apresenta o valor mais elevado na resistência à deformação permanente aproximando-se dos valores de deformação da mistura de referência (MQ), sendo a mistura betuminosa com incorporação de material fresado a que apresenta melhor resistência à deformação permanente. Este resultado era esperado uma vez que o material fresado apresenta um betume envelhecido com uma baixa penetração, resultando numa mistura mais resistente a deformações permanentes.

Para o ensaio de pista em laboratório, em Portugal não estão preconizados valores limite, no entanto, foi considerado como meio de comparação os valores limite considerados em Espanha para o declive máximo da rodeira. Verifica-se que nenhuma das misturas cumpre o valor limite estabelecido. Isto deve-se ao facto já referido anteriormente, da porosidade das lajetas ser demasiado elevada, levando a valores igualmente elevados de deformação permanente.

No CE EP não é estabelecido a avaliação da velocidade de deformação, pelo que teve-se como referência o preconizado na norma Espanhola NLT-173/00 e determinaram-se os valores da velocidade de deformação média, $V_{105/120}$. Comparativamente ao estudo da *PROAS Betunes CEPSA* (Carvalho e Barreno) os resultados obtidos são elevados. No entanto, todas as misturas apresentam um comportamento satisfatório à deformação permanente cumprindo os valores limite recomendados nas especificações D.G. carreteras OC 299/1989 em vigor com a norma NLT 173/89 e o PG3 Art. 542.

As misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado apresentam-se assim, como uma alternativa viável às tradicionais misturas betuminosas a quente. O benefício na incorporação do material fresado dos pavimentos degradados nas misturas betuminosas é evidente. A diminuição da viscosidade do betume no processo de produção permite incorporar uma percentagem mais elevada de RAP levando a uma significativa poupança de energia e economia de espaço nos aterros, para além da redução de agregados naturais utilizados. Entende-se então, ser essencial o incentivo a este tipo de técnica, nomeadamente, através do estabelecimento de especificações adequadas à sua aplicação e controlo de qualidade, como a definição de valores limite que as misturas devem respeitar, considerando as condições da sua utilização, como sejam a temperatura e o tráfego.

Analisando os resultados verifica-se que as misturas temperadas apresentaram, no geral, bom desempenho. Os objetivos definidos neste estudo, foram cumpridos concluindo-se que os resultados obtidos demonstraram que o desempenho das misturas betuminosas temperadas e misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado são semelhantes aos das misturas convencionais a quente. No entanto, para todas as vantagens reportadas ao longo deste trabalho, é necessário reforçar o facto das tecnologias para produção de misturas betuminosas temperadas estarem ainda em fase de estudo e aprovação. Como tal, é necessária uma validação mais sólida, nomeadamente, sobre o comportamento destas a longo prazo para ter certezas quanto à durabilidade destas misturas, pois careçam de um cuidado acrescido na sua temperatura de produção e compactação.

Desta forma, face à necessidade de prolongar a vida útil do pavimento e obtenção de características de qualidade superior, quer em conforto quer em segurança, o estudo realizado permitiu concluir que a mistura betuminosa temperada dispõe de uma metodologia de fácil aplicação em obra, que em termos de formulação permite ir ao encontro das necessidades para fazer face às condições de exploração cada vez mais severas nos pavimentos rodoviários. Esta técnica permite a reciclagem de pavimentos e utiliza meios de aplicação de obras convencionais, obtendo-se resultados similares aos de uma mistura a quente.

5.2 Apreciação global e desenvolvimentos futuros

Dos resultados obtidos para a resistência às deformações permanentes, sugere-se como trabalho futuro a necessidade da realização de mais estudos com ensaios de pista em laboratório, assim como a utilização de outras composições para as misturas betuminosas temperadas de forma a obter resultados ainda mais favoráveis. A continuação de estudos de investigação na área das misturas betuminosas temperadas e misturas betuminosas temperadas com incorporação de outras percentagens de material fresado, nomeadamente, elevadas taxas de reciclagem, torna-se indispensável para análise destas misturas, assim como dos fatores que podem influenciar o seu desempenho. São necessários mais estudos relativos ao desempenho das misturas betuminosas recicladas temperadas, bem como a realização de trechos experimentais com a respetiva monitorização e acompanhamento de obras com este tipo de misturas.

Para além da continuidade de ensaios para estudo desta técnica, como trabalho futuro, é vantajosa a análise e quantificação dos benefícios da sua aplicação, quer a nível económico, social e ambiental, servindo de incentivo aos Donos de Obra. Do mesmo modo, revela-se imprescindível o desenvolvimento de legislação para esta técnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, L.; Oliveira, J.; Silva, H., (2013). “*Formulação e caracterização de ligantes numa mistura betuminosa com uma taxa de reciclagem elevada*”. VII Congresso Rodoviário Português, Estoril, Portugal, 10 a 12 abril.

Alconada, I.B. (2011). “*Contribuição para o estudo do comportamento mecânico de misturas mornas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, setembro.

Almeida, A.J.; Momm, L.; Shinohara, K.J. ; Pérez, Y. (2013). “*Análise do ensaio laboratorial de deformação permanente de misturas de concreto asfáltico modificadas*”. XVII Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, Universidade Federal de Santa Catarina (UFCS) , Brasil, 17 a 22 novembro.

Antunes, M.L., (2006). “*Efeito da composição de misturas betuminosas para camadas de regularização na sua resistência à deformação permanente*”. IV Congresso Rodoviário Português “Estrada 2006”, Estoril, Portugal, 5-7 abril.

Antunes, M.; Batista, F.; Castro Gomes, J.; Dinis de Almeida, Marisa, (2009). “*Reciclagem semi-quente de misturas betuminosas - Formulação e caracterização de desempenho*”. 2as Jornadas CEPSA Betumes/CRP “Poupança: Energia e recursos naturais”. LNEC, Lisboa, Portugal, 7 e 8 julho.

APAO (2006). “*Asphalt Contributes to Sustainable Solutions*”. Centerline, Asphalt Pavement Association of Oregon, Volume X, Issue 1, Spring, 1-2 pp.

APAO (2009). “*Warm mix asphalt is wave of the future*”. Centerline, Asphalt Pavement Association of Oregon, Volume XIII, Issue 1, Winter, 1-2 pp.

APAO (2012). “*RAP is key to reducing the cost of pavement construction*”. Centerline, Asphalt Pavement Association of Oregon, Volume XVI, Issue 1, Summer 1-4 pp.

Azevedo, M.C.M.; Pais, J.C. ; Pereira, P.A.A. (1999). “*Proposta para uma metodologia para caracterização de misturas betuminosas em laboratório*”. 10º Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, p. 2181-2191, Sevilha, 1 a 6 novembro.

Al-Rawashdeh A. (2008). “*Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements*”. MSc Thesis, Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, November.

Araújo, J.; Oliveira, J.; Silva, H.; Sampaio, J.; Palha, C., (2013). “*Avaliação da influência da camada de desgaste na sustentabilidade dos pavimentos rodoviários*”. VII Congresso Rodoviário Português, Estoril, Portugal, 10 a 12 abril.

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.

Baptista, A.; Picado Santos, L, (2009). “*Misturas Betuminosas a quente com alta incorporação de material fresado*”. 2^{as} Jornadas CEPSA Betumes/CRP “*Poupança: Energia e recursos naturais*”. LNEC, Lisboa, Portugal, 7 e 8 julho.

Barrão, L. (2011). “*Avaliação do comportamento de misturas betuminosas sob temperatura elevadas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade de Lisboa, Lisboa, setembro.

Bispo, F. (2013). “*Avaliação do desempenho de misturas betuminosas recicladas temperadas com emulsão betuminosas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, junho.

Budney, J., (2012). “*Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas*”. Dissertação Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, fevereiro.

Button, J.; Estakhri, C.; Wimssat A.(2007). “*A synthesis of warm-mix asphalt*”. Report FHWA/TX-07/0-5597-1, Texas Transportation Institute, Texas.

Capitão, S.; Pais, J.C., Picado-Santos, L.g.; 2003: “*Design and evaluation of the bearing capacity of high modulus asphalt concrete by means of a performance-based approach*”. 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, p. 485 - 493, Guimarães, Portugal, 7 a 10 julho.

Capitão, S.; Picado-Santos, L.; Pais, J., 2004. “*Deformabilidade, comportamento à fadiga e resistência à deformação permanente de misturas betuminosas de alto módulo para camadas de base*”. III Congresso Rodoviário Português, “*Gestão do Sistema Rodoviário*”, Lisboa, 24 a 26 de novembro.

Capitão, S. D.; Picado-Santos, L. G.; Martinho, F. (2012). “*Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt*”. Construction and Building Materials, Vol. 36, pp. 1016-1024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038> [consulta 02 outubro 2013]

Carvalho, T. e Barreno, I. P. (2013). “*Ligantes betuminosos temperados*”. 7º Congresso rodoviário - Novos desafios para a atividade Rodoviária, Lisboa, Portugal, Abril. http://www.crp.pt/docs/A45S121-50_Art_T5_7CRP_2013.pdf [consulta 17 setembro 2013]

CEPSA Betumes, 2010. “*Manual de pavimentação*”. 2ª Edição, Setembro, Lisboa, Portugal.

Corrigan, M. (2008). “*Warm Mix Asphalt Technologies and Research*”. FHWA.

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.

Dinis-Almeida, M. (2003). “*Pavimentos Rodoviários de Baixo Custo com Emulsões Betuminosas e Resíduos das Minas da Panasqueira*”. Tese de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, dezembro.

Dinis-Almeida M. (2010). “*Caracterização e formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas em central*”. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, dezembro.

Dinis-Almeida, M.; Castro Gomes, J.P.; Antunes, M.L. (2009). “*Reciclagem a Semi-quente em Central - Caso Prático*”, Engenharia 2009 - Inovação e Desenvolvimento. Universidade da Beira Interior, Covilhã, 25-27 novembro.

Dinis de Almeida, Marisa; Castro Gomes, J.P.; Antunes, M.L., (2009). “*Contributo para a formulação de misturas recicladas a semi-quente em central*”, XV CILA - Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, Lisboa, Portugal, 22 a 27 de novembro, pp549- 558, ISBN 978-972-8692-43-6.

Dinis de Almeida, Marisa; Castro Gomes, J.P.; Antunes, M.L. (2012). “*Mix design considerations for warm mix recycled asphalt with bitumen emulsion*”. *Construction and Building Materials* 2012; 28:687-693

Dinis de Almeida, Marisa; Castro Gomes, J.P.; Antunes, M.L. (2012). “*Mechanical Performance and Economic Evaluation of Warm Mix Recycling*”. SIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures.

Dinis de Almeida, M.; Castro Gomes, J.P.; Antunes, M.L. (2009). “*Caracterização do Módulo de Rigidez de Misturas Recicladas a Semi-quente em Central*”. Engenharia’09 - Inovação e Desenvolvimento, UBI, Covilhã, 25 a 27 de novembro.

EAPA (2008). “*Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling*”. Position Paper, European Asphalt Pavement Association, 21 May.

EAPA (2010). “*The use of warm mix asphalt*”. Position Paper, European Asphalt Pavement Association, January.

EAPA - European Asphalt Pavement Association, (2011). “*The Asphalt Paving Industry A Global Perspective. Production, Use, Properties, and Occupational Exposure Reduction Technologies and Trends*” - Second Edition, February.

Estradas de Portugal, 2012. “*Caderno de Encargos Tipo Obra*”, Capítulos 14.03 e 15.03 (Pavimentação). Estradas de Portugal, S.A., janeiro.

Ferreira C. (2009). “*Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*”. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, dezembro.

FHWA (2007). “*A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*”. Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, Report 0-5597-1, FHWA, July.

FHWA, 2008. “*Warm-Mix asphalt: European Practice*”. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Publication N° FHWA-PL-08-007, February.

FHWA, 2009. “*Laboratory testing and economic analysis of High RAP Warm mixed asphalt*”. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Publication N° FHWA/MS-DOT-RD-09-200, March.

Freire, A.C., 2002. “*Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*”. Tese de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Ciências e Tecnologia de Coimbra, Portugal, janeiro.

Freire, A.C.; Antunes, M.L.; Picado-Santos, L., 2003. “*Permanent deformation of bituminous mixtures comparative investigation, of several laboratory tests*”. Mairepav 3th International Symposium: Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Pereira & Branco eds., ISBN 972-8692-03- Guimarães, pp. 455- 464, 7 - 10 July.

Gardete, D.; Santos, Picado-Santos, L.; Pais, J. C., 2004. “*Ensaio para deformação permanente em misturas betuminosas: comparação entre os resultados de Wheel tracking e fluência dinâmica*”. III Congresso Rodoviário Português. Lisboa, Portugal, 24 a 26 novembro.

Gardete, D.; Santos, Picado-Santos, L.; Pais, J. C., 2005. “*Permanent deformation characterization of bituminous mixtures: laboratorial tests*”. 4th International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Belfast, Irlanda do Norte, 18 e 19 agosto.

Gardete, D. C., 2006. “*Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra, fevereiro.

Gardete, D.; Santos, Picado-Santos, L., 2006. “*Caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente em laboratório*”. IV Congresso Rodoviário Português, Estoril, Portugal, 5 a 7 abril.

Gardete, D.; Picado-Santos, L.; Pais, J. A.; Luzia, R., (2008). “*Ensaios laboratoriais para caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente*”. 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia Maputo, 2-4 setembro.

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.

Lima, A.T., (2003). “*Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente*”. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, setembro.

Martinho, F.; Picado-Santos, L.; Capitão, S.; Neves, J., (2013). “*Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas contendo MBR*”. VII Congresso Rodoviário Português, Estoril, Portugal, 10 a 12 abril.

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.

Mendes, S. F. (2011). “*Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infraestruturas de transportes*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Motta, R. S. (2011). “*Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético*”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, São Paulo, Brasil.

Neves, J.; Picado-Santos, L.; Alves, M. C.; Martinho, F.; Barbosa, F (2013). “*Estudo experimental sobre o desempenho de misturas betuminosas temperadas*”. 7º Congresso rodoviário - Novos desafios para a atividade Rodoviária - Art T5, Lisboa, Portugal.

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

Otto, G. G. (2009). “*Misturas Asfálticas Mornas: Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Pais, A.R. (2013). “*Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas Validação de uma nova metodologia de formulação*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, junho.

Pais, J. C.; Pereira, P.A.A., Azevedo, M.C.M (2000). “*Ensaio mecânico para caracterização de misturas betuminosas*”. 1º Congresso Rodoviário Português, p. 639-649, Lisboa, Portugal 28 a 30 novembro.

Pereira, R. X. L., (2010). “*Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interação Aditivo-Ligante*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Aveiro, Portugal.

PROAS Betunes Cepsa 2011. “*Vademécum de Pavimentación*”. 10ª Edição, Outubro, Barcelona, Espanha.

Prowell, B. D.; Hurley, G. C. b (2008). “*Warm Mix Asphalt: Best Practices*”. 53o Encontro anual da NAPA- National Asphalt Pavement Association.

Shen, Der- Hsien; Du, J.P.; Jia-chong. (2004). “*Evaluation of building material recycling on HMA permanente deformation*”. Construction and Building Materials, março.

Silva, H.; Oliveira, J.; Jesus, C., (2011). “*Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?*”. Resources, Conservation and Recycling 60 p. 38 - 48.

Zaumanis M. (2010). “*Warm mix asphalt investigation, Master of Science Thesis*”. PhD Thesis, Riga Technical University, Lyngby, Denmark in cooperation with the Danish Road Institute, Department of Civil Engineering.

ACERVO NORMATIVO

933-1: 2000 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution, sieving method

EN 12697-1: 2000 (*Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content*)

EN 1097-6: 2000 Tests of mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption.

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 12697-8: 2006 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics 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 12697-26: 2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness.

EN 12697-30: 2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor.

EN 12697-34: 2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test.

EN 12697-35: 2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing.

EN 12697-35: 2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition.

NLT-173/00 Resistencia a la deformacion plástica de las mezclas betuminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio.